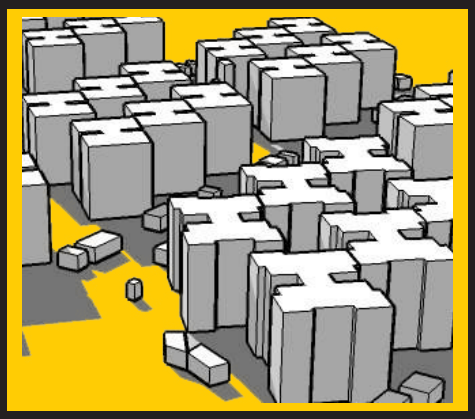
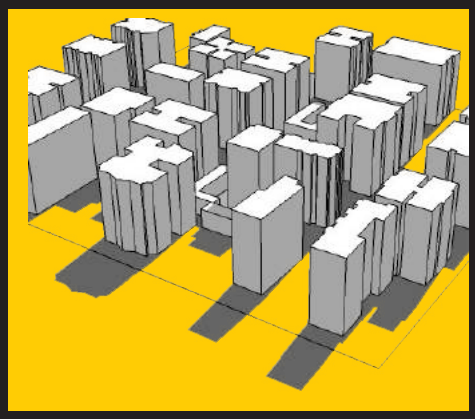
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-graduação em Arquitetura

DE CONDICIONANTES SOLARES À OPORTUNIDADES DE DESENHO URBANO:

OTIMIZAÇÃO DE TIPO-MORFOLOGIAS URBANAS EM CONTEXTO DE CLIMA TROPICAL


Tese de Doutorado de

Tathiane Agra de Lemos Martins

2014

Universidade Federal do Rio de Janeiro

DE CONDICIONANTES SOLARES À OPORTUNIDADES DE DESENHO URBANO:
OTIMIZAÇÃO DE TIPO-MORFOLOGIAS URBANAS EM CONTEXTO DE CLIMA TROPICAL

Tathiane Agra de Lemos Martins

2014

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura

DE CONDICIONANTES SOLARES À OPORTUNIDADES DE DESENHO URBANO:
OTIMIZAÇÃO DE TIPO-MORFOLOGIAS URBANAS EM CONTEXTO DE CLIMA TROPICAL

Tathiane Agra de Lemos Martins

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências da Arquitetura, área de concentração em Sustentabilidade, Conforto Ambiental e Eficiência Energética.

Orientadores: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos
Luc Adolphe

Rio de Janeiro,
Março de 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

Martins, Tathiane Agra de Lemos.

De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano: otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical / Tathiane Agra de Lemos Martins. **-** Rio de Janeiro: UFRJ/ FAU, 2010.

xi, 393f.**:** il.; 31 cm.

Orientador: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos

Tese (Doutorado) – UFRJ/ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo / Programa de Pós-graduação em Arquitetura, 2014.

Referências Bibliográficas: f. 359-372.

1. Morfologia urbana. 2. Energia nas cidades. 3. Potencial solar. 4. Otimização. 5. Algoritmos genéticos. 6. Clima tropical. I. Bastos, Leopoldo Eurico Gonçalves. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura. III. Título.

DE CONDICIONANTES SOLARES À OPORTUNIDADES DE DESENHO URBANO:
OTIMIZAÇÃO DE TIPO-MORFOLOGIAS URBANAS EM CONTEXTO DE CLIMA TROPICAL

Tathiane Agra de Lemos Martins

Orientadores: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos
Luc Adolphe

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências em Arquitetura, área de concentração em Sustentabilidade, Conforto Ambiental e Eficiência Energética.

Aprovada por:

Presidente, Prof. Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos, D.Sc.

Prof. Luc Adolphe, D.Sc.

Profª. Andrea Queiroz Rego, D.Sc.

Profª. Gianna Mello Barbirato D.Sc.

Prof. Frédéric Bonneaud, D.Sc.

Prof. Pierre Fernandez D.Sc.

Rio de Janeiro
Março de 2014.

AGRADECIMENTOS

Por muitas vezes pensei que esse momento nunca chegaria. E, de fato, não teria sido capaz de alcançar a última linha dessa tese se não fosse a força, o amor, o carinho, a amizade e a confiança de pessoas tão especiais a minha volta.

À Deus, sempre e por tudo.

À minha guerreira e amada mãe pelo incondicional estímulo à educação e à qualificação profissional.

À minha querida irmã e "co-orientadora" dessa tese, que além da escuta, da amizade, dedicou seu tempo me auxiliando com problemas operacionais na modelagem computacional.

Ao Luc que conheci como orientador e redescobrir como amigo e companheiro ao longo dessa caminhada; obrigada pelo seu carinho, paciência, apóio e estímulo em todos os momentos.

Ao querido professor Leopoldo, pela amizade e apoio, pela sua atenciosa dedicação, pelos conhecimentos generosamente transmitidos na orientação desse trabalho e pelas correções minuciosas do manuscrito.

Aos amigos do laboratório LRA em Toulouse pela acolhida, pelos conhecimentos compartilhados e pela amizade durante os dois primeiros anos de doutorado.

Às amigas Marion e Catherine por terem dividido comigo as dúvidas, as incertezas e as esperanças do início do curso, mas também os vários momentos de alegria e descontração...

À minha grande amiga Núbia que de perto e de longe sempre esteve presente com seu carinho, sua escuta atenciosa e amizade.

À CAPES pela concessão da bolsa que possibilitou o estágio em Toulouse. Ao CNPq pela bolsa concedida que viabilizou os dois últimos anos de tese.

Ao PROARQ/UFRJ pela formação recebida e apoio à produção acadêmica, em especial à Maria da Guia, pela amizade e ajuda em vários momentos ao longo do curso de Doutorado.

Aos membros do programa CAPES-COFECUB pela oportunidade oferecida de enfrentar o grande desafio de fazer os dois primeiros anos de pesquisa de doutorado na França.

À equipe da ESSS, pela concessão da licença do programa modeFRONTIER®, em particular aos Engenheiros Rodrigo Ferraz e Guilherme Jenovencio, pela atenção e eficiente suporte técnico.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, meu sincero agradecimento.

RESUMO

De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano:
otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical

Tathiane Agra de Lemos Martins

Orientadores: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos e Luc Adolphe

Resumo da Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências da Arquitetura**.**

Cerca de 3/4 dos recursos globais são consumidos hoje em assentamentos urbanos. O processo de urbanização produz modificações severas no clima local, na qualidade ambiental dos espaços, além de um aumento importante na demanda de energia das edificações. Previsões estatísticas sobre o crescimento da população urbana apontam que esta situação tende a ser agravada nos próximos anos, tornando-se, portanto, imperativo buscar estratégias e medidas alternativas que visem melhor adaptar os ambientes urbanos às novas demandas energéticas, a fim de reduzir o impacto ambiental das cidades. O presente trabalho traz uma contribuição ao debate sobre a energia nas cidades, com foco naquela que é consumida e potencialmente produzida pelos edifícios na escala urbana local. A morfologia urbana é considerada como aspecto crucial de transformação das cidades no sentido da eficiência energética de suas construções. Em regiões de clima tropical, a energia de fonte solar possui um potencial de aproveitamento extremamente elevado. No entanto, o bom aproveitamento desse recurso para produção de eletricidade nos edifícios pode sugerir a adoção de formas urbanas muito pouco adensadas e dispersas, de modo a reduzir as obstruções produzidas pelo entorno próximo. Paradoxalmente, formas urbanas dispersas e pouco densas podem resultar em aumento importante da carga térmica solar em suas fachadas. O controle dos ganhos solares nas fachadas pode, por sua vez, representar perdas importantes no nível de iluminação natural dos espaços, além de reduzir o potencial de aproveitamento solar para produção de energia. A fim de quantificar o potencial destas estratégias conflituosas de projeto urbano, torna-se indispensável a aplicação de modelos multidisciplinares de análise, permitindo integrar os múltiplos critérios do processo de concepção da forma construída. A presente pesquisa é uma contribuição para requalificação e concepção urbana a partir de uma abordagem energética, com foco na forma construída de vizinhanças urbanas na cidade de Maceió(AL), em clima tropical. Primeiramente, um conjunto de parâmetros morfológicos relevantes são empregados para classificar e caracterizar o potencial solar de tipologias de referência existentes na cidade. Num segundo momento, esses parâmetros são analisados por meio de uma análise de sensibilidade. Os parâmetros estatisticamente influentes são, então, submetidos a uma metodologia paramétrica de projetos via otimização multiobjetivo, onde o algoritmo genético NSGA-II (*non-dominated sorting genetic algorithm*) é acoplado a um algoritmo simplificado de radiosidade, visando a maximização do potencial de produção de energia nas superfícies de coberta das edificações e minimização dos ganhos solares nas fachadas das mesmas. Níveis mínimos de luz natural para os ambientes e os parâmetros morfológicos do código de edificações são considerados como restrições de projeto. Cinco tipologias representativas do tecido urbano de Maceió foram avaliadas. Um conjunto de indicadores mais influentes no potencial solar das formas urbanas foram hierarquizados, destacando-se o papel preponderante do prospecto médio e do albedo das construções. A aplicação do método de projeto por otimização permitiu testar mais de 80.000 configurações urbanas, apontando para uma grande diversidade de morfologias "ótimas" de quadras urbanas. Esses projetos apresentaram desempenho solar superior aos encontrados nas tipologias existentes na cidade. A abordagem de estratégias energéticas conflituosas de projeto mostrou que muito além da imposição de restrições e complexidades ao processo, há oculta uma grande oportunidade na procura para novas soluções que possibilitem uma revisão da Arquitetura da cidade.

Palavras-chave: morfologia urbana; potencial solar; energia nas cidades; análise de sensibilidade; otimização algoritmos genéticos; clima tropical.

Rio de Janeiro,
Março de 2014.

ABSTRACT
From solar constraints to urban design opportunities:
optimization of urban typologies in a tropical city in Brazil

Tathiane Agra de Lemos Martins

Supervisors: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos e Luc Adolphe

Abstract of the Doctoral degree thesis submitted at the Architecture Postgraduate Program of UFRJ, as a partial fulfillment of requirements for the degree of Doctor of Architecture Science.

At the beginning of 21th century, the world was faced with unprecedented environmental transformations. The urbanization process reached record levels and it keeps increasing, especially in developing countries. Around 3/4 of global resources are currently consumed in urban settlements, with corresponding adverse environmental consequences which leads to severe local climate changes, affecting environmental quality of spaces and leading to a significant increase of energy demand in buildings. A projection of the world urban population indicates that this situation will worsen in the coming years. It is therefore imperative that we understand how to design less resource intensive urban settlements. This research consists of a contribution to the energy debate in cities, focusing on the energy potentially consumed and produced by the built environment in the neighborhood scale. Urban morphology has been pointed out as a pivotal issue on shifting to climate adapted urban environments towards energy efficiency of buildings. In tropical climate regions, solar energy represents a high potential for renewable electric production in buildings, recording high levels of irradiation throughout the year. Though, engaging such a strategy may suggest applying sparsely low-density urban forms, aiming at reducing obstructions caused by the urban built surroundings. On one hand, scattered and less dense urban forms may result in significant increase of solar thermal load in buildings vertical facades, but on the other hand, the control of the solar heat gains in urban facades may represent significant losses on indoors daylight levels and also reducing solar energy harness. Estimating the relative potential of these conflicting design strategies, taking into account the constrained parameters related to local building regulation, requires coupling multidisciplinary and multiobjective models of analysis in order to integrate multi-criteria approach in the urban design process. This thesis aims to contribute to a prospective energy debate toward sustainable urban districts for the city of Maceió in Brazil. Firstly, a set of energy-related morphological parameters are applied to identify, classify and characterize the solar potential of local urban typologies. Then, these parameters are analyzed by means of a sensitivity analysis using a design of experiments reduced factorial method. The statistically most significant parameters are then submitted to a parametric design methodology via optimization, in which the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) are coupled with a simplified radiosity algorithm. The solar constraints are integrated as design criteria aiming at maximizing the solar energy potential on building roofs and minimizing solar gains on the their vertical facades. Daylight threshold levels as well as local building regulation parameters are taken into account as design constraints. Five representative types of urban fabric of Maceió were identified which allowed examining and adapting them from the use of energy-related indicators of the urban form. A set of most influential indicators of solar potential of urban forms was hierarchized, highlighting the role of the aspect ratio and albedo of urban surfaces. The application of optimization algorithm allowed testing more than 80,000 urban settings, pointing out a great diversity of "optimum" morphologies of urban blocks. The urban block designs obtained behaved better compared to the existing local typologies. Dealing with conflicting energy strategies by means of a constrained evolutionary optimization design process offered a great opportunity in searching for new solutions to the urban design in the neighborhood scale, helping to guide urban designers' decisions and allowing a renewal of the Architecture of the city.

Keywords: urban morphology; solar potential; energy in cities; sensitivity analysis; constrained optimization; genetic algorithms; Tropical climate.

Rio de Janeiro,
March 2014.

RESUME

Des contraintes solaires à des opportunités de projet urbain:
optimisation de typo-morphologies urbaines en climat tropical au Brésil

Tathiane Agra de Lemos Martins

Directeurs de thèse: Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos e Luc Adolphe

Résumé de la thèse de Doctorat soumise au Programme de Pos-graduation en Architecture, de l'Université Fédérale de Rio de Janeiro, comme partie intégrante des exigences nécessaires en vue de l'obtention du titre de Doctorat en Sciences de l'Architecture.

Environ trois quarts des ressources globales sont aujourd'hui consommés dans les aires urbaines. Le processus d'urbanisation induit des changements sévères du climat local, de la qualité environnementale des espaces, ainsi qu'une augmentation significative de la demande d'énergie des bâtiments. Les projections statistiques sur la croissance de la population urbaine indiquent que cette situation tendra à s'aggraver dans les années à venir. Il devient donc impératif de chercher d'autres stratégies pour mieux adapter les environnements urbains aux nouvelles demandes énergétiques, afin de réduire l'empreinte environnementale des villes. Dans ce contexte, ce travail est une contribution à la recherche énergétique urbaine, plus particulièrement en ce qui concerne l'énergie consommée et potentiellement produite par les bâtiments à l'échelle urbaine locale. La morphologie urbaine est ici considérée comme un paramètre crucial dans le processus d'amélioration de l'efficacité énergétique du cadre bâti. Dans les zones de basses latitudes, sous climat tropical, l'énergie solaire est extrêmement abondante. Toutefois, la bonne utilisation de cette ressource dans les bâtiments peut suggérer l'adoption de formes urbaines très peu denses et étales, en vue de réduire les obstructions produites par l'environnement proche. A rebours, ces formes urbaines très peu denses peuvent entrainer une augmentation des apports solaires sur les façades, élevant la demande énergétique. Le contrôle des gains solaires sur les façades pour la réduction de la demande énergétique peut ainsi représenter une perte potentielle en terme d'éclairement naturel des espaces, et une réduction du potentiel de production d'énergie solaire. Afin de quantifier le potentiel de ces stratégies conflictuelles, il devient indispensable de convoquer des modèles d'analyse pluridisciplinaires, permettant de mettre en œuvre des approches multicritères dans le processus de conception de la forme urbaine. Cette thèse s'appuie sur une réflexion prospective sur les quartiers de la ville de Maceió, Alagoas, au Brésil. Dans un premier temps, un ensemble de paramètres morphologiques plus pertinents sont employés pour identifier et caractériser le potentiel solaire de typologies de référence de la ville. Ensuite, ces paramètres sont analysés à partir d'une analyse de sensibilité via plan d'expérience. Les paramètres statistiquement significatifs sont alors intégrés à une méthode paramétrique d'optimisation dans laquelle l'algorithme génétique NSGA-II est couplé à un algorithme simplifiée de radiosité, visant à maximiser le potentiel de production d'énergie sur les toitures des bâtiments, tout en minimisant les apports solaires sur ses façades. Nous considérons des seuils d'éclairement naturel et intégrons des règles locales d'urbanisme comme contraintes aux projets. Cinq typologies représentatives du tissu urbain de Maceió ont ainsi été identifiées. L'ensemble des indicateurs les plus influents sur le potentiel solaire des formes urbaines a été hiérarchisé, en mettant l'accent notamment sur le rôle du prospect moyen ou de l'albédo des surfaces. La méthode d'optimisation a permis de tester plus de 80.000 configurations d'ilots urbains et les résultats obtenus font apparaître une grande diversité de morphologies «optimum». Ces projets ont des performances solaires supérieures à celles des typologies existantes dans la ville. Cette intégration de stratégies énergétiques contradictoires montre qu'au-delà de l'intégration de contraintes variées et d'une meilleure adaptation à la complexité du processus de design urbain, l'approche utilisée ici apparaît très utile pour la recherche de solutions urbaines performantes à l'échelle des quartiers. Cette approche peut ainsi participer au renouvellement de l'Architecture de la Ville.

Mots-clés: morphologie urbaine; potentiel solaire; énergétique urbaine; analyse de sensibilité; optimisation; algorithme génétique; climat tropical.

Rio de Janeiro,
Mars 2014.

SUMÁRIO

RESUMO ..... **IX**

ABSTRACT ..... **X**

RESUME ..... **XI**

LISTA DE FIGURAS **16**

LISTA DE TABELAS **23**

INTRODUÇÃO **25**

CAPÍTULO I A ENERGIA SOLAR NO AMBIENTE URBANO **47**

I.1 . A ENERGIA SOLAR NA BASE DOS PROCESSOS E DA FORMAÇÃO DOS CLIMAS 49
I.1.1 . Escalas climáticas *50*
I.1.2 . Escalas temporais *50*
I.1.3 . Escalas espaciais *50*
I.1.4 . Definições da escala e do contexto climático da pesquisa *52*
I.1.5 . Clima nos trópicos *54*
I.1.5.1 . Elementos climáticos nos trópicos úmidos 55
I.1.6 . O perfil climático de Maceió-AL *57*
I.1.6.1 . Temperatura e umidade 57
I.1.6.2 . Irradiação solar e tempo de insolação 57
I.1.6.3 . Nebulosidade e tipo de céu 59
I.1.6.4 . Movimento do ar 61
I.2 . AVALIAÇÃO DA INSOLAÇÃO NA ENVOLTÓRIA DE EDIFÍCIOS URBANOS 62
I.2.1 . Definições da radiação solar *63*
I.2.2 . Definição da radiação direta *63*
I.2.3 . Trocas radiativas na atmosfera *64*
I.2.3.1 . Definições 64
I.2.3.2 . Os modelos de céu e atmosfera 66
I.2.4 . Balanço de radiação nas superfícies *72*
I.2.4.1 . Radiação solar incidente (OC↓) 73
I.2.4.2 . Radiação solar refletida (αOC↓) 74
I.2.4.3 . Radiação térmica atmosférica descendente de onda longa (OL↓) 74
I.2.4.4 . Radiação térmica ascendente (OL↑) 75
I.2.4.5 . Radiação resultante (Q*) 75
I.2.5 . O efeito da forma urbana no balanço de radiação das superfícies construídas *76*
I.2.5.1 . O efeito da Ilha de calor urbano 79
I.2.5.2 . Ilha de calor urbano no trópico úmido 82
I.2.5.3 . Modelos para avaliação das trocas radiativas no meio urbano 83
I.2.6 . Escolha do método de predição da radiação solar em ambientes urbanos *89*
I.2.6.1 . Método gráfico 89
I.2.6.2 . Método físico 93
I.2.6.3 . Método computacional 95
I.2.6.4 Algoritmo Simplificado de Radiosidade (SRA) 97
I.3 . PASSANDO DA PROBLEMÁTICA SOLAR NAS CIDADES À PARAMETRIZAÇÃO DA FORMA URBANA 104
I.3.1 . Trocas convectivas pelo movimento do ar (vento) *105*
I.3.2 . Radiação solar *105*
I.3.3 . Temperatura e umidade do ar *107*
I.3.4 . Síntese *107*

CAPÍTULO II ESTUDO MORFOSOLAR DA CIDADE **109**

II.1 . O ESTUDO DA FORMA E DO TIPO URBANO PARA INTEGRAÇÃO DE ASPECTOS AMBIENTAIS À CONCEPÇÃO DOS ESPAÇOS .. 111
II.2 . MÉTODOS E MÉTRICAS DE ANÁLISE AMBIENTAL E ENERGÉTICA PARA A MORFOLOGIA URBANA 115
II.2.1 . Os indicadores "morfoclimáticos" *117*
II.2.2 . Indicadores "morfosolar" *123*

II.2.3 . Envoltória solar ... *124*
II.2.4 . Densidade, forma e energia nas cidades ... *129*
II.2.4.1 . Cidade de forma dispersa ... 131
II.2.4.2 . Cidades de forma compacta ... 132
II.2.4.3 . Cidade de forma vertical ... 134
II.2.4.4 .Densidade percebida ... 135
II.2.4.5 . Densidade e energia nas cidades ... 137
II.2.5 . Abordagem hierarquizada e escolha dos indicadores da pesquisa ... *138*
II.3 . MODELAGEM URBANA: PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA ANÁLISE TIPO-MORFOLÓGICA ... 143
II.3.1 . Uso do SIG na análise da forma urbana ... *143*
II.3.2 . Construção do modelo de cálculo ... *145*
II.3.3 . Definição de uma resolução espacial ... *147*
II.3.4 . Métodos estatísticos de tratamento de dados urbanos ... *148*
II.4 . APLICAÇÃO DO ESTUDO À MACEIÓ –AL ... 150
II.4.1 . Contexto "morfo-socioeconômico" ... *151*
II.4.2 . Contexto "morfo-normativo" ... *154*
II.4.2.1 . Os principais condicionantes da legislação urbanística ... 155
II.4.2.2 . Os principais parâmetros restritivos do código ... 158
II.4.3 . Análise tipo-morfológica ... *160*
II.4.3.1 . Densidade construída e forma urbana de Maceió ... 161
II.4.3.2 . Cartografia de tipo-morfologias de Maceió ... 164
II.5 . ESTUDO DO DESEMPENHO SOLAR DAS ESTRUTURAS URBANAS DE MACEIÓ ... 178
II.5.1 . Análise morfoclimática ... *178*
II.5.1.1 . Influência da rugosidade na velocidade do vento ... 178
II.5.1.2 . Influência do vento na modificação do fluxo radiativo infravermelho ... 182
II.5.2 . Análise "morfosolar" por classe morfológica de referência ... *184*
II.5.2.1 . Definição das propriedades termo-radiativas das envoltórias ... 185
II.5.2.2 . Análise e síntese dos resultados ... 187
II.5.2.3 . Síntese comparativa dos resultados ... 199

CAPÍTULO III ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS FATORES TIPO-MORFOLÓGICOS ... 207

III.1 . METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS MULTIFATORIAL ... 209
III.1.1 . Planejamento de experimentos por vários fatores ... *212*
III.1.2 . Planejamento de experimentos por métodos fatoriais ... *215*
III.1.2.1 . Projeto simples (ou de um fator por vez) ... 215
III.1.2.2 . Fatorial completo ... 216
III.1.2.3 . Fatorial fracionado ... 217
III.1.3 . Inferência estatística ... *219*
III.1.3.1 . Teste de hipótese ... 219
III.2 . ESTUDO DOS FATORES TIPO-MORFOLÓGICOS INFLUENTES ... 225
III.2.1.1 . Ferramentas empregadas para geração e avaliação paramétrica de projetos no âmbito do estudo ... 225
III.2.1.2 . Modelo simplificado e dados de entrada ... 225
III.2.1.3 . Parâmetros de resposta ... 227
III.2.1.4 . Resolução temporal do estudo ... 227
III.2.1.5 . Resolução espacial e dados de saída ... 227
III.2.1.6 . Resolução espectral ... 228
III.2.2 . Estudo dos fatores tipo-morfológicos influentes no balanço radiativo das envoltórias construídas 228
III.2.2.1 . Impacto das variáveis tipo-morfológicas no balanço radiativo na superfície da Coberta ... 228
III.2.2.2 . Balanço radiativo na superfície da Fachada leste ... 232
III.2.2.3 . Balanço radiativo na superfície da Fachada norte e sul ... 238
III.2.2.4 . Análise comparativa por fator tipo-morfológico ... 243
III.2.2.5 . Efeitos de interação entre os fatores tipo-morfológicos ... 249
III.2.3 . Estudo dos fatores tipo-morfológicos influentes no nível de iluminância nas fachadas ... *257*
III.2.3.1 . Impacto global na resposta de iluminância das fachadas ... 257
III.2.3.2 . Magnitude do impacto dos fatores tipo-morfológicos na resposta de iluminância das fachadas ... 258
III.2.3.3 .Teste de hipótese estatística ... 261
III.2.3.4 . Análise de interação entre os fatores tipo-morfológicos ... 262

CAPÍTULO IV OTIMIZAÇÃO DO POTENCIAL SOLAR DE TIPOLOGIAS URBANAS ... 267

IV.1 . AUXÍLIO À DECISÃO MULTIFATORIAL E MULTIOBJETIVO NA CONCEPÇÃO DOS ESPAÇOS CONSTRUÍDOS 269
IV.1.1 . O problema da concepção da forma *269*
IV.1.2 . A concepção de soluções: metodologia de projeto da forma construída *271*
IV.1.2.1 . Metodologia tradicional de projeto 271
IV.1.2.2 . Metodologia de projeto pela abordagem multicritério 272
IV.1.2.3 . Métodos paramétricos de projeto e uso de algoritmos de otimização de projeto 274
IV.1.2.4 . Síntese comparativa das metodologias 276
IV.2 . METODOLOGIA DE PROJETO POR OTIMIZAÇÃO 280
IV.2.1 . O que é o processo de otimização? *280*
IV.2.2 . Otimização multiobjetivo *280*
IV.2.2.1 . Abordagens da otimização multiobjetivo 283
IV.2.3 . Algoritmos genéticos *285*
IV.2.3.1 . Analogia aos elementos e operações da genética 286
IV.2.3.2 . Parâmetros do algoritmo genético 289
IV.2.4 . O método NSGA *290*
IV.2.5 . O algoritmo NSGA-II *292*
IV.3 . OTIMIZAÇÃO DA FORMA URBANA PARA INTEGRAÇÃO DOS CONDICIONANTES SOLARES EM MACEIÓ 294
IV.3.1 . Descrição do modelo de estudo *294*
IV.3.1.1 . Simplificação e definição dos modelos de referência para estudo prospectivo 294
IV.3.2 . Modelagem do problema de otimização *296*
IV.3.2.1 . Fatores de projeto (variáveis de entrada do modelo) 297
IV.3.2.2 . Restrições de projeto 299
IV.3.2.3 . Definição do método de projeto/otimização 300
IV.3.2.4 . Variáveis de saída e Funções objetivo 301
IV.3.3 Resultados da otimização *303*
IV.3.3.1 . Otimização para a classe tipológica 4: a cidade vertical 303
IV.3.3.2 . Otimização para a classe tipológica 3: cidade compacta 314

CAPÍTULO V ANÁLISE PROSPECTIVA DOS RESULTADOS PARA MACEIÓ 323

V.1 . CONTRIBUIÇÃO À ABORDAGEM INTERTEMÁTICA E INTERDISCIPLINAR PARA ENERGIA URBANA 325
V.1.1 . Integração de outros condicionantes climáticos e energéticos *325*
V.1.2 . Implantação de microrede local de produção e distribuição de energia de fonte solar *329*
V.1.3 . Concepção de quadras mistas ou multifuncionais *331*
V.2 . AUXÍLIO À DECISÃO URBANA 333
V.2.1 . Proposta de inclusão de novos indicadores da forma urbana ao sistema *333*
V.3 . DISPOSITIVOS NO CONTEXTO DA INTERVENÇÃO URBANA 334
V.3.1 . Proposta de um código de microurbanismo *334*
V.3.1.1 . Elaboração de um código de microurbanismo solar 336
V.3.2 . Criação de um banco de dados sistematizado *346*

CONCLUSÕES 350

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 359

GLOSSÁRIO 373

ANEXO A 385

ANEXO B 386

ANEXO C 388

ANEXO D 391

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : esquema ilustrativo das temáticas abordadas na tese. Fonte: ilustração do autor. 27
Figura 2: processo da metropolização no mundo. Fonte: Nordpil (2007). 29
Figura 3: crescimento da população urbana brasileira ao longo dos últimos 70 anos e a projeção para 2050. Fonte: IBGE(2010) e ONU(2010). 29
Figura 4: (a) evolução do consumo de energia elétrica por setor no Brasil, em tonelada equivalente de petróleo e (b) proporção da distribuição. Fonte: BRASIL, 2013. 30
Figura 5 : matriz energética no Brasil. Fonte: BRASIL, 2013. 31
Figura 6: fatores que influenciam o desempenho energético dos edifícios. Fonte: Ratti, Baker e Steemers (2005) 33
Figura 7:.diferentes densidades de ocupação e formas urbanas para um hectare de solo urbano. Fonte: Adolphe (2011).. 34
Figura 8 : distribuição da irradiação global direta nas diferentes regiões do mundo. Fonte:Meteonorm 7.0 (2012). 39
Figura 9 : distribuição da irradiação global direta nos diferentes estados do Brasil. Fonte: CPTEC/INPE/SWERA (2010).. 39
Figura 10: fenômenos radiativos considerados no modelo de análise utilizado no método do trabalho. 44
Figura 11*:* abordagem metodológica da pesquisa. 45
Figura 12 : estrutura do capítulo I. 48
Figura 13: (a) relação tempo e escala horizontal dos fenômenos atmosféricos comuns (esquerda); (b)relação tempo e escala de diversos modelos atmosféricos. Fonte: Moussiopoulos (2003) 51
Figura 14: esquema da interrelação das principais escalas climáticas. Fonte: adaptado de Oke (2006). 52
Figura 15: esquema ilustrativo da escala horizontal e vertical de estudo dos fenômenos radiativos. Fonte: ilustração do autor. 54
Figura 16: classificação climática de Koppen. Fonte: Peel, Finlayson e Mcmahon (2007). 55
Figura 17: regiões no globo de clima tropical úmido com estação seca (Aw/As). Fonte: Peel, Finlayson e Mcmahon (2007). 55
Figura 18: temperatura, umidade relativa do ar e precipitação ao longo do ano para Maceió. Fonte : Ano climático Metonorm (2012) 57
Figura 19: irradiação para o mês de Julho (a) e para o mês de Janeiro (b). Fonte : Atlas solarimétrico de Alagoas ; Eletrobrás (2008) 58
Figura 20: irradiação solar (a) e probabilidade de insolação (b) mensal para Maceió. Fonte : Ano climático Metonorm (2012). 58
Figura 21: nebulosidade (a) e probabilidade do tipo de céu (b) para Maceió. Fonte : Ano climático Metonorm (2012). 60
Figura 22: probabilidade de tipo de céu ao longo das horas do dia e ao longo dos meses do ano para Maceió. Fonte: Cabus (2002). 60
Figura 23: frequência da velocidade do vento por direção ao longo do ano, dada pela estação meteorológica de Maceió-AL. Fonte : Ano climático Metonorm (2012). 61
Figura 24: ilustração esquemática da abordagem adotada nessa seção do capítulo. Fonte: ilustração do autor. 62
Figura 25: espectro eletromagnético da energia solar. Fonte: Ayoade (1996). 63
Figura 26: distribuição percentual da radiação solar incidente. Adaptado de Koenigsberger *et al*., 1977. 64
Figura 27: absortância solar por comprimento de onda para os principais componentes atmosféricos. Fonte : Adaptado de Lutgens e Tarbuck (1998) 65
Figura 28: diferentes efeitos da atmosfera na radiação solar incidente na Terra. Fonte : Ineichen (2009). 65
Figura 29: modelo de céu isotrópico (esquerda) e modelo anisotrópico (circumsolar + plano) proposto por Hay (1979).. 67
Figura 30: exemplo de parametrização das condições de céu. Fonte: Perez *et al.* (1987). 67
Figura 31: distribuição da radiância em céu isotrópico (esquerda) e anisotrópico direita. Fonte: Robinson (2011). 68
Figura 32 : Superfície Polinomial com variação da eficácia luminosa direta (K_B) em função da claridade do céu (ε) e brilho do céu (Δ), para ângulo zenital e temperatura constantes. Fonte: Perez (1990) 69
Figura 33: esquema de subdivisão do céu em parcelas. Fonte: Cabus (2002). 71
Figura 34: esquema ilustrativo das trocas radiativas na cidade. Fonte: ilustração do autor (2013). 73
Figura 35: ângulos de obstrução e as dimensões para cálculo do fator de visão do céu e prospecto médio em cânions urbanos. Fonte: ilustração do autor, adaptado de Oke (1987). 77
Figura 36: diferença entre a temperatura da superfície e do ar, em função do albedo de diferentes revestimentos. Fonte: adaptado de Rosenfeld *et al.* (1995). 78
Figura 37: modelos de experimentação para análise do albedo, em função da variação do zênite solar e perfis de ruas. Fonte: Aida e Gotoh (1982). 79

Figura 38: ângulo do horizonte urbano equivalente (UHA). E a razão da irradiância difusa incidente e horizontal como função do UHA e da inclinação do plano de análise. Fonte: Robinson e Stone (2004). 84
Figura 39: mapa do solo urbano mostrando áreas construídas (figura) e não-construídas (fundo); e MDE – modelo digital de elevação – para uma cena urbana selecionada na cidade de Londres. Fonte: Ratti e Richens, (1999). 84
Figura 40: (a) volume de sombras; (b) imagem preto/branco onde pixels em preto representam área sombreadas e branco sendo superfícies expostas à insolação; (c) fator de visão do céu. Todas para a mesma área urbana de Londres. Fonte: Ratti e Richens (1999). 85
Figura 41: cânion urbano equivalente. Fonte: Robinson e Stone (2004). 86
Figura 42: reflexões a partir de um meio-hemisfério superior e meio-hemisfério inferior. Fonte: Robinson e Stone (2004). 87
Figura 43: definição do ângulo sólido e da radiância para cada parcela da abóbada celeste. Fonte: Robinson e Stone (2004). 87
Figura 44: repartição da fachada conforme valores do fator de visão, σaproximativo . Em escala de cinza, os níveis de σi por cada célula da malha da fachada e, em vermelho, repartição de zonas homogêneas. Fonte: Robinson e Stone (2004). 88
Figura 45: Estudo gráfico de projeção de sombras. Fonte: ilustração do autor (2011). 90
Figura 46: Estudo gráfico para conhecer altura limite permitida para construir sem projetar sombra em determinados espaços coletivos. Fonte: ilustração do autor (2011). 91
Figura 47: Diagrama de Pleyel com dados de iluminância externa e diagrama solar com sobreposição de dados de temperatura do ar externa para Maceió. Fonte: LABEEE, UFSC (2013). 91
Figura 48 : hemisfera de raio unitário (a) ; Princípio do ângulo sólido projetado (b). Fonte : ABNT (2004). 92
Figura 49: exemplo de simulação da projeção de sombras e insolação no programa Ecotect; e máscara de sombra de cena urbana com projeção do diagrama solar, com Townscope. Fonte : Townscope (2010). 93
Figura 50: solarscópio. Fonte : Labcon/UFSC, 2013. 94
Figura 51: exemplo de céu artificial retilíneo. Fonte: Luz, Ferreira *et al*. (2008) 94
Figura 52: esquema ilustrativo da técnica do raio traçado invertido. Fonte: Wikipedia (2013). 96
Figura 53: solução resultante de um ou vários rebatimentos da luz no espaço pelo método progressivo da radiosidade. Fonte: Wikipédia (2013). 97
Figura 54: esquema de discretização da abóbada celeste em 145 parcelas dado por Tregenza. Fonte: Robinson (2011). 98
Figura 55: comparação dos resultados obtidos por cálculo no modelo SRA (esquerda) e RADIANCE (direita) para resolução da mesma cena urbana. Fonte: Robinson (2011). 101
Figura 56: Esquema ilustrativo da transferência de dados da geometria da plataforma ArcGIS para o arquivo de entrada do programa CitySim. Fonte: imagens geradas pelo programa ArcGIS e Citysim, da esquerda para direita, respectivamente. 102
Figura 57: ilustração esquemática das entradas e saídas do modelo SRA. Fonte: ilustração do autor. 103
Figura 58 : conjunto de modelos empregados no algoritmo escolhido para análises preditivas do estudo. Fonte: ilustração do autor. 103
Figura 59 : síntese dos principais parâmetros descritivos da forma urbana implicados na definição dos elementos climáticos influentes no balanço radiativo das superfícies construídas. Fonte: ilustração do autor, 2013. 107
Figura 60 : estrutura do capítulo II. 110
Figura 61: formas urbanas simplificadas de Martin and March (1972) e ambientalmente revisadas por Steemers *et al*. (1997). 113
Figura 62*:* Zonas do Clima Local » propostas por Stewart e Oke (2009). 114
Figura 63: princípio da geração do mapa de tipologias de quadras urbanas (BONHOMME, MASSON e ADOLPHE, 2012). 114
Figura 64 : seis tipologias de forma urbana estudadas por Arantes (2012). 115
Figura 65: esquema ilustrativo do fluxo de informações da base de dados locais ao atendimento de uma dimensão global. Fonte: ilustração do autor (2012). 115
Figura 66 : comparação da superfície exterior e coeficiente de forma de vários tipos de agrupamento de módulos cúbicos ("a"=lado do cubo de referência). Fonte: adaptado de Traisnel (2006). 121
Figura 67 : comparação do coeficiente de forma e coeficiente de forma reduzido (ou indicador de compacidade) entre uma mesma forma de duas dimensões. 122
Figura 68: plano do arruamento, quadras chanfradas e prospecto de Idelfonso Cerdá para Barcelona (Wikipedia, website). 123

Figura 69: gabarito das ruas do projeto de Haussmann (THIBERGE, 2002) 124
Figura 70: construção da envoltória solar de Knowles. Acima-esquerda: influência da latitude e da orientação do sítio; Abaixo-esquerda: face norte e sul geradas em função dos limites anuais; Abaixo-centro: faces leste e oeste em função dos limites diários; Abaixo-direita: envelope solar resultante. Direita: exemplo de projeto a partir da aplicação desse método. 124
Figura 71: projeto *Reciprocity*, em resposta ao concurso *Low2No: A sustainable development design competition.* 126
Figura 72: as três formas urbanas estudadas pela equipe de Carlo Ratti [Ratti, 2003, p.55] (RATTI, RAYDAN e STEEMERS, 2003). 127
Figura 73 : seis formas urbanas definidas no estudo de Cheng et al. (2006). 128
Figura 74: potencial solar (em cobertas e fachadas) para as seis formas genéricas de Cheng *et al*. (2006). 129
Figura 75*:* três formas urbanas diferentes para densidades idênticas . Fonte : Adaptado de Moulinié e Naudin-adam (2005). 130
Figura 76: três formas e densidades urbanas distintas para o mesmo Coeficiente de aproveitamento =1,0 e mesma taxa de ocupação do solo=0,5, respectivamente. Fonte: ilustração do autor (2013). 131
Figura 77: exemplo de cidades dispersas nos Estados Unidos e Inglaterra, respectivamente. Fonte: *GoogleEarth*® (2013). 132
Figura 78: exemplos de cidades compactas e densas. Da esquerda para direita: a. extensão de Barcelona e b e c. renovação de Paris. Fonte: Alhzeiia, 2007; *GoogleEarth*® (2012). 134
Figura 79: exemplos de cidades verticais no mundo. Da direita para a esquerda, Manhattan, Dubai e Hong Kong. Fonte: *GoogleEarth*® (2012) 135
Figura 80: distintas densidades urbanas. Fonte: Adaptado de Salat (2011). 135
Figura 81: custo de infra-estrutura *versus* densidades. 138
Figura 82: abordagem hierárquica de definição e escolha dos indicadores ambientais da morfologia urbana para estudo de caso 139
Figura 83: Esquema da representação gráfica das principais estruturas urbanas em SIG (Fonte: ESRI-ARCGIS®). 144
Figura 84: esquema dos componentes principais do SIG (Fonte: adaptado de Laaribi, 2000). 145
Figura 85: diagrama de programação e automação das rotinas de cálculo dos atributos morfológicos no ModelBuilder do ArcMAP/ArcGIS®. 147
Figura 86: malha nas duas resoluções de análise: 500x500m e 250x250m. 148
Figura 87: posição geográfica da capital alagoana Maceió e o detalhe da área urbana do município (Fonte: SEPLANDE, 2012). 150
Figura 88: dinâmica urbana de verticalização gradual de extensas áreas ocupadas por edificações horizontais individuais em Maceió-AL. 152
Figura 89: condomínio San Nicolas em Maceió-AL . Fonte: Internet. 152
Figura 90: verticalização da planície litorânea de Maceió-AL (em destaque o bairro da Ponta verde) 153
Figura 91: zoneamento de uso do solo urbano de Maceió. Fonte: PMM (2007). 155
Figura 92: desenho esquemático do cone do farol de auxílio à navegação. Fonte: ilustração do autor. 156
Figura 93: sombreamento dos edifícios e logradouros (Autor) e sombras dos edifícios verticais projetadas na praia de Boa Viagem, ena cidade de Recife. Fonte: Gabriel Mascaró (2010). 157
Figura 94: Diferencial de nível x altura das edificações. Fonte: adaptado de CRUZ (2001). 157
Figura 95: croqui esquemático mostrando a definição do parâmetro taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento. Fonte: ilustração do autor. 159
Figura 96: esquema dos três planos de relevo de Maceió. Fonte: ilustração do autor. 160
Figura 97: relevo da zona urbana do município de Maceió. Fonte: Adaptado de Base Cartográfica PMM (2001). 161
Figura 98: mapeamento da forma urbana de Maceió segundo alguns parâmetros morfológicos estudados. 163
Figura 99: correlação linear entre os indicadores de: desvio padrão da altura e rugosidade (r=0,52); e coeficiente de aproveitamento e altura ponderada (r=0,98). 165
Figura 100: correlação linear entre os indicadores de: densidade total construída e taxa de ocupação (r=0,85); e rugosidade e volume construído (r=0,99). 166
Figura 101: correlação linear entre os indicadores de: coeficiente de forma e contiguidade (r=-0,85); e rugosidade e coeficiente de forma (r=-0,23). 166
Figura 102 : representações gráficas da primeira ACP. 168
Figura 103: representações gráficas da segunda ACP. 169

Figura 104: agrupamento estatístico em classes (morfológicas de referencia) em função dos indicadores da altura ponderada e da rugosidade. 171
Figura 105: cartografia das classes tipológicas mais representativas da forma urbana de Maceió. 171
Figura 106: classe tipológica 1. 172
Figura 107: classe tipológica 2 174
Figura 108: Edifícios multifamiliares do Programa de Arrendamento Residencial (PAR), em Maceió-AL . Fonte: Adolphe, 2013). 174
Figura 109: Ilustração da classe tipológica 3. 175
Figura 110: tipologia herdada da arquitetura colonial portuguesa, no bairro do Poço, em Maceió-AL. Fonte: Autor, 2013. 175
Figura 111: classe tipológica 4. 176
Figura 112: classe tipológica 5. 177
Figura 113: desenho esquemático dos perfis logaritmos do vento para classes morfológicas de referencia e influência da topografia e urbanização. 180
Figura 114: frequência da velocidade do vento por direção para classe 1 e 2. 181
Figura 115: velocidade do vento corrigida para classe de rugosidade 3 e 4. 181
Figura 116: velocidade do vento corrigida para classe de rugosidade 5 e médias mensais de velocidade para as 5 classes. 182
Figura 117: Saldo anual de irradiação infravermelha para taxas de velocidade do ar e prospectos diferentes. 183
Figura 118: (a) albedo medido para a cidade de Maceió (em 2003) e (b) cartografia do albedo médio estimado para cada classe morfológica. Fonte: Araújo *et al.* (2010). 186
Figura 119: estudo da projeção de sombra para a classe 1, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30 189
Figura 120: estudo da projeção de sombra para a classe 2, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30 191
Figura 121: estudo da projeção de sombra para a classe 3, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30 193
Figura 122: estudo da projeção de sombra para a classe 4, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30 195
Figura 123: estudo da projeção de sombra para a classe 5, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30 197
Figura 124: irradiação anual nos dois espectros (onda curta e onda longa) e o saldo radiativo na superfície da coberta para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió. 200
Figura 125: irradiação solar anual na superfície da coberta para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió. 200
Figura 126: irradiação anual nos dois espectros (onda curta e onda longa) e o saldo radiativo na superfície das fachadas para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió. 200
Figura 127: iluminância média anual na superfície das fachadas para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió. 201
Figura 128 : comparativo para a taxa de ocupação (TO), coeficiente de aproveitamento (CA) e altura média ponderada entre as classes tipo-morfológicas de Maceió. 201
Figura 129: temperatura média ponderada das superfícies dos edifícios para as cinco classes morfológicas de referencia de Maceió e em linha tracejada, a temperatura média do ar, por mês. 202
Figura 130: estrutura do capítulo III. 208
Figura 131: estratégia experimental com fatores distribuídos aleatoriamente. Fonte: ilustração do autor, 2012. 213
Figura 132: planejamento de experimentos por método fatorial. Fonte: ilustração do autor, 2012. 214
Figura 133: distribuição dos projetos no espaço de busca conforme estratégia experimental de fatorial completo Fonte: ilustração do autor, 2012 216
Figura 134: Distribuição dos experimentos/projetos no espaço de busca delimitado, por fatorial completo de dois níveis. Fonte: Ilustração do autor, 2012. 218
Figura 135: amostra projetos urbanos resultantes. Fonte: Martins *et al*., 2012. 218
Figura 136: esquema sequencial do método científico estatisticamente planejado. Fonte: ilustração do autor. 219
Figura 137: etapas da estratégia adotada de análise estatística. Fonte: ilustração do Autor, 2012. 221
Figura 138: esquema ilustrativo da região crítica do teste de hipótese. 223
Figura 139: modelo simplificado utilizado de base no estudo estatístico. Fonte: ilustração do autor (2012). 226

Figura 140 : ilustração das escalas consideradas na abordagem. Fonte : ilustração do autor. Fonte: ilustração do autor (2013). 227
Figura 141*:* contribuição dos fatores morfológicos em relação ao balanço de radiação de onda curta e onda longa nas cobertas, respectivamente (*overall student test*). 229
Figura 142: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas em relação ao saldo de energia radiativa de onda curta na superfície da coberta. 231
Figura 143: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas em relação ao balanço de radiação no espectro infravermelho na superfície da coberta. 231
Figura 144: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas respostas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada Leste (*overall student test*). 232
Figura 145: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas respostas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada oeste (*overall student test*). 233
Figura 146: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de energia radiante de onda curta na superfície vertical leste 234
Figura 147: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de radiação infravermelha na superfície vertical leste 234
Figura 148: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de energia radiante de onda curta na superfície vertical oeste. 235
Figura 149: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a radiação infravermelha na superfície vertical oeste 235
Figura 150: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas respostas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada norte (*overall student test*). 238
Figura 151: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada sul (*overall student test*). 239
Figura 152: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto balanço de radiação solar na superfície vertical norte. 240
Figura 153: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a radiação infravermelha na superfície vertical norte. 240
Figura 154: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de radiação solar na superfície vertical sul. 241
Figura 155: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de radiação infravermelha na superfície vertical sul. 241
Figura 156: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta resultante na superfície da coberta. 250
Figura 157: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda longa resultante na superfície da coberta. 251
Figura 158: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta resultante na superfície da fachada leste. 252
Figura 159: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda longa resultante na superfície da fachada leste 253
Figura 160: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta resultante na superfície da fachada oeste. 253
Figura 161: Gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda longa resultante na superfície da fachada Oeste. 254
Figura 162: Gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta resultante na superfície da fachada norte. 255
Figura 163: Gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda longa resultante na superfície da fachada norte. 256
Figura 164: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta resultante na superfície da fachada sul. 256
Figura 165: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda longa resultante na superfície da fachada sul. 257
Figura 166: resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos na resposta de iluminância na fachada Sul, norte, oeste e leste, respectivamente (*overall student test*) 258
Figura 167: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a resposta de iluminância na superfície da fachada Sul. 259
Figura 168: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a resposta de iluminância na superfície da fachada norte. 260
Figura 169: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a resposta de iluminância na superfície da fachada leste. 260
Figura 170: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a resposta de iluminância na superfície da fachada oeste 261
Figura 171*:* gráfico de probabilidade normal para o nível de iluminância na superfície da fachada Sul. 263

Figura 172: gráfico de probabilidade normal para o nível de iluminância na superfície da fachada Norte. 264
Figura 173: gráfico de probabilidade normal para o nível de iluminância na superfície da fachada Oeste. 264
Figura 174: gráfico de probabilidade normal para o nível de iluminância na superfície da fachada Leste. 265
Figura 175: estrutura do capítulo IV. 268
Figura 176: etapas do processo global de projeto. Fonte: adaptado de Melhado, 1994. 270
Figura 177: paradoxo da concepção arquitetônica e urbana (ADOLPHE, 1995). 271
Figura 178: variações puramente formais parametrizando orientação e implantação no lote urbano, utilizando técnicas de rotação e reflexão em ambiente computacional do Google Sketchup (STEINø, 2010). 274
Figura 179 : metodologia tradicional de projeto 279
Figura 180 : abordagem multicritério. 279
Figura 181 : metodologia de projeto por otimização. 279
Figura 182 : Distribuição das soluções ótimas encontradas. 282
Figura 183 : Mapeamento do espaço de variáveis de decisão no espaço objetivo. 283
Figura 184: fluxograma do funcionamento geral de um algoritmo genético tradicional – analogia à biologia. Fonte: ilustração do autor. 289
Figura 185 : representação da classificação dos indivíduos no NSGA (fronteiras). 291
Figura 186 : fluxograma do método NSGA. 292
Figura 187 : Processo de verticalização e adensamento da baixa marítima de Maceió. Fonte: Foto do autor, 2013. 294
Figura 188: fluxo de otimização - organograma dos processos, acoplamentos e dados de entrada e saída no programa modeFRONTIER®. Fonte: ilustração do autor, 2013 296
Figura 189: modelo geométrico simplificado utilizado de base para o estudo de otimização da classe 3. 297
Figura 190: modelo geométrico simplificado utilizado de base para o estudo de otimização da classe 4. 298
Figura 191 : definição das variáveis e arquivos de entrada do modelo no processo de otimização. Fonte: ilustração do autor, 2013. 299
Figura 192 : definição das restrições de projeto no processo de otimização. Fonte: ilustração do autor, 2013. 300
Figura 193 : definição do método de projeto/otimização, acoplamento e tratamento de dados de saída. Fonte: ilustração do autor, 2013. 301
Figura 194 : definição das variáveis de saída e funções objetivos no processo de otimização. Fonte: ilustração do autor, 2013. 302
Figura 195: resumo das simulações da primeira otimização. 304
Figura 196: restrições violadas da primeira otimização. 304
Figura 197*:* resultados da otimização multiobjetivo restrita pelo código de edificações. 306
Figura 198*:* resultados da otimização multiobjetivo restrita pelos parâmetros do código de edificações. 307
Figura 199 : projeção de sombras sobrepostas do horário das 8h as 17h, para o solstício de inverno .e máscara de obstrução para fachadas dos projetos de maior e menor potencial solar do primeiro Pareto de soluções da classe 4, respectivamente 308
Figura 200: resumo das simulações: otimização multiobjetivo sem restrição do código de edificações 309
Figura 201: restrições violadas: otimização multiobjetivo sem restrição do código de edificações. 309
Figura 202: resultados da otimização multiobjetivo sem restrição do código de edificações. 310
Figura 203 : projeção de sombras sobrepostas do horário das 8h as 17h, para o solstício de inverno .e máscara de obstrução para fachadas dos projetos de maior e menor potencial solar do segundo Pareto de soluções da classe 4, respectivamente 311
Figura 204 : Projetos da frente de Pareto para os dois cenários de otimização multiobjetivo da classe 4. 312
Figura 205 : esquema das três tipologias evidenciando diferentes prospectos para possíveis diferentes estratégias. 313
Figura 206: resumo das simulações: otimização multiobjetivo para a classe 3, restrita pelo código de edificações. 314
Figura 207: restrições violadas: otimização multiobjetivo para a classe 3, restrita pelo código de edificações. 314
Figura 208: resultados da otimização multiobjetivo restrita pelos parâmetros do código de edificações. Fonte: ilustração do autor. 315
Figura 209 : vista da tipologia *C3(1)Max* gerada pelo processo de otimização, mostrando a variação obtida na altura média. 316
Figura 210 : vista da tipologia *C3(1)* gerada pelo processo de otimização, mostrando a variação obtida na altura média das construções. Fonte: ilustração do autor. 316
Figura 211: resumo das simulações: otimização multiobjetivo restrita pelo código de edificações. 317

Figura 212: restrições violadas: otimização multiobjetivo restrita pelo código de edificações. 317
Figura 213: resultados da otimização multiobjetivo sem restrição do código de obras. Fonte: ilustração do autor. 318
Figura 214 : projetos da frente de Pareto para os dois cenários de otimização multiobjetivo da classe 3. 319
Figura 215: estrutura do capítulo V. 324
Figura 216: proposição de vizinhança a partir das quadras solares propostas com densidade progressiva, gerando o efeito pirâmide e favorecendo a circulação do ar na malha urbana. Fonte: ilustração do autor. 327
Figura 217 :ilustração esquemática da orientação das quadras (com ruas perpendiculares aos ventos dominantes) e arranjo escalonado. Fonte: ilustração do autor. 328
Figura 218 : exemplo de projeto de unidades de vizinhança a partir das quadras solares propostas, associando-se potencial de oferta e demanda das mesmas. 330
Figura 219 : comparação entre os projetos de maior e menor potencial de oferta de energia solar e menor e maior potencial de redução dos ganhos solares em fachadas. 330
Figura 220 : esquema ilustrativo de distribuição de energia solar das construções de maior potencial para as de menor potencial. 331
Figura 221 : proposta de integração de mistura do uso e ocupação do solo às diferentes formas de quadras urbanas obtidas. 332
Figura 222 : gráfico comparativo do potencial tipo-morfológico entre algumas das quadras solares propostas. 343
Figura 223 : gráfico comparativo do potencial solar nas cobertas entre algumas das quadras solares propostas. 344
Figura 224 : gráfico comparativo da irradiação em fachadas para algumas das quadras solares propostas. 344
Figura 225 : gráfico comparativo da iluminância em fachadas para algumas das quadras solares propostas. 344
Figura 226 : exemplo de intervenção pontual em vizinhança situada na planície litorânea de Maceió - planta. Fonte: ilustração do autor. 345
Figura 227 : exemplo de intervenção pontual em vizinhança situada na planície litorânea de Maceió – perspectiva e especificações das tipologias de quadra solar. Fonte: ilustração do autor. 345
Figura 228 : exemplo de intervenção pontual em vizinhança situada na planície litorânea de Maceió - perspectiva. Fonte: ilustração do autor. 345
Figura 229 : exemplo de superfície de resposta de alguns projetos simulados e interpolados por um modelo evolucionário de regressão para futuro desenvolvimento de ferramenta de auxílio à decisão. Fonte: adaptado de modeFRONTIER, 2013. 347
Figura 230 : analogia genética e definição de adaptação no processo de projeto. 373
Figura 231: casas geminadas de meia-morada. Fonte: ilustração do autor, 2012. 374
Figura 232: ilustração esquemática da cotiguidade horizontal (esquerda) e contiguidade horizontal e vertical (direita)..375
Figura 233: exemplo de cruzamento de multipontos. Fonte: adaptada de Amorim, 2006. 375
Figura 234: exemplo de cruzamento de um único ponto. Fonte: adaptada de Amorim, 2006. 375
Figura 235 : ilustração dos diferentes indicadores de densidade. 376
Figura 236: exemplo de operação de mutação de um ponto escolhido aleatoriamente. 380
Figura 237: diferentes tipos de quadra : plano livre, quadra fechada e modelo de quadra aberta. Fonte: ilustração do autor, 2012. 381
Figura 238: variações arquitetônicas do tipo edificado - herança colonial portuguesa no Brasil. Fonte: ilustração do autor, 2012. 383
Figura 239: classificação tipomorflógica do tecido urbano de Maceió obtida pela repartição de bairros. 390
Figura 240: exemplo ilustrativo da classificação realizada pelo MOGA. 391
Figura 241 : fluxograma do algoritmo MOGA. 392

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: nebulosidade e tipo de céu (CABUS, 2002). 59
Tabela 2: albedo (em %) de variados tipos de superfícies. Fonte: Ayoade (1996). 74
Tabela 3: perfis de velocidade do vento para diferentes áreas (Adaptado de Oke, 1987). 81
Tabela 4: Principais categorias metodológicas de indicadores da morfologia urbana (BENZERZOUR, 2004). 117
Tabela 5: Classes de indicadores propostos por Salat (2011) e destaque para a classe de interesse no estudo, a forma. 118
Tabela 6: definição do coeficiente de forma. Fonte: Traisnel (2006) 121
Tabela 7: descrição dos principais indicadores da forma urbana utilizados nesse estudo. 140
Tabela 8 : fórmulas para cálculo dos recuos progressivos em edifícios verticais. 159
Tabela 9: resultados estatísticos dos dados de densidade para o tecido urbano de Maceió em duas resoluções de malha de cálculo. 162
Tabela 10: Matriz de correlação para os parâmetros morfológicos aplicados ao tecido urbano de Maceió. 167
Tabela 11 : auto-vetores e pesos de cada variável para constituição das componentes principais da primeira ACP. 168
Tabela 12 : auto-vetores e pesos de cada variável para constituição das componentes principais da segunda ACP. 169
Tabela 13: resumo das iterações realizadas na análise de agrupamento. 170
Tabela 14 : cinco classes tipológicas urbanas segundo os cinco componentes principais. 170
Tabela 15: alturas de rugosidade média para diferentes sítios construídos. 179
Tabela 16: parâmetros tipo-morfológicos dos modelos genéricos examinados. 182
Tabela 17:coeficiente de luz do dia e valores mínimos de iluminância por fachada em Maceió (SCARAZZATTO, 1995). 185
Tabela 18: resumo dos valores mínimos propostos como critérios de análise do potencial para técnicas correspondentes. 185
Tabela 19: Emissividade de diferentes tipos de superfície. Fonte: Projeto de Norma da ABNT 02:135.07-002 (1998) 186
Tabela 20 : propriedades termo-físicas consideradas nas simulações. 187
Tabela 21: resumo do resultado das simulações e análises para classe 1. 190
Tabela 22: resumo do resultado das simulações e análises para classe 2. 192
Tabela 23: resumo do resultado das simulações e análises para classe 3. 194
Tabela 24: resumo do resultado das simulações e análises para classe 4. 196
Tabela 25: resumo do resultado das simulações e análises para classe 5. 198
Tabela 26: resumo dos resultados em estatística anual por classe morfológica. 199
Tabela 27: disponibilidade em percentual para as fachadas e cobertas para as três técnicas de aproveitamento da energia solar, para as cinco tipologias. 202
Tabela 28: resumo comparativo das principais características "morfosolares"das cinco tipologias de Maceió. 203
Tabela 29: coordenadas dos fatores da amostra distribuídos aleatoriamente. 213
Tabela 30 : Matriz de correlação linear entre os fatores envolvidos no caso de uma amostra aleatória. 213
Tabela 31:coordenadas de uma amostragem de experimentos definida por método fatorial. 214
Tabela 32: matriz de correlação entre os fatores combinados por método fatorial. 214
Tabela 33: matriz de correlação entre os fatores combinados por método fatorial. 218
Tabela 34: mecanismos de erro de um teste estatístico. 223
Tabela 35: intervalos para o conjunto de fatores tipo-morfológicos considerados no estudo. 226
Tabela 36: irradiação solar média anual (kWh/m^2.ano) para nove edifícios e para a média do bairro por fachada e o desvio relativo entre estes. 228
Tabela 37*:* resultados do teste de significância para o balanço de radiação de onda curta na superfície da coberta. 231
Tabela 38: resultados do teste de significância quanto ao resultado na radiação de onda longa na superfície da coberta. 232
Tabela 39: resultados do teste de significância no balanço de radiação de onda curta na superfície leste. 237
Tabela 40: resultados do teste de significância no balanço de radiação infravermelha na superfície leste. 237
Tabela 41: resultados do teste de significância para o balanço de radiação de onda curta na superfície oeste. 237
Tabela 42: resultados do teste de significância na radiação infravermelha na superfície oeste. 238
Tabela 43: resultados do teste de significância no balanço de radiação de onda curta na superfície vertical norte. 242
Tabela 44: resultados do teste de significância na radiação infravermelha na superfície vertical norte. 242
Tabela 45: resultados do teste de significância no balanço de radiação de onda curta na superfície vertical sul. 243
Tabela 46: resultados do teste de significância na radiação infravermelha na superfície vertical sul. 243
Tabela 47: magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos na irradiação solar de todas as superfícies examinadas. 244

Tabela 48: magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos na irradiação infravermelha de todas as superfícies examinadas.....244
Tabela 49: hierarquização da magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos na irradiação solar por fachada. 248
Tabela 50: hierarquização da magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos na irradiação infravermelha por fachada. 248
Tabela 51 : resultados do teste de significância para iluminância na fachada sul.....262
Tabela 52 : resultados do teste de significância para iluminância na fachada norte. 262
Tabela 53 : resultados do teste de significância para iluminância na fachada oeste. 262
Tabela 54 : resultados do teste de significância para iluminância na fachada leste.....262
Tabela 55: comparação entre métodos de projeto e decisão 278
Tabela 56 : Analogia dos algoritmos genéticos com os elementos da biologia genética.....287
Tabela 57: principais fatores tipo-morfológicas que caracterizam as cinco tipologias urbanas utilizadas na definição dos modelos simplificados para otimização. 295
Tabela 58: intervalos para o conjunto de fatores tipo-morfológicos considerados no estudo para a classe 3. 297
Tabela 59: intervalos para o conjunto de fatores tipo-morfológicos considerados no estudo para a classe 4. 298
Tabela 60: cenários de otimização avaliados. 303
Tabela 61: resumo dos intervalos, restrições e valores encontrados para as configurações, original e otimizadas.....313
Tabela 62: resumo dos intervalos, restrições e valores encontrados para as configurações, original e otimizadas, para a classe 3. 320
Tabela 63 : esquema ilustrativo da distribuição do fluxo do vento em diferentes configurações de arranjos urbanos – edifícios alinhados e escalonados. Fonte: ilustração do autor. 328
Tabela 64 : quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo solar: exemplo de quadra tipo C4(1)6. 337
Tabela 65 : quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo solar: exemplo de quadra tipo C4(1)8. 338
Tabela 66 : quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo solar: exemplo de quadra tipo C4(2)9. 339
Tabela 67: quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo: exemplo de quadra tipo C4(2)3452. 340
Tabela 68 : quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo solar: exemplo de quadra tipo C3(2). 341
Tabela 69 : quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo solar: exemplo de quadra tipo C3(2)3. 342
Tabela 70 : coeficientes estatísticos das funções de brilho circumsolar e do horizonte para o modelo de céu de Perez. 385
Tabela 71: Resumo dos indicadores de densidade para os 50 bairros de Maceió. 388
Tabela 72: Resumo dos indicadores ambientais de forma para os 50 bairros de Maceió.....389
Tabela 73: matriz de correlação entre os indicadores considerados para os bairros de Maceió. 390

INTRODUÇÃO

Contexto geral da pesquisa

Um paralelo entre a Arquitetura e o Urbanismo pode ser traçado similar a aquele do homem e a sociedade a que pertence. Em ambos os casos, a dependência de cada ator ao seu contexto de inserção ou vice-versa, não pode ser negligenciada. Introduzidos numa rede integrada, os edifícios encontram-se inseridos num tecido, conectados por redes urbanas, servidos por vias e cuja qualidade ambiental é, sobretudo, definida pelo seu contexto morfológico em diferentes escalas espaciais e temporais. Portanto, a arquitetura não deve ser concebida apenas para satisfazer a um programa funcional ou a uma qualidade estética. Mesmo possuindo a edificação uma envoltória voltada para condições adequadas de desempenho, a sua implantação na cidade não pode ser realizada somente por um processo de pura e simples adição. Em termos gerais, deve ser procurada a integração e adaptação da edificação a um dado contexto, seja este natural ou construído, energético, social, econômico, histórico, e cultural.

Rossi (1982) em seu famoso tratado sobre a Arquitetura da Cidade compreende a arquitetura *"como uma criação inseparável da vida civil e da sociedade em que se manifesta; ela é por natureza coletiva. (...). Iniciaram a arquitetura ao mesmo tempo em que os primeiros esboços das cidades; a arquitetura é, assim, inseparável da formação da civilização e é um fato permanente, universal e necessário"* (ROSSI, 1982)

Muitas vezes, as escalas da arquitetura e do urbanismo têm sido tratadas de forma desconectada, embora haja cada vez mais confirmações desta complementaridade de escalas, estabelecendo-as como um quadro único. A qualidade arquitetônica da cidade não se restringe à realização de obras isoladas, mas a capacidade das novas arquiteturas de se relacionarem a fatos urbanos precedentes: outras arquiteturas, paisagem climática, ao lugar, e as condições de infra-estrutura (AYMONINO, 1984).

Face à premência de atendimento em todas as esferas da ação humana ao paradigma da sustentabilidade, torna-se imprescindível para tanto, além confrontar as distintas escalas para a concepção dos espaços construídos, estabelecer uma maior permeabilidade entre as fronteiras disciplinares que as encerram. É nesse terreno que se encontra uma das principais motivações da presente pesquisa de tese, a da interdisciplinaridade como aproximação à problemática de múltiplos critérios que define a concepção das estruturas urbanas, quando o objetivo for a sua adequação ao ambiente climático de modo a possibilitar uma melhor eficiência energética das construções.

O crescimento populacional verificado de uma maneira geral em quase todas as grandes cidades constitui-se num enorme desafio para os planejadores dos espaços construídos, mas por outro lado passa a constituir oportunidades e novas ações para melhorar o contexto urbano existente. Uma dessas oportunidades é o planejamento e a organização desses espaços a partir do uso de novas e robustas técnicas para otimizar o processo de projeto (heurístico e aleatório) na busca de respostas mais coerentes, inovadoras, adaptadas e adaptáveis para um dado contexto urbano-energético.

O presente trabalho apresenta uma proposta de contribuição à problemática vinculada à relação entre ***cidade*** (mais detidamente a sua dimensão morfológica na escala intermediária entre a arquitetura e vizinhança); ***clima*** (com foco nos condicionantes solares de projeto); *e* ***energia*** (consumida e potencialmente produzida pelos edifícios) (Figura 1).

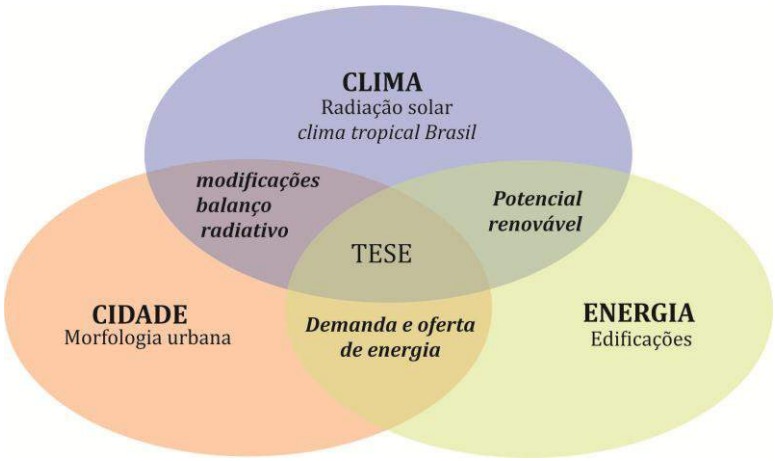


Figura 1 : esquema ilustrativo das temáticas abordadas na tese. Fonte: ilustração do autor.

Para tanto, procura-se apresentar as principais questões implicadas na relação das temáticas *cidade-clima-energia*, que motivaram a formulação das hipóteses assumidas no trabalho e que serão apresentadas mais adiante.

Inicialmente é apresentada uma discussão de como o processo de urbanização tem contribuído para as modificações climático-ambientais, e como esse processo tem influência marcante no consumo final de energia nas cidades. Destaca-se o papel crucial da morfologia urbana como intensificadora do consumo, e também do seu grande potencial para mitigá-lo. As morfologias urbanas da cidade serão pois examinadas sob a ótica dos condicionantes solares de projeto. Define-se um contexto climático particular - região de clima tropical de baixa latitude - onde a abordagem desse trabalho se apoiará para responder às questões propostas. Discorre-se sobre como a modelagem e o uso de técnicas inovadoras no processo de projeto podem auxiliar na resposta às questões levantadas. Em seguimento apresenta-se o contexto e a problemática da pesquisa, os objetivos e as etapas metodológicas. Encerra-se esta introdução, com uma descrição sobre a estrutura e a organização do manuscrito.

Urbanização, mudanças climáticas locais e energia consumida nas cidades

Nos dias atuais, mais da metade da população mundial habita ambientes urbanos, os quais consomem mais de 70% dos recursos energéticos globais. A previsão é de que essa crescente população urbana seja de 75% até 2050 (UN, 2004). Mesmo não sendo homogêneos o desenvolvimento urbano e o consumo nos diversos países do mundo, o crescente processo de urbanização vem, efetivamente, provocando modificações importantes ao meio ambiente. Estima-se que a magnitude desse impacto ambiental ou o tamanho da pegada ecológica[1] global de uma cidade corresponderia, em média, a 300 vezes o seu tamanho (WACKERNAGEL e REES, 1996). Ou seja, entre tudo que uma cidade necessita consumir em termos de recursos naturais globais (principalmente recursos energéticos e hídricos) para manutenção de suas atividades, suas trocas, seu funcionamento e o que produz como rejeitos, resulta num expressivo impacto nocivo ao meio ambiente.

As cidades consistem em agregações de pessoas e de atividades, de habitações individuais e coletivas, mobiliários urbanos, redes diversas (e.g. transporte, comunicação, energia, etc.) elementos naturais (vegetação, relevo, planos d'água etc.), superfícies artificiais, tudo isso disposto de modo

[1] Em 1996, Wackernagel e Rees introduziram o método da "pegada ecológica", que calcula, em hectares, as quantidades de terra e água produtivas necessárias para a obtenção de tais recursos que uma pessoa, cidade ou país utilizam, assim como para a absorção dos resíduos gerados.

relativamente heterogêneo, como um mosaico de diferentes conexões, texturas e formas dentro de um território. Também a este mosaico de texturas e formas corresponde um outro mosaico: aquele da diversidade climática e ambiental. Evidentemente que essas condições climáticas e ambientais serão em parte determinadas pela distribuição e densidade dessas formas e texturas construídas, ou seja, da morfologia urbana. Essas questões serão discutidas mais adiante.

O progressivo processo de urbanização, como é possível verificar na maior parte das cidades do mundo, contribui expressivamente para as mudanças climáticas locais e globais. De modo geral, essas mudanças ocorrem devido às alterações gradativas nas propriedades físicas das superfícies do solo que terminam por afetar as condições térmicas, de captação solar, e da aerodinâmica da atmosfera urbana em várias escalas (OKE, 1987). Em escala local, um dos efeitos mais conhecidos e sentidos dessas modificações no interior das cidades é o efeito da ilha de calor urbano. Esse efeito consiste na elevação de alguns graus na temperatura do ar nos centros urbanos, quando comparada às temperaturas registradas nas zonas menos urbanizadas (ou rurais) do seu entorno. As diferenças de temperatura podem ser de 2˚C, para uma cidade de 1000 habitantes e de até 12˚C ou mais para uma grande metrópole de vários milhões de habitantes (OKE, 1988). A redução da velocidade do vento pela presença das edificações, a diminuição do efeito do resfriamento evaporativo, através de planos de água ou da vegetação cada vez menos presentes em meios urbanos e, ainda as modificações produzidas no balanço radiativo das superfícies, em geral com elevadas condições de absorção e armazenagem térmica (e.g. asfalto, concreto), contribuem expressivamente, na intensificação desse fenômeno. Duas consequências imediatas podem ser verificadas: o impacto negativo na qualidade ambiental dos espaços públicos e privados, na saúde humana e um incremento ainda maior na demanda energética para a operação dos ambientes construídos.

Com o aumento do consumo de energia pelos edifícios, as cidades transformam-se também, entre outros agentes, nas maiores fontes indiretas de produção de gases causadores do efeito estufa. A pressão cada vez maior sobre o sítio local, tem aumentado o potencial de riscos de mudanças climáticas, com a ocorrência mais frequente de episódios climáticos severos, como enchentes, ondas de calor muito acima da média etc. Estudos realizados com séries climáticas dos últimos 100 anos da rede meteorológica mundial, sugerem que o incremento médio observado na temperatura do planeta poderia ser devido à urbanização (CHANGNON, 1992). Diversas hipóteses em torno dessa problemática atribuem às ações antrópicas, como sendo uma das principais causas das mudanças climáticas em grandes escalas e escalas regionais.

Observa-se que em muitas cidades, principalmente aquelas dos países em desenvolvimento, situadas na faixa intertropical, a urbanização e a metropolização tem sido galopante nas últimas duas décadas (Figura 2). Cidades de países como a China, Brasil e Índia, têm crescido em ritmo acelerado, porém sem que houvesse planejamento efetivo de suas redes: estruturais, de transporte, de energia, de água, de comunicação, etc. Nesse processo onde a urbanização acelerada não acompanha medidas importantes de planejamento: as redes de transporte saturam; a oferta de energia e de água não acompanha a elevada e crescente demanda; a explosão da malha urbana obriga a extensão das redes e a ausência de políticas públicas que atuem no sentido do controle e normalização do uso do solo, encaminham as cidades a reproduzirem modelos urbanos de baixa qualidade ambiental.

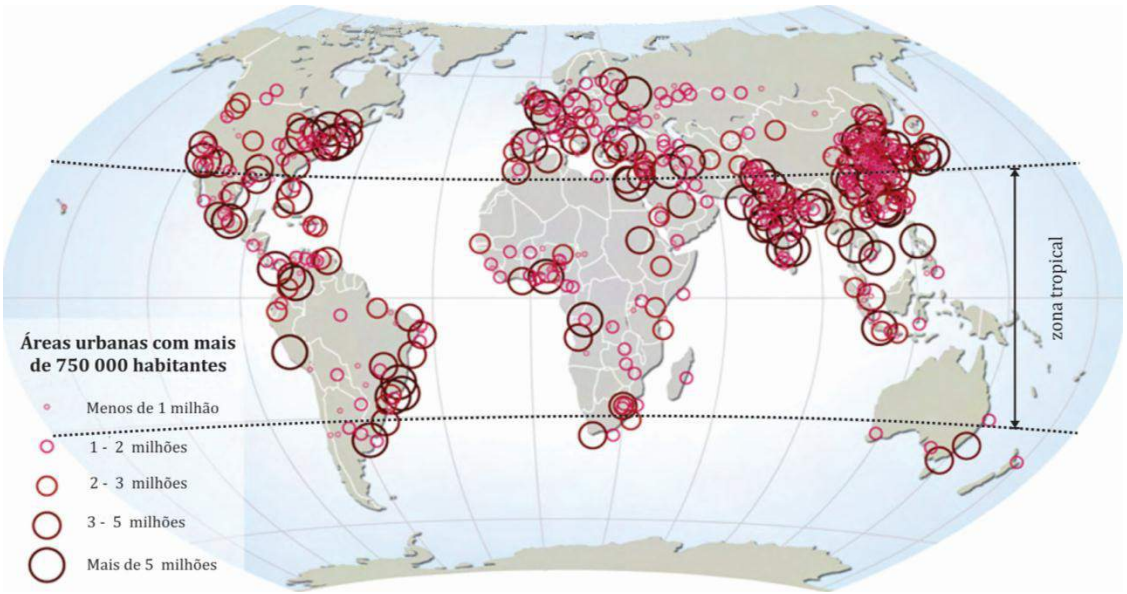


Figura 2: processo da metropolização no mundo. Fonte: Nordpil (2007).

No Brasil, país onde a maioria da população brasileira era essencialmente rural até meados dos anos de 1950, em 50 anos passou a se concentrar maciçamente em áreas urbanas. Em 2010, 84,35% da população já vivia em situação urbana (IBGE, 2010). Segundo projeções da Organização das Nações Unidas (ONU), até 2050, o percentual da população brasileira que viverá em centros urbanos deverá saltar para 93,6%. Em termos absolutos, serão 237.751 milhões de pessoas morando nas cidades do país ainda na metade deste século (Figura 3).

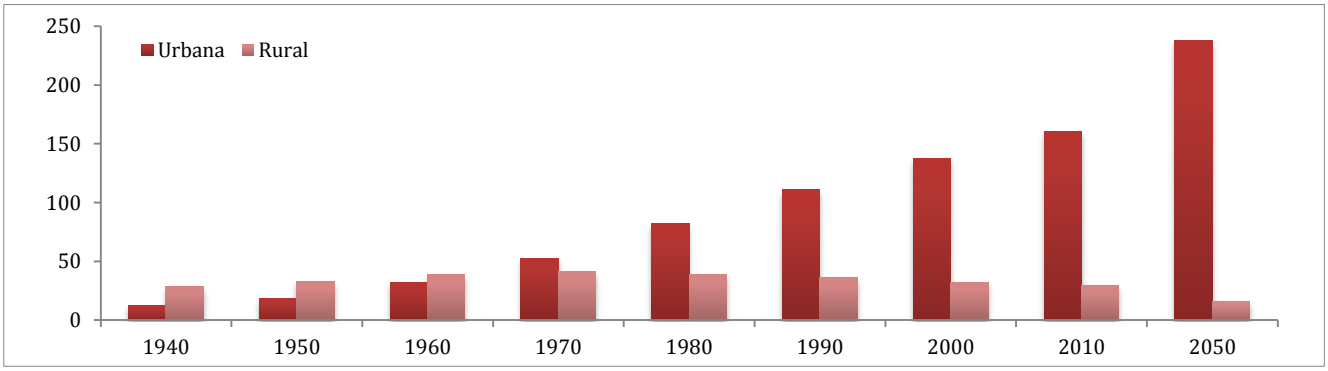


Figura 3: crescimento da população urbana brasileira ao longo dos últimos 70 anos e a projeção para 2050. Fonte: IBGE(2010) e ONU(2010).

Além das consequências já mencionadas, esse crescimento da população urbana no Brasil, tem representado uma expansão desordenada e predatória das cidades em termos ambientais e sociais: pressão sobre áreas ambientalmente sensíveis, aumento expressivo do consumo e da tarifa de energia elétrica, criação de periferias distantes para habitação da população de baixa renda, segregação urbana, engarrafamento viário e uma especulação imobiliária que cria altos edifícios em bairros de ruas já congestionadas e com insolação comprometida.

Mas, observa-se que com este crescimento populacional, a maioria das cidades brasileiras encontra-se em processo de constante transformação de sua forma, à salvo de algumas exceções (alguns distritos urbanos das cidades de urbanização mais antiga, como Rio de Janeiro e São Paulo). Em função de diferentes interesses, essa transformação da forma pode ocorrer mais rapidamente para alguns distritos que para outros, de modo que a morfologia dessas cidades estão longe de estar

consolidadas, como será visto mais a diante nas discussões da cidade escolhida para realização do estudo de caso nesse trabalho, o que concorre a curto e médio prazo para modificações morfológicas importantes.

Todavia, ao trazer a urbanização e o exponencial crescimento da demanda nos centros urbanos brasileiros ao encontro do problema de interesse particular dessa tese, a energia nas cidades, é possível sublinhar alguns dados importantes e identificar algumas tendências no setor:

a. o consumo de energia elétrica no país é **crescente**. Dados mais recentes publicados, indicam que as edificações são responsáveis por 44,7% do consumo total de energia elétrica do país, distribuído entre os setores residencial (22,1%), comercial (15%) e prédios públicos (7,6%). Ressalta-se que nesta estimativa ainda não foi considerada a parcela de energia embutida nos materiais que compõem as edificações (BRASIL, 2013)(Figura 4).

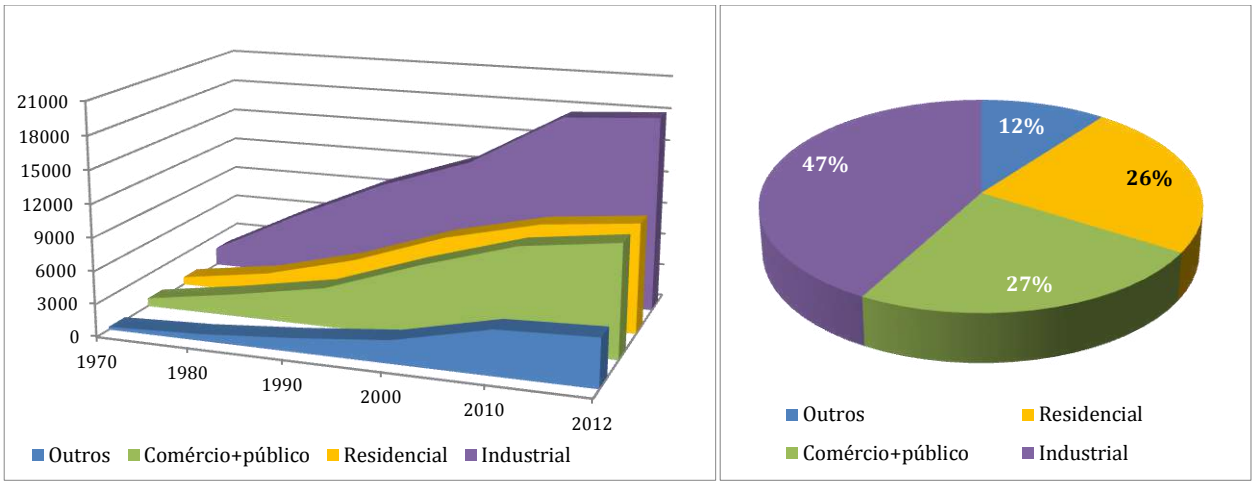


Figura 4: (a) evolução do consumo de energia elétrica por setor no Brasil, em tonelada equivalente de petróleo e (b) proporção da distribuição. Fonte: BRASIL, 2013.

Ainda que a crise energética de 2001 tenha induzido a uma redução do consumo nos edifícios brasileiros, essa tendência foi revertida nos anos subsequentes. A demanda por eletricidade vem apresentando um aumento superior ao do PIB e é alta a estimativa de crescimento do consumo nos edifícios, considerando a estabilidade econômica aliada a uma política de melhor distribuição de renda no país.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) atualizou as premissas básicas e as previsões para o consumo de energia elétrica no horizonte de 10 anos. Os dados serão utilizados como subsídio para a formulação do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) e do Plano Nacional de Energia de Longo Prazo (PNE).

De acordo com as novas estimativas, que contemplam o período de 2014 a 2023, o crescimento médio anual da demanda total de eletricidade (que inclui consumidores cativos, consumidores livres e autoprodutores) será de 4,3% nos próximos 10 anos, atingindo 781,7 TWh em 2023, contra os 514 TWh atuais.

Para 2014, a previsão é de que haja um crescimento do consumo de 3,8%, com destaque para os setores comercial, com alta de 4,4%, e residencial, com crescimento de 4,1%. A taxa de 2014 será superior a do ano passado, quando o consumo de energia cresceu 3,5%, segundo dados preliminares apurados pela EPE.

b. apesar da maior parte de nossa matriz energética estar concentrada na geração hidrelétrica (64,33%), conhecida como uma fonte de energia limpa com baixos níveis de emissão de gases de efeito estufa, esta é causa de grandes impactos ambientais e sociais, principalmente quando da instalação de grandes usinas (e.g. modificações no clima local, desaparecimento de espécies animais,

remoção de famílias e culturas, etc.). Dado o aumento progressivo da demanda, os planos de expansão da geração de energia hoje estão privilegiando a construção de grandes usinas, como as que estão sendo construídas na Amazônia. No entanto, sabe-se que além dos impactos associados à instalação das usinas, estas são dependentes do nível da pluviometria para garantir seu pleno funcionamento. E na insuficiência desse recurso, termoelétricas têm sido acionadas intensamente para suprir a demanda energética, como ocorreu durante seis meses no ano de 2013 e atualmente. Geração esta que pode ser extremamente poluente, dada pela queima, entre outros, de combustíveis fósseis (e.g. carvão mineral, gás natural, óleo combustível). Outrossim, a instalação das usinas hidroelétricas são distantes dos principais centros urbanos, de modo que existe ainda muita perda em linhas de transmissão.

Conforme é possível ser observado no gráfico da Figura 5, a participação de outras fontes renováveis de energia, como a eólica, é ainda pequena, cerca de 0,9% e a energia solar, praticamente inexpressiva. Apesar do enorme potencial eólico e solar do país, ainda é dada pouca a atenção a estas fontes de energia, face ao montante de potência já instalada de usinas hidrelétricas (BRASIL, 2013).

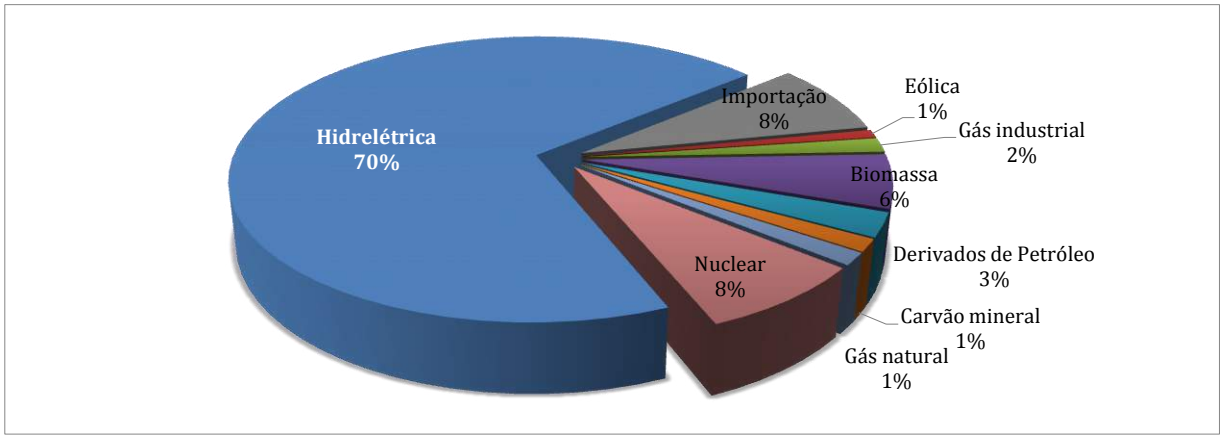


Figura 5 : matriz energética no Brasil. Fonte: BRASIL, 2013.

c. dado o aumento na demanda de energia nas cidades para o transporte e redes, devido às distâncias que separam as diferentes atividades urbanas (aumento dos deslocamentos pendulares), e a expansão da cidade além de seus limites territoriais, no último balanço energético publicado, que houve um acréscimo de mais de 10% em dois anos no consumo energético para o transporte (BRASIL, 2013);

Essas demandas tendem a aumentar com a expansão urbana, como pode ser verificada nas cidades de grande, médio e pequeno porte. Isso pode ser dado em diferentes formatos: (i) através de uma verticalização intensa e aumento da densidade do solo urbano, o que pode sobrecarregar a infra-estrutura que, muitas vezes, já não é adequada, mas que pode reduzir os deslocamentos de automóveis e o espaço ocupado por pessoa; (ii) pela expansão horizontal da malha urbana, na forma de grandes conjuntos residenciais horizontais que impõem a necessidade de implantação de redes tentaculares de transporte, induzindo gastos energéticos ainda maiores.

Diante desse quadro atual e de tendências apresentadas e relacionadas com o meio urbano e as questões energéticas, torna-se, portanto, imprescindível a procura de medidas e estratégias de adaptação para mitigar o consumo de recursos energéticos não-renováveis, por estes provocarem importantes impactos ambientais.

Uma avaliação de alguns dados publicados, apontou que além de grandes consumidores, há inerente ao próprio setor das construções possuiria um grande potencial para reverter a situação presente, e contribuir de forma importante para a conservação de energia e mitigação das emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE). Isto poderia ser conseguido através da racionalização de indicadores, como a densidade e compacidade do tecido urbano (STEEMERS, 2003) (MAÏZIA, SÈZE, *et al*., 2009).

Apesar de ser ainda frágil o quadro regulatório brasileiro no controle e no caráter mandatório de medidas de eficiência energética e geração renovável em edificações, nota-se hoje um crescente esforço na elaboração de regulamentos que visam tratar dessas questões, em termos de agendas de curto, médio e longo prazo. Como exemplo, há os regulamentos publicados pelo PROCEL/EDIFICA da Eletrobrás (BRASIL., 2001). No entanto trata-se, muitas vezes, de medidas ainda bastante centradas na escala do edifício isolado, dada ainda a dificuldade de compreensão sobre as modificações físico-climáticas que tornam complexa a relação entre objetos construídos nas diferentes escalas espaciais e temporais. Além disso, na resolução do edifício, como objeto isolado, o potencial de ação revela-se como mais factível. São também ainda pouco expressivas as abordagens que buscam integrar tal problemática energética em escala mais ampla, como a do planejamento e projeto urbano ou ainda em escalas intermediárias, como na interface entre os parâmetros que definem a concepção arquitetônica e o desenho urbano e as diversas implicações físicas e climáticas locais resultantes.

Outrossim, além das medidas mencionadas que visam reduzir a demanda de energia dos edifícios, alguns estudos têm também procurado investigar o potencial das cidades em viabilizar a produção de energia de fonte renovável e de forma descentralizada (e.g. energia solar, eólica etc.)(MONTAVON, 2010); (MASSON, VIGUIÉ, *et al.*, 2012) (ROBINSON, 2011). No entanto, essa integração pode ser bem complexa, tendo em vista o impacto de parâmetros relacionados sobretudo à geometria urbana, a densidade construída, a compacidade da forma, etc., conforme veremos mais adiante.

Esta escala urbana de implantação de energias renováveis é uma preocupação recente. Em 2009, um relatório da Agência Internacional de Energia destacava o interesse e a possibilidade de integrar sistemas de energias renováveis no tecido urbano. Diversas razões foram suscitadas, como a possibilidade de reduzir localmente as emissões de poluentes, reduzir as perdas em linha de transmissão, contribuir para a redução da precariedade energética de parte dos domicílios de baixa renda, possibilitando a redução significativa das faturas de energia, etc. (IEA, 2009).

No Brasil, a inserção de fontes renováveis de energia na matriz energética é ainda inexpressiva, pois o custo associado à implantação em grandes e pequenas escalas é ainda elevado. No país, a inserção da energia eólica é ainda bastante pensada em grande escala, e em alguns casos distante dos centros urbanos, o que eleva, os custos e as perdas nas linhas de transmissão. Faz-se necessário, integrar essas questões à requalificação e produção da forma urbana na escala local, na escala vizinhança urbana. É nesse contexto que se insere a proposta dessa pesquisa, como será visto mais adiante na apresentação dos objetivos.

Morfologia urbana e a energia consumida nas cidades

O consumo de energia nas cidades, ao que tudo indica, encontra-se condicionado pela forma como foram planejados os espaços construídos. Alguns pesquisadores acreditam que esta influência seja de até 80% nesse consumo (BOYEUR, 2009). Também, Ratti, Baker e Steemers (2005) mostram que a forma e a textura urbana podem duplicar o consumo energético de um edifício, dependendo do contexto climático (Figura 6). Todavia, os valores indicados são apenas em estimativas baseadas em alguns critérios, pois é extremamente complexo precisar esse impacto, dadas as inúmeras variáveis implicadas. Maizia (2007) insiste ainda que "quando se trata de estimar o consumo energético na

escala urbana, uma realização do balanço de energia feito de edifício por edifício torna-se difícil ou mesmo impossível", dada a importante influência exercida de um edifício sobre o outro.

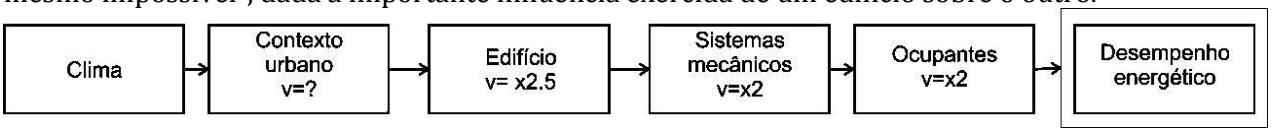


Figura 6: fatores que influenciam o desempenho energético dos edifícios. Fonte: Ratti, Baker e Steemers (2005).

Contudo, muitos estudos já mostraram que dois dos aspectos de maior peso na determinação do consumo energético na cidade encontram-se relacionados com a resposta de sua morfologia[2] construída (conferida de uma dada densidade) responde aos condicionantes climáticos locais e também à organização e distribuição das funções dos espaços no tecido urbano (que determinará os deslocamentos de pessoas e bens).

A morfologia das cidades está, portanto, fortemente correlacionada ao uso dos modos de transporte. A conhecida análise sobre a mobilidade urbana realizada em 1989, por Peter Newman e Jeff Kenworthy, confirma a relação notável entre o consumo de energia devido aos deslocamentos e a densidade urbana (NEWMAN e KENWORTHY, 1989). O estudo desses autores mostra que a densidade de população explica cerca de 60% do consumo de energia do sistema de transportes de uma cidade[3]. Com base nesta constatação, estabeleceram uma primeira relação entre a densidade média de uma cidade e o consumo de energia para a mobilidade: "O principal parâmetro que descreve a forma de uma cidade é a sua densidade; esta tem efeitos significativos para as distâncias de deslocamentos e as soluções modais" (FOUCHIER, 1998). De fato, as cidades que têm uma pequena densidade de população e oferecem muito espaço à circulação e ao estacionamento dos veículos, são aquelas mais dependentes do automóvel e, por conseguinte, mais consumidoras de energia para o transporte de pessoas. Situação possível de ser constatada em muitas das cidades brasileiras.

Ressalta-se aqui que, embora os transportes ocupem o segundo lugar em termos de consumo de energia na cidade, conforme visto nos dados apresentados anteriormente, e representem a segunda fonte de emissões de gases de efeito estufa, este aspecto não será considerado nas avaliações realizadas nesse trabalho. Os modelos que permitem esta descrição são demasiado complexos e poderiam ser objeto de trabalhos futuros dedicados exclusivamente a esse respeito (FLÉTY, ANTONI, *et al.*, 2010). Destacamos nesse estudo, o papel da morfologia construída no desempenho energético das edificações, maiores consumidores da energia final.

A densidade é considerada pela maior parte dos estudos como um dos indicadores chave da morfologia urbana para a definição do consumo de energia das cidades. Entretanto, esse conceito é bastante amplo, como será visto ao longo do texto, e abarca um conjunto parâmetros, de modo que se encontram definidos diversos tipos de densidade e que, em conseqüência, poderão estabelecer diferentes tipos de formas urbanas: densidade da ocupação do solo (ou taxa de ocupação), densidade total construída (ou coeficiente de aproveitamento), verticalidade, densidade de unidade de ocupação, densidade de quadras, densidade humana, densidade de empregos, etc.

---

[2] "A morfologia urbana consiste no estudo da forma física da cidade, na constituição progressiva de seu tecido urbano e nas relações recíprocas dos elementos desse tecido que definem as combinações particulares das figuras urbanas (ruas, edifícios, espaços públicos)" (ALLAIN, 2012). Nesse trabalho será considerada a morfologia urbana como o tecido urbano dotado de forma (s) física(s), de dimensões e de tipos construídos particulares.

[3] Os outros 40 % são atribuídos ao custos dos combustíveis e a eficiência do veículo.

Exemplificando, para uma mesma área urbana de 1 hectare de solo, é possível estabelecer diversas densidades de ocupação (Figura 7), de modo que uma cidade pode apresentar muitas formas/geometrias para o mesmo uso do solo ou para uma mesma taxa de ocupação, com desempenhos completamente distintos. Apesar da grande relevância desse indicador, este não é capaz de responder sozinho às questões energéticas, sendo necessário considerar uma série de outros parâmetros descritivos, tais como, o fator de forma, prospecto médio, rugosidade, porosidade, etc., para que seja possível estabelecer tendências sobre o comportamento energético de uma forma urbana. A escolha dos parâmetros morfológicos de concepção mais pertinentes numa avaliação deverá, portanto, ser dada em função dos condicionantes considerados, como será visto ao longo desse trabalho. No caso da presente pesquisa, a proposta é a de poder contribuir inicialmente para a consideração dos condicionantes solares na revisão da morfologia urbana (revisitando conceitos de densidade, forma e textura) para responder a problemática energética nas cidades. Os indicadores identificados como mais relevantes nessa abordagem serão apresentados e descritos com mais detalhes no Capítulo I e II.

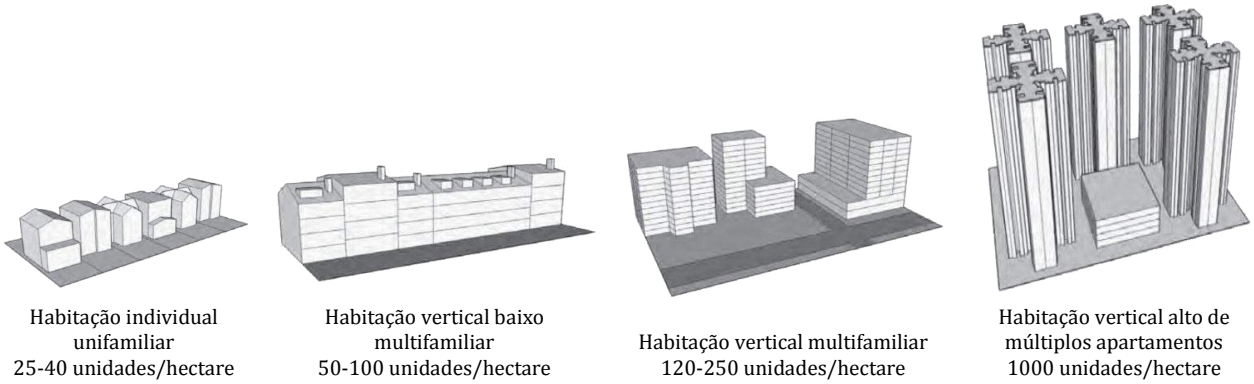


Figura 7:.diferentes densidades de ocupação e formas urbanas para um hectare de solo urbano. Fonte: Adolphe (2011).

Sabe-se que uma dada morfologia de cidade pode representar um custo enorme aos ecossistemas e à sociedade, mas traz em si também um potencial igualmente importante para mitigar as externalidades (MAIZIA, SEZE, *et al.*, 2009) (STEEMERS, 2003). É portanto, no contexto dessa relação de causa e efeito que buscaremos construir o conhecimento necessário, para que haja uma contribuição efetiva de parte da pesquisa de tese.

A morfologia urbana e a implantação das construções no tecido urbano são os principais fatores que afetam a acessibilidade aos ventos, insolação, e à luz do dia nos espaços urbanos. A integração dos parâmetros de disponibilidade solar na morfogênese urbana, por exemplo, pode ser encontrada tanto em práticas da arquitetura vernácula, como em pesquisas mais recentes sobre o direito de acesso à insolação direta (RAPOPORT, 1969); (MORELLO e RATTI, 2009). O controle ou o acesso ao sol e à luz do dia sempre foram um dos principais definidores da forma urbana e arquitetônica nos diversos assentamentos humanos. As construções vernáculas mostram o interesse de conceber espaços que se adequavam as características do sítio climático, empregando de modo bastante eficaz os recursos naturais disponíveis (RAPOPORT, 1969). Um exemplo disso é a forma como os índios americanos Pueblos seguiam regras de acesso à insolação para construir as suas aldeias: as casas eram expostas ao sul (insolação de inverno do hemisfério norte) a fim de captar a energia gratuita do sol para aquecer-se durante o inverno, enquanto suas coberturas se prolongavam protegendo-os da intensa radiação solar direta, durante o período de extremo calor do verão (KNOWLES, 1981). Vários regulamentos urbanos também já contêm regras ligadas ao acesso solar. Por exemplo, na França, após a segunda guerra mundial, uma regra inspirada na Carta de

Atenas, permitiu associar a relação do prospecto médio[4] ao modelo de construção daquela época. Essa regra determinava que a altura do edifício não deveria ser maior que a largura da rua. A "Cité Radieuse" ("a cidade radiante"), assim como outras idealizações para a cidade moderna de Le Corbusier e seus contemporâneos do Congresso Internacional da Arquitetura Moderna (CIAM), foi planejada em busca de uma relação ótima desse prospecto para um traçado urbano alinhado, de modo a permitir uma maior incidência de luz natural, incorporando portanto, a lógica do projeto solar (CORBUSIER, 1933). Cerdà desenvolveu o conceito de cidade compacta e o aplicou à extensão de Barcelona, neste considerou as condições adequadas de luz natural nas fachadas e nos pátios localizados no interior das suas quadras urbanas (CURRELI e COCH, 2010). A problemática da inter-relação das formas construídas e suas superfícies com a insolação nas cidades é tratada em detalhe no Capítulo I.

Convém ser observado que a dicotomia encontrada entre a edificação e seu sítio de implantação, deve-se muita vezes à omissão de alguns planejadores urbanos no tocante à observação da eclíptica solar, o ângulo disponível de visão do céu, e os ventos predominantes. Em uma perspectiva de desenvolvimento urbano sustentável, torna-se imprescindível a reintegração no processo de projeto e concepção dos espaços, de regras que vinculem a morfologia urbana (e.g. gabarito, compacidade/fator de forma, contigüidade, largura de rua, etc.) à sua capacidade de adaptação e controle climático, a fim de reduzir a demanda energética dos edifícios e minimizar o seu impacto nocivo ao microclima urbano.

Assim como para atender a uma menor demanda energética do setor de transporte urbano, estudos recentes apontam que a adoção de altas densidades nas cidades deve ser uma das principais estratégias de planejamento urbano a fim de responder à eficiência e redução do consumo de energia nas construções (CHEN, JIA e LAU, 2008)(ROGERS, 2000) (SALAT, 2011). Salat (2011) mostra, por exemplo, que o consumo relacionado, principalmente ao conforto térmico (mantido por sistemas de condicionamento artificial) pode ser quatro vezes menor para o tecido urbano denso das cidades européias que para as novas cidades na China ou na América, compostas de torres isoladas. Maizia, Séze *et al*. (2009) e Steemers (2003) defendem que formas urbanas mais compactas reduziriam significativamente o consumo de energia das edificações e também dos transportes, este devido à redução das distâncias dos deslocamentos urbanos. Hui (2001) aponta também para reduções nos gastos com ar-condicionado quando os edifícios são mais compactos (menor coeficiente de forma[5]). ou seja, quanto menos superfícies expostas ao exterior, menores serão as perdas térmicas.

No entanto, paradoxalmente, esta estratégia pode limitar a disponibilidade de ventilação e iluminação natural para os espaços interiores, bem como o potencial de uso de energias renováveis nos edifícios, a exemplo do aproveitamento do recurso solar, que dependerá de fatores tais como, o fator de sombra, o fator de visão do céu e do sol, que em meios urbanos muito adensados podem apresentar-se como importantes restrições. Isso aponta para a necessidade de se questionar o paradigma da densidade e da forma urbana quando se parte de uma perspectiva multidisciplinar e em escala urbana local.

Morfologia urbana e energia produzida e distribuída nas cidades

A energia é utilizada na cidade sob várias formas: *energia operacional* usada (por exemplo, para resfriamento, aquecimento e iluminação do edifício), *processamento de energia* (usada na fabricação de bens ou serviços), e *energia de transporte* (usada em deslocamentos/viagens urbanas). Focamos

[4] O prospecto médio corresponde à relação entre a altura construída dos edifícios e a distância que os separa (ADOLPHE et al., 2002).

[5] A compacidade ou *coeficiente de forma* indicam a relação entre a superfície de envelope de um edifício que realiza trocas com o espaço exterior e o seu volume. A compacidade está relacionada à forma do edifício e seu nível de contiguidade com os edifícios vizinhos (verticalmente e horizontalmente). Essas definições são abordadas em maiores detalhes no Capítulo 2 e no Glossário do manuscrito.

nesse trabalho as considerações relacionadas da energia operacional com a morfologia urbana. Conforme já indicado, as edificações são responsáveis por uma grande parcela da demanda energética em áreas urbanas, bem como pelo impacto ambiental e social originado por esta. Além de medidas de conservação e redução da demanda, outra oportunidade na tentativa de resolução desse desafio, pode-se dar pelo uso de fontes renováveis de energia para produção de eletricidade localmente nas cidades.

Um relatório publicado pela Agência Internacional de Energia destaca que a concepção urbana é um fator chave na integração das energias renováveis na cidade (IEA, 2009). No entanto, o critério de otimização da geração dessas energias é dificilmente considerado no planejamento e na concepção urbana (VETTORATO, GENELETTI e ZAMBELLI, 2011). De fato, os planejadores urbanos baseiam-se, muitas vezes, no simples alinhamento das ruas existentes do que na rosa dos ventos e na eclíptica solar quando da fixação de parâmetros regulamentares (BUTERA, 2008). Além disso, poucos são os estudos que tratam de diretrizes para concepção da morfologia urbana sob o enfoque duplo: de redução da demanda e da avaliação do potencial para produção de energia.

Entre as principais fontes renováveis, a energia solar é um dos recursos mais amplamente disponíveis para a geração térmica e elétrica. Em algumas regiões da Terra com maior abundância e regularidade que outras. A exploração do potencial eólico para geração descentralizada de eletricidade nas cidades tem sido abordada por alguns autores (WANG, 2013) (CAMPOS-ARRIAGA, 2009) (BLOCKEN, JANSSEN e HOOFF, 2012). No entanto, no meio urbano face à sua diversidade, o aproveitamento da energia eólica revela-se de menor potencial que o solar. Assim, a presente pesquisa aprofundará a sua investigação no recurso solar. Todavia, a radiação solar interage também de modo complexo com a morfologia urbana e os edifícios, e carece de uma análise criteriosa para a sua utilização para geração elétrica no meio urbano.

A energia solar que incide na morfologia da cidade é recebida pelas fachadas e cobertas das edificações e pode ser utilizada para a produção de eletricidade, a partir do emprego de painéis fotovoltaicos ou através de coletores solares para o aquecimento de água para os domicílios. A implantação das edificações é um fator-chave na viabilidade da captação solar. Edificações elevadas podem parcial ou totalmente bloquear a incidência da radiação solar nas edificações próximas devido às obstruções que produzem e/ou as sombras que projetam.

Do ponto de vista das potencialidades de geração de energia, via conversão solar, uma morfologia de elevada densidade vertical está ainda sujeita ao denominado “paradoxo da superfície” associado à redução da área de aproveitamento da energia solar por metro quadrado habitado, em função da altura da construção (coeficiente de aproveitamento). Nesse sentido, em regiões de clima quente, um dos problemas intrínsecos de qualquer construção provém de duas estratégias contraditórias: (i) reduzir o fator de forma ou reduzir a superfície de envelope exposta à radiação solar direta, a fim de minimizar os ganhos térmicos, e (ii) aumentar a superfície de captação solar do prédio. Um edifício habitacional ou comercial (comumente encontrado nas cidades brasileiras), seja de quatro ou trinta pavimentos, terá sempre uma mesma área de superfície de coberta, para instalação dos painéis fotovoltaicos e nela caberá um número similar de painéis fotovoltaicos. Em alguns casos, quando existe a imposição de recuos compensatórios, essa superfície pode ser ainda menor. De modo que a partir de uma determinada altura, a superfície disponível pode não ser mais suficiente para atender ou compensar à demanda de eletricidade do prédio.

Assim, como resolver esta questão de modo a conseguir uma adequação entre a demanda e a geração de energia via solar?. Qual é neste caso, o papel da morfologia construída na escala urbana? .Qual será a solução de compromisso mais adequada para responder a esse paradoxo nas cidades? Essas são algumas das questões suscitadas para as quais essa pesquisa buscará subsídios para uma resposta.

Embora essa problemática já faça parte das prioridades no âmbito do desenvolvimento urbano dos países desenvolvidos, segundo Vettorato, Geneletti e Zambelli (2011), a produção de energia renovável descentralizada em cidades ainda é pouco abordada no planejamento e projeto/desenho urbano. Em países em desenvolvimento e de condições climáticas extremamente favoráveis, como o Brasil, apesar do enorme potencial solar, essa inserção ainda não é prioritária e esbarra em conflitos de interesses, entre outras questões que se distanciam da problemática do trabalho. No âmbito das pesquisas brasileiras, poucos avanços no sentido de explorar o potencial da forma urbana em reduzir o consumo energético ou em otimizar a produção de energia renovável podem ser encontrados.

Já no âmbito internacional, numerosos trabalhos científicos apresentados, principalmente na última década, sobre a tipo-morfologia urbana, permitiram tirar algumas conclusões sobre o impacto da forma urbana na energia consumida (ARANTES, 2012) (BOYEUR, 2009) (RATTI, BAKER e STEEMERS, 2005) (STEEMERS, 2003) e produzida (KAMPF, 2009) (MONTAVON, 2010). Estes trabalhos mostram que uma cidade densamente construída com edifícios de reduzido fator de forma e construídos com materiais mais adaptados ao clima, podem apresentar bom desempenho energético para contextos de clima temperado. No entanto, poucos são os estudos que enfocam simultaneamente as duas abordagens (potencial de oferta e demanda). Como será visto no próximo capítulo, essa discussão coloca em questão entre outros fatores, o paradigma da densidade urbana. A fim de aprofundar essa abordagem, o presente trabalho irá a seguir tratar dos principais fatores que definem o potencial da forma urbana para otimização do controle e da produção de energia via solar, em clima tropical úmido no Brasil.

A mudança de paradigma energético, em que a cidade, além de consumidora, passa a ser também produtora de energia, também requer que seja questionado um outro modelo de base: o da distribuição dessa energia gerada.

Na maioria dos casos, como ocorre no Brasil, a distribuição de energia elétrica é essencialmente centralizada, ou seja, gerada na escala regional ou nacional e distribuída por meio de uma rede que cobre grande parte do seu território. E, como mencionado anteriormente, muitas restrições são impostas a esse modelo, como o grande desperdício em linhas de transmissão[6] e outros impactos em larga escala. Estima-se que no Brasil as perdas de energia elétrica globais estejam num patamar de cerca de 16%, conforme dados da ANEEL de 2007. Bulhões (BULHÕES, 2011) estima ainda que essas perdas, no ano de 2005 (em torno de 15%) representaram um custo de mais de R$ 2 bilhões em perdas técnicas (perdas em linha de transmissão)[7]. Outrossim, no final de agosto de 2013 houve uma grande queda de energia elétrica na Região Nordeste que, devido à uma queimada, afetou nove estados e teve custo para a economia nacional da ordem de R$ 20 bilhões.

Se considerarmos a emergência de um novo segmento energético, onde a energia é também produzida localmente a partir do crescimento do uso de outras energias renováveis (fotovoltaica, eólica, biomassa etc.), o modelo de rede também deve ser revisto.

Nesse sentido, um novo modelo de rede elétrica tem sido proposto, o da microgeração. As microredes preconizam a descentralização energética que designa a geração de eletricidade ou de calor nas proximidades dos pontos de consumo. Essa geração pode ser não-renovável ou renovável e pode existir em várias escalas, desde equipamentos para uma edificação individual até uma usina que alimenta um ou vários distritos de uma cidade. As microredes possuem como função, portanto,

[6] Constituem a quantidade de energia elétrica dissipada entre os suprimentos de energia da distribuidora e os pontos de entrega nas instalações das unidades consumidoras ou distribuidoras supridas.

[7] Para cálculo das perdas no setor brasileiro leva-se em conta comumente o preço de aquisição de energia pelas distribuidoras, que em 2005 foi de R$ 80,01/MWh.

ligar essa produção de energia descentralizada aos consumidores locais. Entre as grandes vantagens desse modelo estão a reduzida perda na distribuição e também a atuação no sentido de uma maior conscientização da população sobre os processos energéticos (geração, distribuição e consumo) e seus impactos (COUTARD e RITHERFORD, 2009) (SOUAMI, 2009).

No entanto, para que seja viável, esta deve ser necessariamente associada à dispositivos de armazenamento de energia permitindo responder à intermitência de diferentes modos de produção e a intermitência de consumo. Os meios de armazenamento de energia existentes ou em desenvolvimento são diversos (acumuladores eletroquímicos, sistemas hidráulicos, sistemas inerciais, estocagem química etc.), porém não foram ainda suficientemente difundidos (BONHOMME, 2013).

A existência da microrede, entretanto, não significa o fim da rede convencional centralizada. Nesse sentido, estudos recentes apontam para um forte potencial de cogeração em redes inteligentes[8]. O termo vem do inglês "smart grids" e trata-se de uma rede de distribuição de energia caracterizado por um fluxo bidirecional de eletricidade e de informações. A rede inteligente deve ser capaz de controlar e comandar instalações de produção, armazenamento e utilização de energia. Dessa forma, esta pode permitir a obtenção de informações sobre o consumo dos particulares, empresas e administrações públicas e otimizar os sistemas de produção e armazenamento.

No entanto, para que esse modelo de distribuição possa ser efetivamente revisto no âmbito da produção localizada de energia solar, será necessário que o ordenamento urbano das estruturas construídas da cidade também antecipe tal inserção.

Uma das grandes desvantagens desse novo modelo consiste ainda no custo que representa para implantá-lo, algo que atinge a casa da dezena de bilhões de reais (CARVALHO, 2014). Mas se contraposto ao custo das perdas mencionadas precedentemente, essa tecnologia se pagaria de maneira relativamente rápida. Outrossim, os benefícios das microredes inteligentes também estão relacionados à rentabilidade do mercado de energia, pois os chamados "gatos" de luz seriam controlados. Com as redes inteligentes e as informações adequadas seria possível verificar todo foco de desvio. Em Israel, por exemplo, o uso de redes inteligentes reduziu em 50% a fraude de energia elétrica em Jerusalém Oriental. É um exemplo real do que essa tecnologia pode proporcionar, alinhada a informações confiáveis, no sentido de contribuir para uma gestão mais eficaz na distribuição de energia e melhor desempenho do sistema (CARVALHO, 2014).

A energia solar nos trópicos: do controle ao potencial de conversão solar térmica e fotovoltaica

Em regiões de clima tropical, a energia solar apresenta um enorme potencial de utilização. Além dos ganhos de luz natural, esta energia constitui-se como um importante recurso renovável para a produção de energia térmica e elétrica (fotovoltaica).

A captação/conversão da energia solar nas edificações (principalmente coberturas) é muito promissora nessas regiões, dada a abundância do recurso solar e sua temporalidade consistente com a demanda de energia, já que os picos de consumo de eletricidade, muitas vezes impulsionados por cargas de ar condicionado, ocorrem durante o dia, quando o potencial de oferta é máximo.

A Figura 8 indica que os maiores níveis de insolação são recebidos na zona intertropical, que apresenta valores ligeiramente mais elevados do que na zona equatorial, com mais nuvens. Os valores da irradiação diminuem em direção aos pólos, atingindo seu mínimo em torno das latitudes de 70 – 80˚N e de 60 – 70˚S. Esse mapa pode ser contrastado ao primeiro mapa da metropolização galopante o qual associamos ao crescente consumo de energia. De modo que, em uma breve análise, pode-se dizer que apesar da urbanização rápida, intensa e muitas vezes predatória, as cidades

[8] Ver glossário.

situadas em regiões tropicais possuem um enorme potencial de evolução e desenvolvimento a partir da exploração estratégica de recursos naturais abundantes, como a energia solar.

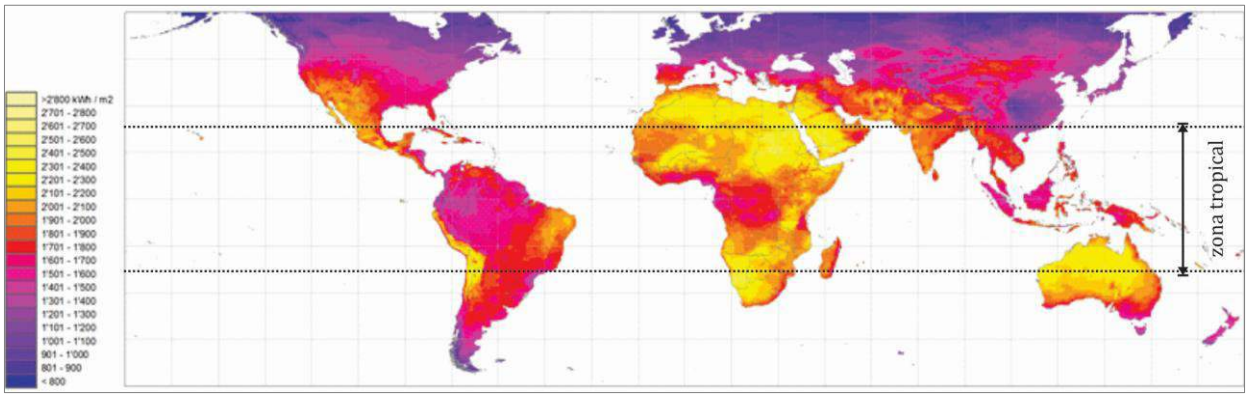


Figura 8 : distribuição da irradiação global direta nas diferentes regiões do mundo. Fonte: Meteonorm 7.0 (2012).

Os mapas abaixo indicam mais em detalhes as médias anuais do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro e o número de horas de insolação, respectivamente (Figura 9). Pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país. O valor máximo de irradiação global – 7,0 kWh/m².dia (ou 2555 kWh/m².ano) - ocorre no norte do estado da Bahia. A menor irradiação solar global (5,0 kWh/m².dia ou 1825 kWh/m².ano) ocorre no litoral da região Sul do País. A título de ilustração e comparação, é possível constatar que os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (1825 - 2550 kWh/m².ano) são superiores aos da maioria dos países da União Européia, como Alemanha (900 - 1250 kWh/m²), França (900 - 1650kWh/m²) e Espanha (1200 - 1850 kWh/m²), onde projetos de energia solar, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados. Se compararmos com os dados da figura acima, verifica-se que o nível de irradiação da região mais ensolarada da Alemanha é em torno de 30% menor que na região menos ensolarada do Brasil.

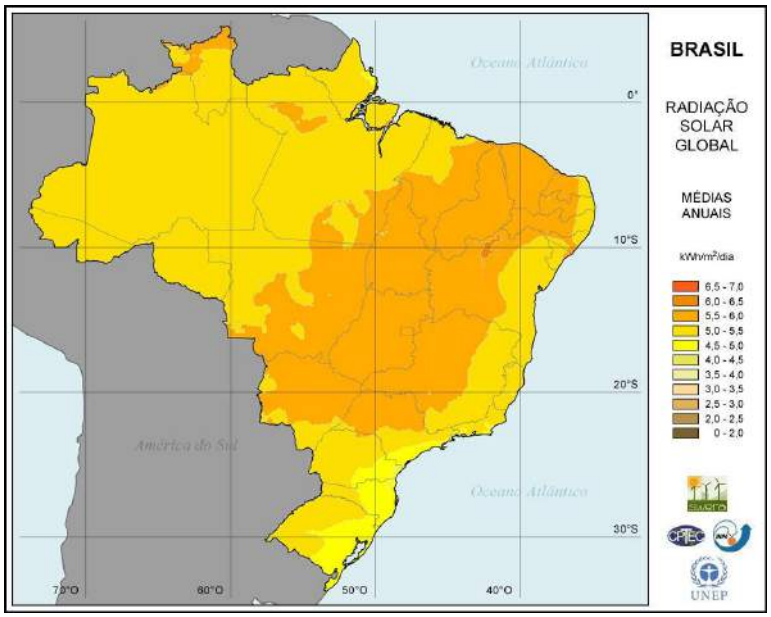


Figura 9 : distribuição da irradiação global direta nos diferentes estados do Brasil. Fonte: CPTEC/INPE/SWERA (2010).

Apesar da relevante abundância em termos de potencial solar, nessas regiões, os ganhos térmicos provindos da energia solar diária incidente na edificação podem também produzir condições bastante indesejáveis em termos de conforto térmico no interior dos edifícios. Assim, passa a ser indispensável, além de identificar a disponibilidade do recurso solar em meio urbano, discutir quais estratégias (de adaptação) são mais adequadas para cada tipologia existente, a fim de encontrar o melhor compromisso entre potencial de demanda x energia potencialmente produzida, para dado um contexto climático.

Outrossim, visto que o processo de crescente adensamento do solo urbano e verticalização produzem um impacto importante no resultado do balanço de radiação solar, sobretudo nas envoltórias dos edifícios, faz-se necessário, portanto, caracterizar a magnitude desse impacto em função dos principais parâmetros morfológicos e climáticos urbanos, na procura de soluções apropriadas que respondam às conflituosas exigências microclimáticas em regiões de clima tropical.

Para aprofundar e ilustrar a aplicação da metodologia desse trabalho em clima tropical no Brasil, a cidade de Maceió, situada no estado de Alagoas (nordeste do Brasil) foi escolhida (destacada no mapa da Figura 9). Maceió é um exemplo importante onde se caracteriza uma urbanização e verticalização intensa do seu território que ainda está muito pouco consolidado, ou seja apresenta-se com elevado potencial de evolução urbana de sua morfologia construída. Além disso, Maceió encontra-se em região tropical de baixa latitude, onde a abundância de energia solar está também associada à sua regularidade, o que aponta para a região um grande potencial de aproveitamento e conversão desta energia renovável. A cidade de Maceió como estudo de caso urbano e climático dessa pesquisa é descrita e discutida em mais detalhes nos Capítulos I e II.

Modelagem urbana e o processo de projeto por otimização

Frente à problemática energética enunciada, os condicionantes solares de projeto na escala urbana em clima tropical podem refletir em estratégias morfológicas bastante conflituosas para o desenvolvimento da forma urbana. Faz-se necessário que os diferentes critérios energéticos sejam, portanto, confrontados aos parâmetros mais relevantes da morfologia da cidade.

Mais quais seriam esses fatores mais relevantes ao olhar dos condicionantes solares em um contexto climático específico?

Qual o modelo de densidade seria mais apropriado para uma dada cidade, no sentido de resolver o pertinente conflito energético entre demanda e oferta?

Como antecipar essa demanda potencial e o potencial de oferta e, quais ferramentas utilizar para apreender a forma da cidade de hoje e tentar antecipar a de amanhã?

A fim de conduzir a complexidade inerente à essas questões, os projetistas/planejadores e os gestores da cidade necessitam de diretrizes, de metodologias, instrumentos de representação e de avaliação para compreender os fenômenos em curso, comparar cenários possíveis ou prováveis, para fazer escolhas, e enfim, poder agir. A modelagem urbana que busca integrar enfoques sistemáticos e interdisciplinares é uma abordagem que visa dar respostas à gestão desta complexidade e dessas incertezas.

Para responder aos cenários de importantes tendências sobre o crescimento urbano e de demanda energética, o uso da modelagem computacional torna-se, assim, indispensável tanto à pesquisa quanto à prática profissional.

Desde os anos 1970 assiste-se a uma proliferação dos instrumentos de cálculos e auxílio à concepção das edificações, desenvolvidos inicialmente por laboratórios de pesquisa especializados na física da construção. A modelagem computacional dos espaços construídos tornou-se algo incontornável no processo de concepção, ao permitir estudar e simular o comportamento de um

sistema (aqui, uma ou mais edificações) num contexto preciso, pelo cálculo de modelos físicos. Para além da compreensão dos fenômenos correntes e a previsão do comportamento de uma edificação, a modelagem contribui para a otimização dos seus consumos, possibilitando testar e prever desempenhos de novos dispositivos, novas formas, novos materiais (GICQUEL, 1992). Atualmente, os profissionais da construção dispõem de uma ampla paleta de instrumentos de simulação que tratam de questões ligadas à térmica e energética, mas também do conforto acústico e luminoso, ou ainda do impacto ambiental da construção. A maior parte destes instrumentos foi inventariada pelo Departamento Americano da Energia, de Eficiência Energética e Energias Renováveis (EERE, 2008).

Variados são, portanto, os modelos existentes que permitem estimar a demanda energética das edificações, principalmente daquelas implantadas isoladamente, mas raros são os trabalhos que tentaram convocar um conjunto de conflituosos critérios para responder, na escala urbana local, à problemática energética na cidade.

Para elaborar cenários que antecipem o comportamento dos espaços construídos, uma dificuldade importante ainda se impõe: como representar a cidade e simular os cenários possíveis/prováveis, tendo-se em conta múltiplos critérios e múltiplas variáveis? Quais cenários examinar? Como identificar quais cenários são os mais representativos dentro de um conjunto de possibilidades, e qual cenário é o mais adequado?

O espaço paramétrico de busca, em se tratando de espaços construídos em escala urbana, pode ser bastante amplo e a probabilidade de encontrar uma ou mais soluções que respondam adequadamente em compromisso com mais de um objetivo/critério de interesse simultaneamente, por meio de tentativa e erro (e sem viés), é extremamente limitada. A mesma densidade urbana de um distrito pode ser pensada ou remodelada para diferentes alturas, profundidades e vazios. Mas, diferentes soluções alternativas esbarram em diversos compromissos entre ganhos solares, sombreamentos, ganhos de luz solar e potencial energético. O processo de projeto dado por métodos convencionais pode ser extremamente difícil, em função da complexidade e quantidade de abordagens integradas.

Torna-se, portanto, bastante pertinente o uso de técnicas provenientes de outras disciplinas, como a matemática aplicada ou a pesquisa operacional, que podem ser integradas como método de busca paramétrica racional no processo de concepção da forma construída, a exemplo dos diversos tipos de algoritmos matemáticos que podem ser associados às ferramentas de projeto. Uma discussão mais detalhada sobre essas técnicas matemáticas aplicadas ao processo de projeto será apresentada no Capítulo III desse manuscrito.

Metodologias multidisciplinares de otimização podem se apresentar como abordagens efetivas para gerar novas experiências, novos conhecimentos que permitam responder às problemáticas conflituosas atuais e também suscitar outras formas (talvez ainda não vislumbradas por métodos convencionais) para atingir ao objetivo.

Por meio do uso de alguns algoritmos, é possível para as medidas de eficiência encontrar um máximo ou mínimo de uma função que dependa de *n* variáveis de decisão de projeto. No nosso caso, o espaço paramétrico é definido pela caracterização morfológica (e.g. rugosidade, densidade, verticalidade, fator de forma etc.); propriedade radiativa de reflexão solar (albedo) das tipologias urbanas. Enquanto a medida de eficiência que se procura reside em achar seu máximo ou mínimo do nível de irradiação nas superfícies, urbanas, garantindo condições adequadas de iluminância nas fachadas.

Essa técnica apresenta-se, portanto, como oportunidade particularmente interessante no contexto de estudo prospectivo onde se busca explorar cenários futuros contrastados e inéditos.

Hipóteses

A partir da problemática explicitada e das principais questões suscitadas, quatro hipóteses principais podem ser formuladas:

Hipótese 1: a forma e a implantação dos edifícios na escala urbana local podem alterar consideravelmente o potencial de energia solar a ser aproveitado.

Recentemente muitos avanços têm sido realizados sobre a eficiência energética voltada para a prática em Arquitetura. No entanto, muitas dessas iniciativas apontam soluções que favorecem o uso racional de energia em edifícios individualmente, mas sem questionar o impacto desses edifícios na escala da cidade tampouco da influência da forma urbana no desempenho dessas construções.

Em contrapartida a essa tradicional abordagem "centrípeta" do edifício "verde" que se baseia na qualidade e eficiência de um edifício isolado em um determinado ambiente ou bairro, acredita-se que uma visão "centrífuga" dos edifícios, ou seja, como estes edifícios ou o conjunto desses modificam e se integram ao seu entorno e sua vizinhança, seja necessária para promoção de maior eficiência energética nas cidades. Num contexto de mudanças ambientais globais, uma abordagem mais aberta que a do edifício individual, com foco na ampla adaptação das cidades torna-se indispensável, a fim de reduzir a sua vulnerabilidade, seus impactos econômicos, ecológicos e sociais (ESCOURROU, 1991). Neste contexto, as interconexões entre um edifício e a infra-estrutura ao redor são cada vez mais reconhecidas como aspectos inevitáveis na abordagem de um edifício mais sustentável (BERARDI, 2013).

As questões energéticas sobre a economia de energia em edifícios e a capacidade destes em promover localmente energia de uma fonte renovável tornam-se também elementos importantes no planejamento urbano na escala da vizinhança e da quadra urbana.

Desta forma, considera-se que os aspectos que definem a forma e a implantação dos edifícios na escala urbana local representam uma influência determinante no potencial solar destes em produzir energia (elétrica, térmica e iluminação natural), bem como, um impacto importante na demanda de energia atribuída aos ganhos solares, em regiões de clima tropical.

Hipótese 2: sistemas simplificados de atributos morfológicos do tecido urbano permitem identificar tipologias construídas, auxiliar no estudo do desempenho energético solar das mesmas e indicar tendências para o desenvolvimento das cidades.

A definição criteriosa de tipologias urbanas de referência, a partir do uso de um conjunto de atributos espaciais e morfológicos que caracterizam forma, implantação e densidade construída, permite inferir sobre a representatividade da forma urbana, auxiliar no estudo qualitativo e quantitativo do potencial solar de diferentes formas urbanas e ser empregado como instrumento que permite medir, regular e avaliar tendências de evolução da morfologia construída das cidades.

Hipótese 3: uma abordagem metodológica pluridisciplinar ancorada em métodos de projeto por otimização matemática possibilita explorar e gerar diferentes soluções de compromisso em problemas multicritério de concepção urbana.

O emprego de ferramentas emprestadas de outras disciplinas, a exemplo de métodos clássicos de otimização, pode auxiliar no estudo paramétrico dos aspectos que definem a morfologia urbana construída, contribuindo para a proposição de soluções de adaptação de tipologias existentes. Outrossim, esta metodologia pode ainda auxiliar na proposição de indicadores de auxílio à decisão de modo à contribuir tanto para um embasamento de parâmetros impostos por códigos de urbanismo quanto para medidas pontuais de intervenção urbana.

Como alternativa à metodologia convencional de projeto (por tentativa e erro) e aos métodos discretos da abordagem de auxílio à decisão multicritério (por ponderação e *ranking*), é possível adotar técnicas de otimização capazes de minimizar a subjetividade do processo e a dependência da repetição de ciclos de avaliação de desempenho. Essa estratégia permite ao projetista avaliar diversas configurações de modelos de forma automática e direcionada, auxiliando-o na análise e no entendimento do comportamento, como no caso desse trabalho que trata do balanço de energia radiativa, permitindo ainda verificar a grandeza da influência das diversas variáveis envolvidas.

A partir do emprego de métodos não-convencionais de projeto, servindo-se dos conceitos e técnicas desenvolvidas em outros domínios disciplinares, como a matemática aplicada e a pesquisa operacional, é possível obter-se, como resposta à problemática energética das cidades, oportunidades diversificadas de desenho urbano e ainda não vislumbradas por meio de técnicas tradicionais.

Hipótese 4: *a otimização da forma urbana a partir de objetivos energéticos antagônicos permitem gerar oportunidades de diversificar a densidade urbana construída e, por consequência, o desenho urbano*

A consideração de condicionantes solares para renovação e concepção de formas urbanas energeticamente eficientes, tendo em vista a busca por soluções que representam um compromisso entre a redução da demanda e aumento da oferta de energia na escala da quadra urbana, é uma oportunidade de propor maior diversidade na densidade (mais racionalizada ou energeticamente racionalizada) e na morfologia construída das cidades.

Objetivos

A presente pesquisa é uma contribuição prospectiva para requalificação e concepção urbana de cidades a partir de uma abordagem energética, com foco na forma construída da quadra urbana em clima tropical no Brasil.

O trabalho tem o objetivo geral de realizar um estudo prospectivo sobre o potencial de aproveitamento racional da energia solar em tipologias urbanas de referência de uma cidade de clima tropical no Brasil, Maceió(AL).

O estudo visa atender a quatro principais **objetivos específicos**:

- Identificar e classificar as tipologias urbanas mais representativas do tecido urbano da cidade de Maceió (AL).

- Estabelecer para as tipologias identificadas o balanço radiativo das mesmas analisando o aproveitamento da energia solar (térmica e fotovoltaica), potencial de luz natural e de redução da carga térmica nas fachadas das envoltórias das edificações.

- Realizar um estudo de sensibilidade relativo aos principais fatores tipo-morfológicos urbanos no balanço de radiação e iluminância nas envoltórias.

- Realizar um estudo prospectivo sobre possíveis tipologias urbanas, com base naquelas encontradas em Maceió visando o aproveitamento da energia solar pelas cobertas das envoltórias e a redução do aporte solar nas fachadas das edificações.

- desenvolver uma abordagem de planejamento para requalificação e concepção urbana, na escala local e escala da quadra, favorecendo o potencial de redução da demanda e potencial de oferta de energia para as edificações urbanas.

Etapas metodológicas

A fim de testar as hipóteses assumidas e responder aos objetivos propostos, essa pesquisa apoiou-se numa abordagem interdisciplinar onde diferentes modelos de análise foram convocados e associados. Esses modelos foram escolhidos e empregados em função da natureza do objeto de estudo e do objetivo específico assinalado. O método desse trabalho pode ser descrito em três etapas principais:

Primeira etapa

Num primeiro momento, uma revisão de literatura sobre os condicionantes solares da forma construída é realizada a fim de identificar os principais indicadores e parâmetros descritivos da morfologia urbana que apresentam impacto significativo e indicação de tendências importantes sobre o desempenho das construções.

A partir de um conjunto inicial de indicadores do desempenho climático da morfologia urbana, um estudo da forma urbana é realizado para Maceió a fim de identificar as tipologias urbanas representativas da malha urbana da cidade. A partir de um modelo Sistema de Informação Geográfica (SIG), os dados vetoriais urbanos da cidade são inseridos em uma malha de análise (500 m x 500 m de resolução – escala da vizinhança) onde são calculados automaticamente o conjunto de atributos morfológicos (entre outros: verticalidade, prospecto médio, taxa de ocupação, compacidade/fator de forma, contiguidade, coeficiente de aproveitamento, rugosidade, etc.). As tipologias urbanas existentes são estatisticamente classificadas (Análise de Componentes Principais e Análise de agrupamento) segundo a predominância de suas características tipo-morfológicas.

As tipologias de referência identificadas são avaliadas em relação as irradiações (de onda curta e de onda longa) e iluminância em suas envoltórias, a partir do uso de um algoritmo simplificado de radiosidade (SRA) no programa Citysim (ROBINSON, 2011). Para isso, o modelo físico considera a totalidade dos fenômenos implicados no balanço radiativo em meio urbano: a irradiação solar direta e os efeitos de obstrução dos edifícios, a anisotropia da radiação difusa, as interreflexões da radiação solar entre os edifícios e o solo urbano, bem como, as trocas radiativas no infravermelho (Figura 10).

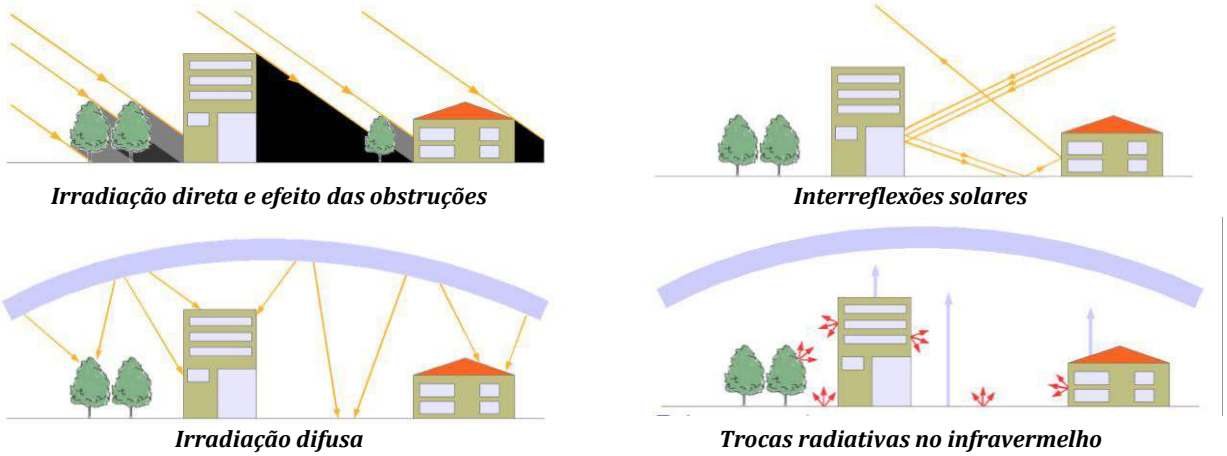


Figura 10: fenômenos radiativos considerados no modelo de análise utilizado no método do trabalho.

Segunda etapa

Os atributos morfológicos inicialmente utilizados são avaliados por meio de uma análise estatística de sensibilidade através de um método fatorial de planejamento de experimentos. Este procedimento permite identificar a magnitude de efeito de cada fator morfológico urbano nas respostas de interesse, possibilitando hierarquizar os fatores mais relevantes da morfologia urbana que influenciam os níveis de irradiação solar e iluminação em fachadas e cobertas de edifícios - medidas de eficiência que serão consideradas no processo de otimização.

Terceira etapa

As tipologias de referência são parametrizadas e submetidas a um processo de projeto a partir do uso de um algoritmo de otimização. Automatizando o cálculo computacional, o SRA é acoplado a um algoritmo evolucionário de otimização (NSGA-II - *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) no modeFRONTIER®, programa multidisciplinar de otimização. Considera-se uma abordagem multicritério, com o objetivo de minimizar as cargas térmicas do edifício e maximizar o seu potencial para conversão solar nas cobertas. Por meio desta abordagem, busca-se alcançar simultaneamente o potencial máximo de produção de energia local e mínima demanda de energia dada aos ganhos térmicos oriundos da incidência solar, dentro de um intervalo restrito de variáveis impostas pelo código de edificações local (Figura 11).

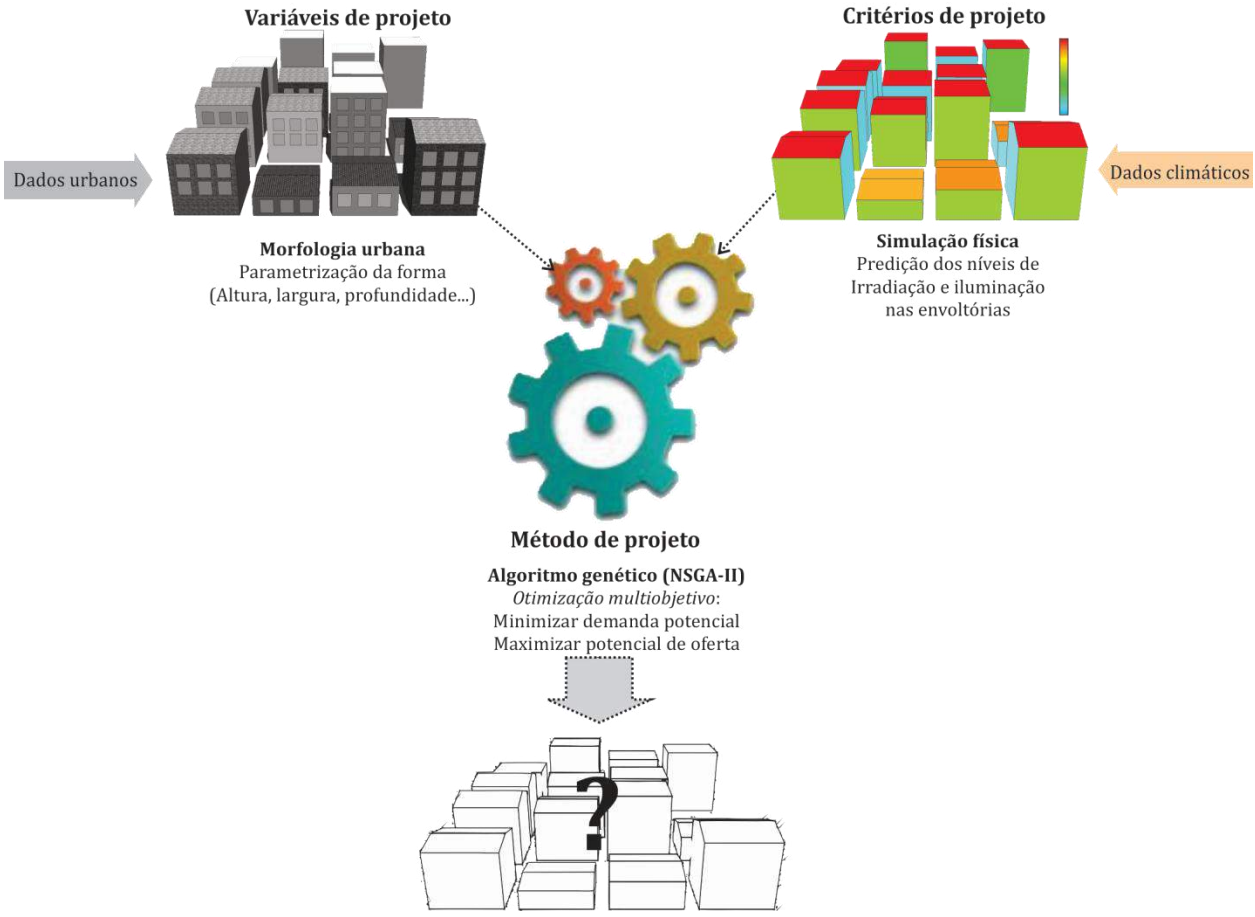


Figura 11*:* abordagem metodológica da pesquisa.

Estrutura da tese

Este manuscrito organiza-se em cinco capítulos distintos e complementares:

No *primeiro capítulo*, discute-se sobre o conjunto de condicionantes climáticos, com foco nas trocas radiativas em meio urbano e em clima tropical. Nesse âmbito, as características particulares do clima da cidade estudo de caso, Maceió, são introduzidas, a fim de estabelecer o quadro contextual da pesquisa. Nessa etapa, são também discutidos os principais modelos e métodos existentes de predição e avaliação do comportamento da radiação solar em espaços construídos. O modelo físico empregado na abordagem metodológica da tese é apresentado - Algoritmo Simplificado de Radiosidade (SRA) -, bem como suas principais hipóteses e limites. Ao fim do capítulo e a partir das revisões de literatura realizadas sobre a relação entre cidade, clima (sol) e energia, passamos dos condicionantes climáticos à definição dos parâmetros descritivos da morfologia urbana identificados como mais relevantes e responsivos à problemática energética em questão.

No *segundo capítulo*, discute-se a importância do uso do conjunto de parâmetros descritivos da morfologia urbana como um instrumento de leitura, classificação e análise do tecido urbano. A partir dos parâmetros mais significativos à temática energética considerada no estudo, levantados no primeiro capítulo, é realizada uma análise morfológica do tecido urbano de Maceió em ambiente computacional próprio a estas análises, o SIG (Sistema de Informação Geográfica). A partir de métodos estatísticos de análise do padrão de comportamento dos resultados obtidos, realizou-se uma classificação do tecido urbano em cinco tipologias de referência, conforme características morfológicas predominantes identificadas por zonas. Cada uma das cinco distintas tipologias urbanas é avaliada por meio do modelo de predição das trocas radiativas em meio urbano (o SRA).

No *terceiro capítulo*, passamos aos métodos de concepção e projeto dos espaços construídos, a fim de destacar a pertinência atual de métodos paramétricos e de otimização de projetos no sentido da consideração de múltiplos critérios para intervenção e requalificação das tipologias existentes destacadas anteriormente. Apresenta-se o estudo de sensibilidade dos parâmetros morfológicos e a inferência estatística dos resultados obtidos.

No *quarto capítulo*, o método paramétrico de projeto por otimização é descrito e aplicado. Apresentam-se os dados de entrada e saída do modelo e descreve-se o processo de modelagem e simulação. Os resultados obtidos são analisados isoladamente, e comparados, além de serem contrastados também com os resultados obtidos no segundo capítulo.

No *quinto e último capítulo* desse manuscrito, apresentamos as análises prospectivas para o desenvolvimento urbano de Maceió, a partir dos resultados obtidos no processo de projeto por otimização, bem como abordagens possíveis para o planejamento da requalificação de espaços existentes e concepção de novos espaços na escala proposta. Por fim, são apresentadas as conclusões e os desdobramentos possíveis desta pesquisa.

CAPÍTULO I
A energia solar no ambiente urbano

Objetivo geral do Capítulo I

Esse primeiro capítulo da tese dirige-se ao estudo da energia solar na origem de vários processos, desde a formação dos climas até as suas importantes implicações nos espaços construídos das cidades.

Procura-se delimitar o universo físico do problema que será objeto de modelagem: o balanço radiativo em fachadas na escala urbana. Para isso, as principais características e componentes desse balanço são descritas: os fatores que determinam a posição do sol numa dada localidade, as interações da energia solar com a atmosfera até a interceptação e interação dessa energia no interior da malha urbana.

Para tanto, faz-se necessário, primeiramente, ter uma noção de escala de ocorrência dos fenômenos (escalas espacial e temporal), bem como dos principais elementos climáticos influentes. Essa definição é importante, pois permitirá esclarecer, na modelagem proposta, determinadas hipóteses assumidas. Além disso, as trocas radiativas estão intrinsecamente relacionadas à uma série de outros processos atmosféricos concorrentes e elementos da formação do clima (e.g. nebulosidade, vento, temperatura, precipitação, etc.), que precisam ser devidamente identificados.

Apresenta-se o modelo de predição que será empregado nas análises subsequentes, as principais hipóteses simplificadoras por este assumidas, seus limites e os parâmetros considerados. Ainda nessa etapa, contextualiza-se o clima da cidade escolhida para aplicação da metodologia dessa pesquisa, destacando o comportamento dos principais elementos climáticos implicados no balanço radiativo das superfícies. Ao fim do capítulo, busca-se relacionar, para cada elemento climático pertinente, um conjunto de parâmetros descritivos da forma urbana identificados na literatura, que podem ser empregados na modelagem climática da morfologia das cidades. A estrutura do capítulo I pode ser encontrada na Figura 12.



Figura 12 : estrutura do capítulo I.

Palavras-chave: clima, energia solar, balanço radiativo, Algoritmo Simplificado de Radiosidade, Clima tropical úmido, Maceió, modelos de predição do desempenho radiativo das superfícies.

I.1. A energia solar na base dos processos e da formação dos climas

Clima (do grego *Klima*) significa inclinação e refere-se à inclinação do eixo de rotação da Terra no seu plano de translação, produzindo assim, um diversificado padrão de elementos e variações atmosféricas (BOYEUR, 2009).

Essas variações devidas ao desigual aquecimento solar da Terra, decorrentes das variações espaciais e temporal, são ocasionadas pelos movimentos terrestres de translação e de rotação com inclinação do eixo na órbita. A energia solar seria o "motor" da atmosfera, estando na origem dos desequilíbrios zonais do balanço radiativo, na criação concomitante do movimento de ar e no ciclo da água. É a partir deste conjunto de características particulares formadas por esses fenômenos, nas várias escalas, e a interação com o espaço físico que se estabelecem os diversos climas na superfície do globo.

A atmosfera tem um papel vital na manutenção da vida na Terra, pois regula os contrastes resultantes do aquecimento solar e do resfriamento radiativo da Terra para o espaço.

A superfície terrestre aquecida pelos raios solares sofre um aumento de temperatura e passa a emitir calor para a atmosfera. Mas esta energia radiante fica em parte retida na mesma devido a sua opacidade na faixa do infravermelho, constituindo o efeito estufa, que reduz os contrastes de temperatura entre a Terra e o espaço, entre o dia e noite e entre as estações. Em grande escala, a atmosfera atua também como meio de transporte e "evacuação" do excedente de calor das regiões equatoriais no sentido das regiões temperadas e polares, gerando as chamadas grandes circulações de massa de ar que definirão, em escalas menores, a distribuição e a intensidade dos ventos. Esse processo de transporte da energia ocorre pois o ar atmosférico aquecido na proximidade da superfície terrestre, torna-se mais leve que as camadas de ar superiores, deslocando-se verticalmente (origem da convecção). Devido ao movimento de rotação da terra, há o deslocamento horizontal das massas de ar aquecidas, em grande escala, de uma região à outra. Devido esta ação, o ar quente que se eleva na atmosfera, transporta ainda o vapor d'água com seu conteúdo energético (energia latente). Ao elevar-se, o ar expande-se e resfria-se até alcançar o ponto de condensação do vapor d'água e libera energia latente. Com a condensação, formam-se as nuvens (que definirão as características de nebulosidade e insolação das regiões). Enfim, entre convecção seca e úmida, a atmosfera é, portanto, capaz de transportar continuamente grandes quantidades de energia a grandes distâncias (METEOFRANCE, 2011).

Desses processos originam-se, portanto, as variabilidades climáticas regionais que classificamos conforme observação de padrões de comportamento em longos períodos. Esses padrões são registrados pela definição de uma série de elementos que são, comumente, analisados de forma integrada e/ou isolada (e.g. insolação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, nebulosidade, precipitação, etc.).

A partir da observação das ocorrências desses elementos e do uso de estatística sobre estratos de dados, em determinadas escalas, foram propostas classificações para o conjunto de determinadas ocorrências, gerando conjuntos sistematizados de informações bastante valiosas para orientar análises diversas, servindo à produção de conhecimento em variadas disciplinas, como a adaptação da construção civil aos condicionantes climáticos regionais. Nesse sentido, a classificação do clima pode ainda permitir a extrapolação de técnicas desenvolvidas em uma região para outra climática similar no globo, bem como manter as correspondências entre os parâmetros climáticos chaves. A escolha desses parâmetros variará de acordo com o campo de estudos (CABUS, 2002).

I.1.1. Escalas climáticas

A abordagem dos principais estudos na área da climatologia classifica o conjunto de fenômenos climáticos em escalas (espaciais e temporais) para os sistemas de circulação meteorológica. Convém ser observado que os vários fenômenos atmosféricos que compreendem desde as zonas planetárias até os sistemas de ventos locais, fazem parte de um único espectro contínuo dos sistemas climáticos que, muitas vezes, se sobrepõem. Apenas para viabilizar estudos específicos, justificar hipóteses e simplificações necessárias, esses sistemas são estabelecidos em escalas e em componentes (Figura 13).

Diferentes autores buscaram classificar os fenômenos climáticos conforme seus limites padrões de *tempo* e suas *dimensões espaciais* típicas (OKE, 1987) (OKE, 2006) (ARNFIELD, 2003). As escalas Micro compreendem os fenômenos com dimensão típica de 0,01m à 1km; Local, de 1km – 10km; Meso, entre 10km e 200km; e Macro, entre 100km e 100000km (OKE, 1987); (OKE, 2006).

I.1.2. Escalas temporais

O clima está sujeito a duas grandes variabilidades temporais. A variabilidade diária, causada pela rotação da terra e variabilidade sazonal, condicionada pela evolução da incidência solar ao longo do ano. As alterações nas características gerais das principais famílias de climas dependem de eventos temporais orquestrados em períodos sazonais, mas também associadas a escalas espaciais situadas abaixo de milhares de quilômetros quadrados. Dessa forma, o conceito de escala de tempo apenas faz sentido quando associado a uma escala espacial (BOYEUR, 2009).

I.1.3. Escalas espaciais

A *micro escala* aplica-se a pequenos recortes espaciais, são os fenômenos compreendidos em dimensão típica de 0,01km à 1km. Características topográficas menos acentuadas e dos ambientes em pequena escala (e.g. geometria dos edifícios, obstáculos, texturas, tipos de solos e recobrimentos, extensão superficial, etc.), modificam sensivelmente em pequenas áreas e de modo bastante notável as características gerais do fluxo de ar, da luz solar, da temperatura e da umidade (OKE, 1987). Os fenômenos nessa escala desenvolvem-se num espaço vertical que se denomina na climatologia de "camada do dossel urbano" – CDU (ou em inglês, *urban canopy layer*), que corresponde aproximadamente à altura média dos principais elementos de rugosidade, Z_H (edifícios e árvores) (Figura 14). Nessas dimensões, a temperatura do ar pode variar bastante (e.g. em função da forma e das texturas dos objetos construídos) e a circulação do ar é muito perturbada devido à presença dos edifícios como obstáculos. As características climáticas quando modificadas pela presença da cidade são discutidas no item I.2.5.

A *escala local* representa extensão típica que vai de 1 à vários quilômetros. Corresponde à escala em que estações climáticas da meteorologia são projetadas e instaladas para monitoramento. Inclui elementos da paisagem, como a topografia, mas exclui efeitos microclimáticos. Em áreas urbanas, isso pode ser traduzido como o clima de bairros com tipos similares de desenvolvimento urbano (e.g. ocupação do solo, dimensões, espaçamento entre edifícios, atividades, etc.). Pode ser caracterizada pela integração e interação de microclimas variados (OKE, 2006). Na vertical, essa escala corresponderia à chamada subcamada de rugosidade (SCR) que se estende do solo até cerca de $1{,}5Z_H$ em centros urbanos densos e até $4Z_H$ em áreas menos adensadas (GRIMMOND e OKE, 1999). Camada limite na qual é possível registrar em sua superfície, justamente, desde anomalias microclimáticas até uma mistura espacialmente uniforme representativa da escala local (OKE, 2006).

A *meso escala* refere-se à escala que compreende toda uma cidade ou uma região metropolitana, com todos os acidentes e conformações topográficas e morfológicas que a dão forma. Consiste na escala em que uma estação meteorológica não seria capaz de cobrir toda extensão

(OKE, 2006). Esta escala permite uma compreensão ampla e completa da estrutura urbana e, mesmo do entorno rural, ideal para apreensão e estudos sobre fenômenos como a ilha de calor urbano, porém não permite avaliar fenômenos climáticos ao nível do pedestre numa rua, por exemplo, tampouco efeitos radiativos produzidos pela complexidade da geometria construída no balanço radiativo de fachadas. Outrossim, não permite examinar fenômenos específicos causados pela rugosidade das edificações, nem de vegetações altas, portanto, não podem ser examinados os fluxos dos ventos locais, a temperatura do solo e umidade do ar ao nível da rua, etc., dada a amplitude de seu domínio de análise e temporalidade. Essa escala poderia ser representada por uma extensão vertical correspondente à camada limite urbana (CLU). A CLU consiste na parte mais baixa da atmosfera, que é diretamente influenciada pelas cidades, pela rugosidade geral das superfícies, pela turbulência térmica e mecânica, pela produção antrópica de calor e pelo armazenamento de calor pelas estruturas físicas urbanas. A CLU forma-se na direção do vento, envolvendo toda a estrutura da cidade ou região metropolitana, como uma redoma cuja altura depende da rugosidade da superfície e da estabilidade atmosférica.

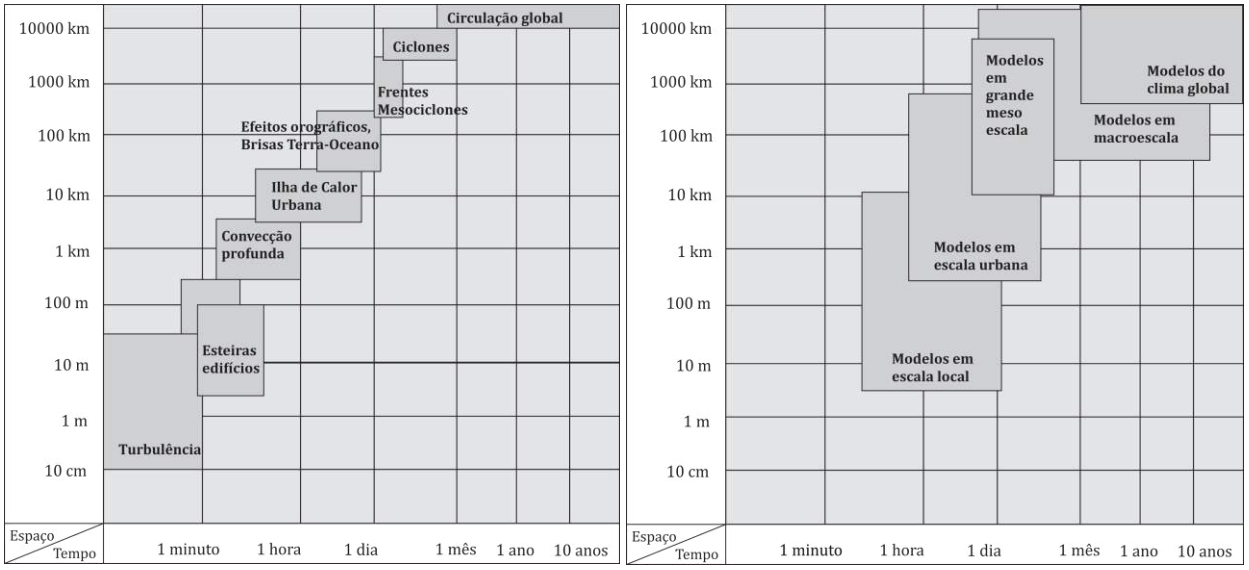


Figura 13: (a) relação tempo e escala horizontal dos fenômenos atmosféricos comuns (esquerda); (b)relação tempo e escala de diversos modelos atmosféricos. Fonte: Moussiopoulos (2003).

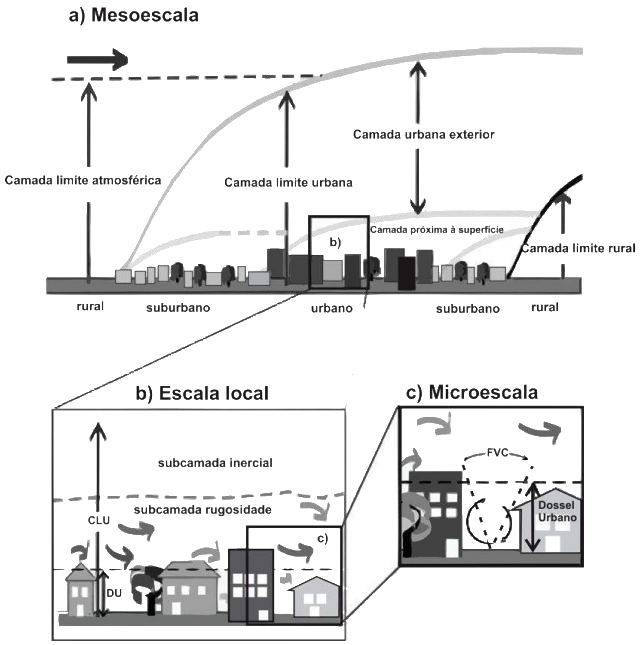


Figura 14: esquema da interrelação das principais escalas climáticas. Fonte: adaptado de Oke (2006).

Um dos principais limites ainda encontrados nas pesquisas sobre clima urbano indica ser a dificuldade de tratamento das diferentes escalas implicadas simultaneamente. Há ainda uma impossibilidade de se tratar a integração de todos os fenômenos climáticos urbanos com o mesmo grau de precisão na escala regional, urbana ou local, visto que as características de determinados fenômenos climáticos não se reproduzem da mesma maneira quando submetidas a condições morfológicas e físicas limites distintas. Trazer a influência das grandes e médias escalas para estudar o desempenho do clima local, no dossel urbano ou no comportamento energético dos edifícios consiste numa importante lacuna nas pesquisas sobre o assunto.

Trabalhos recentes, como os realizados por Bonhomme (2013) e Masson *et al*. (2012), propõem o tratamento de dados urbanos multiescalares em termos de morfologia urbana para acoplamento em modelos pluridisciplinares, inclusive modelos meteorológicos complexos para estudos prospectivos. Estes autores propõem a partir de base de dados reais, o estabelecimento de um modelo de geração automática de formas urbanas simplificadas representativas de um contexto – da mesoescala à escala do edifício. No entanto, a integração dessa base de dados a modelos meteorológicos que respondam adequadamente às sobreposições de escalas, ainda está longe de ser resolvida. Convém também ser citado o trabalho de Rasheed (2009), que propõe o acoplamento de modelos distintos em várias escalas (macro, meso e micro escala) para simular os efeitos da circulação do ar na atmosfera urbana.

Portanto, pode-se inferir com base nesse contexto, que para construir ou empregar modelos analíticos e preditivos que sejam capazes de traduzir de forma mais precisa uma determinada realidade, faz-se necessário delimitar bem os seguintes pontos: a problemática de interesse, a finalidade do estudo, o(s) contexto(s) climático(s) visado(s), os principais elementos e processos que intervêem, suas escalas e magnitudes. Dessa forma, torna-se possível assumir hipóteses razoáveis baseando-se no conjunto de fatores mais significativos e validando o modelo via medições ou comparações com outros modelos validados.

I.1.4. Definições da escala e do contexto climático da pesquisa

No âmbito da complexa problemática de redução do consumo de energia nas cidades, o presente trabalho visa pesquisar sobre a influência da forma urbana no balanço radiativo das

fachadas de seus edifícios numa situação de clima tropical úmido. Procura-se identificar a magnitude dessa influência pela avaliação climática do conjunto de parâmetros que definem essa forma urbana.

Estudar a cidade significa lidar com seu caráter heterogêneo e diverso. Para isso, faz-se necessário repartir seu tecido e identificar padrões tipológicos representativos de suas estruturas, a fim de propor medidas de intervenção pontuais e adaptadas ao contexto local[9].

A forma e implantação dos edifícios, orientação das ruas, assim como a dimensão e forma das áreas urbanas abertas, afetam principalmente, o microclima na escala do dossel urbano (GROSSO, 1998).

Para tanto, é de interesse modelar edifícios urbanos na escala microclimática de até 500m x 500m, cuja escala vertical máxima corresponde à altura média das suas edificações (Figura 15). A definição da real extensão dentro dessa escala, será discutida no capítulo II quando será apresentado o método para definição dos cenários urbanos utilizados como referência. Dentro dessa espacialidade, será ainda avaliada a influência em uma escala mais reduzida, como aquela da quadra urbana.

A escala temporal de estudo corresponde ao intervalo de 1h para um ano climático completo. Onde poderão ser observados os comportamentos: anual e sazonais dos fenômenos de interesse.

Ressalta-se que nessa escala intermediária, não é de interesse a influência das vizinhanças entre si numa escala que considere inteiramente a cidade, nem tampouco a modelagem dos detalhes do edifício. A dimensão espacial onde se circunscreve a problemática desse estudo compreende a interface entre a forma urbana (vizinhança e quadra) e sua influência sobre a envoltória do edifício.

Trabalhar nessa resolução espacial intermediária irá permitir uma compreensão da influência do fenômeno climático de interesse, e integrar duas importantes escalas de intervenção do arquiteto e urbanista (forma construída e envoltória dos edifícios). Procura-se nessa escala, trabalhar a relação intrínseca dos objetos arquitetônicos, na pesquisa de formas inovadoras e conhecimentos específicos a partir de uma abordagem multifatorial e multicritério, para elaboração de regras de concepção e implantação da forma urbana até a interface com o envelope do edifício.

A forma urbana e o envelope do edifício (como "moderador" do clima) são elementos-chave na definição do desempenho energético do edifício. A forma construída e o desempenho da fachada podem ser responsáveis por até 60% dos ganhos de calor de um edifício (TIWARI e PARIKH, 1994). O desempenho energético dos edifícios urbanos está fortemente condicionado pela sua forma e implantação no tecido urbano, sendo estas que determinarão o potencial de trocas radiativas entre os elementos construídos, definindo os ganhos térmicos e de luz natural recebidos pela envoltória, bem como o potencial de produção descentralizada de energia nas cidades.

Na escala de interesse desse trabalho, tanto espacial quanto temporal, algumas hipóteses serão, portanto, assumidas. Estas serão discutidas mais adiante, quando da apresentação do modelo preditivo empregado.

Por fim, ainda no âmbito das definições principais da pesquisa, a metodologia do trabalho será aplicada ao contexto das regiões de clima tropical úmido, conforme discutido na Introdução desse manuscrito. Para aprofundar e ilustrar essa aplicação, a cidade de Maceió, situada no estado de Alagoas (nordeste do Brasil) foi escolhida. Maceió é um exemplo importante onde se caracteriza uma urbanização e verticalização intensa do seu território ainda muito pouco consolidado, ou seja

[9] A contextualização e caracterização tipo-morfológica da aplicação nesse trabalho será apresentada no capítulo II do manuscrito.

com elevado potencial de evolução urbana de sua morfologia construída, conforme será visto em mais detalhes no Capítulo II. Além disso, Maceió encontra-se em região tropical de baixa latitude, onde a abundância de energia solar está também associada à sua regularidade, o que aponta a região como grande potencial de aproveitamento e conversão de energia renovável.

Nesse sentido, algumas das principais definições desse clima serão destacadas a seguir, a fim de discutir em que contexto específico a abordagem desse trabalho se apoiará para responder suas questões.

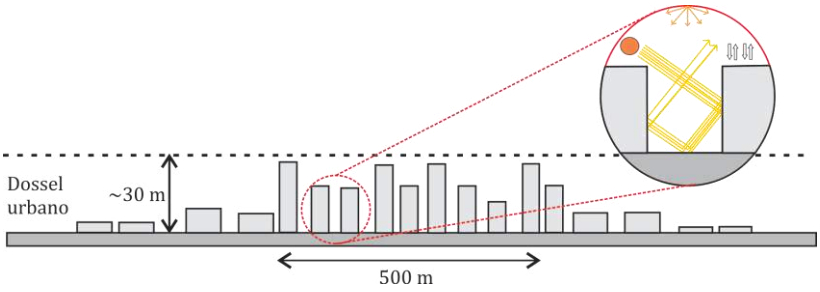


Figura 15: esquema ilustrativo da escala horizontal e vertical de estudo dos fenômenos radiativos. Fonte: ilustração do autor.

I.1.5. Clima nos trópicos

A zona geográfica tropical é aquela compreendida entre os Trópicos de Câncer (23°27'N) e de Capricórnio (23°27'S) e estes limitam as áreas onde o sol pode se apresentar no zênite da abóbada celeste. Portanto, é grande a quantidade de radiação solar recebida ao longo do ano e as flutuações sazonais na temperatura são mínimas, não apresentando período invernal marcante. Compreende aproximadamente 40% da superfície total da Terra (CABUS, 2002).

Do ponto de vista geográfico, esta região intertropical, em função de sua latitude, longitude, altitude, relevo, relação entre superfícies de terra e água, natureza e recobrimento dos solos e correntes marinhas, apresenta grande diversidade de paisagens, tais como: a floresta amazônica; a mata atlântica; e outras regiões como as do semi-árido. Esta variedade de paisagens com sua diversidade de vales e montanhas, compreendem uma enorme variedade de ambientes climáticos, com diferenças no regime de chuvas e umidade, temperatura e regime de ventos. Na região situada a Nordeste é possível se identificar enormes variações climáticas, como: climas quentes e superúmidos e úmido especialmente na faixa litorânea da Bahia, passando por Alagoas até o Ceará, sem seca, ou com subseca de 1 a 2 meses; clima quente e semi-úmido nas encostas leste das Serras no interior (Agreste), com secas de 4 e 5 meses por ano; clima quente e semi-árido do sertão, com secas mais prolongadas e diferenças climáticas consideráveis (BOAS, 1985).

Para analisar e classificar as variações do clima na grande faixa tropical, numerosos métodos e/ou critérios podem ser empregados (AYOADE, 1996). No entanto, como a temperatura e a insolação são relativamente uniformes nessa região, a umidade é correntemente usada como um critério para distinção entre os diferentes tipos de climas tropicais. A classificação mais elementar e aceita separa os trópicos em regiões úmidas e secas (CABUS, 2002). Existem diversas abordagens que propõem outras divisões para os trópicos, mas para os objetivos deste trabalho apenas aquelas ligadas aos trópicos úmidos serão tratadas.

Köppen (1936) define o **trópico úmido** como clima 'A' e o classifica como indicado na Figura 16: (1) Tropical úmido (Af), onde as chuvas no mês mais seco alcançam um mínimo de 60mm; (2) Tropical úmido e seco (Aw), onde ocorre uma estação seca distinta no período de inverno e pelo menos um mês deve ter menos que 60mm de chuva. Se a estação seca ocorrer durante o período de inverno este clima é classificado como 'Aw', e As caso não ocorra seca no período de sol alto, como

na costa nordestina do Brasil entre a latitude 5˚ e 13˚ (Figura 17); (3) Tropical monção (Am) caso em que há uma curta estação seca, mas com precipitação total bastante elevada, de modo que o solo permanece suficientemente úmido durante todo o ano, dando suporte a florestas tropicais.

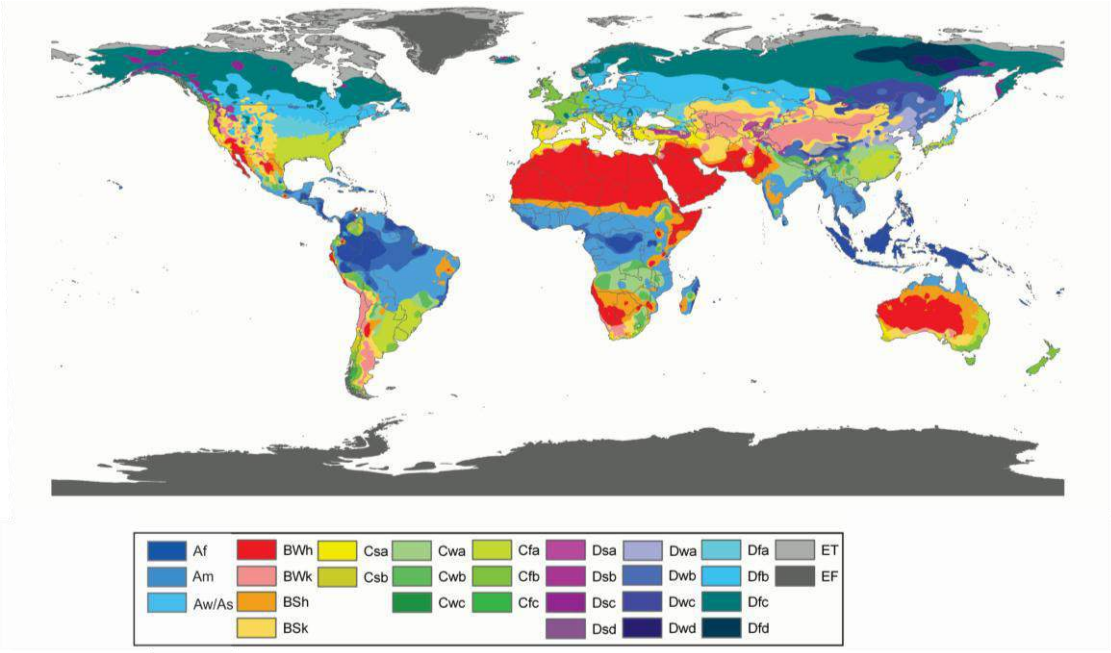


Figura 16: classificação climática de Koppen. Fonte: Peel, Finlayson e Mcmahon (2007).

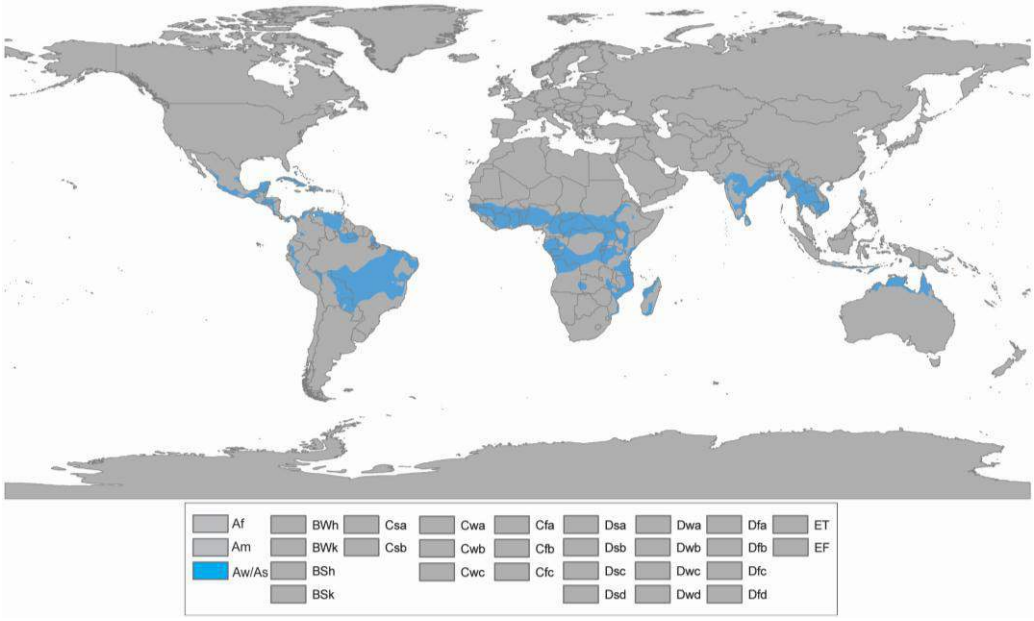


Figura 17: regiões no globo de clima tropical úmido com estação seca (Aw/As). Fonte: Peel, Finlayson e Mcmahon (2007).

I.1.5.1. Elementos climáticos nos trópicos úmidos

Os principais componentes climáticos verificados em regiões de clima tropical úmido são:

Temperatura: embora esta variável climática no trópico úmido seja em média elevada, apresenta-se inferior àquela das regiões dos trópicos secos ou dos subtrópicos. Uma vez que os climas tropicais podem ser definidos pela ausência de estação fria, a diferença de temperatura entre as estações são, muitas vezes, insignificantes. O mesmo ocorre com a variação de temperatura ao longo do dia. Em geral, a amplitude é menor quanto mais próxima a região do Equador, porém, fatores como a continentalidade, altitude e a nebulosidade podem alterar significativamente essa característica (CABUS, 2002). As variações sazonais de temperatura são mais significativas nas regiões extratropicais e continentais e, mais baixas em torno da faixa equatorial, particularmente na proximidade de grandes massas de água.

Precipitação: como a amplitude térmica é bem constante ao longo do ano, as chuvas passam a ser o determinante das estações nessas regiões. As chuvas nos trópicos úmidos têm geralmente uma grande intensidade, embora a sua ocorrência seja apenas normal em curtos períodos de tempo. Essa precipitação pesada tende a ocorrer em áreas próximas ao equador e à costa marítima, que também recebem chuva durante todo o ano. Outro aspecto a ser ressaltado é que as regiões tropicais úmidas apresentam uma significativa variação na precipitação de ano para ano.

Umidade: na maior parte desta região, a umidade é próxima do ponto de saturação à noite, mas diminui rapidamente durante o dia. As variações sazonais são igualmente marcantes, sendo mais altas na estação úmida e mais baixas na estação seca. A pressão de vapor normalmente excede 25mb e os níveis da umidade relativa são geralmente acima dos 80% (CABUS, 2002). De acordo com Jarret (1977), a contínua alta umidade relativa pode gerar condições bastante desconfortáveis. A evapotranspiração nos trópicos úmidos é conectada à umidade relativa e à capacidade do ar em absorver o vapor d'água.

Nebulosidade: as nuvens nos trópicos ocorrem em uma variedade de tamanhos e formas. Embora os trópicos úmidos sejam conhecidos pelas áreas nubladas, existem variações sazonais associadas à mudança na localização e intensidade da zona de convergência intertropical, um largo cinturão caracterizado por uma pressão de superfície relativamente baixa, movimentos de ar ascendente e convergência de massas de ar. Existem também mudanças diurnas, variando em função da localização costeira ou interior. Enquanto as estações litorâneas apresentam nebulosidade máxima no início da manhã e condições de céu limpo no começo da tarde, as estações mais distantes da costa apresentam nebulosidade maior no final da tarde (CABUS, 2002). Hopkinson e Kay (1972) descrevem que o clima quente-úmido tropical apresenta uma alta variabilidade na nebulosidade associada a uma insolação sazonal frequente.

Movimento do ar: a região intertropical está, principalmente, sob influência dos ventos alísios. Estes são originados do deslocamento das massas de ar frio das zonas de alta pressão (trópicos de câncer e capricórnio) para as zonas de baixa pressão (Equador). Devido a um efeito ocasionado pelo movimento de rotação da Terra, o efeito de Coriolis, os ventos nas faixas intertropicais fluem no sentido leste-oeste no hemisfério sul, e no sentido oeste-leste no hemisfério norte. Na região da linha do Equador, devido ao aquecimento solar constante e quase uniforme é formada uma zona de baixa pressão (chamada de ZCIT – Zona de Convergência Intertropical)[10] para a qual se deslocam os ventos alísios de sudeste, vindos do hemisfério sul, e os ventos alísios de nordeste, vindos do hemisfério norte. Esses ventos são os responsáveis por transportar umidade das zonas tropicais para a zona equatorial provocando chuvas nessa região. Em geral os ventos são fracos nos trópicos úmidos, embora ventos fortes possam ocorrer em áreas específicas de tempos em tempos, de forma violenta e destrutiva. Durante a época de chuvas o vento está associado a chuvas pesadas.

Insolação: a insolação na região dos trópicos é de elevada intensidade e poucas variações sazonais, devido à elevada altitude solar nessas latitudes e às características da atmosfera. As pequenas

[10] Ver glossário.

variações anuais desse componente nos trópicos úmidos estão essencialmente associadas às variações da nebulosidade/precipitação que determinarão a intensidade da radiação solar direta e difusa ao longo do ano. Uma revisão mais detalhada sobre as componentes da insolação – objeto principal de interesse nesse estudo – será apresentada na próxima seção.

I.1.6. O perfil climático de Maceió-AL

Situada à latitude 9˚39' abaixo do Equador, 35˚44 de longitude oeste do meridiano de Greenwich e à 16m em relação ao nível do mar, Maceió consiste em uma cidade costeira banhada pelo oceano Atlântico, localizada na região Nordeste do Brasil.

Maceió consiste em cidade típica do clima tropical quente e úmido, que conforme a classificação climática de Koppen (1936), corresponde ao tipo As', caracterizado por pequenas variações diárias, sazonais e anuais de temperatura e umidade e por uma importante dinâmica pluviométrica cuja distribuição e intensidade definem as duas únicas estações climáticas ao longo do ano na cidade. O verão, caracterizado por elevadas temperaturas e reduzida pluviosidade (estação seca) com ocorrências de chuvas passageiras; e no inverno, as temperaturas são ligeiramente mais amenas que no verão, porém com elevada pluviometria.

I.1.6.1. Temperatura e umidade

A temperatura média anual de Maceió é de 24,8°C e a variação anual é de 2,8°C, entre os valores médios mensais da temperatura do ar. As temperaturas médias mensais podem variar entre 23,9°C e 26,9°C ao longo do ano. Por ser uma cidade litorânea e estar sob a influência de grandes massas d'água, apresenta taxas de umidade relativa do ar mais elevadas, com média de 78% e uma precipitação acumulada superior à 2000mm, sendo cerca de 60% do volume de chuvas concentrado nos meses de abril à julho (Figura 18).

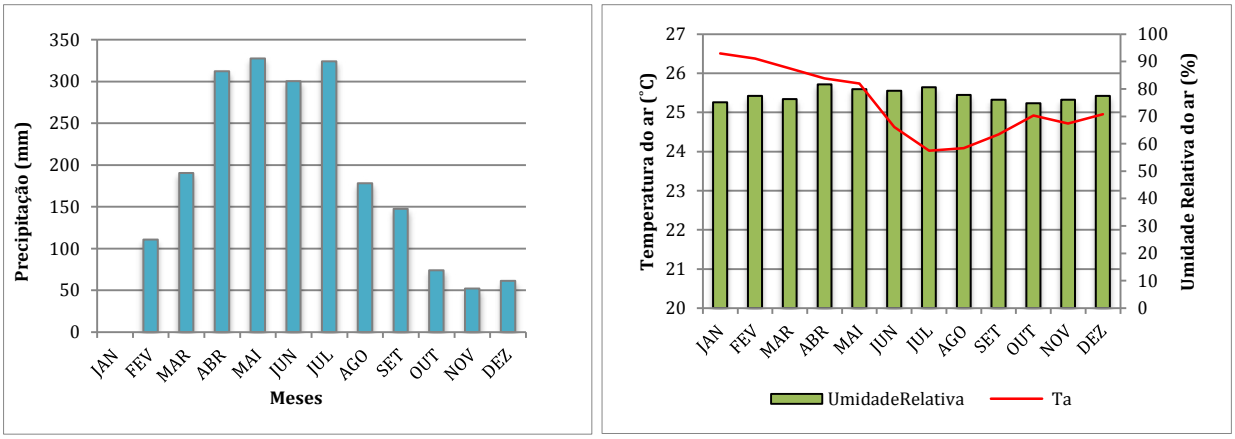


Figura 18: temperatura, umidade relativa do ar e precipitação ao longo do ano para Maceió. Fonte : Ano climático Metonorm (2012).

I.1.6.2. Irradiação solar e tempo de insolação

A distribuição espacial e temporal da energia solar, bem como a dinâmica que define a cobertura de nuvens e tipo de céu são os aspectos mais cruciais na definição do potencial de uma localidade em favorecer o aproveitamento do recurso solar, seja para produção de energia térmica e elétrica, seja para fins passivos de aproveitamento da luz natural.

Antes de apresentar os dados para Maceió, ilustramos comparativamente o potencial dessa região no contexto estadual (Figura 19). Observa-se que as localidades que apresentam maiores níveis de irradiação, sobretudo no verão (Figura 19b), são as situadas no interior do estado (nas

regiões do agreste e sertão). Nessas regiões, de clima tropical semiárido, as condições de céu distinguem-se bastante das encontradas no céu tropical úmido das cidades situadas na região litorânea, como Maceió. Entre outros, isso pode ser atribuído ao nível de vapor d'água presente na atmosfera, bastante distinto nessas regiões. Quanto ao aspecto temporal, é possível destacar a redução da irradiação direta nos períodos de inverno (ou estação chuvosa), devido à presença de céu mais coberto (como será discutido na sequência).

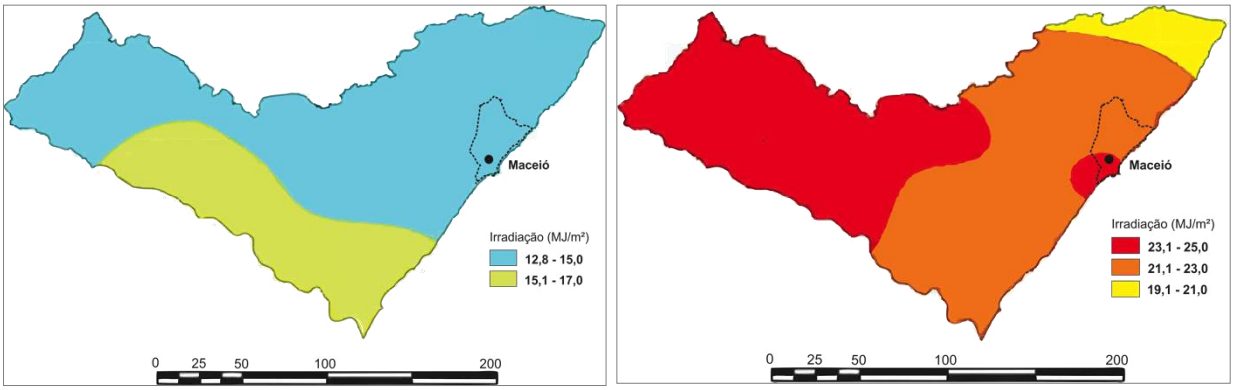


Figura 19: irradiação para o mês de Julho (a) e para o mês de Janeiro (b). Fonte : Atlas solarimétrico de Alagoas ; Eletrobrás (2008).

Conforme dados obtidos de irradiação solar direta e difusa para Maceió, são observados dois comportamentos distintos. Para a irradiação direta, tem-se o efeito sazonal um pouco mais marcante. Dado ao aumento da nebulosidade e precipitação, principalmente nos meses de maio a agosto, a irradiação direta, nesse período, poder ser de 46% (agosto) a 73% (junho) menor quando comparada à maior irradiação mensal ao longo de um ano (verificada no mês de janeiro) (Figura 20a). Por outro lado, observa-se um comportamento sempre uniforme da irradiação difusa ao longo do ano. Esse comportamento pode estar associado ao tipo de céu na região, que é caracterizado por ser predominantemente parcialmente coberto de nuvens.

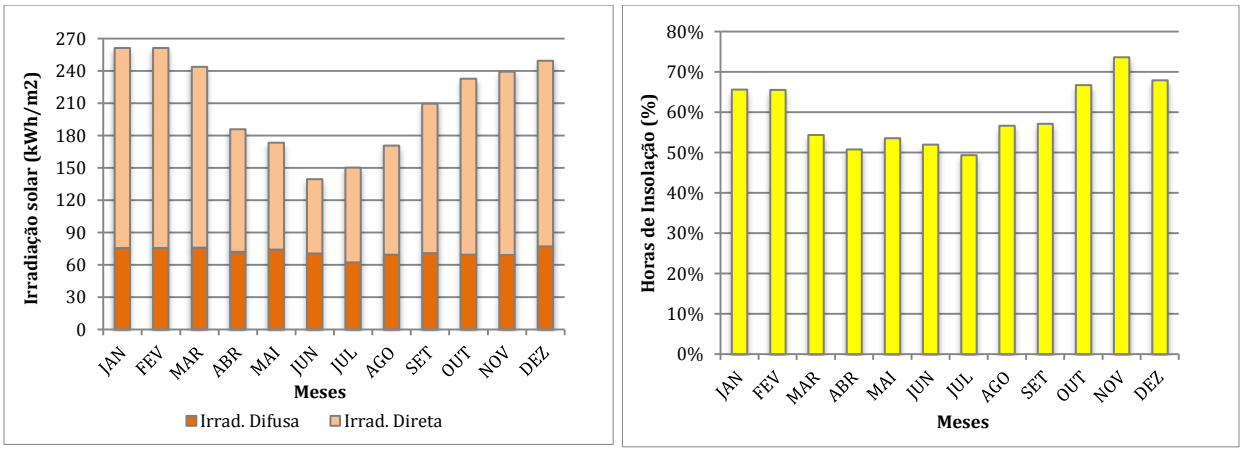


Figura 20: irradiação solar (a) e probabilidade de insolação (b) mensal para Maceió. Fonte : Ano climático Metonorm (2012).

A fim de ilustrar a dinâmica e importância da energia solar (como fonte de luz e calor) em Maceió, a probabilidade de insolação também foi calculada a partir dos dados meteorológicos disponíveis. A probabilidade foi avaliada relacionando a insolação total em horas com o equivalente total de horas durante o dia para um período de um mês. As horas do dia são calculadas com base na duração do dia astronômico. Como Maceió está situada próxima do Equador, a diferença entre o dia mais curto (no solstício de inverno) e o dia mais longo (solstício de verão) não é expressiva (um

pouco mais de uma hora).

Baseado nos dados apresentados, é possível afirmar a importância da energia do sol e suas implicações para o projeto dos espaços construídos (e.g. uso da luz natural ou o aproveitamento para produção local de energia de fonte solar). Por exemplo, pode ser verificado que num cenário cuja insolação é de menor importância, equivale a 50% das horas do dia, enquanto aquele de maior importância, pode representar até 73% das horas do dia durante o mês de novembro (Figura 20b).

I.1.6.3. Nebulosidade e tipo de céu

A nebulosidade (ou cobertura total de nuvens)[11] do céu de Maceió, mostrada em média mensal na Figura 21a, é maior no mesmo período em que ocorre maior concentração pluviométrica, de abril à julho, porém com valores consideravelmente significativos também ao longo de todo ano. Essa tendência pode ser também comparada com os valores de radiação direta e probabilidade de insolação (Figura 20), que apresenta a curva, portanto, inversa do gráfico da nebulosidade.

A título ilustrativo, a partir dos dados obtidos para nebulosidade foi também possível realizar uma estatística para estimar o tipo de céu de Maceió. Conforme Cabús (2002), é possível propor uma classificação preliminar do tipo de céu a partir dos dados de cobertura de nuvens (Tabela 1). A partir do agrupamento dos dados, por mês e por horas do dia, é possível calcular a probabilidade de ocorrências para cada escala de tempo. A probabilidade do tipo do céu é, então, determinada pela relação entre o número total de ocorrências de um tipo particular e o número de ocorrências total de um período (Tabela 1).

Ressalta-se aqui que a probabilidade proposta foi baseada na frequência horária de dados de um período de 10 anos (2000-2009). Embora representativos, esses resultados podem expressar viés, que só poderá ser identificado com uma amostra mais ampla e uma abordagem estatística mais apropriada (CABUS, 2002). No entanto, os resultados obtidos aqui podem servir como uma referência preliminar para ilustrar globalmente o comportamento do céu local para estudos de potencial de energia solar e iluminação natural nos espaços construídos das cidades.

Tabela 1: nebulosidade e tipo de céu (CABUS, 2002).

Nebulosidade em oitavas	Tipo de céu
0	Claro
1 octa	Claro
2 octas	Parcialmente coberto
3 octas	Parcialmente coberto
4 octas	Parcialmente coberto
5 octas	Parcialmente coberto
6 octas	Parcialmente coberto
7 octas	Coberto
8 octas	Coberto

[11] Representa a fração da abóboda celeste coberta por nuvens.

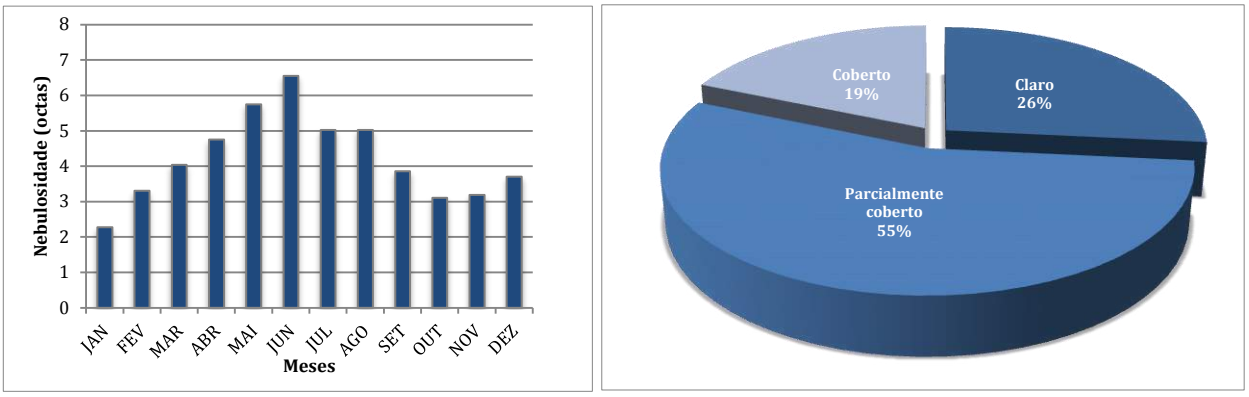


Figura 21: nebulosidade (a) e probabilidade do tipo de céu (b) para Maceió. Fonte : Ano climático Metonorm (2012).

A probabilidade de ocorrência de tipos de céu para Maceió, conforme Tabela 1, são apresentados na Figura 22. Os dados do gráfico abaixo foram agrupados a partir de uma série horária e os resultados mostram que o céu parcialmente coberto é o mais frequente, conforme esperado (55% das ocorrências). O céu coberto apresenta uma frequência de 19% e o céu do tipo claro ocorre 26% do período avaliado.

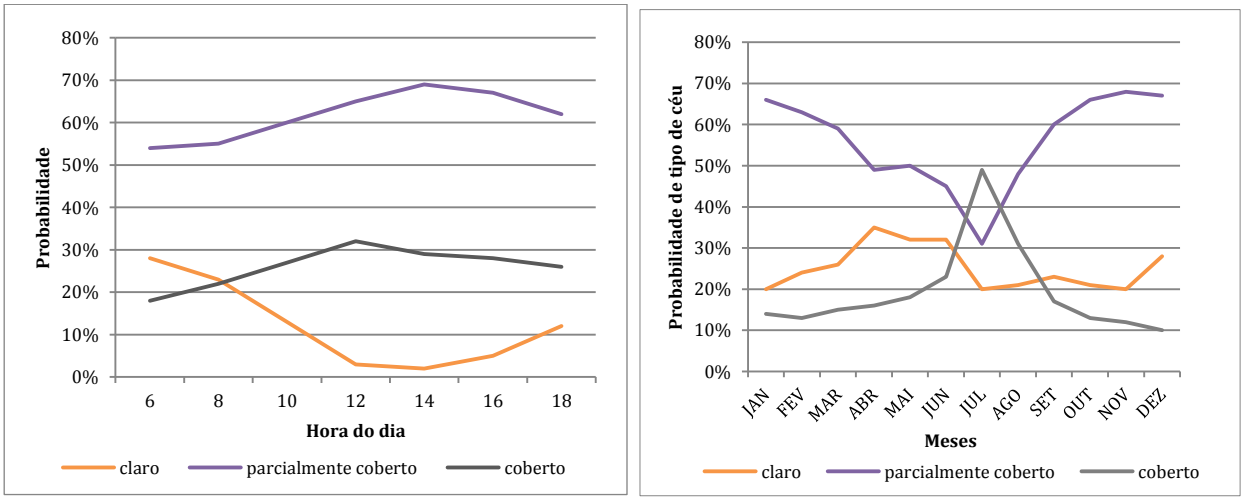


Figura 22: probabilidade de tipo de céu ao longo das horas do dia e ao longo dos meses do ano para Maceió. Fonte: Cabus (2002).

Observa-se que de acordo com a hora do dia, o céu claro é o tipo mais instável. Esse tipo de comportamento é mais frequente quando a altura solar é menor, ou seja, principalmente durante a manhã e no final da tarde, com menor ocorrência ao meio do dia. O céu coberto, inversamente, é mais frequente do início da tarde ao pôr-do-sol. O céu parcialmente coberto é o mais frequente ao longo de todo o dia, tendo sua máxima ocorrência no período da tarde.

Na estatística apresentada para os meses do ano, verifica-se que o céu coberto é o mais sensível às variações sazonais, acompanhando a mesma tendência da precipitação para os meses de inverno da região (meses chuvosos). Durante esses meses (principalmente entre junho e agosto) a frequência de ocorrência é bastante próxima do tipo de céu parcialmente coberto.

Outrossim, observa-se que ao meio-dia o céu claro é mais raro, e surpreendentemente, tem uma breve ocorrência durante a estação de chuva nessa hora do dia. O céu parcialmente coberto é bem mais frequente, principalmente no verão, com pico em novembro.

Se no meio da tarde a ocorrência de céu claro não é significativa estatisticamente, ao nascer do sol sua frequência passa a ser bastante relevante. Sendo mais frequente que o céu coberto de setembro à junho.

A nebulosidade, a composição do céu e a insolação, que será melhor discutida mais adiante, são os fatores que mais influenciam nos estudos dos efeitos radiativos em superfícies construídas.

I.1.6.4. Movimento do ar

No que se refere às principais características do fluxo do vento encontradas na meteorologia para a cidade de Maceió, este é proveniente, ao longo do ano, de todo o quadrante leste (sudeste, leste e nordeste). Sendo, sua maior ocorrência proveniente da direção leste e sudeste (meses de abril à outubro) e Nordeste, principalmente nos meses de verão (meses de novembro a março), com ventos de maior intensidade . O valor médio mensal de velocidade do vento é da ordem de 2,8m/s, podendo chegar a valores absolutos mais intensos (de 10m/s) na direção Nordeste (ALMEIDA e BARBIRATO, 2004). A maior ocorrência de calmarias são registradas no períodos da madrugada maceioenses (Figura 23).

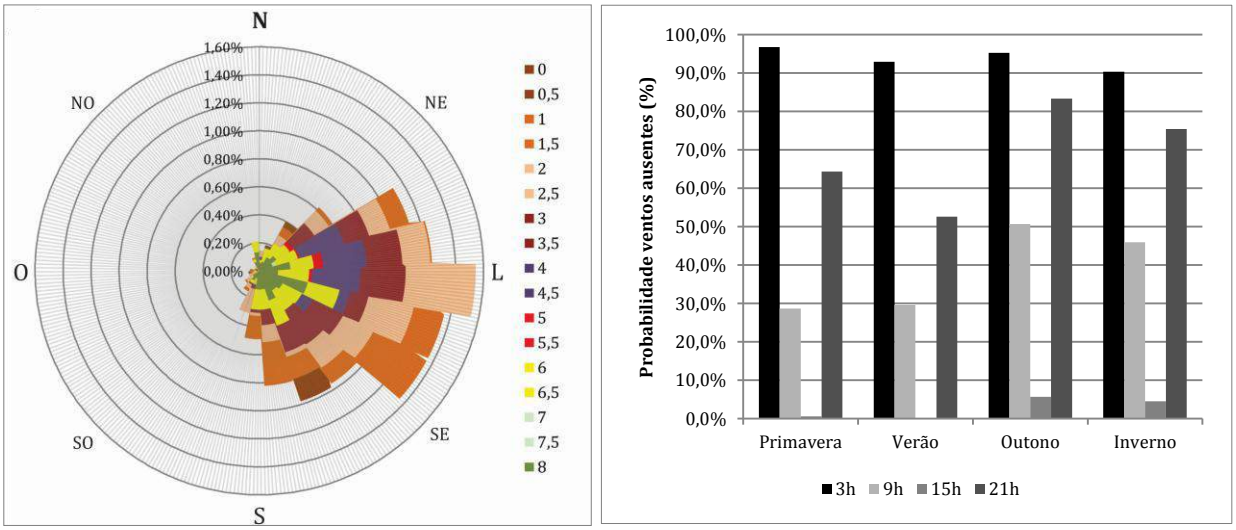


Figura 23: frequência da velocidade do vento por direção ao longo do ano, dada pela estação meteorológica de Maceió-AL. Fonte : Ano climático Metonorm (2012).

I.2. Avaliação da insolação na envoltória de edifícios urbanos

Nessa seção será enfocado o estudo dos processos físicos pertinentes à abordagem da tese que busca estabelecer relações de causalidades entre os principais parâmetros que definem a morfologia construída das cidades e o comportamento das trocas radiativas resultantes nas superfícies das edificações. Assim, serão revistos alguns conceitos e processos-chave que definem o balanço radiativo encontrado nas superfícies construídas.

A crescente demanda por informações sobre a utilização da radiação solar como fonte suplementar e alternativa às fontes convencionais de energia, requer o conhecimento detalhado das características climáticas da radiação solar incidente sobre superfícies, para serem usadas em uma grande variedade de aplicações, incluindo projetos de engenharia para coletores solares, projetos de arquitetura e planejamento urbano. Para satisfazer esses tipos de estudos, faz-se necessário conhecer a intensidade da radiação solar que incide sobre uma superfície inclinada e sua variação sazonal por um período mínimo de um ano.

Portanto, passa-se a examinar a natureza e características da energia solar, os principais fatores atuantes na sua disponibilidade e no seu balanço nas superfícies urbanas construídas e os principais modelos que nos auxiliarão nas análises desse recurso como condicionante, e as oportunidades de adaptação e integração à forma construída na cidade.

A organização dessa abordagem teórica inicial será dada como mostra a Figura 24 a seguir: descrição da energia solar, características da sua energia, os processos de interação com a atmosfera, o balanço radiativo geral entre a atmosfera e a Terra, até o balanço em superfícies urbanas.

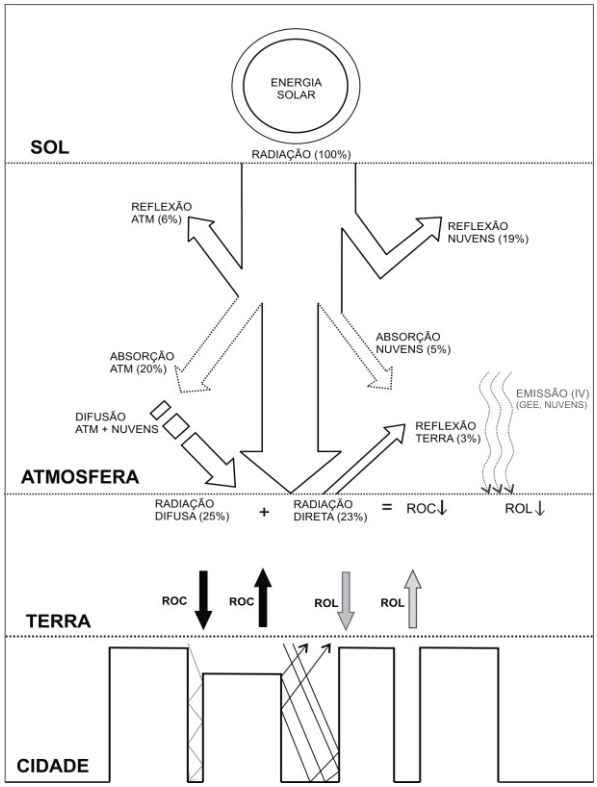


Figura 24: ilustração esquemática da abordagem adotada nessa seção do capítulo. Fonte: ilustração do autor.

I.2.1. Definições da radiação solar

O Sol fornece 99,97% da energia que é utilizada para vários fins no sistema terra-atmosfera. No entanto, de toda a energia emitida pelo astro em todas as direções, a energia que efetivamente intercepta esse sistema é bastante insignificante, cerca de meio milionésimo da energia solar total emitida para o espaço. Contudo, calcula-se que esta energia seja 30 mil vez maior que o consumo total anual de energia no mundo (AYOADE, 1996).

O Sol, uma esfera gasosa luminosa, apresenta em sua superfície uma temperatura aproximada de 5600 K e emite energia sob a forma de ondas eletromagnéticas[12] ou corpúsculos (fótons), que se propagam à razão de aproximadamente 300.000 km/s. A intensidade da radiação solar que se propaga no espaço diminui inversamente ao quadrado da distância ao Sol. Assim, o fluxo solar (ou constante solar) que é a quantidade de energia solar recebida, por unidade de área, por uma superfície horizontal no topo da atmosfera, corresponde a um valor médio de 1367 W/m^2 (AYOADE, 1996).

Quase 99% da radiação solar é de curto comprimento de onda, ou seja de 0,15 a 4,0μm. Segundo Sellers (1965), uma classificação da composição espectral da radiação solar indica que 9% é ultravioleta ($\lambda \leq 0{,}4$ μm), 45% estaria na faixa do visível ($0{,}4\mu m \leq \lambda \leq 0{,}74$ μm), enquanto que os 46% restantes são do domínio infravermelho ($\lambda > 0{,}74$ μm) (Figura 25).

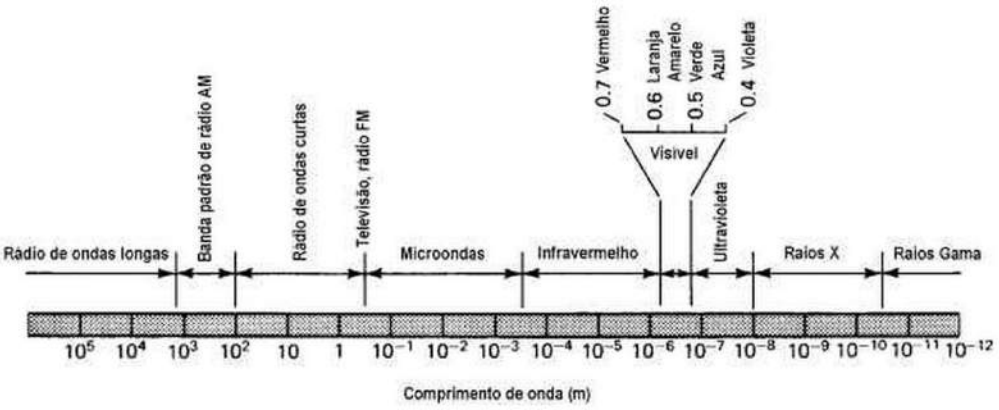


Figura 25: espectro eletromagnético da energia solar. Fonte: Ayoade (1996).

I.2.2. Definição da radiação direta

A variação da quantidade de energia da radiação solar incidente no topo da atmosfera será devido à variação da distância Terra-Sol e pela órbita elíptica da Terra. A irradiância extraterrestre, recebida por uma superfície horizontal situada no topo da atmosfera, é essencialmente, a constante solar ajustada a fim de considerar a excentricidade da órbita da Terra em torno do sol (ROBINSON, 2011):

$$I_{eh} = G(1 + 0{,}033 \cos\left[\frac{2\pi j}{365}\right]) \quad [\text{W.m}^{-2}] \qquad [\text{Eq. 1}]$$

onde: $G = 1367\ W.m^{-2}$ é a constante solar; j: n° do dia na sequência anual (calendário Juliano).

A energia solar para uma determinada latitude sofrerá modificações na sua passagem pela atmosfera. Os principais processos e modelos para caracterizá-las serão apresentados na sequência.

[12] São ondas constituídas pela combinação dos campos elétrico e magnético oscilantes e se propagam com uma velocidade constante no vácuo.

I.2.3. Trocas radiativas na atmosfera

I.2.3.1. Definições

A atmosfera terrestre possui como elementos constituintes diversos gases, vapor d`água, poeiras e aerossóis e as nuvens que concorrem para que o feixe de raios solares que atinge à Terra sofra os efeitos especulares de absorção e espalhamento. Portanto, considerando a Figura 26, pode ser observado que de um percentual de 100% desta radiação que chega ao topo da atmosfera, somente 50% irão atingir o solo, através das componentes radiativas: direta - sob a forma de feixe de raios - (27%) e difusa (23%). (KOENIGSBERGER, INGERSOLL, *et al*., 1977). A absorção dos raios solares pela atmosfera e os demais percentuais são indicados na Figura 27 e na Figura 28.

São esses efeitos, associados à posição aparente do sol, que caracterizará as condições de céu e de luz particulares de uma dada localidade. Esses processos serão descritos suscintamente (e genericamente), de modo a facilitar a compreensão dos modelos desenvolvidos que auxiliam na predição dos comportamentos para os distintos cenários climáticos, como será visto a seguir.

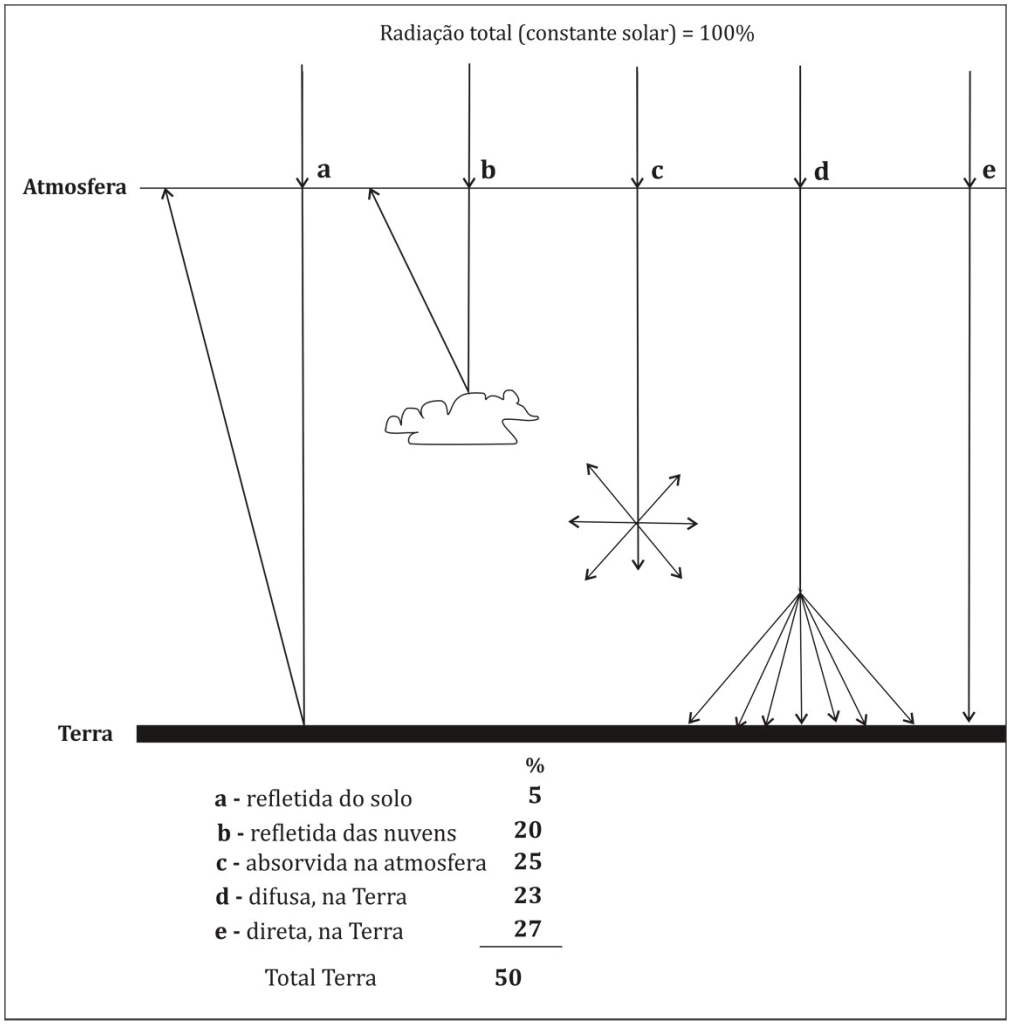


Figura 26: distribuição percentual da radiação solar incidente. Adaptado de Koenigsberger *et al*., 1977.

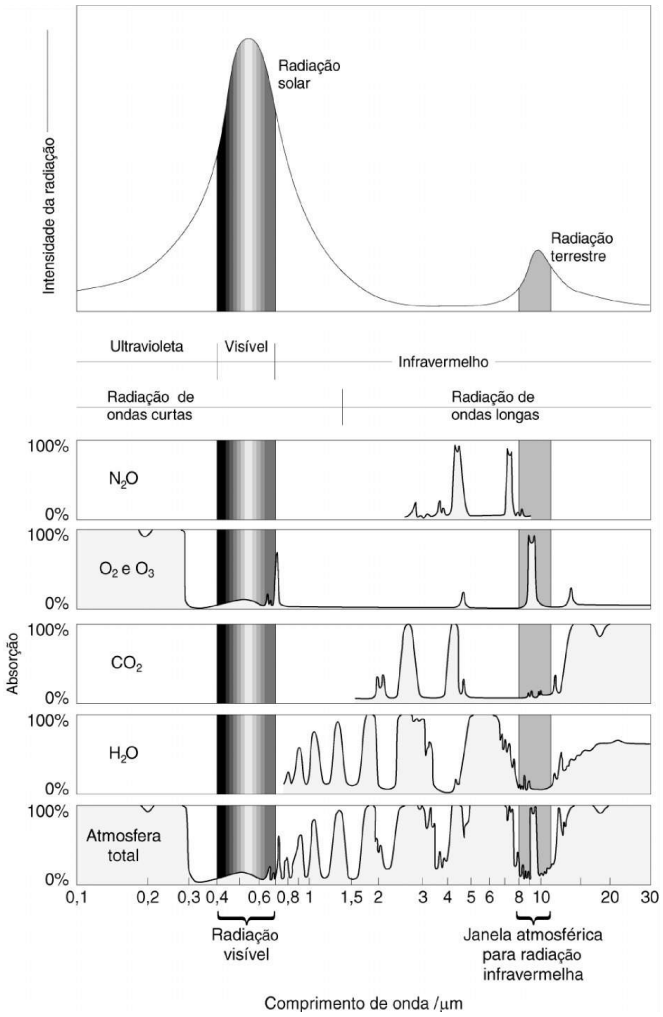


Figura 27: absortância solar por comprimento de onda para os principais componentes atmosféricos. Fonte : Adaptado de Lutgens e Tarbuck (1998).

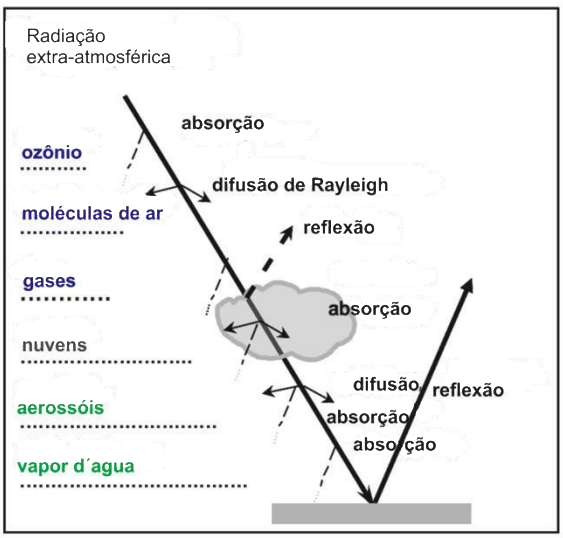


Figura 28: diferentes efeitos da atmosfera na radiação solar incidente na Terra. Fonte : Ineichen (2009).

O balanço radiativo das superfícies construídas, como será visto mais adiante, pode variar bastante, em função de diversos fatores ligados à geometria construída, a textura urbana (e.g. albedo, emissividade, absortividade, etc.), fatores e elementos climáticos de cada local. Além disso, a radiação que chega na superfície da Terra, dependerá ainda das condições de céu e dos poluentes presentes na atmosfera.

I.2.3.2. Os modelos de céu e atmosfera

Para trazer esse conjunto complexo de múltiplos fenômenos e componentes imbricados nos processos da radiação solar no âmbito da atmosfera para o propósito de análise desse estudo, faz-se necessário apresentar os principais modelos teóricos utilizados para calcular a distribuição da energia radiante através da abóbada celeste, assim como a energia incidente numa superfície qualquer. São discutidos modelos tanto para as trocas radiativas no espectro solar, quanto no infravermelho.

Esse tipo de modelos são amplamente empregados na programação de diversos métodos de cálculo de iluminação e irradiação, como o utilizado no presente estudo, pois possibilitam a geração e integração direta de dados de difícil operacionalidade[13]. Alguns métodos de cálculo que integram esses modelos de céu serão discutidos na próxima seção, inclusive o método selecionado para aplicação na abordagem desse estudo.

(a) Modelos de céu para trocas radiativas no espectro solar

Serão agora apresentados alguns dos principais[14] modelos teóricos utilizados na predição das trocas radiativas de onda curta, a partir de alguns estudos comparativos e de validação para diversas regiões, inclusive em clima tropical.

Os primeiros modelos de predição da irradiância incidente em superfícies assumiam que o céu era isotrópico, ou seja tendo o mesmo brilho ou ainda a mesma radiância ($W.m^{-2}.sr^{-1}$) em todas as direções (Figura 29). Assim, a irradiância solar difusa, $I_{d\beta}$ ($W.m^{-2}$), incidente numa superfície de inclinação β, pode ser estimada em função da irradiância difusa no plano horizontal, I_{dh}:

$$I_{d\beta} = I_{dh}(1 + \cos\beta)/2 \qquad [W.m^{-2}] \qquad [Eq.\ 2]$$

No entanto, sabe-se por experiência que céus reais não são isotrópicos. Mesmo em condições de céu perfeitamente encoberto, de ocorrência relativamente rara, a radiância do céu (R) tende a aumentar com a altitude (γ) relativa ao zênite (z) (MOON e SPENCER, 1942):

$$R_\gamma = R_z(1 + 2\ sin\ \gamma)/3 \qquad [W.m^{-2}.sr^{-1}] \qquad [Eq.\ 3]$$

Em condições de céu claro, a radiância seria, portanto, mais elevada nas proximidades do sol, devido ao espalhamento local direto da radiação solar, assim como no horizonte, devido ao retro-espalhamento[15] da energia refletida além do mesmo. Esses efeitos são denominados de brilho circumsolar e brilho do horizonte, respectivamente. A partir desses fenômenos, diversos modelos de céu anisotrópico puderam ser desenvolvidos ao longo dos anos. Estes podem ser de modo geral, classificados como modelos de dois componentes (circumsolar + plano) (HAY, 1979); (Figura 29) ou modelos de três componentes (circumsolar + plano + horizonte) (KLUCHER, 1979) (REINDL, BECKMANN e DUFFIE, 1990).

---

[13] Existe um número limitado de estações ao redor do globo terrestre para observações das componentes da radiação solar na superfície horizontal e principalmente a observação da radiação solar em uma superfície inclinada, já que nem todas as estações de radiometria solar fazem essas medidas.

[14] Modelos que têm sido mais recorrentemente e recentemente empregados e discutidos na literatura sobre o assunto.

[15] Ver Glossário.

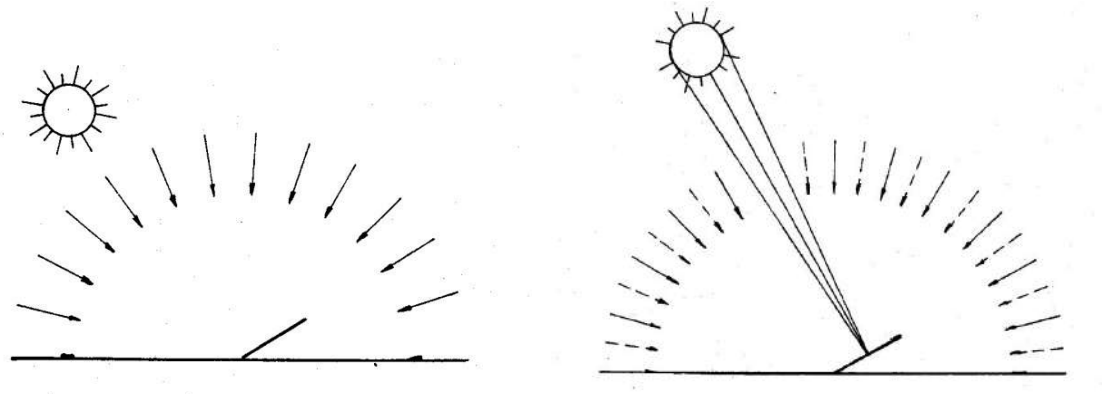


Figura 29: modelo de céu isotrópico (esquerda) e modelo anisotrópico (circumsolar + plano) proposto por Hay (1979).

Dentre os modelos de céu anisotrópico com três componentes, o modelo de Perez *et al*. (1987) é o que tem tido melhor aceitação. A abordagem estatística que foi considerada neste modelo está baseada em um grande número de análises da distribuição da radiância do céu em diferentes regiões climáticas, e que apresentou bons resultados de validação em testes empíricos independentes (MARDALJEVIC, 1995). Como tal, tem sido incluída em diversos programas computacionais de simulação energética e de luz natural nas edificações, tais como *Energyplus*, *Daysim*/*Radiance e Citysim*. Segundo Perez *et al*. (1987) a partir da combinação de três componentes básicos do modelo mencionado, pode-se construir um espaço tridimensional que representa todas as possibilidades de condições do céu, desde muito claro até o céu encoberto escuro. As componentes são função de três parâmetros principais: o ângulo zenital (Z), o índice de brilho do céu (Δ) e o índice de claridade do céu (ε). Um exemplo desta parametrização pode ser visualizada na Figura 30.

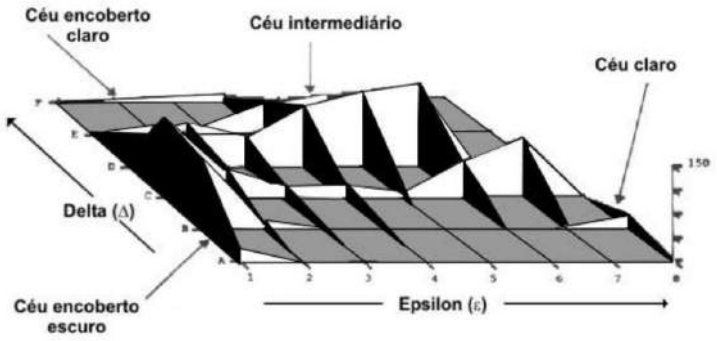


Figura 30: exemplo de parametrização das condições de céu. Fonte: Perez *et al*. (1987).

Essa parametrização permite, portanto, estimar a irradiância total incidente como a soma das contribuições da radiação direta, refletida do solo e do céu anisotrópico.

Os três termos entre colchetes na equação abaixo, correspondem aos três parâmetros do modelo de Perez *et al*. (1987):

$$I_{d\beta} = I_{dh}[(1 - F_1)(1 + \cos\beta)/2 + F_1 a_0/a_1 + F_2 \sin\beta] \quad [\text{W.m}^{-2}] \qquad [\text{Eq. 4}]$$

Onde os coeficientes a representam o ângulo de incidência da componente circumsolar [$a_0 = \max(0, \cos\theta)$ e $a_1 = \max(\sin 5\pi/180, \sin\gamma)$], que é efetivamente tratado como um ponto fonte localizado em ou acima de uma altitude limite de $5\pi/180$ (rad). $F_{1,2}$ representam as funções de

brilho circumsolar e do horizonte que depende do ângulo do zênite solar, Z (que é restrito a um valor mínimo de $5\pi/180$ radianos), do brilho do céu, Δ e de um conjunto de coeficientes estatísticos f para oito categorias da claridade do céu, ε (ver tabela **ANEXO A**).

$$F_1 = \max(0, f_{11} + f_{12}\Delta + f_{13}Z) \qquad [/] \qquad [Eq. 5]$$

$$F_2 = f_{21} + f_{22}\Delta + f_{23}Z \qquad [/] \qquad [Eq. 6]$$

o brilho do céu é o produto do número de massas ópticas de ar por onde a radiação direta passa, que é inversamente proporcional à altitude solar ($m \approx \gamma^{-1}$) e o quociente da irradiância solar difusa no plano horizontal, I_{dh} e a irradiância extraterrestre, também no plano horizontal, I_{eh}:

$$\Delta = \mathrm{m}\ I_{dh}/I_{eh} \qquad [/] \qquad [Eq. 7]$$

a irradiância horizontal extraterrestre é essencialmente a constante solar, G= 1367 W.m^{-2}, ajustada para considerar a excentricidade da órbita em torno do sol:

$$I_{eh} = G(1 + 0.033\cos[2\pi j/365] \qquad [\mathrm{W.m^{-2}}] \qquad [Eq. 8]$$

finalmente, o índice de claridade, ε, com o qual é possível selecionar os coeficientes estatísticos correspondentes para as funções de brilho circumsolar e do horizonte em [Eq.5,6] acima, é dado pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{(I_{dh}+I_{bh})/I_{dh}+5.535E6\ Z^3}{1+5.535E6\ Z^3} \qquad [/] \qquad [Eq. 9]$$

A fim de verificar até que ponto o aumento na complexidade da modelagem proposto por Perez melhora a qualidade da predição, Robinson (2011) compara a irradiação em superfície inclinada para os modelos isotrópico e anisotrópico de Perez, e apresenta os percentuais de diferença entre os dois (Figura 31). O autor verificou que para uma superfície de 70˚ de inclinação (em relação a horizontal), situada na latitude de Kew no Reino Unido, o modelo anisotrópico estima que 15% a mais energia é recebida quando orientada para sul e 20% quando orientada para o norte.

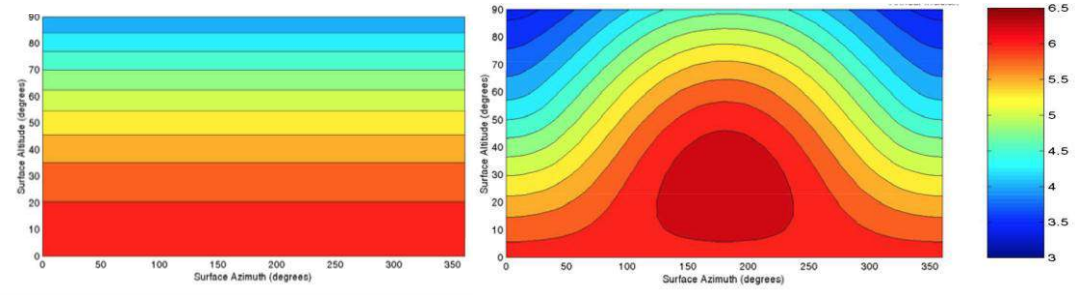


Figura 31: distribuição da radiância em céu isotrópico (esquerda) e anisotrópico direita. Fonte: Robinson (2011).

Outra alternativa aos modelos de dois e três componentes para predição da irradiância incidente em superfícies inclinadas, são os que modelam a distribuição da radiância na abóbada do céu como uma função contínua da locação angular de um ponto no céu relativo ao zênite ou ao sol, permitindo, assim, estimar a contribuição da irradiância incidente de uma região do céu que se encontra visível em relação à uma superfície receptora.

Numerosos modelos possibilitam essa distribuição da radiância no céu, dos quais grande parte foram desenvolvidos para auxiliar predições de iluminação. Um dos primeiros foi o modelo de Moon and Spencer (1942). Outros modelos incluem as primeiras formulações da Comissão Internacional de Iluminação (CIE) para céu claro (KITTLER, 1967), passando por modelos mais recentes de céu claro (CIE, 1973), (CIE, 1996) até definições de céu mais abrangentes (PEREZ,

SEALS e MICHALSKY, 1993); (CIE, 2002) que cobre uma ampla gama de tipos de céu (encoberto, intermediários e claro). O modelo de Perez, Seals e Michalsky (1993) fornece uma base simples para a seleção de oito tipos de céu.

Wright, Perez e Michalsky (1989) analisaram também a influência da umidade do ar na variação da eficácia luminosa direta (K_B), uma vez que com a redução da altitude solar, os raios passam por uma maior massa de ar antes de atingir a superfície terrestre, aumentando a atenuação devido à absorção do vapor de água e aerossóis durante o caminho percorrido pelo raio solar. Verificou-se que para céu claro, a eficácia luminosa direta aumenta com o vapor da água na atmosfera, a radiação direta é atenuada principalmente na parte infravermelha do espectro pela absorção da água, o aumento de aerossóis no ar não afeta a eficácia luminosa direta. Para céu intermediário, o nível de vapor de água na atmosfera diminui a eficácia luminosa direta, como há mais partículas de aerossóis onde o vapor de água pode condensar. A partir destes dados verificou-se a necessidade de adicionar este parâmetro ao modelo de conversão da radiação solar em iluminância.

De acordo com o modelo de Perez *et al.* (1990), para a eficácia luminosa direta, tem-se o modelo representado na Figura 32, onde nota-se o efeito acentuado da umidade do ar. A eficácia luminosa direta (K_B) diminui com o aumento a temperatura de orvalho (T_d) para as condições de céu intermediário, enquanto aumenta para o céu claro, devido à absorção da radiação na faixa do infravermelho do espectro.

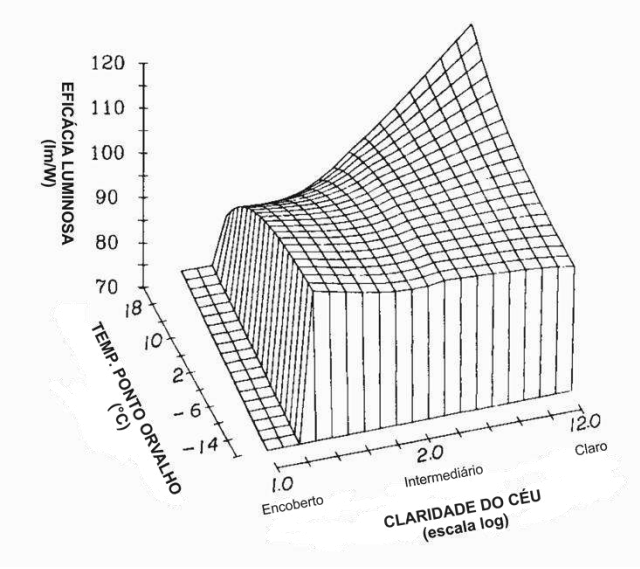


Figura 32 : Superfície Polinomial com variação da eficácia luminosa direta (K_B) em função da claridade do céu (ε) e brilho do céu (Δ), para ângulo zenital e temperatura constantes. Fonte: Perez (1990).

Dessa forma, o modelo desenvolvido por Perez et al. (1990) utiliza quatro parâmetros para definir a irradiância/iluminância: ângulo zenital (Z), índice do brilho do céu (Δ), índice de claridade do céu (ε) e vapor de água na atmosfera (W). Destes, o índice de claridade do céu é utilizado para definir o tipo de céu (de encoberto a claro) e os coeficientes a serem utilizados para o cálculo das iluminâncias. O brilho do céu é definido como o produto do número de massas ópticas de ar por onde passa a radiação direta, que é inversamente proporcional à altitude solar ($m \approx \gamma^{-1}$) e o quociente da irradiância solar difusa no plano horizontal I_{dh} e a irradiância extraterrestre também no plano horizontal.

Este modelo de Perez *et al*. (1990) foi extensamente validado através de dados representativos de várias regiões climáticas, de regiões marítimas tropicais à desertos em altas altitudes para os modelos de irradiância e de marítimo temperado à continental para os modelos de disponibilidade de iluminância. Para estes modelos, foram utilizados dados coletados em treze cidades, a partir dos quais os modelos foram derivados experimentalmente, desenvolvidos, para cada caso, a partir do método de ajuste dos quadrados mínimos.

Modelos numéricos para a previsão da eficácia luminosa ou da iluminância externa nem sempre apresentam a melhor adaptação aos dados medidos em todos os climas. A avaliação para estes modelos em geral é realizada através dos indicadores estatísticos: erro quadrático médio (EQM), desvio absoluto entre o valor estimado e o real; e o viés médio (viésM), que reflete a tendência do modelo em subestimar ou superestimar valores.

Em clima tropical úmido, Lam *et al*. (1997) comparou o modelo de Perez e cinco outros modelos conhecidos de céu (o de Kittler, o ASRC-CIE, Brunger, Perraudeau e o do padrão CIE para céu encoberto) à uma amostra de medições de irradiância e iluminância para a cidade de Singapura. Mesmo se baseada em uma amostra relativamente restrita de dados, o que pode não garantir uma resposta precisa e definitiva, os autores puderam concluir sobre o desempenho relativo dos seis modelos quanto à aplicabilidade e confiabilidade em clima tropical. A estatística apresentada mostrou que três dos seis modelos analisados, (sendo estes: Perez, Kittler e Perraudeau) apresentaram bom desempenho (com menor desvio padrão entre os modelos examinados) para a predição da distribuição da luminância (cd/m^2) do céu de Singapura. No entanto, em geral, a maioria mostrou uma tendência de superestimar os valores de luminância difusa, particularmente em parcelas da abóbada mais distantes da posição do sol (LAM, MAHDAVI, *et al*., 1997).

Estudos realizados por Soga, Akasaka e Nimiya (1999) compararam três modelos de predição de irradiância direta e seis modelos para irradiância difusa com medições para três cidades japonesas (Sapporo, Tokyo e Fukuoka), entre estas Tokyo que possui clima subtropical úmido. Os autores identificaram erros médios quadráticos (RMSE) menores em relação às medições efetuadas para os modelos de Perez, Erbs, Chandrasekaran e Reindl, entre os nove modelos examinados (além dos mencionados: Maxwell, Nagata, Skartveit, Udagawa e Watanabe). Na sequência, foi também examinado a irradiação em superfícies inclinadas a partir da irradiação global horizontal utilizando 54 combinações dos nove modelos de irradiância (direta e difusa) com seis modelos de irradiância do céu (Akasaka, Hay, céu isotrópico, Perez, Reindl e Skartveit). Os pesquisadores concluíram que a combinação do modelo de Perez para irradiância direta com modelo de irradiância do céu anisotrópico também de Perez proporcionou o menor RMSE para todas as cidades estudadas (SOGA, AKASA e NIMIYA, 1999).

Ramos e Ghisi (2010) avaliaram o cálculo da iluminação natural efetuado pelo programa TropLux, EnergyPlus e Daysim/Radiance (estes dois últimos que também adotam o modelo de Perez *et al*. (1990) para predição da iluminância externa) através da comparação do fator de luz diurna e da comparação das iluminâncias externas resultantes das simulações com dados medidos na cidade de Florianópolis. Os autores encontraram desvios bastante significativos entre os valores medidos tanto para iluminância direta quanto difusa horizontal externa e os dados do programa EnergyPlus. Quando comparado à amostra de dados medidos para Florianópolis, o modelo de Perez superestimava a iluminância difusa em céu encoberto, conforme os autores, porém apresentando melhores resultados para o céu intermediário (ou parcialmente encoberto) e também para o céu claro. Condição esta, todavia, que pode responder de forma satisfatória à dinâmica do céu tropical. Conforme Bittencourt (1993), a partir de pesquisa em cidade litorânea do nordeste do Brasil, o tipo de céu mais recorrente ao longo do ano é o céu parcialmente encoberto. O autor verificou que o céu claro pode apresentar ocorrências mais raras (cerca de 4,5%, em média), enquanto o tipo encoberto apresentaria uma ocorrência de cerca de 15% (BITTENCOURT, 1993).

Complementarmente aos modelos de céu descritos, outras técnicas importantes foram desenvolvidas para facilitar e auxiliar, tanto nos procedimentos de medição como na modelagem computacional desses componentes. Principalmente nas últimas duas décadas, diversos modelos têm sido desenvolvidos a fim de auxiliar na predição da distribuição da luminância na abóbada celeste, por meio da subdivisão da mesma. No âmbito dos estudos da iluminação natural, a predição de iluminâncias é muitas vezes dada em função da visão ou obstrução de regiões discretas da abóbada celeste o que tem encaminhado ao desenvolvimento de uma técnica, hoje padrão, de subdivisão desta abóbada em uma série de parcelas (Figura 33). Vários modelos de discretização já foram elaborados com variadas aplicações (TREGENZA, 1987) (TREGENZA e SHARPLES, 1993) (REINHART e HERKEL, 2000) (ABNT, 2004). A subdivisão pode ser dada em função da geometria, simetria e dimensão constante das parcelas da abóbada. Esses critérios podem variar para cada proposta conforme aplicação e objetivo, que pode auxiliar tanto em medições como na modelagem computacional. Para simplificar exigências no âmbito da modelagem computacional, esse tamanho deve levar em conta a compatibilidade ao método de computação empregado e aos componentes analisados. Para cálculos diretos, recomenda-se que as parcelas sejam o menor possível para reduzir erros de locação solar em dada parcela do céu, mas um compromisso deve ser encontrado para que o incremento no número de parcelas não gere uma quantidade excessiva de cálculos (e.g. coeficientes e/ ou fatores de luz do dia), aumentando o tempo de cálculo e armazenamento (CABUS, 2002).

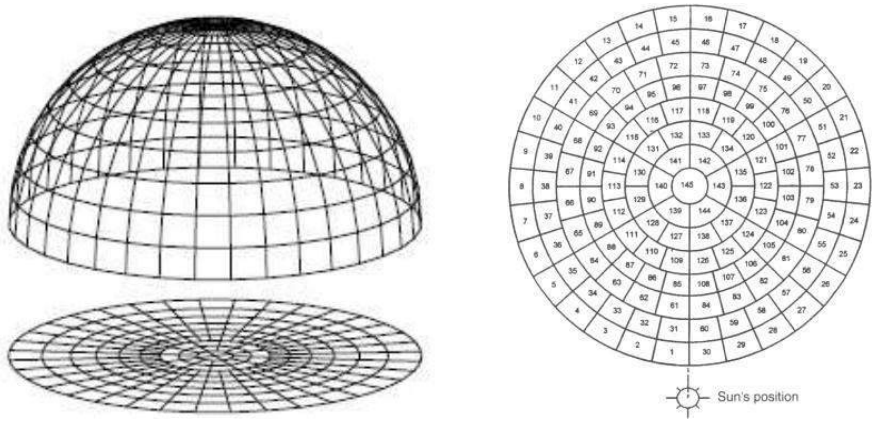


Figura 33: esquema de subdivisão do céu em parcelas. Fonte: Cabus (2002).

(b) Modelos de céu para predição das trocas radiativas no infravermelho

Um superfície qualquer situada na crosta terrestre irá absorver a energia solar (em função de sua absortividade espectral), e uma vez aquecida à uma temperatura T_s, passará a trocar energia por radiação de ondas longas com o seu entorno hemisférico T_{amb}, seguindo a lei de Stefan-Boltzmann (Eq.10):

$$I_L = \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T_s^4) \qquad [W.m^{-2}] \qquad [Eq.\ 10]$$

Onde (ε): emissividade hemisférica total e (σ): constante de Boltzmann=5,67 W. $m^{-2}.K^{-4}$

Para definição desta temperatura superficial, muitos autores usam a conhecida aproximação através da temperatura sol-ar[16] (ROBINSON, 2011).

Uma definição adequada da temperatura da abóbada hemisférica pode ser obtida considerando-se o ângulo de visão do céu, e a superfície com uma dada inclinação (β)(Eq.11):

[16] A temperatura sol-ar representa o efeito combinado da radiação solar incidente na superfície e dos intercâmbios de energia por radiação e convecção entre esta e o meio envolvente.

$T_{amb}^4 = T_{céu}^4(1 + cos\beta)/2$ [K] [Eq. 11]

A temperatura do céu, por sua vez, é função das características de composição da atmosfera (e.g. moléculas atmosféricas, aerossóis e a cobertura de nuvens). As nuvens variam conforme o tipo, distribuição e espessura, e têm um papel determinante na obtenção da emitância do céu.

Há uma variedade de modelos empíricos voltados para esta determinação, e que foram desenvolvidos através de medições e da proposição de modelos, como os por Angstrom (1915), Brunt (1932), Berdahl e Martin (1984) e Unsworth e Monteith (1975).

Skartveit *et al*. (1996) compararam predições de irradiância no infravermelho dadas por 34 fórmulas empíricas diferentes com medições e resultados obtidos por meio do uso do programa de simulação MODTRAN[17]. Objetivou-se qual modelo apresentaria maior alcance em termos de aplicabilidade climática, concluindo-se que aquele de Berdahl e Fromberg (1982), ao expressar a emitância do céu, inicialmente, sem nuvens (ε_0), como função linear da temperatura de ponto de orvalho (T_d), apresentou um desempenho bastante adequado para um amplo intervalo de temperaturas e umidades (Eq.12):

$\varepsilon_0 = 0.741 + 0.00062\, T_d$ [/] [Eq. 12]

Estudos posteriores, como os realizados por Berdahl e Martin (1984), incluíram na expressão da emitância do céu sem nuvens, a cobertura e a altura das nuvens, e o gradiente de temperatura.

No entanto, na ausência de medições relevantes, Skartveit *et al*. (1996) propuseram uma boa aproximação para o mencionado modelo, onde o aumento da emitância do céu com nuvens poderia ser expresso da seguinte forma: $(\varepsilon - \varepsilon_0)/(1 - \varepsilon_0) \approx n^{2.5}$, com n sendo a fração de nuvens no céu ($n = C/8$, onde C seria a nebulosidade[18] em octas), de modo que: $\varepsilon_{céu} = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0)\, n^{2.5}$ e:

$T_{céu}^4 = T_a^4\, \varepsilon_{céu}$ [K] [Eq. 13]

Autores que estudaram a contribuição da temperatura do céu em clima tropical a partir de um conjunto de medições em cidades típicas desse contexto, como em Guadeloupe (MOLLE, 1984), a escreveram de forma semelhante: $T_{céu} = T_a \varepsilon_{céu}^{0,25}$, sendo a emitância equivalente do céu, também em função empírica da temperatura do ponto de orvalho. Utilizou-se para Guadeloupe (região de clima tropical úmido), o valor de emitância do céu para o mês de março, por exemplo, de 0,85. Substituindo esse valor na equação acima, tem-se um valor da temperatura do céu bastante próxima da temperatura do ar, condição esperada para essas regiões, devido à elevada quantidade de vapor d'água no céu. O vapor d'água tem grande capacidade de absorção de energia radiante no infravermelho. Consequentemente, quanto maior for o conteúdo de vapor d'água na atmosfera, menor a capacidade de emissão infravermelha terrestre.

Essa característica, como será visto mais adiante, implicará de forma significativa na magnitude da energia radiante emitida pelas superfícies construídas em cidades como Maceió.

I.2.4. Balanço de radiação nas superfícies

O balanço de energia por radiação exprime o diferencial entre a quantidade de radiação que é absorvida e emitida por um dado corpo ou superfície urbana (COLOMBERT, 2008), pode ser expresso da seguinte forma (Figura 34):

[17] MODTRAN (*MODerate resolution atmospheric TRANsmission*) simula a propagação atmosférica de radiação eletromagnética uma ampla gama espectros e de processos de absorção e emissão na atmosfera, entre outros (ACHARYA, BERK, *et al*., 1998). Esse modelo já foi amplamente validado e verificado, porém, além de demandar um elevado custo computacional, exige a entrada de numerosos dados de variáveis de difícil acesso.

[18] Dado facilmente acessível em banco de dados da meteorologia.

$$Q^* = OL\downarrow - OL\uparrow + (1-\rho)\, OC\downarrow \qquad \text{[Eq. 14]}$$

Onde,
Q*, a radiação resultante (W.m^{-2});
OL ↓ , a radiação atmoférica descendente;
OL ↑ , a radiação de onda longa, emitida pelo meio;
OC ↓ , a radiação solar global recebida sobre uma superfície horizontal;
ρ é o albedo da superfície.

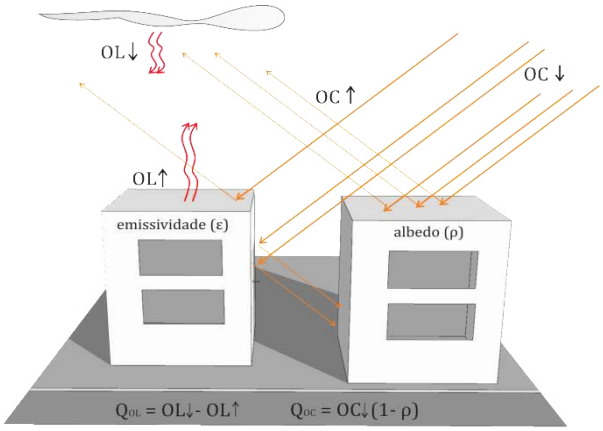


Figura 34: esquema ilustrativo das trocas radiativas na cidade. Fonte: ilustração do autor (2013).

I.2.4.1. Radiação solar incidente (OC↓)

Conforme já indicado, a radiação solar (luz visível e infravermelho próximo) sofre absorção e difusão, durante sua passagem pelas camadas atmosféricas, presença de nuvens e dos outros componentes atmosféricos.

Em consequência, incidem na superfície terrestre: a componente solar *direta* e componente solar difusa, radiação redistribuída pela abóbada celeste.

Dessa radiação que chega nas diferentes superfícies construídas ou em ambientes naturais, importantes variações podem ser verificadas. Ringenbach (2004) estimou a partir de alguns estudos empíricos que a radiação solar incidente em áreas urbanas pode ser de 3 a 10% menor que em áreas rurais. Isto pode ser explicado pelo maior teor de poluição atmosférica em alguns meios mais urbanizados. Há uma presença crescente de partículas diversas, aerossóis, que absorvem e fazem a difusão da radiação solar, e núcleos de condensação, promovem a criação de nuvens (SACRE, 1983) (RINGENBACH, 2004). Estudos apresentados por Stanhill e Kalma (1995) em Hong Kong (China) mostram que, em alguns casos extrnosso, a atenuação da radiação pode alcançar mais de 30% em relação ao meio rural. A radiação difusa, por outro lado, aumenta devido aos processos mais intensos de difusão da radiação direta que não consegue ultrapassar a camada de poluição, porém este aumento do difuso não consegue compensar a grande atenuação da radiação direta (CANTAT, 1987), reduzindo a quantidade da energia total incidente. Esses processos de modificação da atmosfera urbana reduzindo a radiação incidente poderá contribuir, por exemplo, de forma significativa na redução do potencial solar de produção energética nos centros urbanos. Somado a isso, a poluição do ar pode implicar também no depósito de poeira nas placas coletoras (painéis solares) que podem ter eficiência progressivamente reduzida (CLOSE, 1996). Além disso, outro fator importante na redução da radiação incidente nas superfícies é a morfologia construída, devido aos múltiplos efeitos exercidos pela presença de construções, como a obstrução e a projeção de sombras. Esses efeitos particulares ligados à morfologia urbana serão tratados com mais detalhes no próximo item.

I.2.4.2. Radiação solar refletida (α OC ↓)

A radiação incidente sobre qualquer superfície opaca (como o solo) é, então, absorvida e/ou refletida:

$$E_\lambda\ (incidente) = E_\lambda\ (absorvido) + E_\lambda\ (refletido) \quad \text{[Eq. 15]}$$

No balanço radiativo, a radiação solar refletida (α OC↓) depende do albedo da superfície urbana (α). O albedo dependerá, em centros urbanos, da geometria do ambiente construído e dos materiais de construção (textura urbana).

As superfícies urbanas apresentam albedos variados, mas em média inferiores aos observados nas superfícies naturais. A morfologia urbana (ou a disposição geométrica) dos componentes urbanos na interceptação da radiação, também participa na diminuição no albedo em zonas urbanas (como será visto mais adiante). Oke (1987) estima que o albedo médio das cidades é da ordem de 0,15, que pode ser inferior ao albedo de zonas rurais (0,11 a 0,15 para a floresta; 0,2 para vegetação; 0,25 a 0,3 para solos nus) (NAJJAR, KASTENDEUCH, *et al.*, 2005).

Em geral, superfícies secas ou de cores claras refletem mais a radiação solar que superfícies úmidas (Tabela 2). Conforme observado por Taha (1997(a)), os albedos urbanos estão, geralmente, incluídos entre 0,10 e 0,20, entretanto, em algumas cidades, esses valores podem ser muito maiores. Cidades do Norte de África são bons exemplo de albedos mais elevados, entre 0,30 e 0,45, pois que consistem em cidades situadas, muitas vezes, em meio arenoso (e.g. cidades em torno do deserto do Sahara), de habitações construídas em terra clara e situadas em clima bastante árido. Já as cidades americanas e européias, em sua maioria, apresentam albedo entre 0,15 e 0,20. Medições recentes em países da Europa mostraram que o albedo das superfícies urbanas europeias é extremamente baixo, devido à elevada mineralização do solo urbano (COLOMBERT, 2008).

Observa-se que o albedo em ambiente urbano pode apresentar uma variação diária importante (CHIMKLAI, HAGISHIMA e TANIMOTO, 2004), pois é também definido em função da posição do sol, ou seja, ao ângulo de incidência da radiação solar. Assim, devem ser utilizados para o albedo das cidades, valores que considerem o efeito das sombras, a radiação refletida das superfícies com propriedades diferentes, a importância de interceptação da radiação, etc.

Tabela 2: albedo (em %) de variados tipos de superfícies. Fonte: Ayoade (1996).

Superfícies	**Albedo**	**Superfícies**	**Albedo**
Solo negro e seco	14	Gramados	15-30
Solo negro e úmido	8	Neve (recém caída)	80
Solo nu	7-20	Gelo	50-70
Areia	15-25	Água (altitude solar >40°)	2-4
Florestas	3-10	Água (3°<altitude solar < 30°)	6-40
Campos naturais	3-15	Cidades	14-18

A questão do albedo será tratada em mais detalhes no item I.2.5 quando das discussões do albedo como fator tipo-morfológico pertinente na avaliação das modificações microclimáticas na cidade.

I.2.4.3. Radiação térmica atmosférica descendente de onda longa (OL ↓)

Os elementos presentes na atmosfera (ar, vapor d'água, dióxido de carbono, nuvens, etc.) emitem radiação térmica de onda longa (radiação infravermelha) e que atingem uma dada superfície ao nível do solo.

Esta radiação aumenta na presença de nuvens e aerossóis e, apresenta, em céus claros, uma variação diurna. A radiação térmica do comprimento de onda máximo é atingida em torno de meio-dia e mínimo no final da noite (SACRE, 1983).

Estournel *et al*. (1983) realizaram em Maio e Junho de 1979, medições em sítio urbano, na cidade de Toulouse, que é uma cidade média (de aproximadamente 400 mil pessoas), e medições também em local rural fora da cidade. Estas medições mostraram um excedente de radiação infravermelha descendente na cidade, tanto durante a noite, como durante o dia (excesso de aproximadamente 15Wm^{-2} (ou 5%), no final da noite é de 25Wm^{-2} (ou aproximadamente 7%) à tarde). Isto é acompanhado por uma diminuição de 3,5% (30Wm^{-2}) na radiação solar direta em sítio urbano.

I.2.4.4. Radiação térmica ascendente (OL ↑)

A radiação térmica emitida pelo meio, OL↑ (espectro infravermelho), depende da temperatura da superfície e da emissividade dos materiais que constituem a superfície ao nível do solo (lei de Stefan-Boltzmann). Nas áreas urbanas, materiais possuem, em geral, temperaturas mais elevadas do que os materiais mais naturais do meio rural circundante. Assim, a radiação térmica ascendente é mais importante na área urbana, sobretudo, a partir do meio do dia, período em que materiais tiveram tempo para se aquecer. Da mesma forma, no período noturno, as superfícies urbanas resfriam-se mais lentamente que as superfícies naturais (RINGENBACH, 2004). Nunez e Oke (1977) também observaram que o resfriamento noturno é menos acentuado na rua que em telhados, devido à retenção de radiação de onda longa pelos edifícios de um lado e pela rua, do outro (COLOMBERT, 2008).

I.2.4.5. Radiação resultante (Q*)

A radiação resultante é o resultado do balanço radiativo Terra-Atmosfera, e que estabiliza o clima na Terra (MOLION, 2008). Todos os termos desse balanço podem ser afetados, de forma mais ou menos importante, pelo meio urbano, seja devido a sua geometria, aos seus materiais, ou ainda a poluição atmosférica.

Para Oke (1987) ao analisar esta equação verificou que o saldo de radiação, em geral, não varia muito entre a cidade e o campo, com uma redução provavelmente, menor que 5% nas áreas urbanas em comparação com as zonas rurais circundantes.

Da radiação infravermelha, o balanço OL ↓ – OL ↑ é, conforme Oke (1987) e Ringenbach (2004), igualmente pequeno em meio urbano, em relação às zonas vizinhas menos urbanizadas. O aumento da radiação infravermelha descendente (OL ↓), devido à poluição não permite compensar o aumento da radiação infravermelha ascendente (OL ↑).

No entanto, o balanço do fluxo radiativo solar e infravermelho é apenas parte do balanço de energia para uma superfície, pois há ainda as trocas convectivas secas (entalpia sensível QH) e úmidas (entalpia latente QL), como a condução térmica (QG) para o solo.

A superfície total do solo é, portanto, como um mosaico de superfícies vegetais, minerais e sintéticas, irrigadas ou não, apresentando propriedades radiativas, térmicas, aerodinâmicas e hídricas completamente diferentes (ARNFIELD, 2003). Além disso, na camada intraurbana, acentua-se o desdobramento dessas superfícies e a heterogeneidade geométrica, a diversidade das propriedades termofísicas do desenho urbano, os diversos componentes desconhecidos (tal como a composição do subsolo) ou a imprevisibilidade da quantidade de equipamentos energéticos no interior dos edifícios, tornam o cálculo do balanço de energia urbano, uma tarefa extremamente difícil (BOYEUR, 2009).

No âmbito desse trabalho, reconhece-se a importância e cita-se mais adiante (item I.2.5) as principais modificações microclimáticas pela presença da cidade e sua morfologia, pois que os elementos climáticos resultantes dessas modificações atuam de forma interativa no balanço

radiativo das superfícies – objeto de interesse nesse trabalho. Porém, o balanço de energia da cidade não será detalhado, visto que não parte da abordagem e da problemática específica tratada nessa tese.

I.2.5. O efeito da forma urbana no balanço de radiação das superfícies construídas

A radiação solar interage com o tecido urbano em vários níveis. A geometria e implantação dos edifícios e dos cânions urbanos[19] induzem diferentes padrões de obstrução e projeção de sombras em suas fachadas. Além disso, as características físicas das superfícies (material, cor, textura) afetam a absorção e reflexão solar, e diferentes exposições solares espaciais e temporais causam variados diferenciais de temperaturas e, portanto, produzem também trocas térmicas convectivas entre as superfícies dos edifícios e o meio/rua (GIVONI, 1998).

O acesso ao recurso solar para as superfícies edificadas no contexto das estruturas urbanas dependerá de fatores tanto espaciais como temporais. Espacialmente (sincronicamente), que depende da relação entre a largura das ruas (ou a distância entre edifícios) e a altura dos mesmos, enquanto, temporalmente (diacronicamente), é afetada pela implantação dos edifícios na malha urbana (GROSSO, 1998).

Um meio urbano sob a incidência solar imporá restrições para o processo de reflexão, pois a fração da radiação solar incidente que é refletida pelas diferentes superfícies, só consegue sair parcialmente no sentido da atmosfera. Assim, dependendo da proximidade dos edifícios, da altura média construída e da abertura das ruas e dos vazios urbanos, essa radiação pode ficar retida no interior da malha urbana, após sofrer múltiplas reflexões. Com isso, as superfícies se aquecem mais que se estivessem isoladas uma das outras. Esta interceptação da radiação solar pela geometria urbana é influenciada e concorre para alterações nos valores do albedo das superfícies (COLOMBERT, 2008). As questões relativas à influência dos diversos materiais das superfícies serão retomadas mais adiante.

No caso de ambientes urbanos bastante verticalizados, o afastamento entre as edificações terão uma influência sobre as trocas no infravermelho e na faixa solar.

Vários indicadores morfológicos podem ser usados para definir a magnitude das obstruções e dessas trocas radiativas promovidas pela presença de estruturas urbanas (ROBINSON, 2006), a exemplo do fator de visão do céu ($\psi_{céu}$) e do prospecto médio (P_m) (Eqs. 16 e 17). A Figura 35 ilustra esquematicamente os ângulos de obstrução e as dimensões do cânion urbano para cálculo dos dois indicadores mencionados.

[19] Arranjos lineares de blocos de edificação, comuns nas cidades do século XIX e XX, constituindo cavidade de ar acima das ruas, limitado lateralmente pelas paredes das edificações. De acordo com Oke (1978), um cânion urbano é entendido como um "intervalo (espaço) entre duas construções adjacentes de um meio urbano".

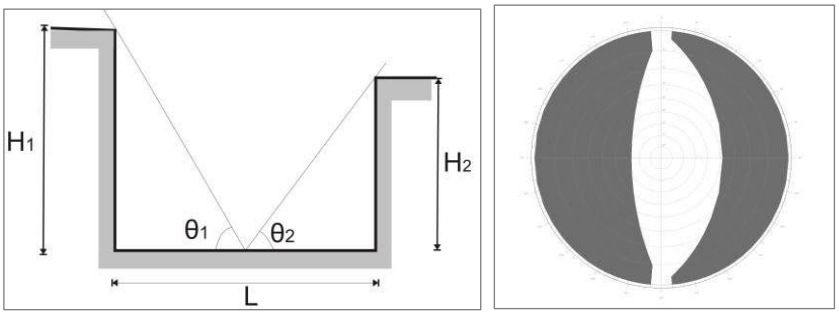


Figura 35: ângulos de obstrução e as dimensões para cálculo do fator de visão do céu e prospecto médio em cânions urbanos. Fonte: ilustração do autor, adaptado de Oke (1987).

$$\psi_{céu} = \left(1 - (\psi m_1 + \psi m_2)\right) = \frac{(1-cos\theta_1)}{2} + \frac{(1-cos\theta_2)}{2}) \qquad [/] \qquad \text{[Eq. 16]}$$

$$P_m = (H_1 + H_2/2)/L \qquad [/] \qquad \text{[Eq. 17]}$$

O conjunto de processos particulares das trocas radiativas ocorridos em meios urbanos (e.g. reflexões, obstruções, projeção de sombras, etc.) são também acompanhados de modificações nas características térmicas, ou mesmo higrotérmicas (como será visto mais adiante) das superfícies e dos espaços. Além da geometria (visão do céu, sombras, etc), essas modificações são também atribuídas à materialidade das superfícies urbanas.

As superfícies com menores valores de albedo absorvem mais a radiação solar ($\alpha_{solar} = 1 - \rho$) do que aquelas com um albedo mais elevado. Uma vez aquecidas (o que depende de suas propriedades físicas e de transporte), essas superfícies passam a emitir radiação térmica, em função da sua temperatura e emissividade[20] e, esta radiação pode ficar também retida no interior do cânion, aquecendo, assim, o ar ambiente e os materiais das envolventes.

Além do albedo e da emissividade, a capacidade térmica[21], a condutividade térmica[22], são também indicados como fatores relevantes na avaliação do balanço radiativo em superfícies urbanas (COLOMBERT, 2008). Esses fatores retardam mais ou menos seu processo de aquecimento e de restituição do calor absorvido para o meio (inércia térmica dos materiais).

Sobre a importância específica da variação da emissividade nesse balanço, alguns autores como Santamouris (2005) e Artis e Carnahan (1982), discordam, afirmando que o papel da emissividade seria menor e destacam a importância das demais propriedades térmicas dos materiais. Pois a maioria dos materiais de construções, entre os mais amplamente empregados, possuem emissividade em torno de 0,9.

As diferenças no comportamento térmico dos materiais podem ser identificadas, em parte, por sua temperatura da superfície. Nesse sentido, Artis e Carnahan (1982) puderam verificar, a partir de análises da termografia das coberturas dos edifícios, que a variação da emissividade de um material teria, de fato, um efeito mínimo na temperatura de superfície.

Também podem ser citados os seguintes estudos experimentais realizados sobre o comportamento térmico de alguns materiais de construção:

Asaeda *et a*l. (1996) analisaram o comportamento térmico do concreto (albedo de 0,45 e

20 A emissividade (/) corresponde à relação entre a radiação infravermelha emitida por uma superfície e o máximo teórico dessa radiação por um corpo negro submetido à mesma temperatura.
21 A capacidade térmica (J/°C) é a quantidade de calor que pode armazenar um material em relação ao seu volume. Ela é definida pela quantidade de calor necessária para elevar em um grau celsius, a temperatura de um metro cúbico do material.
22 A condutividade térmica (W/m/°C) quantifica a habilidade de um corpo em conduzir calor.

condutividade térmica de 1,69 $W.m^{-1}.°C$), do asfalto (albedo de 0,10 e condutividade térmica de 0,74 W.m.°C) e do solo nu. Os autores mediram a distribuição das temperaturas a diferentes profundidades no material, analisaram os fluxos de calor superficial "sol-ar" no período de verão e mediram a radiação infravermelha procedente do material (OL↑), efetuando o balanço energético à superfície do material. Concluíram que a radiação infravermelha ascendente emitida pelas superfícies urbanas (OL↑) seria quase contrabalançada pela radiação infravermelha descendente atmosférica (OL↓) quando a diferença de temperatura entre o ar ambiente e o da superfície for mínima, como pode ocorrer em climas quentes e úmidos. Em contrapartida, quando a temperatura da superfície excede bastante a do ar, então OL↑ passa a ser maior que OL↓ e a absorção de OL↑ pela baixa atmosfera pode se tornar um componente significativo do balanço energético e contribuir, assim, para o aquecimento local da atmosfera.

Rosenfeld *et al*. (1995) apresentam também a influência do albedo sobre a temperatura de superfície. A Figura 36 mostra as diferenças entre as temperaturas de superfície e do ar, ao meio-dia, para diferentes superfícies horizontais expostas ao sol (as condições de vento, que podem ter uma influência importante, não são assinaladas nesse trabalho). Para as superfícies de reduzido albedo e que, portanto, absorvem fortemente a radiação solar, a diferença de temperaturas entre a superfície e o ar ambiental, ΔTs-a, pode atingir 50°C. Para superfícies menos absorventes (de elevado albedo), como a pintura branca, ΔTs-a = 10°C. Pode-se notar que a superfície pintada de preto gera uma diferença de temperatura (entre superfície e ar) de 40°C quando comparada com a superfície pintada de branco.

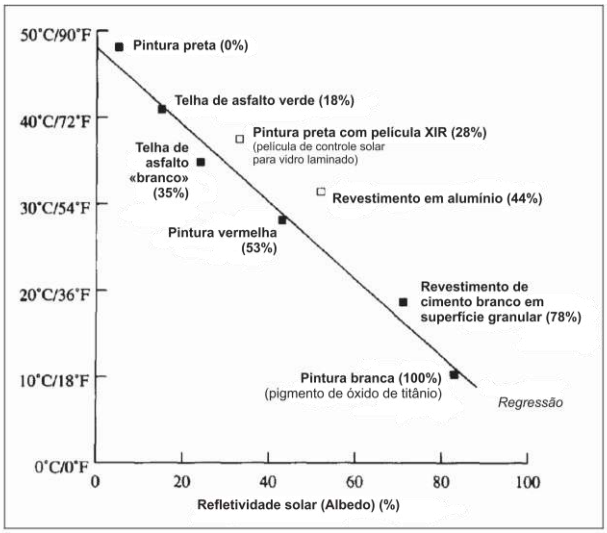


Figura 36: diferença entre a temperatura da superfície e do ar, em função do albedo de diferentes revestimentos. Fonte: adaptado de Rosenfeld *et al*. (1995).

Além disso, no meio urbano, devido à sua morfologia, torna-se complexo o processo de reflexão da radiação solar, devido ao parcial aprisionamento no cânion e a saída para a atmosfera. Assim, além do albedo das superfícies passa a ter influência, a geometria dos arranjos da malha urbana, como que estabelecendo um albedo equivalente.

Um exemplo dessa complexa e importante relação pôde ser demonstrada por Oke (1987) e Aida e Gotoh (1982). Os autores verificaram que há uma variação do albedo em função da geometria urbana das ruas influenciando na exposição solar dessas superfícies (Figura 37). Concluíram que quanto maior o prospecto (ou seja, quanto maior for a altura do cânion em relação a largura da rua), menor o albedo equivalente para o arranjo das superfícies.

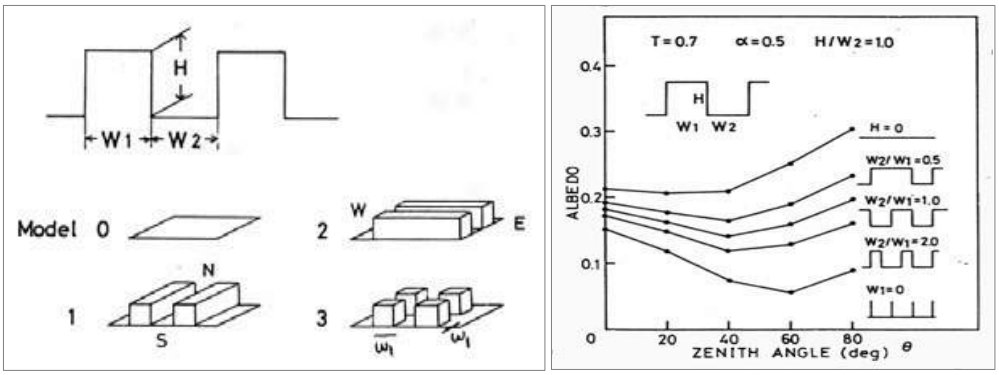


Figura 37: modelos de experimentação para análise do albedo, em função da variação do zênite solar e perfis de ruas. Fonte: Aida e Gotoh (1982).

Todas essas características morfológicas e de propriedades termo-radiativas dos materiais nas cidades permitem que seja criado um mosaico de condições climáticas bastante particulares para cada cidade, distrito ou bairro.

Um fenômeno que conceitua bem essas diferenças microclimáticas no âmbito da cidade é chamado de efeito ilha de calor urbano.

I.2.5.1. O efeito da Ilha de calor urbano

O efeito estufa consiste em processo de aquecimento atmosférico em função da presença dos Gases de Efeito Estufa - GEE (vapor d'água, gás carbônico, metano, ozônio, óxido nitroso e compostos de clorofluorcarbono). Os GEE, como bons absorvedores da radiação infravermelha emitida pela Terra, atuam como uma barreira atmosférica que impede a emissão dessa energia para o espaço, (MOLION, 2008).

Analogamente a este efeito, porém em menor escala, é possível reconhecer, no interior do dossel urbano, um aumento significativo da temperatura do ar e das superfícies construídas nas cidades se compararmos com um ambiente natural. Esse fenômeno climático regional é conhecido como ilha de calor urbano (ICU) e, consiste no resultado cumulativo de modificações na cobertura do solo e na composição da atmosfera urbana, devido ao desenvolvimento urbano e às atividades antrópicas (ALCOFORADO, LOPES, *et al.*, 2005). Segundo Oke (1987), o efeito da ilha de calor urbano é, provavelmente, o exemplo mais claro e imediato das modificações humanas no clima.

O termo ilha de calor urbano sugere, portanto, a existência de uma cidade "quente" rodeada pelo campo mais fresco e, corresponde à integração da totalidade dos microclimas originados pela urbanização (LANDSBERG, 1981). No entanto, a exata dimensão e forma desse fenômeno variam bastante no tempo e no espaço, como resultado de características meteorológicas, de implantação e da morfologia urbana. A cidade, portanto, consistiria, sobretudo, num mosaico de áreas mais quentes (por exemplo, bairros de grande densidade de construção e tráfego intenso) e de outras mais frescas (como em áreas verdes e de extensas massas de água).

Segundo Oke (1987) e diversos outros pesquisadores da área, a magnitude desse efeito poderia ser estimada utilizando como indicador a diferença de temperatura do ar entre a área urbana e o seu entorno rural menos urbanizado (Δt_{u-r}). Após ter estudado o fenômeno em centros urbanos de 31 cidades, Oke (1982) pôde concluir que, em cidades com condições de céu claro e calmaria, pode-se aplicar uma regra simples para o fenômeno da ilha de calor urbano. Essa regra dependeria unicamente da variação do prospecto da rua (razão da altura dos edifícios pela largura da rua, Hm/L) ou do fator de visão do céu (ψcéu), como discutido anteriormente (Eq.18 e 19).

$$\Delta T_{(u-r)} = 7{,}54 + 3{,}97 \log \frac{H}{L} \quad [^{\circ}C] \quad [Eq.\ 18]$$

$$\Delta T_{(u-r)} = 15.27 - 13{,}88\ \psi_{céu} \quad [^{\circ}C] \quad [Eq.\ 19]$$

A intensidade da ICU varia, não apenas em função do tamanho do centro urbano, mas também da densidade populacional, da densidade construída e dos parâmetros que descrevem a morfologia urbana: implantação, forma e materialidade das edificações. As diferenças de temperatura encontradas podem variar de 2˚C à 12˚C, em função da dimensão da cidade, da densidade de habitantes e das construções (MESTAYER e ANQUETIN, 1994)

A ICU apresentaria indiretamente efeitos na demanda de energia dos edifícios. Nos centros urbanos, as cargas térmicas podem ser dobradas pela ocorrência desse fenômeno, enquanto que o coeficiente de desempenho dos sistemas de ar-condicionado é reduzido (SANTAMOURIS, 2001).

Além das alterações no balanço radiativo, a existência da ilha de calor urbano tem sido atribuída a numerosas causas (MESTAYER, DURAND e AUGUSTIN, 2005) (SANTAMOURIS, 2005) (ARNFIELD, 2003) (ALCOFORADO, LOPES, *et al.*, 2005). As principais dessas causas são discutidas a seguir. Optou-se por citar aquelas que podem produzir efeitos importantes no comportamento das trocas radiativas nas superfícies urbanas.

(a) Modificação da evapotranspiração e da umidade do ar

A modificação da evapotranspiração em áreas urbanas está relacionada tanto à impermeabilização do solo quanto à redução de áreas verdes. A impermeabilização do solo urbano, devido à mineralização das superfícies e o escoamento muito rápido das águas urbanas pela rede, reduz consideravelmente a evaporação, devido a uma menor quantidade de água no solo para a evaporação. A redução de áreas vegetalizadas também atua na modificação desse processo, pois os vegetais são capazes de extrair água do solo para retorná-la em forma de vapor d'água na atmosfera (transpiração). Esses processos contribuem substancialmente para a redução umidade do ar no meio urbano.

Essa diminuição da umidade é acompanhada de um aumento das temperaturas, pois a evaporação da água é dada pelo calor latente absorvido. Um exemplo disso pode ser dado citando o estudo de Dettwiller (1978). O autor demonstrou que para uma precipitação de 5mm/m^2 por metro quadrado em vinte e quatro horas, oito vezes menos água é evaporada em meio urbano que em meio rural. A diferença da quantidade de calor transferida ao ambiente corresponde a 2,5 kWh/m^2 num dia, ou seja pouco mais do dobro do calor resultante das atividades humanas no verão (DETTWILLER, 1978).

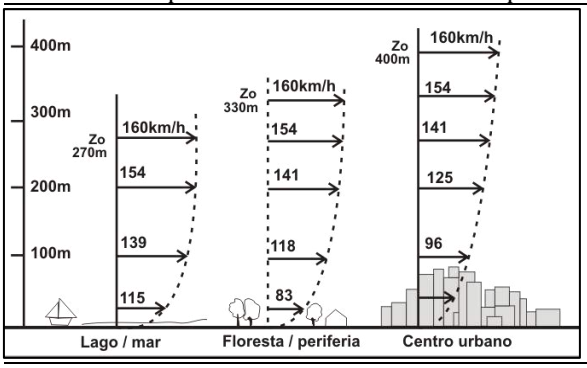
(b) Modificação no escoamento do ar

A natureza fragmentada e heterogênea da superfície urbana tem implicações importantes tanto no balanço termo-radiativo quanto no escoamento do vento na camada limite urbana (ARNFIELD, 2003). Este último também implicará na modificação do balanço radiativo, devido a seu efeito térmico atuante na transferência de calor sensível por convecção entre as envolventes dos edifícios e o meio circundante, pode intensificar ou atenuar localmente o aquecimento do ar nos espaços urbanos.

Na escala local da cidade, o fluxo do vento em contato com uma superfície está sujeito aos efeitos do atrito. Sendo o grau de rugosidade da superfície que determinará a intensidade dos efeitos provocados por este fenômeno. O incremento da velocidade do vento ao longo de um eixo vertical varia de zero, na superfície terrestre, até uma velocidade igual à do fluxo livre de obstruções, gerando o que chamamos de gradiente da velocidade do vento. A altitude na qual a velocidade do vento é livre da influência do atrito da terra é conhecida como altura do gradiente e é

função da rugosidade da superfície terrestre (BITTENCOURT, 1993) (Tabela 3). Quando o fluxo do vento atravessa campos abertos, áreas suburbanas ou centralidades urbanas mais adensadas, distintas alturas de gradientes são produzidas, uma vez que as rugosidades dessas áreas são distintas. Consequentemente, a velocidade do vento na altura das construções dependerá do entorno no qual se encontram inseridas, Tabela 3. Em largas extensões, o perfil permanece constante, se a rugosidade do terreno for homogênea e o relevo não for acidentado.

Tabela 3: perfis de velocidade do vento para diferentes áreas. Fonte: adaptado de Oke (1987).



Terreno	**Z_o** (m)
Assentamento disperso (fazendas, vilas, árvores)	0,2 – 0,6
Subúrbio	
Baixa densidade (residências e parques)	0,4 – 1,2
Alta densidade	0,8 – 1,8
Centro urbano	
Alta densidade (>5 pavimentos de edifícios de quadra e alinhados)	1,5 – 2,5
Alta densidade com edifícios mais quadrados de múltiplos pavimentos	2,5 - 10
Alta densidade (>5 pavimentos de edifícios de quadra e alinhados)	1,5 – 2,5

A multiplicação das construções nas cidades aumenta, portanto, a rugosidade e leva à diminuição da velocidade do vento e ao aumento de fenômenos como a turbulência[23] (SACRE, 1983) (ESCOURROU, 1981). Assim, para uma mesma altura, de cerca de 20m acima do solo, pode-se observar uma velocidade média, de cerca de 20 a 30% menor na cidade. Por outro lado, a turbulência aumenta na ordem de 50 a 100% (SACRE, 1983).

Outros fatores de importante relevância relacionados ao tecido urbano dizem respeito à orientação das ruas e das quadras urbanas face aos ventos dominantes. Fatores que influenciam o comportamento do escoamento do ar na malha urbana (SACRE, 1983). Outros estudos, como realizado por Oke e Nakamura (1988), mostram o importante efeito da orientação e também do prospecto (altura e largura) em cânions urbanos. Na existência de grandes prospectos em malhas extremamente densas e rugosas, a velocidade do vento é reduzida e calor mais dificilmente dispersado.

A magnitude do impacto da rugosidade sobre a velocidade do vento e no balanço radiativo de onda longa será enfocado para as classes morfológicas de referência de Maceió, como será discutido no Capítulo II do manuscrito.

(c) A influência das emissões de calor antrópico

A liberação de calor antrópico (climatização, transporte, atividade industrial e também o metabolismo humano) é muito mais elevado em áreas urbanas, devido à concentração de atividades e de habitações. A magnitude do impacto do fluxo de calor antrópico no clima foi estudado por Crutzen (2004). O autor mostra que o conjunto de energia lançada pelo homem na atmosfera (é de 0,025Wm^{-2} em média), seria quase desprezível se comparado aos 235 W.m^{-2} recebidos em média do sol, pelas reflexões das superfícies e pela atmosfera. A liberação de calor antrópico é concentrada, sobretudo, em uma pequena porção da superfície da terra, em particular, dentro de áreas bastante urbanizadas. O potencial impacto desses fluxos de calor antrópico no clima local pode ser importante, com valores típicos de 20 - 70 W.m^{-2} (CHIRKOV, 2003).

[23] Em mecânica dos fluidos designa-se por **escoamento turbulento**, **fluxo turbulento** ou simplesmente **turbulência** o escoamento de um fluido em que as partículas se misturam de forma não linear, isto é, de forma caótica com turbulência e redemoinhos, em oposição ao fluxo laminar (Escoamento laminar).

I.2.5.2. Ilha de calor urbano no trópico úmido

Um dos primeiros estudos microclimáticos em região tropical foi conduzido por Nieuwolt (1966), em Singapura. A partir de medições de temperatura do ar e umidade relativa em vários pontos da cidade e comparando com medições da área rural (aeroporto da cidade), o pesquisador verificou que a cidade apresentava-se não apenas mais quente (entre 3˚ e 3.5˚C), como mais seca (umidade relativa até 20% menor). Isto pode ser devido ao aumento da temperatura que, por sua vez, limita a pressão de vapor d'água no ar, diminuindo a umidade relativa nos centros urbanos, quando comparado com dados medidos em estações meteorológicas situadas na zona rural (ESCOURROU, 1991) (OKE, 1987). Segundo Nieuwolt (1966), ruas com prospecto mais estreito produziram resultados ainda mais críticos.

Estudos sobre a ICU em Manaus, no Brasil, por exemplo, mostrou uma redução de até 9% na umidade relativa da cidade em relação à zona rural (MAITELLI e WRIGHT, 1996). Estudo em Cuiabá mostra a formação das ilhas urbanas bem mais secas durante o dia (MAITELLI, SOUZA e PINHO, 2005).

Esses resultados decorrem dentre outros fenômenos, da modificação do balanço radiativo nas cidades. Conforme já discutido, na medida em que a radiação térmica emitida pelas superfícies aquecidas durante o dia encontra barreiras nas estruturas urbanas (e.g. grandes e estreitos prospectos, elevada densidade construída, menor fator de visão do céu) que as impedem de serem enviadas para a atmosfera e ao espaço, há um aumento significativo de calor localmente. O aumento da rugosidade e a redução do movimento de ar no meio urbano faz com que este fenômeno seja intensificado, na medida em que as trocas convectivas atuantes na liberação do calor sensível são minimizadas, dificultando a dispersão do calor acumulado. Somado a isso, as superfícies urbanas, cada vez mais impermeabilizadas, modificam o balanço hídrico nas cidades. Com menos água no ar e nas superfícies (devido ao aumento de temperatura local), menos calor latente é transferido, menor é a evaporação, portanto será maior a quantidade de calor presente.

Alguns trabalhos registraram também a importância de diferenças na umidade urbana/rural, dando origem a existência de uma "ilha de umidade" noturna. Estudos sugerem que o ar seria relativamente mais seco no interior do dossel urbano durante o dia, porém levemente mais úmido durante o período noturno, quando comparado com áreas menos urbanizadas ou rurais (OKE, 1987). No entanto, ressalta-se que com velocidades do vento mais importantes, esse fenômeno reduz sua magnitude, destacando-se, portanto, o efeito da rugosidade do sítio.

No entanto, a ilha de calor é ainda de difícil predição. Os métodos utilizados para descrever esse fenômeno, nas últimas duas décadas de pesquisa, não diferem significativamente, dos adotados anteriormente e, portanto, todos apresentam as limitações apontadas por Lowry (1977) na definição inequívoca dos efeitos urbanos (ARNFIELD, 2003). Métodos estes baseados em monitoramento, em período de tempo determinado, em uma ou mais estações urbanas e rurais.

Publicações recentes, no entanto, têm rediscutido algumas definições metodológicas de avaliação e predição desse fenômeno, incorporando uma abordagem morfológica mais abrangente aos fenômenos microclimáticos urbanos. Stewart e Oke (2009) rejeitam o sistema usual de avaliação de sítios "urbanos" e "rurais". Referem-se a esta classificação como sendo aleatória e subjetiva, dificultando a precisão e consistência nas avaliações das ilhas de calor, visto que, segundo os autores, 2/3 dos estudos na literatura oferecem apenas uma descrição qualitativa dos espaços monitorados, sem oferecer nenhum indicador mais preciso que caracterize as propriedades que influenciam diretamente a magnitude do fenômeno urbano, nomeadamente, a geometria, textura, exposição das superfícies. Nesse sentido, argumentam a necessidade de modelos espaciais do crescimento de assentamentos e da forma urbana, ancorados em um sistema de classificação morfológico mais preciso da paisagem climática em escala local (STEWART e OKE, 2009).

Como conclusão, é possível destacar o papel preponderante da morfologia e da materialidade das superfícies urbanas na modificação do microclima e da formação da ilha de calor. Destaca-se o efeito na modificação do balanço radiativo nesses processos e, também, intrinsecamente o efeito desses processos na modificação do balanço radiativo das superfícies, objeto de interesse desse trabalho.

I.2.5.3. Modelos para avaliação das trocas radiativas no meio urbano

Complementarmente aos modelos precedentes que permitem tratar a complexidade dos fenômenos físicos da atmosfera na trajetória dos raios solares, nessa seção será apresentado de forma resumida alguns modelos que foram desenvolvidos para auxiliar nos estudos de interação da radiação com a forma urbana e na predição da irradiância nas superfícies.

Um dos principais desafios recentes no âmbito dos estudos sobre a modelagem climática dos edifícios na escala urbana se refere à definição de modelos paramétricos para a forma urbana e sua compatibilização com outros voltados para a predição climática. Isto se deve à complexidade e certa heterogeneidade das escalas de alcance e de tipologias.

A maioria dos modelos de predição de desempenho climático (e energético) em edifícios, ainda consideram de forma bastante limitada - e quando a consideram- a presença do contexto urbano. Uma das grandes motivações de trabalhos recentes, inclusive o presente estudo, é o de procurar uma melhor resolução, levando em conta os principais efeitos da forma urbana na predição da interação com a radiação solar.

A fim de ilustrar essa problemática, Robinson e Stone (2004) realizaram um estudo comparativo simples. Seja um ponto central de uma janela à 2m do solo numa fachada situada em um cânion urbano de altura constante de 25m e largura de 10m (ou seja, H/W=2,5). O ângulo de horizonte urbano equivalente (*Urban Horizon Angle* - UHA)[24] (BAKER e STEEMERS, 1994) (ver Figura 38) igual à aproximadamente 66˚. Ou seja, nesse caso, cerca de 2/3 da abóbada celeste está obstruída pelo edifício em frente. Se compararmos com um edifício cujas fachadas verticais possuam um ângulo de horizonte urbano equivalente igual à 0˚ –caso de um edifício modelado em situação isolada de contextos urbanos – mesmo numa situação de céu isotrópico, a irradiação direta para a janela no cânion pode ser menor que 90% em relação ao caso da janela do edifício isolado (Figura 38). O que pode ter implicações consideráveis no consumo energético do edifício.

[24] Altura angular subtendida do ponto central de uma janela à altura média dos edifícios adjacentes.

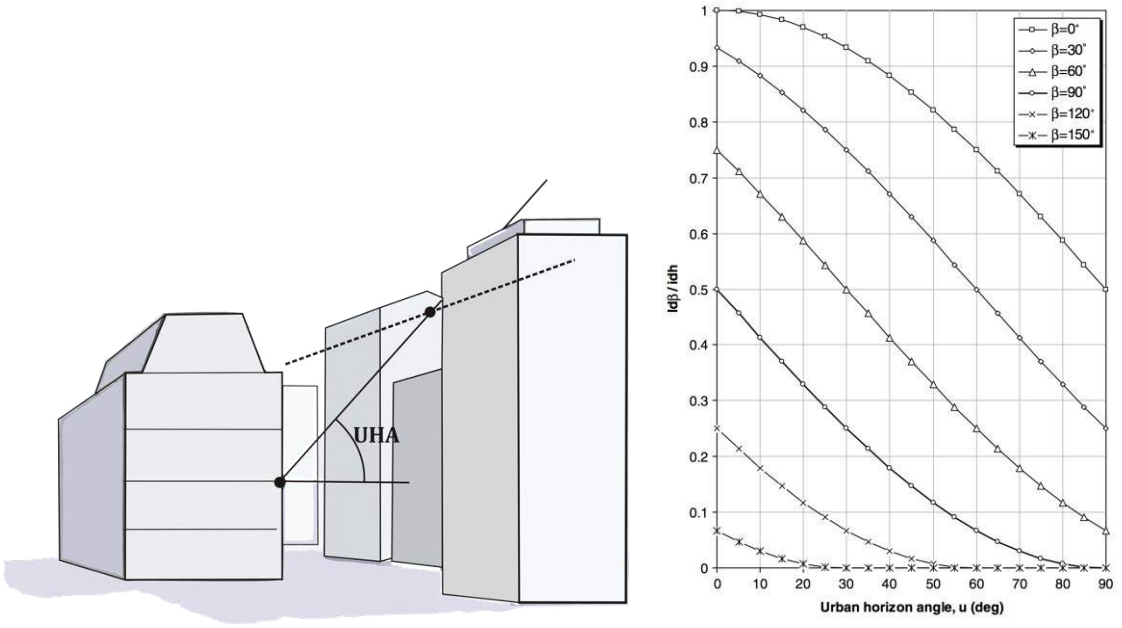


Figura 38: ângulo do horizonte urbano equivalente (UHA). E a razão da irradiância difusa incidente e horizontal como função do UHA e da inclinação do plano de análise. Fonte: Robinson e Stone (2004).

(a) Modelos de Elevação Digital (MDE) para análises urbanas

Um tipo de abordagem interessante, consiste no método de processamento de imagens dos modelos digitais de elevação (MDEs), de muito uso na geografia e introduzidos por Richens (1997), para análise simplificada da forma ou da textura urbana. Um MDE é uma imagem na qual cada pixel corresponde a uma dada posição de coordenadas (x,y) sendo a coordenada z é representada numa escala de cor cinza ($0 \leq z \leq 255$) (Figura 39). Cada pixel está também associado a uma escala 's', que define a largura do pixel , e uma *calibração* 'c', que define a diferença de altura representada por um número inteiro na escala de cinzas. Uma imagem de 512 x 512 na qual a escala do pixel corresponde a 1m e o parâmetro de calibração a 0.2m, representa uma cena urbana de 512m x 512m x 51m. Como mostra o exemplo da figura abaixo, de uma aplicação do MDE para uma cena urbana em Londres, onde numa representação simples da textura urbana numa imagem binária, construído em figura (preto) e fundo (branco).

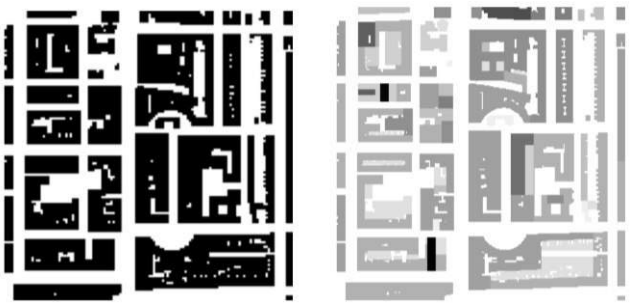


Figura 39: mapa do solo urbano mostrando áreas construídas (figura) e não-construídas (fundo); e MDE – modelo digital de elevação – para uma cena urbana selecionada na cidade de Londres. Fonte: Ratti e Richens, (1999).

O algoritmo central dado pelo autor computa a projeção de sombras para uma posição do sol. Cada pixel é traduzido e reduzido ao longo do vetor oposto, de modo que $\Delta x = \cos\alpha$, $\Delta y = \sin\alpha$ e $\Delta z = c \tan\gamma / s$, cada valor sendo arredondado ao número inteiro mais próximo. O processo

continua até que todas as alturas sejam nulas ou que os pixels restantes tenham sido traduzidos e reduzidos para os limites exteriores da imagem. Se o MED original for deduzido da união de cada uma dessas imagens individuais de sombras, após terem sido convertidas para preto/branco, então, tem-se a projeção das sombras para a cena urbana estudada, conforme mostra a Figura 40. Se o processo for repetido para cada hora em dias representativos ao longo do ano e o valor do pixel dividido pelo número total de imagens, então, a união dessas imagens ponderadas indica a proporção do ano que uma dada superfície horizontal (solo/coberta) fica na sombra.



Figura 40: (a) volume de sombras; (b) imagem preto/branco onde pixels em preto representam área sombreadas e branco sendo superfícies expostas à insolação; (c) fator de visão do céu. Todas para a mesma área urbana de Londres. Fonte: Ratti e Richens (1999).

Mais tarde, Ratti e Richens (1999) utilizaram o mesmo algoritmo do sombreamento para computar o fator de visão do céu. Isto implicou na distribuição de pontos de luz em toda a abóbada celeste e repetição do algoritmo da projeção de sombras de maneira similar a utilizada para produzir a média das sombras ao longo do ano. Para uma maior precisão no algoritmo, utilizaram 255 luzes (distribuídas nas regiões de ângulo sólido similar) correspondendo ao valor máximo de cada pixel, de modo que o valor "0"corresponde ao fator de visão do céu de "1"(e 255 à 0) (Figura 40c) (RATTI, 1999).

Esse modelo pode ser interessante, no entanto, na análise da morfologia a partir de alguns parâmetros descritivos da forma que possibilitam dar indicações pertinentes sobre seu desempenho em termos de insolação, mas necessitaria de validação a partir de simulações ou medições. Um exemplo disso é a aplicação realizada por Ratti (2002) e Ratti et al. (2003). Os autores utilizaram em suas pesquisas, o fator de visão do céu como indicador da irradiação de onda curta incidente e emissão de irradiação de onda longa em configurações urbanas simplificadas.

(b) Modelos simplificados de cânion urbano

Uma abordagem alternativa que resolve algumas das limitações de modelos como o MDE, é a abordagem desenvolvida por Robinson e Stone (2004). Consiste em substituir a complexa geometria dos edifícios urbanos, representando-a como uma "rua cânion equivalente" (também em duas dimensões), porém tendo-se em conta os ângulos de obstrução e a radiação refletida pelas superfícies adjacentes. Os autores desenvolveram um modelo de cânion utilizando uma distribuição isotrópica e anisotrópica da radiância no céu.

Para o modelo isotrópico, o cálculo de predição é semelhante ao apresentado anteriormente na Equação (Eq.2) para a predição da irradiância difusa sobre uma superfície de inclinação β. A diferença estaria na consideração da morfologia e da componente refletida. No modelo do céu isotrópico já apresentado, a irradiância difusa horizontal é multiplicada apenas pelo fator de visão do céu de uma superfície inclinada. No modelo de cânion proposto, os autores propõem um fator de visão do céu equivalente, semelhante ao apresentado no início desse item (item I.2.5.3), porém onde

as obstruções solares são combinadas num horizonte contínuo equivalente de altura angular, u , ao ponto de referência (Figura 41).

Dessa forma, a irradiância difusa do céu incidente na fachada do cânion equivalente pode ser dada da seguinte forma:

$$I_{a\beta} = I_{dh}[1 + \cos(\beta + u)]/2 \qquad [\text{W.m}^{-2}] \qquad [\text{Eq. 20}]$$

Para predição da contribuição refletida da radiação solar global incidente, $I_{g\beta}$ numa superfície-obstrução superior de refletância difusa ρ, a energia correspondente recebida pela superfície de interesse ($I_{\rho U,\beta}$) é dada por:

$$I_{\rho U,\beta} = I_{g\beta\rho}[\cos\beta - \cos(\beta + u)]/2 \qquad [\text{W.m}^{-2}] \qquad [\text{Eq. 21}]$$

E, da energia recebida pela reflexão com a parte inferior do plano horizontal:

$$I_{\rho L,\beta} = I_{g\beta\rho}[\cos(\beta - u^*) - \cos\beta]/2 \qquad [\text{W.m}^{-2}] \qquad [\text{Eq. 22}]$$

E, da energia recebida pela reflexão com o solo:

$$I_{\rho G,\beta} = I_{g\beta\rho}[1 - \cos(\beta - u^*)]/2 \qquad [\text{W.m}^{-2}] \qquad [\text{Eq. 23}]$$

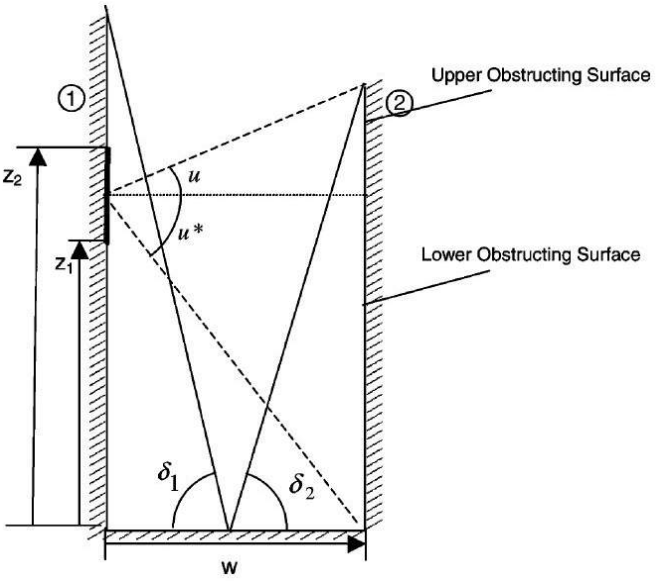


Figura 41: cânion urbano equivalente. Fonte: Robinson e Stone (2004).

(c) Modelo de discretização da cena urbana

A fim de alcançar maior precisão na consideração da influência das obstruções em reduzir a quantidade de radiação (do céu e do sol) nas superfícies urbanas, bem como da radiação refletida pelas mesmas como fontes secundárias de energia e luz, Robinson e Stone (2004) propõem um modelo mais complexo que se baseia na técnica da Radiosidade[25]. Os edifícios urbanos, nesse modelo (agora em três dimensões), são discretizados. Consideram-se dois hemisférios (acima e abaixo da horizontal/normal), como mostra a Figura 42. Estes são discretizados, ou seja, são divididos em parcelas regulares para a qual a radiância do céu e das obstruções dominantes (se estas existirem) e respectivas frações de visão associadas são utilizadas para determinar a contribuição correspondente à irradiância na superfície.

[25] A técnica de simulação computacional chamada Radiosidade será descrita na próxima seção.

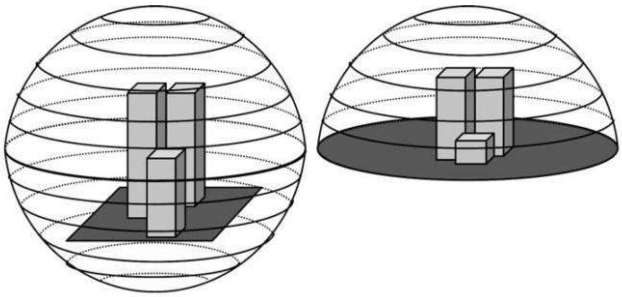


Figura 42: reflexões a partir de um meio-hemisfério superior e meio-hemisfério inferior. Fonte: Robinson e Stone (2004).

Esse modelo parte de uma abóbada celeste já discretizada, conforme a já mencionada metodologia de subdivisão do céu de Tregenza e Sharples (1993), na qual o céu é dividido em 145 partes. As parcelas do céu possuem ângulos sólidos (ϕ) semelhantes, determinados pela faixa/zona de azimute (α) da *i*-ésima parcela e alturas de elevação (γ) máxima e mínima correspondentes, que podem ser definidos utilizando a seguinte expressão:

$$\phi_i = \Delta\alpha_i(\sin\gamma_{i,max} - \sin\gamma_{i,min}) \quad [\text{sr}] \qquad [\text{Eq. 24}]$$

Cada parcela fica, portanto, associada a um ângulo sólido e um valor de radiância, R_i (W.m^{-2}.sr^{-1}), dada a partir do modelo de Perez *et al*. (1993)(item I.2.3.2). No qual, a luminância relativa de um ponto arbitrário no céu, ℓv, é uma função do ângulo do zênite, do ponto do céu Z considerado e da distância angular entre o ponto e o sol, θ (também tratado como um ponto) (Figura 43). De modo que assim esta radiância pode ser definida (ROBINSON e STONE, 2004):

$$R_i = \ell v_i I_{dh} \sum_{j=1}^{145}(\ell v \phi \sin\gamma_i) \qquad [\text{W.m}^{-2}\text{.sr}] \qquad [\text{Eq. 25}]$$

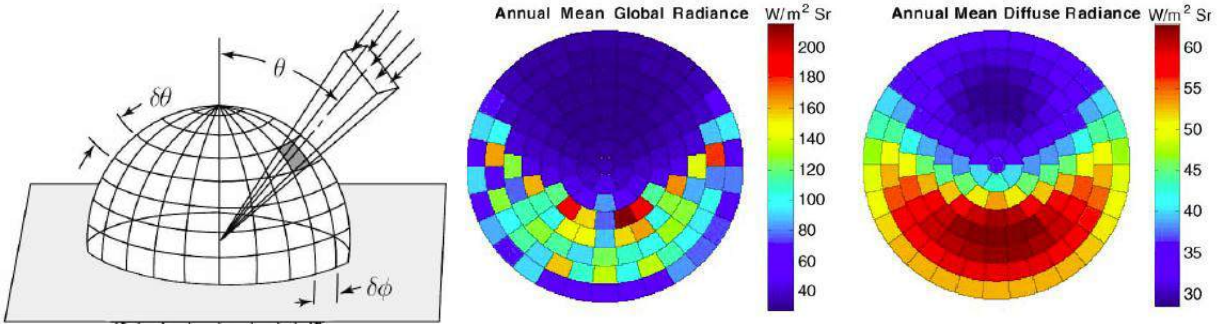


Figura 43: definição do ângulo sólido e da radiância para cada parcela da abóbada celeste. Fonte: Robinson e Stone (2004).

Em função da geometria urbana e do edifício estudado, calcula-se para cada uma das parcelas (i):

- σ_i : a fração da parcela do céu que é visível a partir da superfície estudada ($0 \leq \sigma_i \leq 1$) (adimensional);
- ξ_i : o ângulo de incidência entre a parcela do céu e a superfície estudada (em radianos).

Com o fator de visão conhecido, o ângulo de incidência do centróide da parcela até o plano de interesse, ζ, é dado por:

$$\cos\xi_i = \cos\bar{\gamma}_i \cos\bar{\alpha}_i' \sin\beta + \sin\bar{\gamma}_i \cos\beta \quad [\text{rad}] \qquad [\text{Eq. 26}]$$

Na qual:

- $\bar{\gamma}_i$ é a altitude do centro da parte visível da parcela do céu *i.*
- $\bar{\alpha}_i'$ é o azimute entre o centro da parte visível da parcela do céu e a normal da superfície estudada;
- β é a inclinação da superfície estudada.

Os cálculos podem ser realizados para as 8760 horas de um ano considerando as 145 parcelas do céu, preparando-se todas as características da abóbada (R_i) e das j superfícies estudadas (ξ_i)(σ_i)(ϕ_i) , numa matriz de dimensão 8760 x 145 (ROBINSON e STONE, 2004).

Para o cálculo do fator de visão (σ_i), cada parcela do céu é subdividida em uma malha de 10x10, e para as 100 células resultantes, determina-se o número n de células a partir das quais é possível ver o céu. De modo que:

$\sigma_i \cos \xi_i = 10^{-2} \sum_{j=1}^{n} \cos \xi_j$ [/] [Eq. 27]

Dessa forma, é possível calcular a radiação refletida pelas superfícies que obstruem a abóbada celeste, $I_{\rho U,\beta}$, como segue:

$I_{\rho U,\beta} = \sum_{i=1}^{145} \left(I_{g\beta\rho}/\pi\right)_i \phi_i (1 - \sigma_i) \cos \xi_i$ [W.m^{-2}] [Eq. 28]

Para a radiação incidente nas obstruções, $I_{g\beta}$ - de refletância conhecida, ρ_i - considera-se a hipótese de que a radiância da obstrução mais importante (ou dominante) é semelhante a todas as outras obstruções. Usando o algoritmo de discretização da parcela é possível identificar qual superfície produz o maior ângulo de incidência -fator de visão.

O cálculo acima (Eq.28) é efetuado para o centro de uma dada fachada. No entanto, sabe-se que numa cena urbana, uma fachada poderá ter diferentes fatores de visão do céu, de acordo com o ponto considerado e, portanto, uma grande variação para σ_i. Para isso, define-se uma malha para cada fachada. Para a célula da malha, calcula-se – de modo aproximado – a fração visível do céu, $\sigma_{aproximativo}$.

O algoritmo reparte, em seguida, a fachada em zonas de $\sigma_{aproximativo}$ homogêneo (Figura 44). E calcula a radiação recebida no centro de cada nova zona.

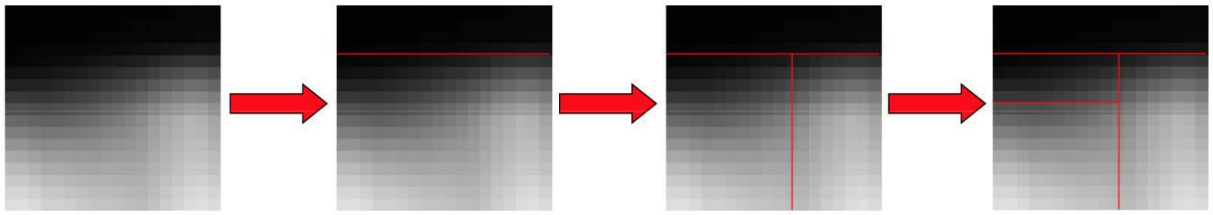


Figura 44: repartição da fachada conforme valores do fator de visão, $\sigma_{aproximativo}$. Em escala de cinza, os níveis de σ_i por cada célula da malha da fachada e, em vermelho, repartição de zonas homogêneas. Fonte: Robinson e Stone (2004).

Para calcular a contribuição dos raios refletidos na cena urbana, estima-se, inicialmente, a irradiância de todas as superfícies, pelas seguintes expressões:

- para o direto: $I_{d\beta} = \sum_{i=1}^{145} I_{bni}\, \sigma_i \cos \xi_i$ [W.m^{-2}] [Eq. 29]

- para o difuso: $I_{b\beta} = \sum_{i=1}^{145} R_i\, \phi_i \sigma_i \cos \xi_i$ [W.m^{-2}] [Eq. 30]

A partir da irradiância solar (direta e difusa) incidente em uma dada superfície, esta refletirá e será usada como uma primeira passagem (*pass*) para o cálculo da reflexão das demais superfícies, de modo que (Eq.28), num primeiro momento, representa um único rebatimento de radiação refletida difusamente[26]. Esse processo é repetido, mas na sequência, (Eq.28) sendo usada como mais uma contribuição solar para as demais obstruções até convergência da solução para toda a cena urbana modelada.

Para completar, no modelo, consideram-se as reflexões abaixo do plano horizontal ($I_{\rho L,\beta}$). Para isso, é possível seguir a mesma regra da (Eq.28)– que define a primeira reflexão, com a diferença que agora considera-se uma abóbada invertida (Figura 42), de modo a computar reflexões que vêm dos planos inferiores, inclusive do solo, para a superfície estudada. Sendo expressa da seguinte forma:

$$I_{\rho L,\beta} = \sum_{i=1}^{145} \left(I_{g\beta\rho}/\pi\right)_i \phi_i \cos\xi_i \qquad [\text{W.m}^{-2}] \qquad [\text{Eq. 31}]$$

I.2.6. Escolha do método de predição da radiação solar em ambientes urbanos

Diante do contexto apresentado, faz-se necessário buscar técnicas e instrumentos que auxiliem na qualificação, quantificação e integração dessa dinâmica climática a uma das principais ferramentas de trabalho no processo de concepção do projetista, a forma construída.

O objetivo principal dessa etapa é apresentar o conjunto escolhido de métodos para avaliar a disponibilidade da irradiação e iluminação nas envoltórias construídas das cinco classes morfológicas de referência da cidade de Maceió, bem como dos cenários prospectivos que serão tratados no capítulo III.

Para tanto, inicialmente são apresentados os instrumentos mais empregados, particularmente, quando o objetivo for o de prever o desempenho da forma construída em termos de energia radiante e luminosa na **escala urbana**. Essas técnicas são classificadas em três categorias principais: método gráfico, método físico, e o método computacional.

I.2.6.1. Método gráfico

Um dos primeiros e mais simples métodos empregados na análise de insolação, de obstruções, projeção de sombras e iluminação dos espaços, é o uso dos dados da geometria solar representados em diagramas ou cartas solares. A carta solar consiste em projeções estereográficas das trajetórias aparentes do sol para uma dada latitude, contendo informações sobre os principais ângulos solares (azimute e altitude solar). Esse tipo de método permite grande flexibilidade e adaptação aos instrumentos tradicionais de concepção dos projetistas. Além de fácil manipulação, o método gráfico pode servir a numerosas aplicações, da escala arquitetônica à escala urbana, tais como: estudo da insolação no interior dos espaços construídos; estudo da máscara de sombra de uma janela ou de um entorno urbano; estudos de projeções de sombras em cobertas, fachadas e em espaços públicos; estudo preditivo sobre volume possível à construir, etc.

Uma das aplicações mais recorrentes desse método no domínio da arquitetura é a projeção da máscara de sombra (ou obstrução solar e do céu) a partir de aberturas em fachadas de edifícios. Traçando ângulos horizontais e verticais correspondentes à visão da abóbada celeste a partir de um ponto da janela, para um intervalo da trajetória solar (conjunto de azimutes e altitudes), é possível

[26] Considera-se nessa abordagem que todas as superfícies são Lambertianas. A refletância Lambertiana é a propriedade que define uma superfície que reflete de forma difusamente ideal.

dimensionar dispositivos de proteção solar para aberturas ao longo do ano (e.g. *brise-soleil*, marquises, beirais, etc.).

Na escala urbana, citam-se os estudos das obstruções geradas por um entorno urbano imediato em relação à abóbada celeste e à posição do sol a partir de um dado ponto de observação (e.g. altura do pedestre, eixo de uma rua, janela de um edifício, etc.). A análise gráfica resultante é semelhante e, pode substituir uma imagem gerada por uma máquina fotográfica de grande angular (lente olho de peixe). Com auxílio da carta solar e dos referidos ângulos horizontais e verticais, a partir de um ponto de visão qualquer, é possível desenhar a máscara de sombra gerada pela massa construída do entorno. A razão da quantidade de céu visível em projeção estereográfica, em relação à toda massa construída também projetada, é o que define o conhecido Fator de Visão do Céu (FVC), que pode variar de 0 a 1 (adimensional). Esse fator pode ser útil na avaliação e predição de uma série de outros fenômenos climáticos urbanos que vão além do simples estudo da obstrução solar, podendo dar indicações interessantes. Um exemplo disso, diz respeito à emissão da irradiação infravermelha pelos edifícios que, dependendo da magnitude da obstrução da abóbada celeste de um entorno urbano, poderá ser mais ou menos expressiva.

O conhecimento da técnica gráfica pode facilitar o estudo de sombras para diversas aplicações. Dois exemplos importantes podem ser citados: auxílio na implantação e instalação de sistemas de captação solar em cobertas, evitando o sombreamento indesejável das placas coletoras; e o estudo do direito ao sol, permitindo verificar a projeção de sombras em edificações do entorno, de passeios públicos, praias, etc. Recentemente, algumas municipalidades costeiras do Brasil, como o Rio de Janeiro, têm exigido estudos gráficos que comprovem que um futuro empreendimento a ser construído na orla não projetará sombras na ciclovia nem na praia ao longo do ano (Figura 45).

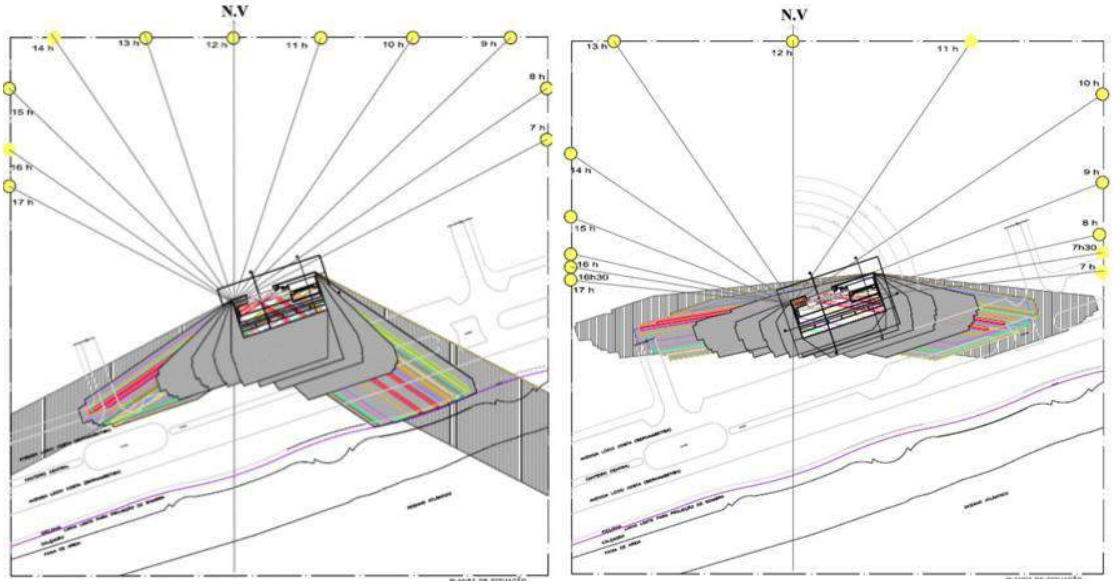


Figura 45: Estudo gráfico de projeção de sombras. Fonte: ilustração do autor (2011).

O uso dos diagramas de auxílio ao desenho também pode ser bastante útil na situação inversa, ou seja, na previsão das dimensões possíveis de construir de modo a evitar a projeção de sombras indesejáveis ou não permitidas por lei na vizinhança. A técnica gráfica e o conhecimento da geometria solar pode ser instrumento extremamente útil nas primeiras fases de projeto para um arquiteto antecipar e orientar escolhas em termos de volume e proporção (Figura 46).

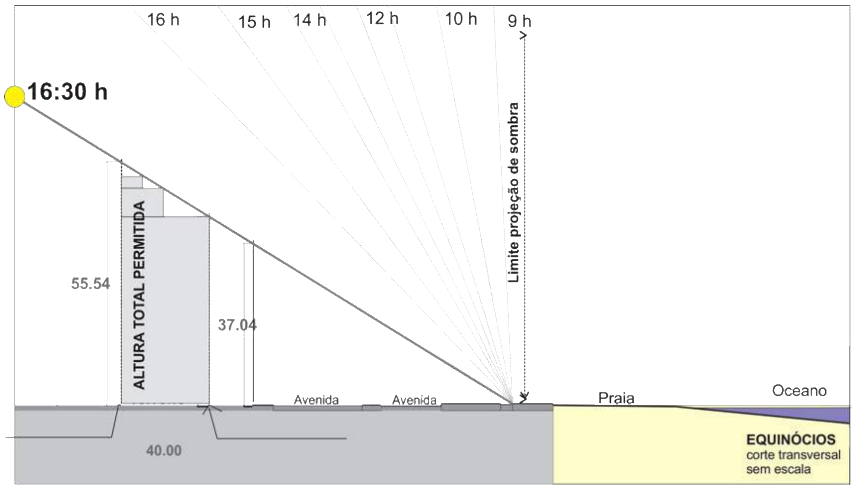


Figura 46: Estudo gráfico para conhecer altura limite permitida para construir sem projetar sombra em determinados espaços coletivos. Fonte: ilustração do autor (2011).

O uso dessa técnica pode ainda ser interessante quando associado a dados quantitativos de radiação, temperatura ou iluminação. O diagrama da trajetória solar pode ser sobreposto as informações medidas em estações meteorológicas (Figura 47), permitindo um estudo mais completo, qualitativo e quantitativo (a título indicativo), do impacto da radiação solar direta em fachadas ou da iluminação externa possível, por meio da sobreposição de diagramas, como o diagrama de Pleyel (Figura 47).

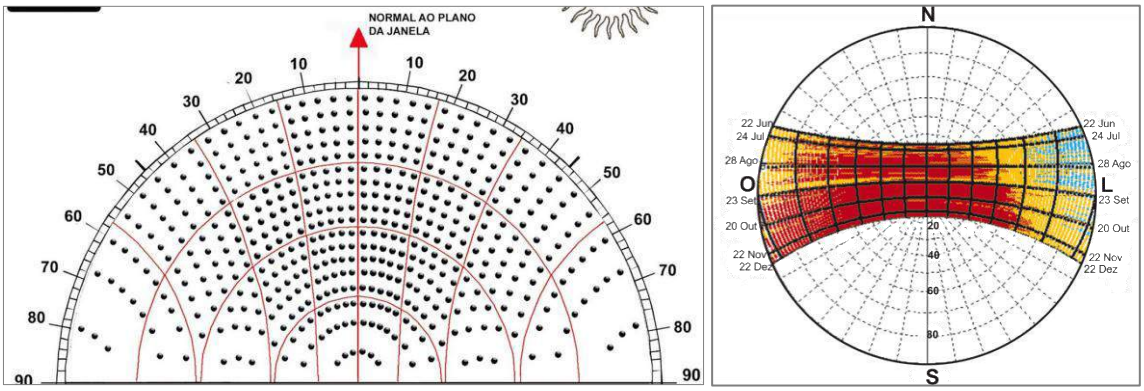


Figura 47: Diagrama de Pleyel com dados de iluminância externa e diagrama solar com sobreposição de dados de temperatura do ar externa para Maceió. Fonte: LABEEE, UFSC (2013).

A NBR15215-3 (ABNT, 2004), referente à determinação da iluminação natural em ambientes internos, apresenta um método gráfico para a determinação do Fator de Luz do Dia (FLD) e da iluminância. Este método baseia-se nas luminâncias das 244 subdivisões da abóbada celeste e no ângulo sólido determinado por um ponto P, em um plano horizontal e a abertura, conforme a Figura 48.

Através de máscaras de obstrução e Diagramas de Contribuição Relativa de Luz (DCRL), que representam a projeção estereográfica da abóbada celeste, é possível calcular a contribuição de iluminação natural (CIN) de um ou mais pontos localizados em um plano horizontal. Nos DCRL cada zona representa, numericamente, sua contribuição relativa para a iluminância de um ponto no plano horizontal.

O método apresentado pela norma é também baseado na consideração dos vários caminhos através dos quais a luz natural atinge um ponto no interior de uma edificação. De acordo com a

norma indicada, a luz admitida no interior das edificações é proveniente de três parcelas: luz direta do sol, luz difundida na atmosfera (abóbada celeste) e luz refletida no entorno. A luz distribuída pelo interior do ambiente é composta de três componentes: componente celeste (CC), componente refletida externa (CRE) e componente refletida interna (CRI) (ABNT, 2004).

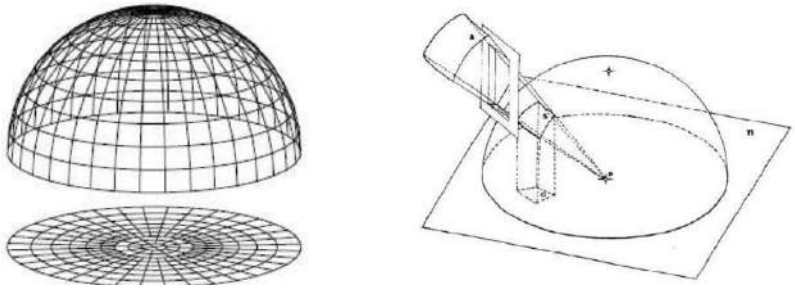


Figura 48 : hemisfera de raio unitário (a) ; Princípio do ângulo sólido projetado (b). Fonte : ABNT (2004).

No entanto, devido às diferenças possíveis encontradas entre a dinâmica dos tipos de céu, o cálculo da posição do sol, conforme visto na seção anterior, torna esse tipo de procedimento extremamente trabalhoso e dependente de dados de iluminância ou radiância externa, nem sempre facilmente disponíveis. Desta forma é mais recomendado para utilização nas análises iniciais do projeto.

A técnica gráfica impede também uma compreensão mais precisa, dinâmica e integrada dos principais fenômenos climáticos implicados (e.g. nebulosidade, umidade, temperatura do ar e do céu), bem como, a consideração do papel crucial da morfologia urbana construída como obstrução e também como fonte de energia radiante e luminosa refletida.

O método gráfico permite, como uma primeira abordagem, compreender a dinâmica da geometria da insolação, servindo de instrumento pedagógico e também de auxílio à concepção da forma e dispositivos construídos.

O uso do computador, todavia, modificou e facilitou a consideração de muitos desses estudos de forma rápida e automatizada. Programas de desenho tais como Sketchup, AutoCAD, Revit, ArchiCAD permitem visualizar, criar vídeos, imagens, permitindo análises no tempo da concepção dos primeiros volumes.

Outros aplicativos numéricos mais simples permitem igualmente o uso dos gráficos de forma facilitada auxiliando à concepção em outros programas, tais como os programas Analysis Sol-ar (LABEEE, UFSC)[27] ou Radlite (CASTRO, 2005). E, modelos mais sofisticados, como Ecotect (MARSH, 2004) e Townscope (TELLER e AZAR, 2001), integram as mesmas informações de forma mais versátil e dinâmica, permitindo a importação de geometrias previamente modeladas em programas do tipo CAD (Figura 49). Townscope, de um lado, estima a irradiação em função da radiação direta e difusa, assim como, de uma única reflexão difusa em um ponto arbitrário num espaço 3D. O programa trabalha com a projeção estereográfica da cena 3D no diagrama da trajetória solar para ter em conta o acesso solar direto e da abóbada celeste, equivalente ao fator de visão do céu. Ecotect, do outro, emprega técnica similar, usando modelo de céu isotrópico, mas como posição real do sol para predição da irradiação direta e difusa, porém não considerando as contribuições da radiação refletida na cena urbana.

[27] Programa desenvolvido no âmbito do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina.

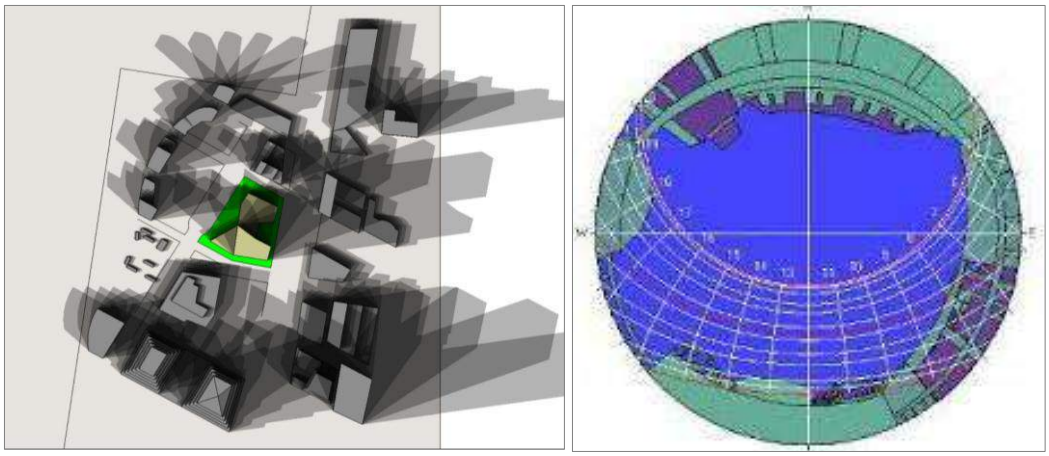


Figura 49: exemplo de simulação da projeção de sombras e insolação no programa Ecotect; e máscara de sombra de cena urbana com projeção do diagrama solar, com Townscope. Fonte : Townscope (2010).

I.2.6.2. Método físico

Com o mesmo objetivo, um segundo tipo de técnica bastante utilizada é a que permite representar a insolação ou a iluminação em construções por meio do uso de maquetes físicas escalonadas em equipamentos que simulam a trajetória solar ou um céu artificial. Como exemplo dessa categoria de instrumentos é possível citar: os heliodons, os helioscópios (ou solarscópios) e a caixa de céu artificial. Esse conjunto de equipamentos é bastante utilizado por estudantes de arquitetura como facilitador no entendimento da geometria solar, insolação e efeitos genéricos da luz, respectivamente.

Heliodons ou “máquinas do sol" consistem em dispositivos utilizados para simular o movimento aparente do sol, em qualquer local da Terra, pois permite ajustar a declinação solar (caracterizando as modificações sazonais), a rotação da Terra (efeito horário da luz do dia) e o ângulo entre um plano horizontal onde é possível colocar um modelo em escala reduzida (maquete física das construções) em uma latitude específica e o feixe solar. Geralmente, o heliodon consiste em uma prancheta graduada para diferentes latitudes, que simula o horizonte do local da região de estudo, e por uma lâmpada montada em uma régua graduada para diferentes declinações, geralmente com a posição assumida pelo Sol nos solstícios e equinócios. Esta prancheta rotaciona em função das diferentes horas do dia (VIANNA e POUEY, 2006). Além de permitir analisar a incidência solar nas fachadas, pátios e aberturas, na escala urbana, o equipamento pode ser de grande valia no estudo da forma urbana, nos agrupamentos dos edifícios, análises de estratégias de códigos de planejamento e densidade de ocupação da cidade.

Com o mesmo princípio de funcionamento do heliodon, o helioscópio, também conhecido como solarscópio, permite o estudo da insolação de uma construção, dada às condições de sua implantação. Os modelos mais convencionais construídos no Brasil consistem em conjunto de arcos (geralmente três) montados sobre uma prancheta fixa, onde são posicionadas as maquetes. Os três arcos correspondem à declinação solar nos solstícios e equinócios, sendo rotacionados ao redor da prancheta para a latitude que se deseja estudar a insolação. A Figura 50 abaixo mostra um exemplo de helioscópio e fotos de ensaios de insolação realizados com uso desse instrumento no Laboratório de Conforto ambiental, LABCON, na Universidade Federal de Santa Catarina.



Figura 50: solarscópio. Fonte : Labcon/UFSC, 2013.

Já os estudos de iluminação em maquetes podem ser realizados através de ensaios sob condições de céu real ou por meio de medições em equipamentos que simulem uma ou mais condições de céu, denominados de céu artificial. A principal vantagem do uso desses equipamentos é a luminosidade controlada, o que permite variações no modelo sem mudanças das condições de exposição, facilitando a análise do fenômeno (HOPKINSON, PETHERBRIDGE e LONGMORE, 1966). Existem dois tipos principais de céu artificial: o hemisférico, que simula condição de céu claro ou encoberto e o retilíneo (Figura 51), mais simples, que simula apenas condição de céu encoberto.

A variação de luminância no céu hemisférico ou em abóbada é obtida devido à complexidade desse equipamento, composto por diversas lâmpadas que tornam possível simular diferentes condições de céu, "com sol" (céu claro) ou "sem sol" (encoberto). No entanto, as dimensões necessárias e a manutenção deste tipo de equipamento fazem com que seja caro e pouco indicado (LUZ, FERREIRA, *et al.*, 2008). Já o modelo de céu retilíneo, mais utilizado, do tipo "caixa de espelhos", bastante empregado, é composto por uma caixa retilínea com teto luminoso e espelhos planos paralelos nas faces verticais, podendo ser construído em pequenas dimensões, contendo uma abertura lateral para encaixe da maquete, ou em grandes dimensões para colocar toda a maquete no seu interior. Este tipo de céu, devido a sua pequena complexidade construtiva, é bastante recomendado para fins didáticos (HOPKINSON, PETHERBRIDGE e LONGMORE, 1966).

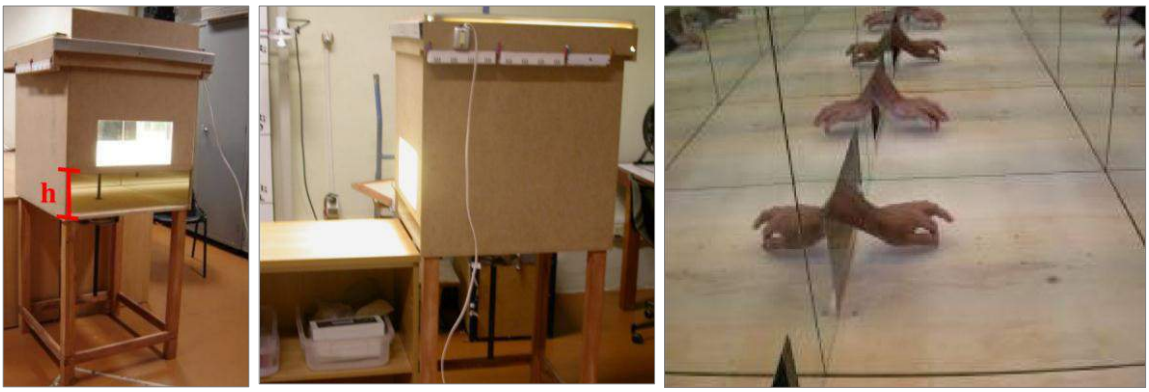


Figura 51: exemplo de céu artificial retilíneo. Fonte: Luz, Ferreira *et al.* (2008).

O método de análise por meio de modelos físicos são bastante interessantes para avaliações, principalmente, qualitativas dos efeitos da insolação, projeção de sombras e da iluminação, de grande valia para uso didático, não permitindo, todavia, uma quantificação mais precisa do impacto desses fenômenos de forma dinâmica. Outrossim, tratam dos fenômenos de forma isolada, não tendo em conta, por exemplo, dos complexos efeitos relacionados aos diferentes comprimentos de onda (solar, infravermelho, espectro visível), da interação entre outras variáveis climáticas de grande importância. Apresenta ainda limites na consideração dos efeitos da geometria urbana (e.g. múltiplas reflexões e obstruções).

I.2.6.3. Método computacional

Abordagens mais amplas sobre a análise da disponibilidade da iluminação natural e da radiação solar em configurações urbanas envolve o uso de programas mais detalhados de simulação. Com o advento do computador, todas as técnicas apresentadas anteriormente puderam ser escritas em expressões, mais ou menos complexas e completas, automatizando a consideração e integração de vários aspectos implicados, de forma isolada ou simultânea.

Com o uso de programas computacionais, a contribuição da radiação direta, do céu e da geometria construída pode ser resolvida com mais precisão e em diferentes escalas espaciais e temporais de interesse. Isso é possível por meio do uso de técnicas de simulação dos efeitos da energia solar (de onda curta, visível, e de onda longa) produzidos em superfícies. Duas das principais técnicas hoje empregadas para simular as trocas/transferências radiativas em espaços construídos são: a técnica do Raio-traçado e a da Radiosidade.

Essas técnicas são brevemente descritas na sequência, a fim de auxiliar a compreensão do modelo escolhido para simulação dos cenários urbanos (reais e prospectivos), que consiste em um algoritmo simplificado de Radiosidade.

(a) Raio traçado

A técnica do raio traçado (ou *raytracing*) é uma técnica comumente utilizada na computação gráfica para geração de imagens traçando um raio de luz através de planos de imagem e simulando os chamados efeitos de colisão (reflexão, refração e transmissão) destes com objetos virtuais. Pode ser classificado tanto em função da direção desse raio (direto ou invertido), quanto em função da abordagem matemática que pode ser aplicada (determinística ou estocástica) (CABUS, 2002).

A abordagem direta do raio traçado (*forward raytracing*) traça o raio da fonte de energia (sol) até um dado destino (ou observador), como ocorre na natureza. Essa abordagem permite que a técnica possa ser aplicada independente do ponto de vista, o que não ocorre com o raio invertido. Para o raio traçado invertido (*backward raytracing*) cujo caminho do raio é percorrido a partir do olho do observador até a fonte de energia, para cada novo ponto de observação que se deseje examinar, uma nova simulação deve ser lançada (Figura 52). Cada raio observado é tratado separadamente. Simular, portanto, vários pontos podem representar um elevado custo computacional (MONTAVON, 2010).

Para resolver esse problema é também possível empregar abordagens matemáticas associadas à técnica. Por meio de um raio traçado determinístico, o resultado é o mesmo sempre que o procedimento é repetido. Já o raio traçado estocástico oferece resultados diferentes a cada processamento (processo de rebatimentos da luz de forma randômica, como ocorre naturalmente) (CABUS, 2002).

A técnica do raio-traçado invertido associada a métodos estocásticos, como o método de Monte Carlo, é bastante utilizada na resolução de problemas de iluminação natural em espaços construídos (WARD e SHAKESPEARE, 1997), (CABUS, 2002). Conforme Cabus (2002), esse método resolve bem as interreflexões da luz no espaço, porém na avaliação da incidência direta, exige um elevado número de parcelas para que seja razoavelmente preciso, sendo portanto, mais conveniente associar o método determinístico para predição da componente direta. Um exemplo de aplicação dessa técnica – especialmente para predições de iluminação na escala arquitetônica – é o programa RADIANCE (WARD e SHAKESPEARE, 1997) e o programa Troplux (CABUS, 2002). Ambos utilizam a técnica do raio traçado invertido associada ao método probabilístico Monte Carlo para resolução das reflexões.

Esta técnica possui a vantagem de ser capaz de produzir um elevado grau de realismo visual, geralmente maior que os demais métodos típicos de processamento de imagens, porém com o inconveniente do elevado custo computacional associado. Isso faz com que essa técnica seja a mais adequada para aplicações onde a imagem possa ser renderizada lentamente antes de ser utilizada, como em imagens estáticas (maquete eletrônica) e efeitos visuais em televisão, para as quais sejam reproduzidas imagens de alguns pontos de vista principais e, seja menos adequada para aplicação em tempo real, como em jogos eletrônicos, onde a velocidade é aspecto crítico. Em simulações computacionais no âmbito da iluminação em espaços construídos, pode ser adequado dependendo da escala e do número de cenários que se deseje examinar.

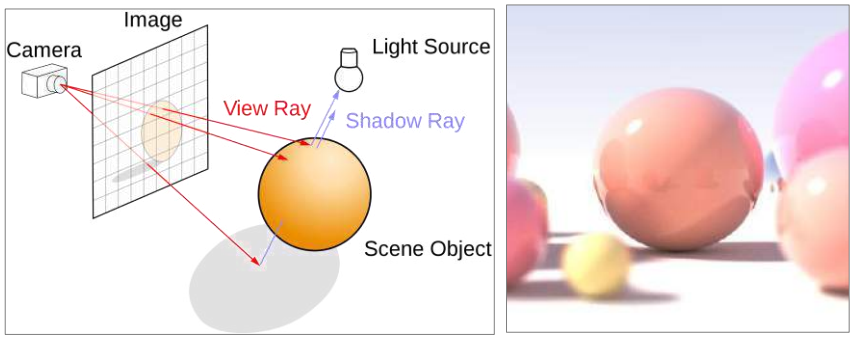


Figura 52: esquema ilustrativo da técnica do raio traçado invertido. Fonte: Wikipedia (2013).

(b) Radiosidade

O método da radiosidade consiste em técnica de cálculo de iluminação originalmente desenvolvida no domínio da transferência de calor e, afinada posteriormente, sobretudo para ser empregada na resolução de *renderização* de imagens 3D no âmbito também da computação gráfica (GORAL, TORRANCE, *et al*., 1984).

Em síntese, o método da Radiosidade é uma aplicação do método de discretização em elementos diferenciais para resolver a equação de renderização para cenas com superfícies que refletem luz difusamente. Diferentemente de métodos que usam algoritmos de Monte Carlo (como o método do raio traçado invertido) que lida com diferentes tipos de trajetória da luz, métodos de radiosidade típicos apenas consideram trajetórias que deixam a fonte de luz e são refletidas difusamente um dado número de vezes antes de chegar ao observador; A radiosidade é um algoritmo que trata de toda a radiação que sai de uma superfície (refletida e/ou emitida), podendo abranger todo o espectro da radiação solar e a faixa do infravermelho. A iluminação global no sentido que a iluminação que chega ao olho decorre não apenas das fontes de luz (e.g. sol e abóbada celeste), mas também de todas as superfícies da cena que interagem entre elas. Aspecto extremamente relevante na resolução de problemas de trocas radiativas e de luz em cenas urbanas complexas, dada a importância das múltiplas reflexões entre os edifícios e entre estes e o solo urbano. O cálculo por meio desse método é, portanto, independente do ponto de vista, diferentemente do método do raio traçado apresentado.

Nessa técnica, as superfícies originais de uma dada cena (urbana) são divididas em uma malha de pequenas superfícies ou parcelas (quadriláteras ou triangulares) e no processo de radiosidade, é calculada a quantidade de radiação que sai de cada elemento da malha para todos os outros elementos da mesma. Os valores de radiosidade final são armazenados para cada parcela da malha. Esses valores são mantidos mesmo quando o ponto do observador é alterado, tornando possível processar os numerosos pontos com o mesmo cálculo de radiosidade inicial. A técnica de radiosidade é a mais adequada para sombras e reflexões difusas.

Para cada parcela da malha, é também computado um fator de visão. Esse fator consiste em coeficiente que descreve como e o quanto cada parcela enxerga uma à outra (parcelas dos objetos construídos da cena e, eventualmente, parcelas do céu). Parcelas estando muito distante uma da outra, ou orientadas em ângulos oblíquos uma da outra, terão fatores de visão menores. Se outras parcelas estiverem no caminho, o fator de visão é reduzido ou zerado, dependendo se a oclusão for parcial ou total.

Os fatores de visão são usados como coeficientes de forma linearizada na equação de renderização, que produz um sistema linear de equações. Ao resolver esse sistema, tem-se a radiosidade, ou brilho, de cada parcela, considerando interreflexões difusas e projeção de sombras suaves.

A radiosidade quando progressiva resolve o sistema iterativamente de modo que para cada iteração, tem-se valores intermediários de radiosidade para a parcela. Esses valores intermediários correspondem a níveis de rebatimento. Ou seja, após cada iteração, é possível saber como ficará a cena apenas após um, dois, três, quatro ou mais rebatimentos de luz (Figura 53). Para profissionais que trabalham com renderização de imagens, é possível, por exemplo, escolher o número de iterações em função da qualidade da imagem e do tempo resultante a cada rebatimento, de modo a reduzir o custo computacional envolvido na resolução do processo ou, nesse e em outros casos, como na simulação de iluminância em espaços construídos, aguardar a convergência numérica do modelo (ROBINSON, 2011).

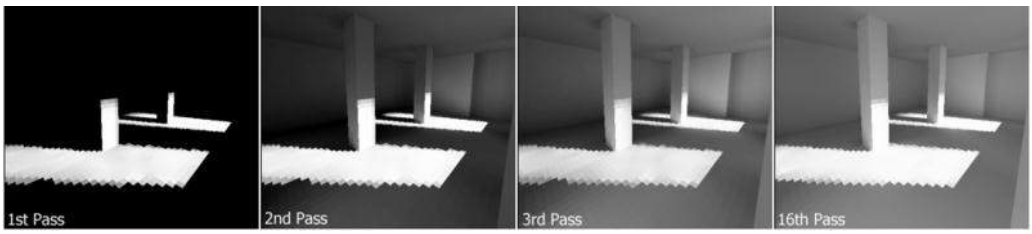


Figura 53: solução resultante de um ou vários rebatimentos da luz no espaço pelo método progressivo da radiosidade. Fonte: Wikipédia (2013).

I.2.6.4 Algoritmo Simplificado de Radiosidade (SRA)

O Algoritmo Simplificado de Radiosidade ou *Simplified Radiosity Algorithm* (SRA)[28] consiste em procedimento matemático que calcula as trocas de energia radiativa nas superfícies construídas na escala do distrito urbano. Este algoritmo foi escolhido para aplicação na metodologia do presente estudo e esta escolha será justificada na medida em que esse procedimento for apresentado como segue.

Procura-se, nessa etapa, explicitar os princípios que foram empregados na construção do SRA, esclarecer as principais hipóteses assumidas, seus limites e adequabilidade ao contexto em estudo.

Com o objetivo de modelar as trocas radiativas que ocorrem entre a atmosfera e as superfícies urbanas construídas, o SRA foi elaborado a partir de um acoplamento de diversos modelos matemáticos que permitem ter em conta os principais elementos atuantes na dinâmica solar, nas condições de céu e de atmosfera, a fim de estimar com certo rigor as trocas radiativas nos espectros eletromagnéticos de onda curta (ultravioleta), visível e de onda longa (infravermelho) em

[28] O SRA foi escrito no programa CitySim, desenvolvido por Robinson (2011) e equipe, no *Solar Energy and Building Physics Laboratory* (LESO-PB), no âmbito da *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne* (EPFL).

fachadas. Para que fosse possível estabelecer um grau razoável de precisão neste algoritmo, Robinson (2011) procurou, num segundo momento, também determinar a radiação solar direta incidente considerando a redução dessa incidência devido às obstruções da cidade (a partir de fatores de visão solar e do céu), as reflexões múltiplas produzidas por estas, bem como a radiação dispersada tanto pelo céu quanto pelas obstruções.

(a) Modelo de previsão da radiância e luminância do céu

A partir do algoritmo de Spencer (1971), que define a posição do sol, o SRA estima a radiação direta, que será dada em função da altitude solar do lugar (γ), do ângulo de incidência na superfície estudada (θ) e dois dados (meteorológicos médios) de entrada: a irradiância solar global horizontal e a irradiância solar difusa horizontal (ROBINSON, 2011):

$$I_{b\theta} = \left(I_{gh} - I_{dh}\right) \cos\theta \,/\, \sin\gamma \qquad [\text{W.m}^{-2}] \qquad [\text{Eq. 32}]$$

A fim de obter maior precisão no seu algoritmo, Robinson (2011) integra ao SRA um modelo de céu que permite estimar a distribuição anisotrópica da energia radiante difusa em toda abóbada celeste, através do modelo de Perez *et al*. (1993) (ver item I.2.3.2). O método desenvolvido por Perez (também chamado de *All-weather model*) separa os tipos de céu em oito classes – cobrindo uma gama de tipos que vão do encoberto, passando pelo intermediário ao claro - e para cada uma delas, a equação do cálculo da iluminância apresenta diferentes coeficientes (item I.2.3.2).

Para calcular a distribuição da luminância e também da radiância no SRA, emprega-se o esquema de discretização dado por Tregenza e Sharples (1993), no qual o céu é dividido em sete faixas azimutais de intervalos constantes de altitude. O intervalo azimutal das parcelas aumenta até o zênite (12°, 12°, 15°, 15°, 20°, 30°, 60°). No zênite existe apenas uma parcela, resultando, portanto, em um céu composto de 145 parcelas, de altitude e azimute distintos Figura 54.

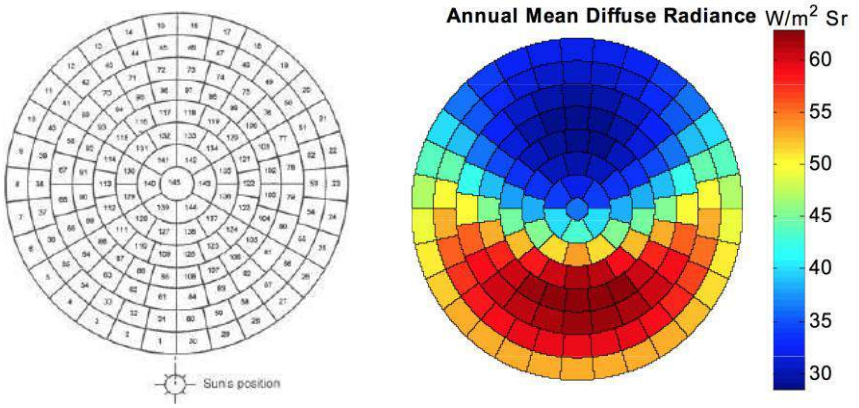


Figura 54: esquema de discretização da abóbada celeste em 145 parcelas dado por Tregenza. Fonte: Robinson (2011).

(b) Técnicas empregadas para considerar contribuições da geometria urbana

Com as contribuições do sol e do céu definidas (radiação solar direta e difusa), o SRA integra, então, as importantes contribuições da geometria urbana. Ou seja, emprega técnicas capazes de ter em conta as reflexões entre as superfícies dos edifícios e entre estas e o solo, bem como o efeito das obstruções existentes em relação ao sol e ao céu.

Para isso, o SRA resolve a irradiância direta (do sol e do céu) (W.m^{-2}), obstruída e refletida empregando a modelo de discretização da cena urbana e a técnica da Radiosidade, conforme descrito anteriormente (item I.2.5.3 e item I.2.6.3).

(c) Modelos empregados para previsão da irradiação de onda longa

Na seção I.2.3.2 (subitem (b)) foi apresentado um modelo simplificado para predição das trocas de radiação de onda longa. Este modelo simplificado consiste na diferença de temperatura de uma dada superfície, T_s, e do seu entorno, T_{amb}, ambas expressas na quarta potência (Eq.10).

O algoritmo SRA emprega tal modelo, para o qual calcula a temperatura das superfícies a partir da temperatura "sol-ar" (que será descrita mais adiante nesse tópico). Já para calcular a temperatura do entorno, T_{amb}, o algoritmo considera que a fachada receptora possui uma visão obstruída definida pelos mesmos fatores de redução de visão do céu e das demais superfícies empregados na predição das trocas radiativas de onda curta, de modo que (Eq.33):

$$T_{amb}^4 = \frac{1}{\pi}(T_{céu}^4 \sum_{i=1}^{p}(\phi\sigma cos\theta)_i + \sum_{j=1}^{2p}(\phi\omega cos\theta T_s^4)_j) \quad [K] \qquad [Eq. 33]$$

T_{amb}= temperatura ambiental efetiva (K) ou temperatura do entorno.
ϕ = ângulo sólido (Sr);
σ = proporção em que cada parcela (p)do céu pode ser vista (fator de visão).
ω= proporção em que cada parcela (2p) de cada edifício do entorno pode ser vista (fator de visão).
θ= ângulo médio de incidência (entre cada parcela do céu, p, e o plano de incidência).
$T_{céu}$= temperatura da abóbada celeste.
T_s=temperatura da superfície (K) – dada pela temperatura "sol-ar".

Ou seja, para definir a temperatura ambiental efetiva contabiliza-se:

(i) a *contribuição da temperatura do céu,* levando-se em conta o ângulo sólido de cada parcela *i* da abóbada celeste (ϕ_i), a proporção de cada parcela que é vista a partir de uma dada fachada urbana, (σ_i), e o cosseno do ângulo médio de incidência de cada parcela, (θ_i);

(ii) a *contribuição da temperatura das superfícies adjacentes*, levando-se em conta o ângulo sólido de cada parcela *j* das superfícies do entorno (ϕ_j), a proporção de cada parcela que é vista a partir de uma fachada urbana receptora, (ω_j), e o cosseno do ângulo médio de incidência de cada parcela, (θ_j).

Para estimar o primeiro termo da equação (Eq.33), faz-se necessário determinar a temperatura do céu. Para isto, foi utilizada a fórmula dada por Berdhal e Fromberg (1982), que expressa a emitância (radiante) *sem nuvens* (ε_o) como função linear da temperatura do ponto de orvalho: $\varepsilon_o = 0.741 + 0.00062T_d$ (ver item I.2.3.2).

No SRA, o valor assumido para a emitância considera a equação acima e a corrige em função da nebulosidade. A aproximação empregada para definição da temperatura é dada por Skartveit *et al.*, (1996): $(\varepsilon - \varepsilon_o)/(1 - \varepsilon_o) \approx n^{2.5}$, onde n é a fração de nebulosidade (n=C/8, onde C é a nebulosidade em octas); assim resulta para a emitância com nuvens:

$\varepsilon_{céu} = \varepsilon_o + (1 - \varepsilon_o)n^{2.5}$,

O que permite ao algoritmo definir a temperatura do céu que é, então, dada por: $T_{céu}^4 = T_a^4\varepsilon_{céu}$. (ver item I.2.3.2).

Para estimar o segundo termo da equação (Eq.33), a temperatura das superfícies (T_s), utiliza-se a abordagem da temperatura sol-ar - temperatura fictícia que representa o efeito combinado da radiação solar incidente nas superfícies (nesse caso, envoltória e solo urbanos) e das trocas de energia por radiação e convecção entre a superfície e o meio envolvente; Essa temperatura é obtida pela soma da temperatura do ar ambiente e da razão entre os fluxos de radiação solar e infravermelho e o coeficiente de transferência de calor por convecção da superfície para o ar ambiente: $h_{co} = 5.8 + 4.1v$ (ROBINSON, 2011), em função da velocidade do vento local ($m.s^{-1}$).

$T_s = (T_a + I_\beta + I_L)/h_{co}$ [K] [Eq. 34]

Na definição desse modelo, as superfícies da cena urbana são consideradas como superfícies isoladas, não devendo haver trocas térmicas com o edifício, o que é conveniente para aplicação na abordagem desse trabalho, já que a pele exterior do edifício define o limite morfológico do objeto de investigação de interesse.

(d) Hipóteses simplificadoras e acurácia do modelo

O SRA é consideravelmente mais complexo e também mais dispendioso do ponto de vista computacional que a maioria dos métodos gráficos, físicos ou computacionais simplificados apresentados nas seções anteriores, para tentar resolver o mesmo tipo de problema. No entanto, é muito mais preciso, pois permite a modelagem da real geometria construída, tendo-se em conta as obstruções e interreflexões ocasionadas pela forma urbana.

No entanto, para tanto, o algoritmo adota algumas hipóteses simplificadoras. As simplificações mais significativas feitas nesse algoritmo são:

(i) as **superfícies são Lambertianas**, ou seja, são superfícies difusoras ideais (reflexão uniforme em todas as direções). O algoritmo utilizado não considera o cálculo em superfícies especulares, cálculo usualmente empregado em simulações dinâmicas na escala do edifício (como por meio de técnicas como o raio-traçado invertido). Na escala do edifício a existência de uma fração expressiva de vidro em fachadas do entorno, poderia representar um incremento em termos de energia radiante refletida para uma dada hora do dia, em um dado ponto de avaliação no plano de trabalho no interior de uma sala de um edifício. Ao avaliar um valor instantâneo de irradiação ou iluminação para um dado ponto de uma fachada, as superfícies especulares poderiam representar uma contribuição importante. No entanto, na escala espacial urbana e, temporal em termos de saldo anual (escala temporal do ano), esse comportamento pontual da reflexão numa dada fachada fica combinado em uma média de variações (e.g. média dos diferentes ângulos de incidência, fluxo solar, etc.), de modo que o impacto individual de uma superfície especular passaria a ser bem menos relevante. Assim, a média da variação do fluxo solar em fachadas se aproximará do que seria uma superfície lambertiana, reduzindo as diferenças encontradas entre os modelos. Sendo esta simplificação que favorece o tempo de cálculo razoável do algoritmo SRA, permitindo que seja integrado em processos de otimização, como será feito nesse estudo.

(ii) a **radiância da obstrução obedecerá sempre à obstrução *dominante***, que é definida como aquela que mais contribui para irradiância refletida. Para cada superfície deve ser atribuído um valor de albedo. Essa hipótese assumida, de que a distribuição da radiância na região obstruída de uma parcela do céu é uniforme e pode ser representada por aquela superfície dominante, é o que significativamente, permite que o SRA resolva a radiância de forma mais eficiente, sem um custo computacional excessivo, ao reduzir o número de "caminhos" de trocas de energia (ROBINSON, 2011);

As implicações das mencionadas simplificações foram testadas por Robinson e Stone (2004) para cenas urbanas com variados graus de complexidade, comparando predições do SRA com as do programa RADIANCE[29] (Monte Carlo + Raio traçado). Os resultados obtidos apresentaram boa aceitação (Figura 55), porém com uma discrepância ligeiramente maior para fachadas orientadas ao sul. Conforme o autor, isto pode ser dado, principalmente, pela forma aproximada com a qual os

[29] As superfícies quando modeladas no programa RADIANCE foram também definidas como Lambertianas (especularidade e rugosidade foram definidos como zero), para que as comparações ficassem concentradas na qualidade das aproximações no cálculo da Radiosidade. Esse raciocínio foi considerado razoável pelos autores visto que as superfícies em configurações urbanas tendem a ser, principalmente, difusamente reflexivas.

fatores de visão solar são calculados. No entanto, esses erros modestos são aceitáveis na maioria das propostas de modelagem de ambientes urbanos (ROBINSON, 2011).

A diferença é que simulações no ambiente do RADIANCE podem ser cerca de cinco vezes mais dispendiosas em termos de custo computacional quando comparadas ao tempo do SRA, de modo que para simulações de cenas urbanas, relativamente complexas, em que superfícies sejam predominantemente difusamente reflexivas, o SRA parece apresentar melhor desempenho.

Este algoritmo é particularmente importante no contexto do presente trabalho, pois adequa-se à integração com outras ferramentas de simulação - como algoritmos de otimização - oferecendo um razoável compromisso para resolução das trocas radiativas em meio urbano na abordagem multidisciplinar visada.

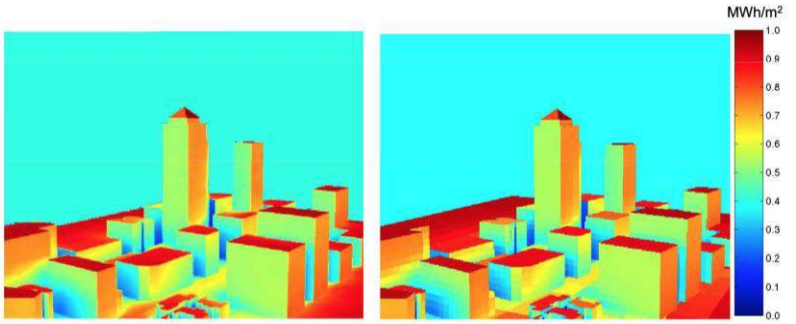


Figura 55: comparação dos resultados obtidos por cálculo no modelo SRA (esquerda) e RADIANCE (direita) para resolução da mesma cena urbana. Fonte: Robinson (2011).

(e) Definições gerais do programa no contexto da pesquisa

O SRA foi programado no código Citysim. Este programa é composto de uma interface (ainda pouco convivial) e um núcleo de cálculo onde se encontra programado o SRA e demais modelos. Para utilizar o núcleo de cálculo do Citysim, é necessário inicialmente preparar um arquivo de entrada (no seu formato nativo ASCII) com todos dados urbanos exigidos para leitura, processamento e cálculo do código. Esse arquivo de entrada é composto, basicamente, de três categorias de informações que devem ser fornecidas ao programa: geometria do espaço, componentes das superfícies (propriedades dos materiais) e contexto climático (Figura 57).

A geometria 3D de uma dada vizinhança urbana é cadastrada por meio do uso de coordenadas cartesianas. Esta pode também ser modelada, inicialmente, em programas CAD/CAO (*Computer Aid Design*) e importada via arquivo dxf (*Drawing eXchange Format*) pela interface do Citysim. Nesta pesquisa, os modelos morfológicos de referência previamente georeferenciados e analisados em ambiente SIG (ArcGIS) (ver Capítulo II e Glossário), foram exportados desse último em tabelas dbf (*Data Base File*) nas quais se encontram as coordenadas cartesianas georeferenciadas dos edifícios urbanos da cidade em estudo.

Para adaptar essas coordenadas ao formato de entrada do Citysim (xml) (ver **ANEXO B**), foi utilizado uma ferramenta auxiliar, o programa Matlab, por meio do qual foi possível inserir automaticamente as coordenadas do arquivo dbf em arquivos de entrada do Citysim (correspondente à cada classe morfológica em estudo) (Figura 56).

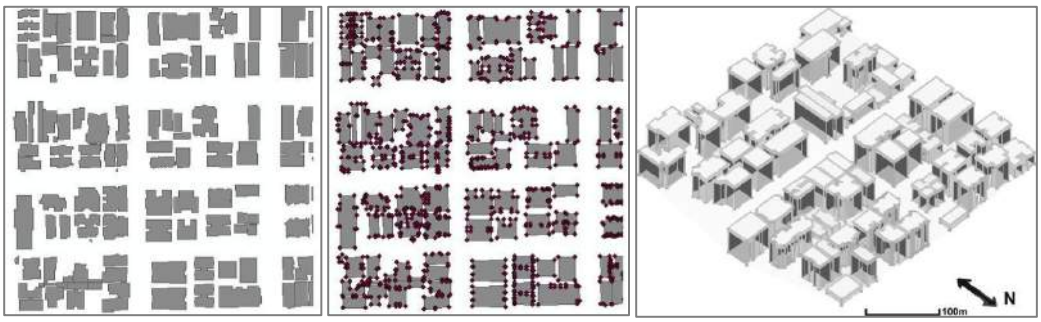


Figura 56: Esquema ilustrativo da transferência de dados da geometria da plataforma ArcGIS para o arquivo de entrada do programa CitySim. Fonte: imagens geradas pelo programa ArcGIS e Citysim, da esquerda para direita, respectivamente.

Ainda no arquivo de entrada, para cada edifício da cena urbana é atribuído um conjunto de informações sobre a composição das superfícies (solo, coberta e fachadas), são estes: condutividade térmica, capacidade térmica, a transmitância térmica e o albedo. Quanto às aberturas existentes nos edifícios, estas podem ser introduzidas ao modelo geométrico atribuindo uma fração de abertura em vidro (*glazing ratio*) por plano de fachada. A proposta do programa é resolver a complexidade de interações na escala urbana do distrito, de modo que o detalhamento necessário para modelagem mais fina na escala do edifício não é contemplada. Para cada fração de abertura definida deve ser especificado o fator solar e a transmitância térmica do componente.

Nesse mesmo arquivo, é necessário ainda indicar a localização geográfica de estudo e o nome do arquivo climático correspondente (.cli), que deve ser fornecido separadamente. Esse arquivo deve apresentar dados horários de um ano completo, para as seguintes variáveis: radiação direta global horizontal, radiação difusa horizontal, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, precipitação e nebulosidade. O arquivo no formato exigido pode ser gerado por meio de base de dados em programas como Meteonorm[30]. Nesse último é também possível gerar um outro arquivo importante para definição da cena estudada: as obstruções horizontais distantes (.hor), dada a presença da topografia local.

A partir da leitura do arquivo de entrada, o núcleo do programa realiza as análises, calculando, por meio do algoritmo SRA, a iluminância (lux) e irradiância horária (solar e infravermelha em $W.m^{-2}$) resultante por superfície, por edifício. Os resultados obtidos são escritos também em arquivo próprio de saída (.out) que pode ser lido e analisado em programas como Excel.

A partir de ferramentas de tratamento de dados e análise estatística, os resultados obtidos para as análises da morfologia urbana e clima são comparados em estatística anual para irradiação [$Wh/(m^2.ano)$] ou médias mensais de iluminância (lux).

[30] Banco de dados meteorológicos global. Disponível em: http://meteonorm.com/

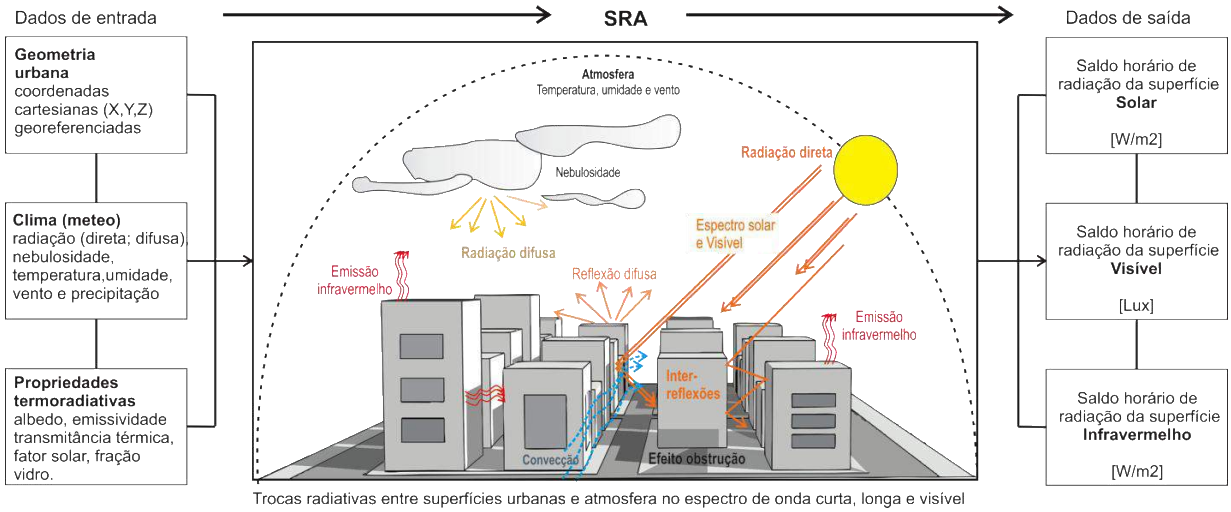


Figura 57: ilustração esquemática das entradas e saídas do modelo SRA. Fonte: ilustração do autor.

Em síntese, o algoritmo SRA que será empregado nas análises preditivas e prospectivas do presente estudo inclui os modelos conforme ilustra a Figura 58 abaixo.

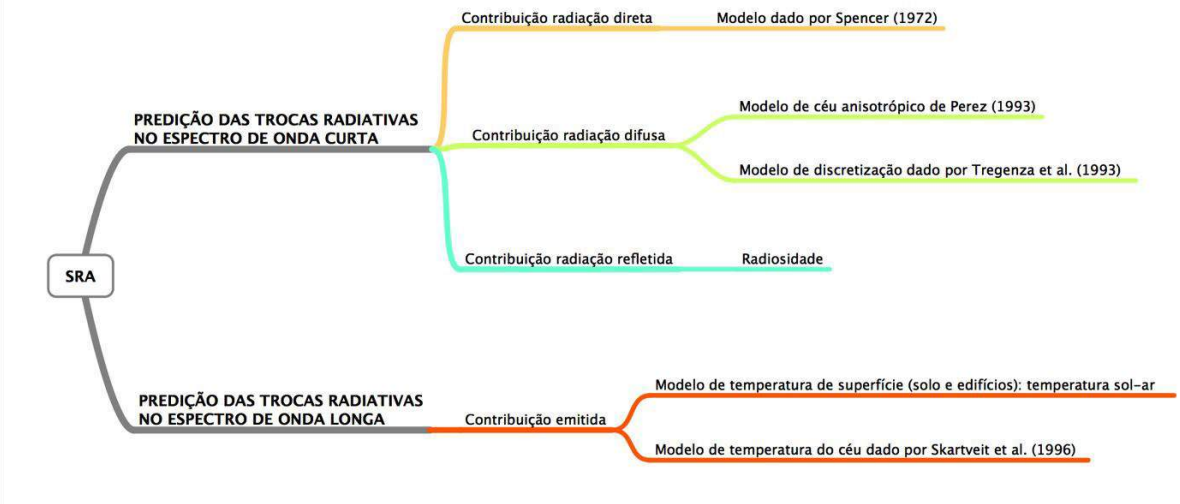


Figura 58 : conjunto de modelos empregados no algoritmo escolhido para análises preditivas do estudo. Fonte: ilustração do autor.

Os resultados da aplicação nesse estudo serão apresentados e discutidos nos capítulos II, III e IV.

I.3. Passando da problemática solar nas cidades à parametrização da forma urbana

Em cidades, a visão do horizonte será frequentemente obstruída em todas as suas direções, principalmente em centros urbanos de elevada densidade construída. Essas obstruções podem reduzir bastante tanto a visão do céu, quanto de várias horas de sol nesses espaços, modificando substancialmente o balanço radiativo nas superfícies urbanas, em termo de disponibilidade de luz natural, aporte solar e potencial energético solar das fachadas.

Conforme visto, a cidade também interage com uma série de elementos climáticos, alterando relativamente suas características. As componentes modificadas desse novo microclima, por sua vez, atuarão modificando o balanço radiativo das superfícies construídas. A fim de considerar essas influências (forma e clima) no fenômeno de interesse (balanço radiativo das fachadas), sugere-se o uso de um conjunto de parâmetros descritivos simplificados da morfologia urbana construída capazes de fornecer indicações relevantes sobre o comportamento das principais fenômenos climáticos no âmbito das cidades.

Para passar da problemática climática a uma linguagem de projeto (mais próxima ao arquiteto e urbanista), busca-se parametrizar a forma urbana a partir de indicadores simplificados de desempenho climático. Um sistema de indicadores ou parâmetros descritivos permite traduzir de forma satisfatória, direta e simples informações sobre fenômenos complexos em parâmetros urbanos de forma, oferecendo indicações importantes para se estabelecer relações entre a forma e o clima.

O inconveniente de tal método é que se trata de uma modelagem bastante simplificada, necessitando ser validada ou "acoplada" a outros modelos mais robustos para identificação da relevância de suas respostas ao problema investigado. No contexto do presente estudo, os parâmetros descritivos utilizados serão também submetidos a análises paramétricas de sensibilidade, por meio do uso de um modelo computacional (Capítulo III).

Baseando-se em estudos prévios da literatura, um conjunto desses parâmetros descritivos foram selecionados, focando nos quatro principais elementos climáticos implicados no problema da pesquisa e no contexto climático: radiação solar, temperatura, umidade, vento.

Ressalta-se que, nessa abordagem, para compreendermos o impacto dos importantes parâmetros que definem a arquitetura urbana, isolamos essa temática. De modo que, outros aspectos conforme discutidos precedentemente, tais como a influência da evapotranspiração e do calor proveniente de outras atividades humanas (calor antropogênico) não serão consideradas nessa abordagem.

Outrossim, alguns critérios foram considerados para se chegar a um conjunto de instrumentos "morfológico-climáticos" que sejam significativos à temática proposta e, também à operacionalidade desses parâmetros como linguagem de projeto. Os seguintes critérios foram, portanto, considerados (ADOLPHE, 2001):

(1) *Integralidade*, de modo que o sistema de parâmetros cubra o conjunto de elementos climáticos pertinentes à abordagem;
(2) *Não-redundância,* na escolha de indicadores de baixa correlação;
(3) *Operacionalidade,* limitando o número de indicadores.
(4) *Legibilidade,* indicadores de fácil interpretação e aplicação ao projeto.
(5) *Mensurabilidade*, que exijam o uso de dados facilmente obtidos a partir de banco de dados cadastrais urbanos;
(6) *Consistência física*, indicadores consistentes com o fenômeno físico correspondente;

(7) *Consistência espacial,* indicadores que sejam consistentes com a escala de estudo – escala microclimática e do dossel urbano;
(8) *Comparabilidade,* indicadores cujos valores absolutos não sejam altamente significativos, (que possam conferir a hipótese de simplificação adotada), mas para os quais variações relativas (intervalo e direção) são significativos.

I.3.1. Trocas convectivas pelo movimento do ar (vento)

Para modelar a influência do vento nos fenômenos de interesse nesse estudo, equipara-se a cidade, a um meio tridimensional (na escala do dossel urbano), meio poroso de estrutura sólida. Nessa hipótese, todavia, distinguem-se as condições climáticas acima das cobertas e no interior do dossel, considerando que acima dessa camada ou da coberta dos edifícios, essas condições corresponderiam às características de um mesoclima regional, e as condições locais estando relacionadas à topografia (variação da altura do dossel construído e vegetal). Conforme visto anteriormente, essas condições locais abaixo do dossel reduzem a velocidade do ar quando comparadas às condições locais em zonas rurais e podem ser avaliadas utilizando o indicador da *Rugosidade*.

A abordagem da rugosidade como parâmetro de modelagem das modificações provocadas pela forma urbana nas trocas convectivas, assume que o limite do dossel em relação ao perfil vertical de velocidade do vento é bem definido e estável. O que consiste em redução bastante limitante para abordagens preditivas meteorológicas específicas sobre o escoamento do vento na mesoescala ou na escala local e nas várias camadas climáticas verticais. No entanto, essa limitação pode ser válida para estudo em geometrias urbanas simplificadas, oferecendo indicações aproximadas, a partir da "correção" do vento médio em escala local em função da rugosidade em microescala, a fim de servir à outras aplicações. No presente estudo, essa aproximação é aceitável, visto que a finalidade é levar em conta a influência da forma construída, na escala da vizinhança, no balanço radiativo das fachadas dos edifícios. Nessa abordagem assume-se um clima meteorológico médio (ano climático proveniente de estações de monitoramento) para as escalas superiores à escala do dossel trabalhada.

A partir de modelos preditivos mais complexos, para cálculo do balanço radiativo em fachadas, será apresentado mais adiante um estudo paramétrico de sensibilidade, onde se verifica a magnitude de efeito das trocas convectivas na resposta do balanço do infravermelho em fachadas. Validando ou não a relevância dessa influência para modelagem radiativa proposta.

A Rugosidade pode ser obtida avaliando-se a distribuição da altura dos edifícios para vários azimutes. Esse indicador permitirá, numa abordagem morfológica inicial, distinguir elementos abertos e fechados, em vazios urbanos. O tecido urbano é, de fato, feito de espaços abertos como ruas e avenidas (equivalente a um meio feito de poros), e de espaços fechados (ou parcialmente fechados), equivalentes a cavidades, tais como pátios e jardins.

O gradiente de pressão em espaços abertos pode ser facilmente avaliado pela área frontal vertical e pela orientação da rua em relação à direção predominante do fluxo do ar (ADOLPHE, 2001). Aspectos que podem ser considerados, de forma complementar, por meio do uso de outros dois indicadores, a *Porosidade* e a *Sinuosidade/Direcionalidade* (ADOLPHE, 2001) (BENZERZOUR, 2004).

I.3.2. Radiação solar

Para avaliar a influência da morfologia urbana em termos da radiação solar recebida - como fonte de calor e disponibilidade de luz natural e energia nas envoltórias - considera-se que esta pode ser avaliada em função de fatores de geometria e materialidade.

Quando a radiação solar (direta e difusa) chega ao espaço das cidades, ela é interceptada pela geometria de seus elementos, em função, principalmente, de como estes estão distribuídos espacialmente (relação de proximidade) na malha urbana, bem como, da altura média construída no dossel. O primeiro aspecto que caracterizará o acesso dos raios solares numa dada fachada corresponderá, portanto, a quantidade de obstrução que esses elementos construídos produzirão em relação á posição do sol e a fração de céu visível a um determinado ponto de observação na cidade.

Alguns estudos consideram que o parâmetro crítico para esta avaliação no tecido urbano pode estar relacionado com o ângulo sólido por meio do qual a energia radiante do sol/céu é vista (dado um ponto central na fachada, por exemplo) ou pelo próprio *Fator de Visão do Céu*, introduzido por Oke (1988). Este último sendo bastante empregado (e amplamente validado) em estudos para avaliação da intensidade de fenômenos como a ilha de calor urbano (item I.2.5).

No entanto, a modelagem e avaliação de parâmetros de forma, como os mencionados, para aplicação na escala urbana da vizinhança, depende de uma modelagem criteriosa (e.g. que exige uma discretização espacial incompatível com as atuais possibilidades de modelagem em SIG – Sistema de Informação Geográfica) e numa descrição tridimensional incompatível com o critério de mensurabilidade estabelecido (dados que sejam facilmente obtidos de bases cadastrais disponíveis para o estudo). A descrição da forma na escala urbana em plataformas SIG, depende de polígonos num plano horizontal com altura cadastrada, de modo que se torna mais viável realizar análises em seções 2D (corte e planta), do que implementar cálculos de ângulos em 3D, como seria o caso do Fator de Visão do Céu.

Outros parâmetros descritivos alternativos que possuem o mesmo objetivo foram apresentados e empregados por outros autores, tal como o indicador de *Oclusividade* (MARTIN CENTRE, 1997), o *Ângulo do Horizonte Urbano* (UHA) (BAKER e STEEMERS, 1994) e o *Prospecto médio* (OKE, 1988). Ambos são função da altura média construída e da distância que separam os edifícios.

Esses parâmetros não apenas indicam sobre a condição de abertura da forma urbana quanto à sua acessibilidade à energia solar, quanto o grau de confinamento desses espaços, indicando sobre a capacidade das estruturas urbanas em dispersar a energia recebida, seja por reflexão (difusa ou especular) da radiação solar, como por emissão da energia térmica decorrente da radiação que é parcialmente absorvida pelas superfícies. Por essas razões, conforme visto, tanto o fator de visão do céu como o prospecto médio podem ser empregados como indicadores da intensidade do fenômeno da ilha de calor urbana.

Além disso, a acessibilidade à luz natural, por exemplo, será também proporcional à área de envoltória construída não-adjacente a outros edifícios. Dois parâmetros complementares, nesse sentido, são: o *Fator de Forma* e a *Contiguidade*. O primeiro relaciona as áreas de envelope não-adjacentes e o volume dos edifícios, e o segundo, relaciona as áreas não-adjacentes e as adjacentes aos edifícios vizinhos, tanto horizontalmente como verticalmente.

Complementarmente a isto, faz-se necessário citar o uso de outros indicadores que definem a materialidade das fachadas e que apresentam importante influência nesses fenômenos, ou seja, os indicadores da capacidade dos materiais em refletir, emitir e estocar a energia recebida (albedo, emissividade e da capacidade térmica dos materiais). Informações termo-radiativas facilmente encontradas na literatura e que devem estar associadas ao estudo da relação entre a morfologia urbana e clima.

I.3.3. Temperatura e umidade do ar

Ao absorver uma dada fração da energia radiante recebida, as paredes das envoltórias aquecem e em função da sua capacidade de armazenar, conduzir e emitir energia térmica, essas envoltórias vão "ceder" mais ou menos calor para o meio circundante, aquecendo o ar ambiente, elevando a temperatura local e agindo, assim, no balanço radiativo no infravermelho. Isso é dado pois a transferência de energia radiante ocorre em função da diferença de temperatura entre os meios (superfície e o ar e entre superfícies). Quanto mais o ar é aquecido, menor a diferença de temperatura, menor será o fluxo de calor emitido pelas superfícies.

Além disso, tem-se que os ganhos de calor provenientes da energia radiante (aporte solar) recebida pelas envoltórias será também proporcional à área de envoltória construída não-adjacente a outros edifícios. Citamos novamente, portanto, a influência preponderante da relação entre a área da envoltória exposta à radiação e o volume construído (*Fator de Forma* e a *Contiguidade)*. O fator de forma, particularmente, atuará também de maneira bastante relevante no cálculo teórico da carga térmica para resfriamento dos edifícios (CARLO e LAMBERTS, 2010).

A influência da temperatura nesses processos dependerá também da refletividade (albedo), da emissividade e capacidade térmica dos materiais.

I.3.4. Síntese

A partir das hipóteses apresentadas, a complexidade da morfologia urbana pode ser simplificada, para responder a um conjunto de condições climáticas específicas, em um modelo de no mínimo com onze dimensões: rugosidade, porosidade, direcionalidade/sinuosidade, fator de forma, contiguidade, densidade construída, verticalidade, prospecto médio, refletividade, emissividade e capacidade térmica. A definição de cada indicador, suas principais relações e valores de referência serão apresentados no próximo capítulo (Capítulo II).

Esse conjunto inicial de indicadores será complementado após levantamento e discussões pertinentes ao contexto tipo-morfológico e normativo da aplicação proposta nesse trabalho (ver Capítulo II).

A síntese das discussões suscitadas e que buscam, nessa etapa, justificar e tecer as principais relações entre os elementos climáticos e a forma construída da cidade, pode ser ilustrada esquematicamente como na Figura 59.

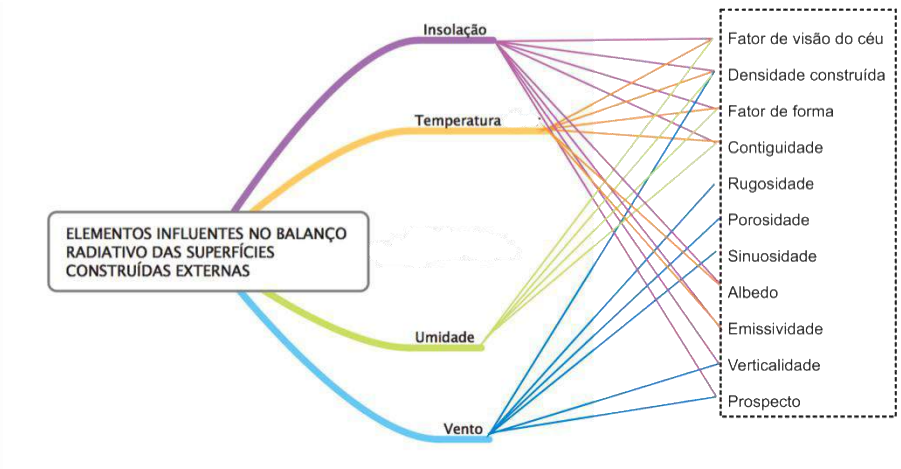


Figura 59 : síntese dos principais parâmetros descritivos da forma urbana implicados na definição dos elementos climáticos influentes no balanço radiativo das superfícies construídas. Fonte: ilustração do autor, 2013.

Conclusões do capítulo

A partir da revisão bibliográfica e das informações discutidas nesse primeiro capítulo da tese, importantes aspectos metodológicos e contextuais da pesquisa puderam ser definidos:

- O *contexto climático de estudo e de aplicação*. Foi possível verificar que regiões de clima tropical úmido apresentam um vasto potencial para aproveitamento da energia solar como recurso renovável para produção de energia (térmica, elétrica e ganhos de luz natural). A captação da energia solar nas edificações pode ser muito promissora nessas regiões, dada a temporalidade regular desse recurso. Conforme visto, regiões situadas nos trópicos úmidos próximas ao Equador apresentam poucas variações anuais e sazonais dos níveis de insolação, temperatura e umidade. A principal variação climática nessas regiões é a precipitação/ nebulosidade que definirá duas estações nessas regiões, com ou sem chuva. Essa condição variável de nebulosidade atua, portanto, reduzindo a radiação solar direta e aumentando a contribuição da radiação difusa durante os meses de maior precipitação. Aspectos que foram observados em exemplo típico desse contexto climático, que é a cidade de Maceió, escolhida para aplicação do estudo.

- A *escala climática espacial e temporal mais adaptada* para modelagem das respostas de interesse. Verificou-se que é de interesse modelar edifícios urbanos na escala microclimática de até 500m x 500m, cuja escala vertical máxima corresponde à altura média das suas edificações, pois é nesse recorte espacial que se torna possível integrar duas importantes escalas de intervenção do arquiteto e urbanista (forma construída e envoltória dos edifícios). Foi visto ao longo desse capítulo que o desempenho energético dos edifícios urbanos está fortemente condicionado pela forma e implantação destes no tecido urbano, sendo estes os principais aspectos que determinarão o potencial de trocas radiativas entre os elementos construídos. A escala temporal de estudo corresponde ao intervalo de 1h para um ano climático completo, onde poderão ser observados os comportamentos anual e sazonais dos fenômenos de interesse.

- O *modelo analítico mais adaptado* ao recorte espacial, temporal e contextual. O presente capítulo revisou os principais modelos de predição do balanço radiativo em superfícies inclinadas e possibilitou eleger o modelo computacional SRA como o mais adaptado para identificar o potencial solar das edificações na escala urbana da vizinhança. Este é capaz de determinar (com um grau de precisão satisfatório para a escala de investigação) a radiação solar direta incidente considerando a redução dessa incidência devido às obstruções da cidade, as reflexões múltiplas produzidas por estas, bem como a radiação dispersada tanto pelo céu quanto pelas obstruções. Foi visto ainda que este algoritmo impõe, no entanto, algumas simplificações no seu modelo (e.g. superfícies urbanas como superfícies lambertianas e a consideração de uma obstrução dominante), mas que são aceitáveis em modelagens urbanas (na escala do bairro/vizinhança) e na escala temporal de estudo.

- A *relação entre condicionantes climáticos e a forma urbana*. Para permitir cruzar dados físicos oriundos de modelos climáticos aos dados urbanos da morfologia construída, buscou-se ao fim do capítulo, "parametrizar" a forma urbana a partir de um sistema de indicadores simplificados de desempenho climático. Um tal sistema de indicadores pode permite traduzir de forma satisfatória, direta e simples informações sobre fenômenos complexos em parâmetros urbanos de forma, oferecendo indicações importantes para se estabelecer relações entre a forma e o clima. Essa consiste em uma das hipóteses do trabalho que será investigada no próximo capítulo (Capítulo II), quando as informações (resultados) obtidos a partir da aplicação do modelo de predição climática urbana serão contrastadas às principais características morfológicas da cidade de Maceió. O emprego de técnicas relativamente complexas na metodologia do trabalho permitirá gerar dados que poderão ser direcionados e adaptados à linguagem do planejador dos espaços por meio de uma abordagem integrada de indicadores "morfo-solares", conforme será visto nos capítulo subsequentes desse manuscrito.

CAPÍTULO II
Estudo morfosolar da cidade

Objetivo geral do Capítulo II

O presente capítulo dirige-se ao estudo da morfologia urbana como componente crucial na definição do desempenho climático nas cidades. Discute-se o estudo da forma urbana no processo de concepção dos espaços construídos, bem como, a tipologia como instrumento de análise climática. Busca-se tecer a relação entre a forma urbana e a resposta desta ao contexto climático através de uma revisão de estudos e indicadores na literatura e, ao fim do capítulo, através de uma aplicação metodológica simplificada na cidade de Maceió-AL, Brasil.

O presente capítulo é constituído de cinco etapas: (1) estudo e discussão sobre a forma construída como um método de análise; síntese e concepção do projeto de arquitetura na urbe, e a procura de integração com os condicionantes climáticos; (2) revisão das principais métricas espaciais e indicadores ambientais da morfologia urbana, afim de se obter uma seleção do conjunto de indicadores a ser considerado no estudo; (3) apresentação do método e instrumentos para definição dos tipos construídos predominantes no tecido urbano (*primeira etapa metodológica da tese*); (4) apresentação da cidade estudo de caso, Maceió-Alagoas, e aplicação da metodologia apresentada; (5) estudo do desempenho solar das estruturas urbanas identificadas na cidade estudada.

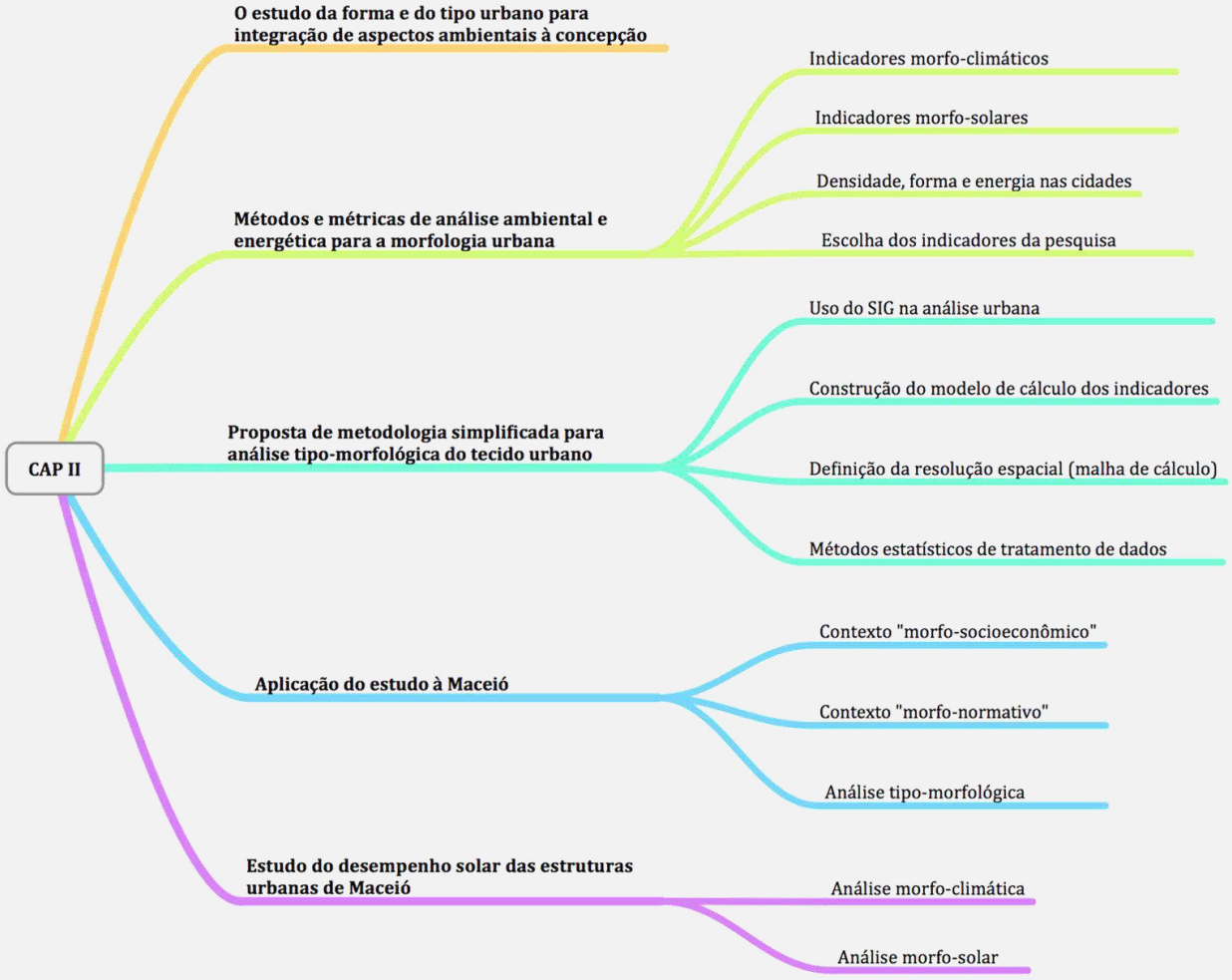


Figura 60 : estrutura do capítulo II.

Palavras-chaves: morfologia urbana, tipologia, clima e energia, indicadores ambientais da morfologia urbana, SIG, cartografia da forma urbana, desempenho morfosolar das superfícies.

II.1. O estudo da forma e do tipo urbano para integração de aspectos ambientais à concepção dos espaços

> "*O catálogo de formas é infinito: enquanto houver uma forma que não tenha encontrado a sua cidade, continuarão a nascer novas cidades. Onde as formas esgotam as suas variações e se desfazem, começa o fim das cidades*" (CALVINO, 2008).

"O catálogo de formas é infinito", e o homem tem inventado e reinventado o seu espaço ao longo de sua história em resposta à diferentes contextos: político, social e/ou ambiental. A cidade consiste, portanto, em espaço dinâmico constituído de uma adição de formas e tipos urbanos variados que traduzem uma dada concepção de cidade e de vida.

A definição de forma urbana possui variadas conotações e pode ser dada em função das características da abordagem empregada na discussão ou estudo (RAYNAUD, 1999). "Se a forma urbana deriva de um estudo tipo-morfológico entendido no sentido da classificação ou da tipologia, fala-se de *tipo urbano*". Emprego do termo que assume uma abordagem descritiva e/ou comparativa, como será visto mais adiante na discussão e aplicação metodológica dessa etapa do trabalho.

Pensar a evolução da cidade através da adaptabilidade de sua forma construída a um conjunto de objetivos e critérios, requer que haja uma compreensão do repertório significativo das formas existentes. Assim, torna-se possível modificar, adaptar um sistema de formas, decompô- lo em partes, mas conservando sua forma global, o que, segundo Salat (2011), constitui uma forma de permanência e resiliência[31].

O crescimento progressivo da forma da cidade a partir de adições e supressões sucessivas de seus elementos, pode conduzir através de um processo de seleção e mutação criteriosa a uma condição de boa adaptabilidade ao meio físico disponível. Entretanto, a cidade pode ser progressivamente destruída quando apresenta um crescimento excessivamente acelerado e sem planejamento, ou sofra intervenções em nível ou escala inapropriados, seja no que se refere ao seu meio físico, estrutural, climático ou social.

Para um dado contexto urbano, revela-se necessário para se conhecer o repertório de formas, a utilização de instrumentos e métricas em conformidade com uma dada problemática e objetivos, tal como os indicadores apresentados anteriormente, no primeiro eixo teórico da tese (clima e insolação nas cidades). Mas antes de ser apresentado o conjunto de instrumentos que será útil na abordagem metodológica desse estudo, faz-se necessário explicitar como os métodos, técnicas ou abordagens poderão ser utilizados pelo projetista no processo de concepção da forma construída. No contexto da problemática desse trabalho, pretende-se particularmente discutir o processo de concepção da forma que integra os condicionantes climáticos, mais especificamente os condicionantes ligados a energia solar.

Nesse segundo eixo teórico do trabalho, a cidade é, portanto, estudada através da sua morfologia. Morfologia significa "ciência que estuda a forma" e, no contexto das cidades, pode ser definida como o estudo da forma urbana ou o estudo dos aspectos exteriores do meio urbano, por meio do qual se coloca em evidência a sua estrutura construída (LAMAS, 2009). Tal estudo constitui um instrumento poderoso no entendimento e no planejamento da cidade e, interage com uma ampla gama de disciplinas. No urbanismo, o estudo da morfologia aparece, principalmente, como um método de análise, chave para se detectar princípios, regras e tipos inerentes ao traçado da cidade, o que é fundamental para futuras intervenções urbanas (DEL RIO, 2000).

[31] Resiliência é a capacidade de um sistema ou um grupo de indivíduos, de superar um obstáculo e recuperar um funcionamento ou um desenvolvimento normal, após a vivência de um trauma.

A morfologia urbana deve ser entendida aqui como a forma tridimensional composta por um grupo de edifícios e os espaços criados em torno destes (STEEMERS, 2003). Morfologia esta que será examinada mais adiante, através do prisma climático e energético. Esse tipo de abordagem colocará, portanto, "entre parênteses" as várias e importantes interações que religam as formas urbanas a um dado contexto social, econômico ou político, para poder destacar, nos estudos das relações formais e espaciais, os componentes de uma paisagem climática.

Outrossim, o interesse de uma tal abordagem consiste em permitir a apreensão da posição e do papel exato de cada componente elementar da forma urbana em relação à um ou vários objetivos e critérios climáticos, energéticos e urbanos. Procura-se identificar possíveis contextos em que seja possível modificar a forma urbana, criar novas regras, com a identificação de seus limites, suas características, de modo a possibilitar a evolução dos traços característicos de um bairro tipológico, mas sem o desconfigurar completamente.

Outro conceito importante, portanto, para compreensão da abordagem morfológica empregada nesse trabalho, é o de tipologia. Tipologia como objeto síntese de um conjunto de atributos ou ainda como metodologia de projeto.

Para tipologia, não existe uma única definição. Contrariamente, tal conceito é redefinido sempre em função das investigações que se pretende realizar. O tipo é, portanto, um instrumento e não apenas uma simples categoria (PANERAI, DEPAULE e DEMORGON, 2009). As noções de tipo e tipologia podem, portanto, consistir em importantes ferramentas de análise urbana.

Neste trabalho, adota-se a acepção que define o tipo como expressão da essência de uma família de objetos. Para Boudon e Bourricaud (1982), a única coisa que distingue uma tipologia de uma classificação é o número de critérios utilizados para distinguir os elementos de um conjunto. Quando a definição é baseada em um único critério, esta é chamada de classificação; quando são usados vários critérios, chama-se, talvez, tipologia (COENEN-HUTHER, 2006). A análise tipológica permite identificar os tipos, oferecendo, portanto, uma articulação lógica (uma "tipo-logia").

O exercício metodológico da análise tipológica propõe reunir as características particulares dos objetos, retendo apenas os seus traços gerais mais significativos diante de um determinado conjunto de critérios. Para Rossi (1982), o processo de redução é uma operação lógica e necessária que permite a análise da forma urbana e arquitetônica. Busca-se adotar uma observação sistemática, a classificação, a comparação, aproximação, onde o tipo funcione também como proposição para reprodução (PANERAI, DEPAULE e DEMORGON, 2009).

A análise e definição de tipologias construídas existentes, conforme um conjunto de parâmetros ou indicadores morfológicos[32] de análise, permitirá propor, nesse trabalho, variações, regras e mutações para adaptação do tipo à problemática anunciada.

Os indicadores mencionados consistem em instrumentos simplificados de análise tipo-morfológica capazes de integrar temáticas científicas mais complexas (e.g. análise climática, desempenho energético) a parâmetros ou atributos da forma construída, de modo que estas temáticas possam ser mais facilmente apreendidas por projetistas, adaptando-se ao contexto de fase de concepção de projetos. Sendo também, por esta razão, que esses indicadores morfológicos foram escolhidos como a linguagem espacial que nos acompanhará até a síntese dos resultados e proposições.

A classificação tipo-morfológica baseada em determinados indicadores permite extrapolar conhecimentos específicos de uma temática a fim de suportar ou orientar cientificamente escolhas

[32] Alguns indicadores morfológicos importantes à problemática ambiental, são: coeficiente de forma, rugosidade, contiguidade, prospecto médio, fator de visão do céu, etc. Os indicadores da morfologia urbana serão discutidos no item I.2.

em outras disciplinas. No contexto dessa pesquisa, o tipo permitirá orientar análises do desempenho climático de famílias de formas urbanas representativas.

Para ilustrar isso, citam-se alguns exemplos. No caso dos estudos sobre a ventilação natural em espaços construídos, dados específicos gerados por meio da simulação em túnel de vento de modelos físicos de tipologias construídas (ou formas representativas simplificadas de contextos reais) são utilizados para efetuar certas generalizações que podem ser úteis em abordagens metodológicas simplificadas na pesquisa em Arquitetura. Por meio da linguagem do tipo pesquisadores da área puderam estabelecer relações, classificando tecidos urbanos em função do efeito da rugosidade produzido no comportamento do escoamento do ar nas cidades (e.g. tipologia de centro urbano denso, tipologia dispersa, etc.) (ALLARD e SANTAMOURIS, 1998).

Na década de 1970, os arquitetos Martin e March, motivaram-se pela procura de uma tipologia que apresentasse o melhor potencial para construir (em termos de melhor aproveitamento do solo urbano). Para tanto, investigaram diferentes geometrias, e chegaram a seis tipologias principais comumente encontradas nas cidades européias: pavilhões, barras, geminadas, edifícios geminados com pátio, pavilhões com pátio e pátios (Figura 61) (MARTIN e MARCH, 1972). Décadas mais tarde, Steemers et al. (1997) retomaram as mesmas tipologias para avaliá-las do ponto de vista ambiental, utilizando indicadores simplificados de desempenho (e.g. percentual de sombra projetada, fator de visão do céu, etc.), concluindo que para uma mesma taxa de ocupação, tipologias em pátio produziriam melhores condições em termos de iluminamento natural nos espaços (ver Steemers *et al*. (1997)).

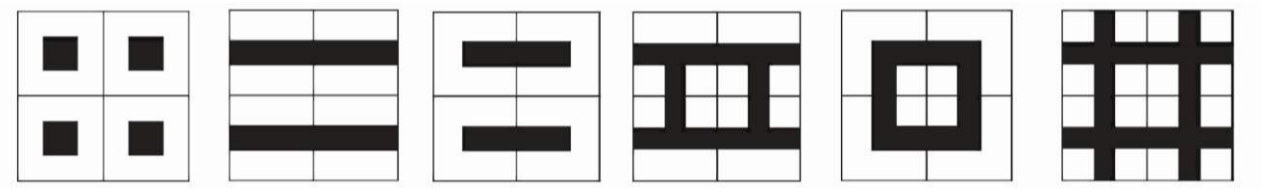


Figura 61: formas urbanas simplificadas de Martin and March (1972) e ambientalmente revisadas por Steemers *et al*. (1997).

A abordagem tipo-morfológica pode ainda ser bastante útil no estudo do impacto da forma construída em fenômenos microclimáticos urbanos, como a ilha de calor. Stewart e Oke (2009) sugerem um zoneamento climático local (*Local Climate Zone)* a partir de modelos genéricos de forma urbana caracterizados por atributos morfoclimáticos (e.g. estruturas construídas, superfícies e atividades humanas). A proposta busca ir além da tradicional abordagem que classifica o efeito da ilha de calor como a diferença de temperatura encontrada apenas entre uma zona urbana e uma zona rural. Os autores sugerem que os efeitos climáticos possam ser traduzidos em termos de oito tipologias do clima local (Figura 62), em um mosaico de ilhas de calor.

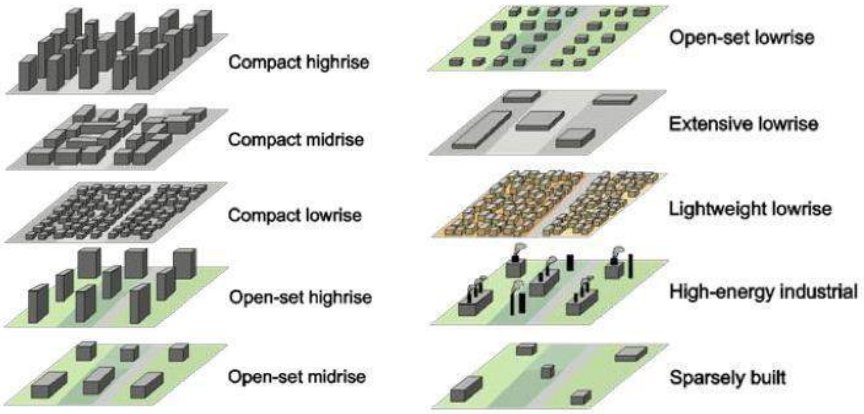


Figura 62*:* Zonas do Clima Local » propostas por Stewart e Oke (2009).

Estudos como o de Jiang (2010) propõem o uso de famílias tipo-morfológicas para identificar o impacto da forma urbana nos gastos energéticos para transporte. No tecido urbano em Jinan, na China, o autor identifica quatro tipologias urbanas representativas na malha estudada: "tradicional", "ortogonal", "enclave" e "superquadra", as quais contrasta com pesquisas estatísticas de domicílios, a fim de verificar qual perfil de transporte e de deslocamentos cada tipo-morfologia demandava.

Diversas pesquisas aplicaram a abordagem tipológica para diferentes finalidades de análise ambiental e energética da forma. As abordagens variam conforme objetivo específico e região geográfica (STEWART e OKE, 2009) (MARIQUE e REITER, 2012) (LONG e KERGOMARD, 2005).

Um estudo recente, também importante, é o de Bonhomme *et al*. (2012). Os autores utilizaram os conceitos de tipologia e forma para elaborar uma ferramenta que gera automaticamente mapas tipológicos de quadras urbanas – GENIUS (*GENerator of Interactive Urban blockS*). A partir de dados urbanos georeferenciados, o aplicativo permite tratar, classificar e, por meio de métodos estatísticos obter um novo mapa, este contendo polígonos representando sete tipologias de quadras urbanas distintas (Figura 63). Tais tipologias sendo representativas do contexto urbano europeu. Esse modelo faz parte de um projeto de pesquisa mais amplo cujo objetivo é realizar estudos prospectivos sobre o efeito das mudanças climáticas, demanda e produção energética das tipologias de quadra urbana até 2100 na região de Paris, alimentando o modelo com previsões meteorológicas, socioeconômicas e ambientais (MASSON, VIGUIÉ, *et al.*, 2012).

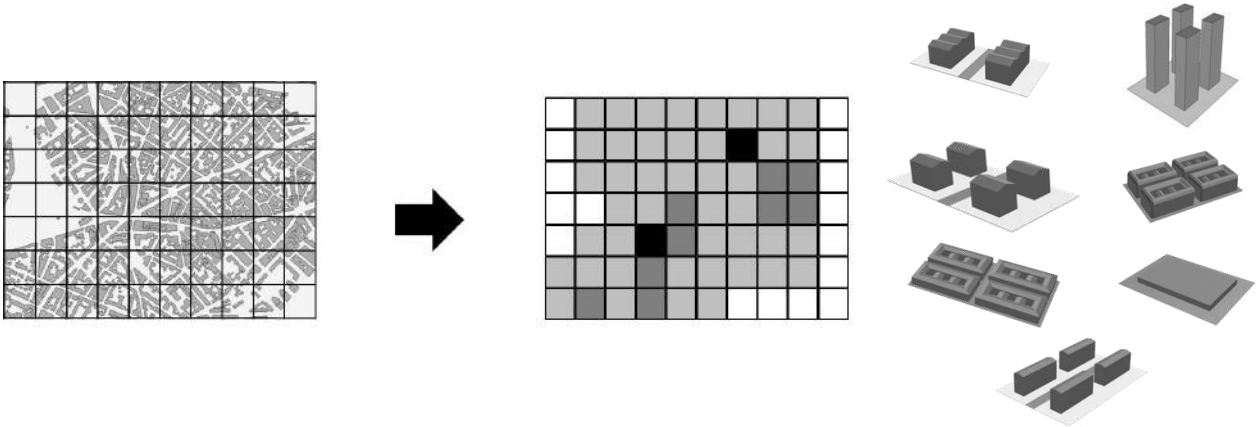


Figura 63: princípio da geração do mapa de tipologias de quadras urbanas (BONHOMME, MASSON e ADOLPHE, 2012).

Mais recentemente, Arantes (2012) examinou seis tipologias de formas urbanas genéricas contrastadas de mesma densidade construída (número de habitação/hectare): a torre, o pavilhão, a casa em fila, o compacto linear escalonado, o linear espaçado escalonado e o habitat individual (Figura 64). A tipologia foi empregada para identificar a relação entre os aspectos de densidade da forma e o balanço energético obtido nas edificações. A tipologia de melhor desempenho para o contexto de clima temperado estudado consistiu na forma de casas em fila (casas geminadas). No entanto, os demais aspectos que definem e qualificam a forma urbana (contiguidade, rugosidade, porosidade, prospecto, etc.) não foram considerados nessa análise.

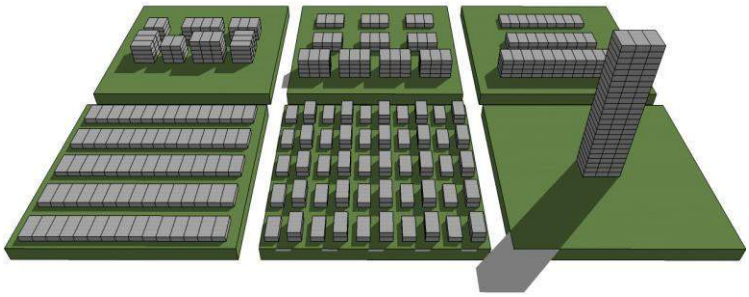


Figura 64 : seis tipologias de forma urbana estudadas por Arantes (2012).

O uso do tipo como instrumento e objeto de análise em espaços urbanos permite, portanto, reduzir a complexidade inerente à morfologia da cidade. Consegue-se através dos tipos condensar um conjunto de aspectos e critérios relevantes de modo a que sejam utilizados em conhecimentos aplicáveis à outras disciplinas ou especialidades, tais como a climatologia, estrutura, materiais e processos urbanos.

Assim, o desenvolvimento da pesquisa sob o enfoque tipológico poderá auxiliar no estabelecimento de relações entre uma forma construída da cidade, com as condições climáticas locais e os balanços energéticos resultantes, através de suas restrições e potencialidades.

II.2. Métodos e métricas de análise ambiental e energética para a morfologia urbana

Nos últimos anos tem sido observado o uso crescente do termo "indicador" no contexto da operacionalização dos numerosos aspectos relacionados à sustentabilidade (ambiental, sócio-cultural e econômica). No âmbito da larga gama de selos, certificações, sistemas de avaliações complexos, os indicadores têm como vocação principal estabelecer uma descrição relativa às questões de um determinado critério. Os indicadores têm a função de fornecer um "retrato" do comportamento para um projeto baseado em valores de referência a partir de dados locais (Figura 65).



Figura 65: esquema ilustrativo do fluxo de informações da base de dados locais ao atendimento de uma dimensão global. Fonte: ilustração do autor (2012).

Um indicador traduz dados em uma informação sucinta que possa ser facilmente compreendida, permitindo, portanto, simplificar situações complexas e encaminhá-las com consistência operacional aos principais atores de intervenção do ambiente construído, atuando no processo de decisão. Esta noção passou a ser bastante empregada também pela necessidade em tornar acessível a uma comunidade não especializada, dados complexos relacionados com as várias disciplinas envolvidas no processo de concepção e projeto dos espaços construídos. Assim, permite-se que estas informações e conceitos sejam mais facilmente difundidos e assimilados pelos não-especialistas, sobretudo na prática das disciplinas relacionadas com o clima e as questões ambientais (BENZERZOUR, 2004).

Existe uma relação estreita entre indicador e descritor ou atributo. Dada as diversas conotações e diferentes aplicações, optou-se por esclarecer brevemente aqui a definição desses termos nesse trabalho.

Um descritor possui como papel, descrever uma situação de acordo com a perspectiva de um único domínio do conhecimento. Enquanto que um indicador tentaria avaliar a situação em um campo do conhecimento através dos descritores, com os quais se encontram ligados (diretamente ou através de interpretação). A finalidade dos indicadores seria, portanto, traduzir uma situação complexa. Em outras palavras, no contexto desse trabalho, os indicadores da morfologia urbana seriam descritores morfológicos que permitem analisar uma dada realidade de fenômenos “não morfológicos" tais como os relacionados ao ambiente climático ou a energia na cidade.

Os indicadores operacionais, como os conceitos práticos, corresponderiam à tradução de uma realidade construída. Não teriam valor teórico em si. Seu objetivo consistiria em expressar uma realidade e ao mesmo tempo, ultrapassá-la para possibilitar a elaboração de generalizações aplicáveis.

Trazendo os conceitos de forma e tipologia ao encontro de um sistema de indicadores, pode-se obter uma ferramenta extremamente prática de análise morfológica. Ferramenta que permitirá identificar, classificar e comparar o conjunto de formas existentes, a fim de entender o comportamento energético de uma situação atual e prospectiva.

Tal sistema de medidas espaciais permite, primeiramente, repartir os diferentes tecidos urbanos existentes, e retirar os traços comuns entre as várias cidades, criando, assim, tipos que recuperariam, talvez, uma repartição geográfica de grande valia (SALAT, 2011).

Os indicadores espaciais podem ser ferramentas bastante úteis aos urbanistas, pois possuem, muitas vezes, caráter intuitivo, fácil de apreender, podendo servir de instrumento de auxílio à decisão. Estes também permitem comparar e julgar vários projetos, verificando as possíveis implicações de ordem energética e ambiental de cada escolha formal ou tipológica (de forma estimativa). Não devem, no entanto, serem utilizados como valores absolutos, mas como um meio de avaliar o desempenho relativo, comparando diferentes tipos de formas, de bairros ou cidades (SALAT, 2011).

Mesmo consciente de que a medida quantitativa dada pelos indicadores da forma está longe de esgotar a complexidade de uma cidade, entretanto permite uma reflexão sobre a multiplicidade de olhares para os diferentes aspectos que recobrem uma cidade, de descrevê-la em alguns valores essenciais, que podem servir de comparação com outros meios (SALAT, 2011).

A partir dessas definições, apresenta-se em sequência, uma breve revisão dos principais indicadores da forma urbana que auxiliarão na análise dos aspectos ambientais no contexto da cidade, com foco nos fenômenos climáticos e, mais especificamente, naqueles relacionados à insolação e iluminação das superfícies urbanas construídas.

II.2.1. Os indicadores "morfoclimáticos"

Nas últimas duas décadas, foi realizado um progresso significativo, na tentativa de medir e analisar padrões espaciais que ajudem a caracterizar a forma urbana. E, embora a aplicação dessas métricas espaciais seja uma das metodologias de maior potencial na caracterização da forma urbana, apenas recentemente que estes índices foram utilizados para analisar e classificar a forma urbana de modo mais sistemático (ADOLPHE, CHÂTELET, *et al.*, 2002) (HUANG, LUB e SELLERS, 2007) (RODRIGUES, 2009).

De modo geral, é possível encontrar na literatura três categorias principais de indicadores orientados para análise ambiental da morfologia construída (Tabela 4):

Tabela 4: Principais categorias metodológicas de indicadores da morfologia urbana (BENZERZOUR, 2004).

Categoria de indicadores		Características	Principais referências
Morfoenergéticos	**Morfoclimático**	Tratam de identificar no contexto construído, o que poderia influenciar um conjunto de fenômenos climáticos. Traduzindo-se, portanto, em grande número de indicadores.	(GROLEAU e MARENNE, 1995) (AIT-AMEUR, 2002) (ADOLPHE, 2001)
	Físico-morfológico	Caracterizam apenas a influência sobre os fenômenos físicos e climatológicos, muitas vezes, em grande escala.	(BOTTEMA, 1997); (GRIMMOND e OKE, 1999)
	Relacionam os diversos aspectos da morfologia urbana ao consumo e produção de energia nas cidades, não necessariamente passando pela interação entre morfologia e modificações físico-climáticas locais.		. (SALAT, 2011) (ADOLPHE, CHÂTELET, *et al.*, 2002)
Morfo-físico-sensíveis	Destinam-se a caracterizar o que é percebido pelos usuários dos espaços urbanos, enquanto a caracterização da interação entre o físico e o construído não é um fim em si (não quantificáveis).		(AUGOYEARD, 1995) (BOUSSOUALIM, 2002) (LEVY, 1992)
Morfológicos- gráficos	São indicadores que podem ser usados para descrever uma interação entre o físico e o construído, mas não exclusivamente. A principal característica desta categoria de indicadores é estar baseada na definição geométrica e representação gráfica, tornando-os mais explícitos do que as categorias anteriores (e.g DEM – *Digital Elevation Model*).		(TELLER, 1999) (BENZERZOUR, 2004)

Conforme descrito na tabela acima, a morfologia construída nas cidades pode ser medida, relacionando-a aos aspectos sensíveis dos espaços (*indicadores morfo-físico-sensíveis*), ou seja, na caracterização destes em termos de ambiências urbanas e percepção da paisagem construída pelo usuário; aos aspectos físicos dos espaços em que se deseje descrever graficamente sua geometria de cheios e vazios urbanos, por exemplo (*indicadores morfológicos-gráficos*); e aos aspectos físicos e climáticos, onde se busca estabelecer relações entre a forma construída e as modificações climáticas que esta produz, dentro de um conjunto mais amplo de indicadores que buscam estabelecer uma relação com a energia consumida nas cidades (*indicadores morfo-energéticos*). É em torno dessa última categoria de indicadores que esta tese desenvolverá suas análises.

Infere-se, portanto, que em função do(s) objetivos(s) e da escala de interesse é possível se definir um conjunto de indicadores mais pertinentes. É preciso ressaltar que não é possível se definir um conjunto de indicadores específicos e definidos para uso no planejamento urbano, uma vez que a importância de cada um varia conforme o objetivo e características da paisagem urbana em estudo (PARKER, EVANS e MERETSKY, 2001). É necessário, portanto, pensar cada indicador como um parâmetro característico associado, ou seja, pensar na função para cada qual será

associado um indicador, de modo a responder à problemática anunciada. No final dessa seção, essa questão será retomada para justificar e auxiliar na definição dos indicadores empregados no estudo.

Entre os indicadores de importante impacto na energia das cidades, quer seja energia consumida pelas construções ou transportes, Salat (2011) distingue sete classes, o que permite avaliar os seguintes aspectos: intensidade, distribuição, proximidade, conectividade, complexidade, diversidade e forma (Tabela 5).

Tabela 5: Classes de indicadores propostos por Salat (2011) e destaque para a classe de interesse no estudo, a forma.

Tipos de indicadores	**Descrição**
Intensidade	Permite medir e qualificar a densidade e a concentração de um tipo de objeto, numa dada escala.
Distribuição espacial	Indica a concentração relativa ou, o contrário, a dispersão de objetos numa dada escala, em relação a totalidade de objetos recenseados em escala superior (e.g. repartição de parques ou de habitação de interesse social em um bairro em relação a totalidade da cidade). Trata-se de quantificar a repartição de objetos para avaliar sua equidade. A repartição possui, muitas vezes, como objetivo, ser o mais homogênea possível.
Proximidade	A proximidade corresponde à distância entre dois objetos (e.g. entre as habitações, a zona residencial e as atividade de lazer ou o trabalho, zonas comerciais e de atividades múltiplas). Essa distância deve ser minimizada para assegurar deslocamentos de forma mais eficaz no cotidiano.
Conectividade	A conectividade corresponde a acessibilidade relativa ou a interconexão espacial de um sistema ou de uma rede (e.g. rede de ruas, tecido construído).
Diversidade	A diversidade refere-se a variedade de tipos de objetos similares numa dada escala (e.g. diversidade do uso do solo ou da dimensão ou tipologia de habitações na escala do bairro). Diferente da distribuição espacial, esse tipo de indicadores interessa-se pela proporção de diferentes objetos, mas não se pela situação mais ou menos homogênea no espaço.
Forma	Agrega informações a geometria dos elementos construídos (e.g. volume, ocupação no espaço). Consideram esses dados como base para construção de fórmulas que informem sobre o consumo energético ou a relação do homem com seu ambiente.

O autor qualifica e oferece técnicas que permitem medir as relações desses indicadores, o que influenciará na organização da morfologia no tecido urbano, bem como sua geometria construída.

O conceito e aplicação de indicadores para a morfologia urbana não é recente, como pode ser verificado na literatura. Numa tentativa de estudo para uma sistematização de indicadores morfológicos para análise dos espaços urbanos em geral, mencionamos os trabalhos que se seguem. Torrens e Alberti (2000), que distinguiram a forma urbana através de uma série de indicadores para densidade, acessibilidade, dispersão e características do edifício, tendo por base a análise de imagens obtidas por sensoriamento remoto. Galster *et al*. (2001) caracterizaram a forma urbana através de oito dimensões: densidade, contiguidade, concentração, agrupamento (*clustering)*, centralidade, polarização, heterogeneidade no uso do solo e proximidade. Ewing *et al*. (2002) criaram um índice baseado em quatro indicadores principais: densidade residencial, heterogeneidade no uso do solo, importância das atividades e acessibilidade, a fim de medir o impacto do espalhamento da cidade no transporte e mobilidade urbana. Parker *et al*. (2001) defenderam a aplicação de métricas espaciais para análise socioeconômica, urbana e rural, enquanto afirmam que as métricas espaciais podem ser usadas para uma melhor representação

espacial das características urbanas. Além destes autores, estudos empíricos têm comprovado o uso de métricas espaciais e sensoriamento remoto em ambiente urbano, como uma prioridade na investigação das cidades (BATTY e LONGLEY, 1994) (ALBERTI e WADDELL, 2000).

Trazendo os indicadores da morfologia ao encontro das problemáticas relacionadas com as condições climáticas na cidade, trabalhos como o de Karima Ait-Ameur (2002) foram realizados na tentativa de validação de um conjunto de indicadores morfológicos relacionados com os efeitos microclimáticos urbanos. Para tanto, apresentou, catorze indicadores para serem aplicados na microescala e na escala da cidade. Foram realizadas medições pontuais em várias localidades na França (cidades situadas na região sul da França), registrando-se valores para temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do ar, no sentido de testar a sensibilidade das alterações nos indicadores de um local para outro. Na escala do tecido urbano da cidade, os indicadores definidos foram: a densidade construída, a taxa de impermeabilização e a rugosidade. Enquanto, na microescala urbana, foram definidos os indicadores: o prospecto equivalente da rua, o comprimento equivalente, fatores de obstrução construída, o fator de sombra projetada, densidade de impermeabilização, densidade de área vegetalizada, percentual envidraçamento na fachada e o albedo das superfícies.

Na escala da rua, Eliasson (2000) realizou um estudo quantitativo na cidade de Göteborg, Suécia. Tratava-se de compreender a relação entre a geometria da rua, caracterizada apenas pelo fator de visão do céu (FVC) e a variação de temperatura do ar e das superfícies, umidade e velocidade do vento em duas áreas do centro da cidade e arredores. O autor demonstrou a existência de uma variação de temperaturas menor que o esperado. Tendo em conta apenas o FVC, a relação obtida foi de que a temperatura de superfície e do ar variaria poucos graus entre diferentes geometrias urbanas.

Com a mesma finalidade, mas num contexto mais amplo, destacando a problemática energética das cidades, Adolphe *et al*. (2002) desenvolveram um sistema de indicadores "morfoclimáticos" de auxílio à decisão no contexto urbano. Os autores elaboraram um amplo sistema de indicadores, aplicáveis a diferentes escalas - cidade, bairro e quadra. Um grande número de indicadores puderam ser testados e validados (e.g. FVC, compacidade, rugosidade, porosidade, etc.), após campanha de medições climáticas em dois estudos de caso, bairros nas cidades francesas de Toulouse e Marseille.

Nos últimos anos, destacam-se ainda os trabalhos de Rousseaux *et al*. (2011) e Bonhomme *et al*. (2012), ambos na perspectiva da construção de um modelo de evolução urbana. Os modelos propostos buscam descrever cenários tipo-morfológicos no sentido de antecipar a demanda e produção de energia em 100 anos, partindo de indicadores e dados existentes de morfologia, economia e meteorologia para cidades na França.

No contexto das pesquisas brasileiras, poucos trabalhos aplicaram métricas espaciais para análise tipo-morfológica urbana, associadas a modelos dinâmicos nos estudos sobre o impacto da morfologia urbana no clima local. Amorim *et al*. (2009) propuseram o uso de imagens de satélite para análise da textura urbana, no sentido de destacar padrões morfológicos representativos de áreas urbanas em Recife-PE, a partir de diferentes dinâmicas sociais e urbanas. Lima e Assis (2003) descreveram em SIG, um processo para estimar a massa de construção e prever o balanço de energia, na cidade de Belo Horizonte-MG. Mendonça e Assis (2003), visando amenizar o impacto da ocupação do solo no clima local, identificaram e registraram características locais, definindo áreas urbanas homogêneas que serviram de base para formular uma hipótese de ventilação urbana local, no bairro Floresta em Belo Horizonte-MG. Souza *et al*. (2010) avaliaram o papel do fator de visão do céu na intensidade de ilhas de calor em um bairro residencial de Bauru-SP. Estes foram comparados

com dados de medições em campo, gerando uma equação para avaliação desse fenômeno na mencionada região.

Todos os trabalhos mencionados possuem em comum o uso de indicadores como hipótese simplificadora na procura de uma tradução para a complexa heterogeneidade da morfologia urbana em traços característicos mais relevantes para análise dos fenômenos climáticos e energéticos.

Entre os indicadores da forma urbana mais empregados entre os estudos mencionados acima (para fins de análises microclimáticas e/ou energéticas) em espaços construídos na cidade, é possível destacar os seguintes:

- a *rugosidade* e a *porosidade* do tecido urbano. Esses indicadores permitem qualificar o grau de aspereza e de abertura da malha, respectivamente. O primeiro é definido pela altura média do dossel urbano e o outro pela relação entre o volume urbano de vazios e volume urbano construído. Estes dois indicadores permitem oferecer leituras qualitativas relevantes do tecido urbano sobre o comportamento do escoamento do ar. E, quando cruzados com os dados climáticos pertinentes, pode oferecer indicações para o planejamento dos espaços em grandes escalas. As hipóteses simplificadoras utilizadas no desenvolvimento metodológico desses indicadores podem ser encontradas em Adolphe (2001);

- *contiguidade* (horizontal e vertical). Esse indicador caracteriza a relação entre a superfície do envelope construído adjacente a outros edifícios e a área total de superfície de envoltória exposta ao exterior. Centros históricos densos costumam apresentar elevada contiguidade (horizontal) construída (e.g. casarões geminados de até três pavimentos de origem colonial portuguesa no Brasil) e torres verticais costumam apresentar reduzida contiguidade horizontal, porém elevada contiguidade verticalmente.

- *prospecto médio* e o *Fator de Visão do Céu (FVC)*. Esses indicadores consistem nos dois principais indicadores utilizados em análises climáticas urbanas, especialmente na caracterização da intensidade do efeito da ilha de calor (OKE, 1987) (OKE, 1988) (CHAPMAN, 2002) (SOUZA, TENTE, *et al.*, 2010). (BLENNOW, 1995). Possibilitam caracterizar o nível de obstrução do conjunto edificado em relação ao céu e ao sol. Auxilia no estudo do balanço de radiação solar em superfícies construídas, tanto em termos térmicos quanto de disponibilidade de luz natural. O prospecto médio define a razão da altura média construída pela distância entre edifícios e, o fator de visão do céu (FVC) é definido pela relação entre a área de céu da abóbada visível pela área obstruída por edifícios, a partir de um ponto do qualquer no meio urbano. Quanto mais obstruído for um local (menor o FVC e maior o prospecto médio), maior será a dificuldade do tecido urbano dispersar para a atmosfera a carga térmica "armazenada" em sua estrutura durante o dia.

- *verticalidade.* Define a altura construída ponderada pela área urbana construída (SALAT, 2011).

- *densidade construída*. É definido pela relação da superfície construída pela superfície total disponível. Dada a certa complexidade em sua definição e sua importância na definição da morfologia urbana, nas estratégias de ocupação e sua relevância em códigos urbanos, esse indicador é tratado em separado (ver item II.2.4).

- o *coeficiente e fator de forma*. Esse indicador consiste em um dos indicadores de morfologia mais pertinentes e o mais utilizado no estudo do desempenho energético dos edifícios. Define a relação entre a superfície da envoltória exposta ao exterior de um ou mais edifícios e o volume construído dos mesmos. Para um dado volume de um edifício, quanto maior for a sua superfície exposta ao exterior, maior será o valor numérico deste indicador. Entretanto, para esse indicador uma ressalva precisa ser feita. Embora bastante empregado como um dos principais indicadores simplificados da potencial demanda energética de um edifício (como será visto mais a frente), este indicador não

separa a forma de sua dimensão. Ou seja, dois edifícios com a mesma forma, porém de tamanhos distintos, teriam *coeficientes de forma* distintos.

Para resolver isso, Traisnel (2006) utilizou um artifício matemático a fim de separar as duas definições. O autor apresentou o coeficiente de dimensão e o coeficiente de forma reduzido. Retirando o coeficiente de dimensão da equação, considera-se apenas a forma do edifício, denominando-se o coeficiente de forma reduzido ou indicador de compacidade (Tabela 6).

Tabela 6: definição do coeficiente de forma. Fonte: Traisnel (2006).

Fator de forma		**Coeficiente de dimensão**		**Coeficiente de forma reduzido** (indicador de compacidade)
$\frac{S_e}{V}$	=	$\frac{1}{V^{1/3}}$	*	$\frac{S_e}{V^{2/3}}$

Sendo, Se a superfície de envelope exterior; V o volume da construção;

Para ilustrar o comportamento desses indicadores em termos de forma resultante e quantidade de superfície exposta ao exterior, considera-se como exemplo um cubo como uma unidade formal de referência (e.g. unidade de habitação). Para oito unidades de habitação, seria possível conceber diferentes formas construídas para diferentes desempenhos em termos do indicador fator de *fator de forma (FF),* conforme ilustra a Figura abaixo. Unidades isoladas (como habitações unifamiliares) possuem maior superfície exterior (S_e) e, portanto um maior coeficiente de forma, quando comparada com as mesmas oito unidades em forma de torres verticais, barra ou bloco. Uma maior superfície exterior pode indicar tendências sobre o comportamento energético dessas unidades: maior superfície de ganho de calor por aporte solar, de ganho de luz natural ou maior superfície de captação de energia solar. Essas formas podem representar também diferentes densidades construídas, conforme será visto mais adiante (item II.2.4).

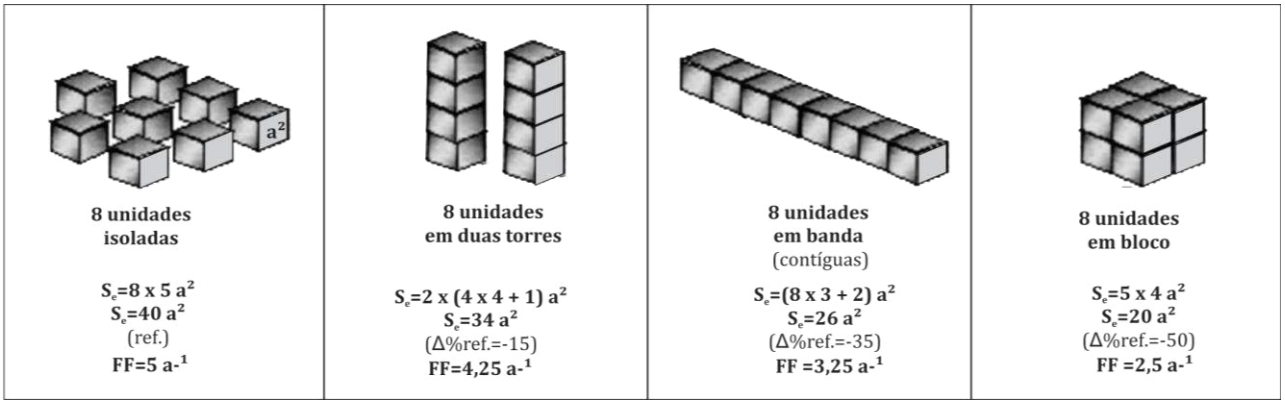


Figura 66 : comparação da superfície exterior e coeficiente de forma de vários tipos de agrupamento de módulos cúbicos ("a"=lado do cubo de referência). Fonte: adaptado de Traisnel (2006).

Entretanto, se desconsiderado o efeito do tamanho, um cubo pequeno e um cubo quatro vezes maior teria um *coeficiente de forma reduzido* (Cf_R) igual (Figura). No caso desse último indicador, torna-se possível isolar a variável forma, a fim de comparar diferentes soluções geométricas sem que o tamanho da mesma influencie nas análises.

Para distinguir essas definições, nesse trabalho, utiliza-se o termo *coeficiente de forma* para se ter em conta apenas a variável forma e *fator de forma* quando a referência for útil à relação superfície exterior e volume como um todo (forma e dimensão integrados).



Figura 67 : comparação do coeficiente de forma e coeficiente de forma reduzido (ou indicador de compacidade) entre uma mesma forma de duas dimensões.

Todos os indicadores "morfoclimáticos" mencionados podem auxiliar na análise das cidades, podendo indicar tendências sobre o comportamento ambiental de suas formas, permitindo (SALAT, 2011):

- Fornecer diretrizes para regras de urbanismo e de edificações urbanas para que sejam mais eficientes em energia;
- Avaliar o potencial para geração de energia renovável (solar e/ou eólico) de um projeto urbano nas fases iniciais de projeto, com propósitos de otimização da morfologia urbana;
- Apresentar indicações para concepção de espaços públicos mais confortáveis em termos dos ventos e insolação;
- Posicionar as fontes de poluentes atmosféricos em função do potencial de dispersão oferecido pela forma/textura urbana.

A complexidade dos múltiplos aspectos relacionados ao espaço urbano reflete nos numerosos indicadores que necessitam ser correlacionados. Certos grupos de indicadores, entretanto, apresentarão uma correlação mais ou menos importante entre eles, o que indicará o seu grau de relevância para uma aplicação em determinados contextos.

No entanto, dificilmente um indicador morfológico isolado caracterizará apropriadamente uma condição climática. E a relação ou a articulação entre os diferentes indicadores, como os mencionados acima, pode não ser evidente. Para que seja atribuído sentido a estes indicadores, torna-se indispensável considerá-los de forma integrada a partir da mesma problemática e objetivos comuns. Ao final dessa seção, serão apresentados, uma primeira ampla gama de indicadores morfoclimáticos pertinentes (Tabela 7), os quais serão analisados em termos de sua correlação, e por meio de uma Análise de Componentes Principais. Assim, será obtido o grupo mais significativo de indicadores para classificação do tecido urbano e que será utilizado como linguagem morfológica ao longo do estudo.

Conforme descrito na introdução, é de particular interesse neste trabalho a aplicação de indicadores da forma urbana para caracterizar o desempenho das formas construídas e o seu potencial para produzir energia de fonte solar em suas cobertas. Interessa-nos, portanto, conhecer as relações entre a problemática e os objetivos anunciados e o conjunto de indicadores mais responsivos nesse contexto.

A fim de conhecer melhor os indicadores e relações pertinentes aos objetivos específicos fixados, apresenta-se a seguir alguns dos principais trabalhos, métodos e indicadores "morfosolares".

II.2.2. Indicadores "morfosolar"

A tendência ao adensamento e à verticalização dos grandes centros urbanos tem imensamente limitado e muitas vezes comprometido, o acesso dos raios solares e da luz natural nas edificações, com sérias conseqüências quanto à salubridade e qualidade dos ambientes interiores.

O estudo da incidência solar e a sua acessibilidade, face às máscaras no entorno das edificações pode ser obtido através da eclíptica solar (trajetória aparente do sol na abóbada celeste). É possível projetar para obter o acesso solar com muita exatidão, se os vizinhos estiverem suficientemente distantes, ou se houver limitações ao que pode ser construído, e já que a energia solar é uma fonte eterna e gratuita, torna-se necessário assegurar esta captação. "Nada é tão certo e consistente como o movimento do sol através do céu. O que não é certo é se a futura construção em propriedade vizinha obstruirá o sol" (LECHNER, 1990).

O conceito de "direito ao sol" é definido como o direito de ter acesso à radiação solar direta sem obstáculos de objetos adjacentes (LECHNER, 1990). Esse conceito implica no fato de que novas estruturas não devem projetar sombras na coberta de edifícios existentes no seu entorno. Uma boa solução, por exemplo, é determinando limites verticais adequados para zonas urbanas. O direito ao sol tem sido encorajado no contexto em algumas cidades dos Estados Unidos e Inglaterra (BRONIN, 2009). Mas, em geral, esse tipo de medida não é muito comum na prática nas cidades pelo mundo, no entanto, códigos e leis em alguns países, incentivam com recompensa edificações que utilizam o conceito, empregando energia solar (BRONIN, 2009).

No contexto europeu, algumas regulamentações de urbanismo e projetos de reformulação e expansão de centros urbanos históricos, tal como Paris e Barcelona, principalmente no século XIX, buscaram estabelecer-se empregando a noção de alguns indicadores morfológicos que traziam as preocupações ligadas aos aspectos climático e higienista, tais como o prospecto e o gabarito (Figura 69).

Como exemplo dessa preocupação, o engenheiro Cerdá propôs para Barcelona (em torno dos anos de 1860), quadras urbanas chanfradas aumentando o número de planos de fachadas, o número de aberturas para o exterior e aumentando o fator de visão do céu (Figura 68). Os amplos pátios no caso da extensão de Barcelona, proporcionavam importante área tanto para melhorar o acesso à iluminação natural quanto para promover a circulação de ar no interior dos espaços.

Na mesma época, alguns trabalhos trataram a influência direta da relação entre altura/largura da rua na iluminação e no aquecimento passivo dos edifícios para as condições climáticas da cidade de Paris. Os trabalhos de Haussmann (entre 1853-1870) resultaram em maiores prospectos com a abertura de ruas que antes eram de 12m e que passaram à 24m e de 13m à 18m nos bairros mais antigos. A tipologia construída proposta também tinha de adaptar-se à mesma preocupação do acesso solar (Figura 69).

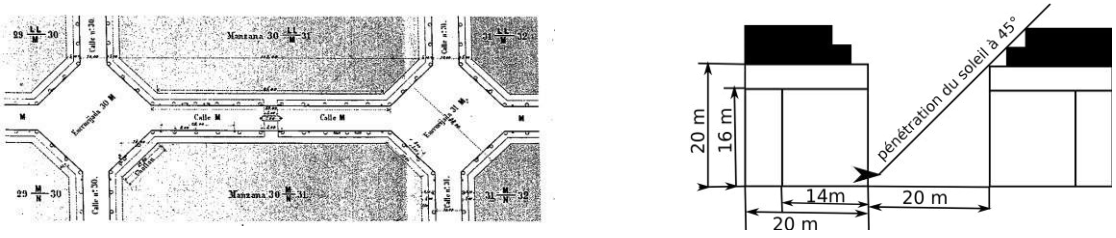


Figura 68: plano do arruamento, quadras chanfradas e prospecto de Idelfonso Cerdá para Barcelona (Wikipedia, website).

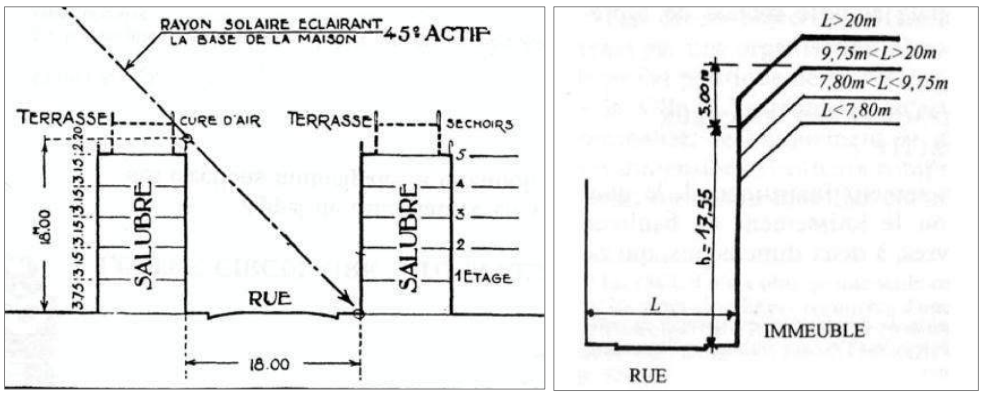


Figura 69: gabarito das ruas do projeto de Haussmann (THIBERGE, 2002)

II.2.3. Envoltória solar

O conceito de envoltória solar, desenvolvida por R. Knowles nos anos 1970, consiste de uma envoltória tridimensional e de volume imaginário que, estabelecida para um dado contexto, garante aos seus vizinhos um mínimo de insolação direta durante o dia, ao longo de todo o ano. "É uma forma de assegurar o acesso solar urbano para ambos, a energia e a qualidade de vida regulando o desenvolvimento dentro de limites imaginários derivados da trajetória aparente do sol" (KNOWLES, 1974). Assegura-se que a sua envoltória, assim como, a de seus vizinhos tenham a possibilidade de adotar estratégias solares passivas (e.g. iluminação natural) e/ou ativas (e.g. produção de energia de fonte solar térmica e fotovoltaica).

A envoltória solar é estabelecida a partir da posição do sol para as diferentes horas do dia e de acordo com as estações, e da posição das construções vizinhas. Depende do espaço e do tempo. Porém, além da latitude local, o contexto urbano influencia o tamanho, a forma e a porosidade do envelope solar, importantes para as questões de conversão de energia solar por meios passivos e ativos, pois implica a mudança de orientação das maiores superfícies de fachada e cobertura da edificação. Assim, o envelope pode ser obtido simulando a sombra projetada de uma construção fictícia sobre os seus vizinhos de acordo com a hora do dia, permitindo, portanto delimitar a zona limite na qual poderia ser construída uma edificação (Figura 70).

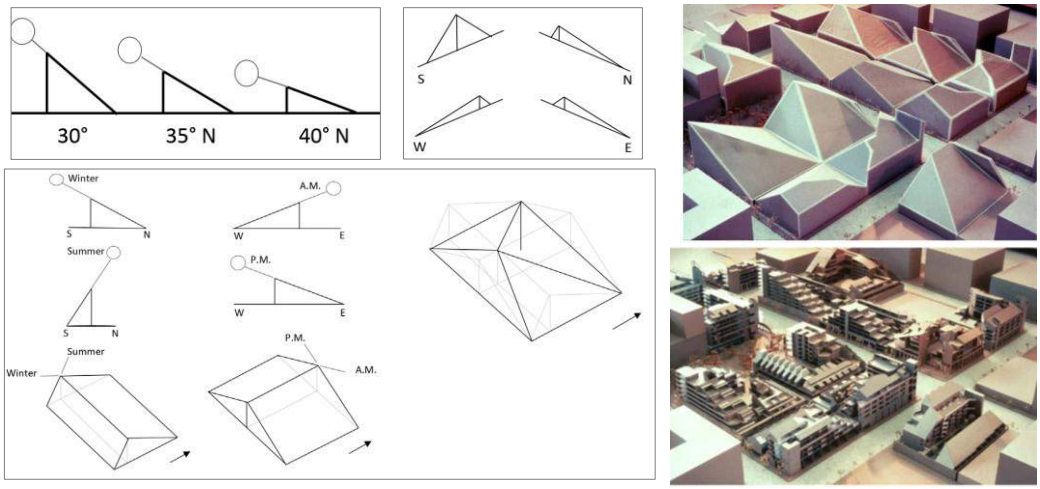


Figura 70: construção da envoltória solar de Knowles. Acima-esquerda: influência da latitude e da orientação do sítio; Abaixo-esquerda: face norte e sul geradas em função dos limites anuais; Abaixo-centro: faces leste e oeste em função dos limites diários; Abaixo-direita: envelope solar resultante. Direita: exemplo de projeto a partir da aplicação desse método.

A envoltória solar pode ser utilizada como instrumento de auxílio ao planejamento e projeto urbano, a fim de assegurar às construções um nível mínimo de radiação solar direta. Usando estes envelopes, pode-se determinar a geometria preferida e a orientação das calçadas, espaços abertos e a configuração dos edifícios, de forma a assegurar sua exposição ao sol de inverno, em determinados contextos climáticos, e/ou promover a proteção adequada do sol no verão ou o ano inteiro, em contextos de clima quente, porém assegurando um mínimo de acesso solar para fins de salubridade e promoção da iluminação natural nos recintos interiores.

Diversos estudos aplicaram, testaram e adaptaram o uso desse método em diferentes contextos. No Brasil, Pereira e Nome Silva (1997) lançaram uma "proposta sistemática do uso do envelope solar em planejamento urbano como forma de controle de ocupação do solo urbano em função da insolação". Cruzam informações de um envelope solar com o plano diretor e outros condicionantes da cidade, para possibilitar a sua aplicação em distintas situações urbanas. Grazziotin et al. (2002) relacionam o envelope solar e suas aplicações no planejamento urbano, desenvolvendo técnicas na simulação de ambientes urbanos, considerando o acesso solar. Pérez (2007) utilizou a envoltória solar de Knowles (1981) para verificar a influência dos parâmetros do código de urbanismo e edificações (e.g. indicadores de volumetria e densidade) no acesso solar de edificações e entorno de zonas urbanas de Campinas, São Paulo. Como conclusão, cita que bairros menos adensados de tipologias dispersas conseguem atender adequadamente aos requisitos de acesso solar (da edificação e seu entorno) produzidos pelo uso da técnica da "envoltória solar".

Niemasz *et al*. (2011) analisaram o impacto do uso da envoltória solar aplicada à tipologia residencial mais frequente nos Estados Unidos (tipologia unifamiliar isolada). Mostram que para a tipologia examinada, utilizar o conceito de envoltória solar possui interesse limitado em zonas climáticas frias e nenhum interesse para aplicação em zonas climáticas quentes. Um dos principais problemas apontados é de incompatibilidade desta condição real com situações pensadas em termos de um adensamento urbano. Pois, conforme indicam Niemasz *et al*. (2011), se considerarmos a densidade e o balanço energético dessa tipologia americana tradicional, esta estaria longe ser considerada eficiente ambientalmente. Também, estes autores propõem relativizar os benefícios da envoltória solar, principalmente, no que diz respeito aos efeitos da insolação direta que dependem diretamente do clima e da construção (e.g. orientação, etc.).

O modelo de cidade dotada de baixa densidade construída e habitada pode apresentar desvantagens importantes do ponto de vista energético e econômico (e.g. instalação de infra-estrutura, redes de transporte tentaculares, etc.), como será discutido mais adiante no item I.2.3.

Portanto, o uso do envelope solar como instrumento de projeto da Arquitetura urbana poderia encaminhar a reprodução de modelos de cidade de reduzida densidade (que talvez representassem maiores gastos energéticos, entre outros), pois para garantir um acesso a insolação natural mais amplo, seria necessário reduzir o volume definido para o envelope solar, particularmente para altas latitudes, e portanto, de reduzir o potencial de construir.

Em resposta a essas considerações anteriores, Knowles (2003) propôs utilizar a envoltória solar apenas na cobertura dos edifícios, o que permitiria alcançar densidades mais elevadas e garantir maior potencial de aproveitamento solar para fins de produção de energia.

O envelope solar, no entanto, é uma ferramenta de auxílio à concepção que tem sido bastante utilizada por arquitetos. Um exemplo disso pode ser ilustrado pelo trabalho realizado pelo escritório dinamarquês *Bjarke Ingels Group* que utilizou o conceito da envoltória solar para desenvolver seu projeto *Reciprocity*, em resposta ao concurso *Low2No: A sustainable development design competition* (Figura 71) (BJARKE INGELS GROUP, 2009).

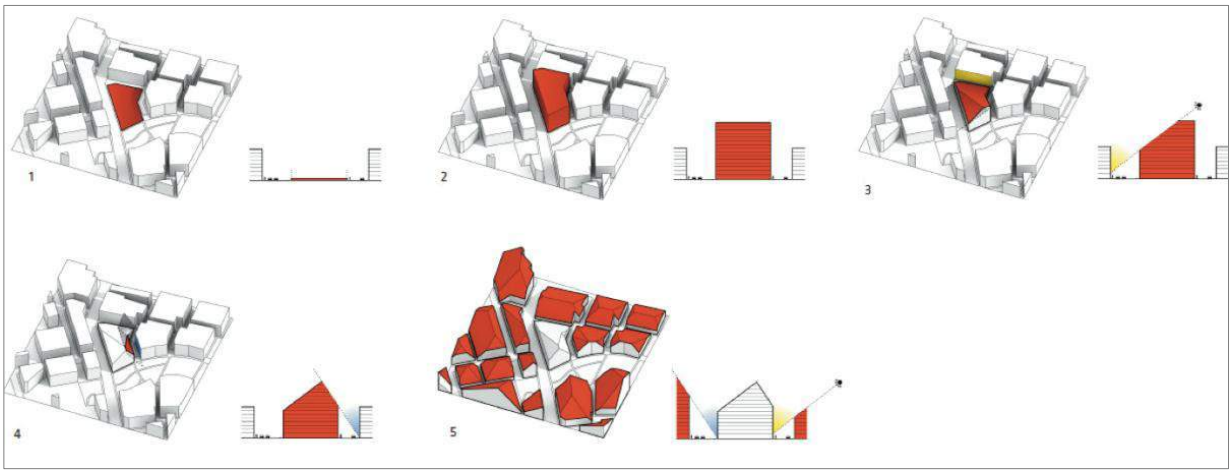


Figura 71: projeto *Reciprocity*, em resposta ao concurso *Low2No: A sustainable development design competition.*

Knowles (1981) propôs um novo conceito baseado na envoltória solar, o qual denominou de "envelope territorial" (*landscape envelope*). Esse conceito permite visualizar a localização e o dimensionamento ótimo das árvores de folha caduca que permitiriam reduzir os ganhos solares pelas fachadas, mitigando o superaquecimento e, assim, reduzindo a carga térmica para resfriamento. No inverno, o acesso solar seria aumentado pela ausência da folhagem.

Outros pesquisadores propuseram definições complementares ao envelope solar de Knowles. Entre as principais destaca-se o SRE (*Solar Right Envelope*), que indica a altura máxima de um edifício para que não projete sombras nos seus vizinhos. Também há o SCE (*Solar Collection Envelope*), que estabelece a altura mínima da janela mais baixa para que esta receba condições minimamente satisfatórias de insolação e iluminação natural diariamente (CAPULETO e GUEDI, 2001). Morello e Ratti (2009) estendem ainda mais o conceito, introduzindo a superfície iso-solar (*iso-solar surface*). Utilizando o DEM (*Digital Elevation Model*), os autores desenvolveram um método simplificado que permite quantificar a irradiação solar e iluminância natural em superfícies urbanas, de utilidade para planejadores e projetistas no estudo do sítio e entorno, quando da etapa que antecede a elaboração do projeto.

Groleau e Marenne (1995) consideram que os indicadores morfológicos permitiriam orientar projetistas sobre as características da insolação em um tecido urbano. Os indicadores empregados foram: a altura média dos edifícios, a densidade média, o nível de homogeneidade (elevado ou baixo), a sinuosidade, o prospecto médio das ruas e a tipologia dos espaços abertos. Simulações da insolação aplicadas para três amostras de tecidos urbanos em Nantes, na França, foram avaliados para fins de validação desses indicadores. Os autores concluíram a relevância da classificação das formas urbanas de acordo com indicadores morfológicos propostos, assim como a necessidade também de ampliar o escopo dos aplicativos para outros fenômenos microclimáticos, como luz natural e energia consumida e produzida pelas construções.

A fim de analisar o papel da morfologia urbana no desempenho solar e de luz natural para um bairro, Ratti, Backer e Steemers (2005) definem quatro parâmetros principais:

- A densidade de sombra projetada (número médio de horas de sombra para um dado dia e latitude);
- O fator de iluminação natural direta nas ruas;
- A razão entre superfícies passivas/ superfícies não-passivas. A proposta desse indicador é fornecer uma estimativa sobre o grau de exposição dos edifícios ao seu ambiente exterior e, portanto, propício ao uso de técnicas passivas (e.g. tanto luz como ventilação natural). A partir

de um método empírico, o estudo demonstra que as zonas passivas[33] estão situadas a uma profundidade máxima de seis metros em relação a fachada exposta (ou seja, duas vezes o pé-direito).

- O fator de visão do céu (ou *sky view factor*) é o quarto indicador proposto nessa abordagem. Frequentemente utilizado nas abordagens de climáticas urbanas, esse indicador estima a abertura da estrutura urbana para o céu.

Em termos de produção energética e de penetração da irradiação solar no tecido urbano, as pesquisas são numerosas e, em alguns casos, realizadas em paralelo com as pesquisas sobre o desempenho térmico das formas urbanas (MARTIN e MARCH, 1972) (RATTI, RAYDAN e STEEMERS, 2003) (CHENG, STEEMERS, *et al.*, 2006)

Um dos primeiros e mais conhecidos trabalhos na literatura sobre o assunto, de Martin e March (1972), estudou e comparou duas formas urbanas genéricas (a quadra em forma de torre vertical e de pátio) para o contexto climático quente e árido, observando o comportamento relativo a dois critérios: o potencial de construir e a disponibilidade de luz solar. Os pesquisadores apontaram as vantagens na quadra compacta dotada de pátio. A quadra compacta com pátio teria o benefício de espaços livres mais espaçosos e permitiria reduzir a altura dos imóveis (em 2/3 em relação a quadra com torre), porém conservando a mesma área útil habitável da torre (MARTIN e MARCH, 1972).

Ratti *et al*. (2003), consideram no estudo de indicadores de desempenho, três formas urbanas (Figura 72): (i) dezesseis quadras com pátio e três pavimentos, construídas em periferia; (ii) dezesseis edifícios no centro das quadras, com ruas estreitas; (iii) quatro edifícios de seis pavimentos no centro das quadras, com ruas largas.

Relacionando o cálculo da densidade da sombra e da exposição à luz natural destas três formas urbanas, os autores mostram que a forma em quadra apresenta uma elevada densidade de sombra nas ruas e uma baixa exposição à luz natural no conjunto urbano estudado.

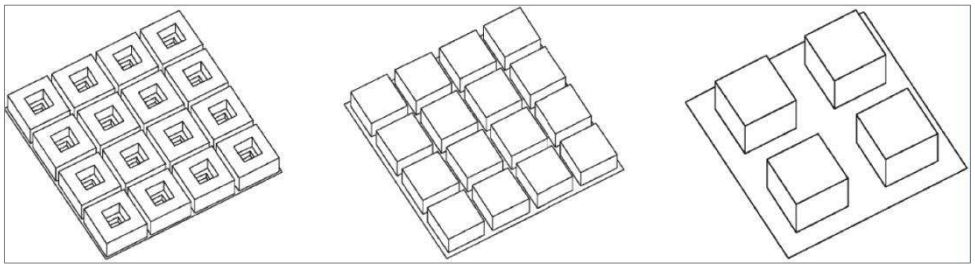


Figura 72: as três formas urbanas estudadas pela equipe de Carlo Ratti [Ratti, 2003, p.55] (RATTI, RAYDAN e STEEMERS, 2003).

O estudo mostra que os desempenhos das formas urbanas podem variar conforme os edifícios afastam-se mais ou menos uns dos outros.

Outro indicador recorrente nos estudos "morfosolares" é a forma do dossel urbano. Esse parâmetro encontra sua pertinência nas pesquisas sobre sombreamento e iluminação dos espaços urbanos, nas problemáticas de ventilação natural ou ainda no estudo da temperatura urbana ambiente. Frequentemente, o estudo da forma do dossel urbano é dado pela consideração de um importante indicador, o albedo[34] (MESSAOUD, 2009). Nas pesquisas descritas anteriormente,

[33] Onde é possível aproveitar recursos naturais (e.g. iluminação e ventilação natural dos espaços), de modo a possibilitar um melhor desempenho energético das edificações.

[34] Grandeza adimensional. Albedo calcula a relação entre a nergia solar refletida por uma superfície e a energia solar incidente. Quanto mais reflexiva for uma superfície, maior será o seu albedo. Esse indicadore será discutido no capítulo II.

considera-se quase sempre apenas a iluminação direta. A maioria dos estudos citados não considera o efeito das inter-reflexões entre as superfícies construídas (e.g. edifícios, solo etc.) que contribuem de forma importante para a disponibilidade da luz do dia (e insolação) nas envoltórias construídas. Para remediar isso, algumas pesquisas integram a análise do albedo, considerando-o como um importante indicador que pode modificar de forma significativa o microclima (ARANTES, 2012).

Um exemplo disso pode ser encontrado no trabalho de Aida e Gotoh (1982) que questionam a relação entre profundidade construída (W1) e a largura da rua (W2), como importante indicador da forma urbana. Os autores estabelecem uma relação entre o albedo a relação log (W1/W2), no caso particular onde a altura construída (H) é igual à largura da rua (H=W2). Um das condições impostas nesse estudo foi o albedo considerado com um valor uniforme. Mostra-se que o albedo urbano reduz-se na mesma proporção que a relação log (W1/W2). Para qualquer ângulo zenital solar, o albedo mínimo é obtido por W1/W2=1/2 ou log (W1/W2)= - 0,3. Ou seja, uma configuração urbana cuja rua for duas vezes mais larga que a profundidade dos edifícios permite ganhos solares benéficos em contextos climáticos dotados de estação invernal. Em climas quentes, os ganhos térmicos solares podem ser evitados através de revestimentos mais reflexivos para as superfícies construídas (AIDA e GOTOH, 1982), no entanto, deve-se observar o impacto que superfícies altamente reflexivas podem causar, em termos de desconforto térmico e visual, nos pedestres.

Outros estudos trataram ainda da relação entre albedo e densidade urbana. Kondo *et al*. (2001) realizaram um estudo de caso sobre seis geometrias urbanas de alturas idênticas (25m), mas de densidades distintas e concluem não haver uma correspondência manifesta entre a densidade urbana e o albedo.

A fim de avaliar o impacto da densidade construída no potencial de produção de energia solar fotovoltaica em cobertas e fachadas de edifícios urbanos, Cheng et al. (2006) consideraram seis formas urbanas genéricas que foram definidas variando os seguintes indicadores: densidade construída bruta, taxa de ocupação do solo, regularidade da altura e regularidade na implantação dos edifícios (Figura 73).

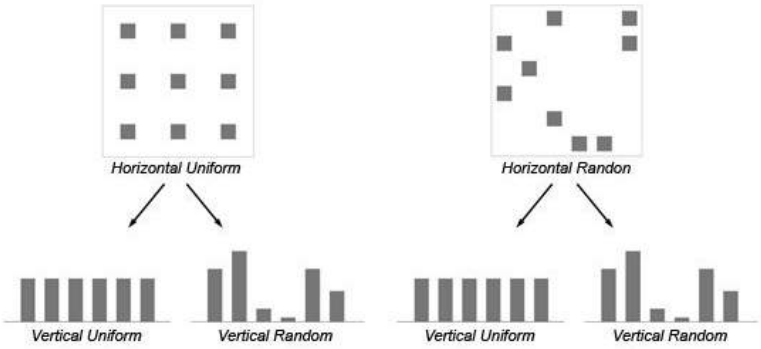


Figura 73 : seis formas urbanas definidas no estudo de Cheng et al. (2006).

O estudo demonstrou uma influência importante da densidade construída sobre a insolação nas formas urbanas. O melhor potencial para conversão solar fotovoltaica encontrado, foi dado pela forma com menor taxa de ocupação do solo, menor densidade bruta, maior heterogeneidade da altura e maior heterogeneidade na implantação dos edifícios (Figura 74).

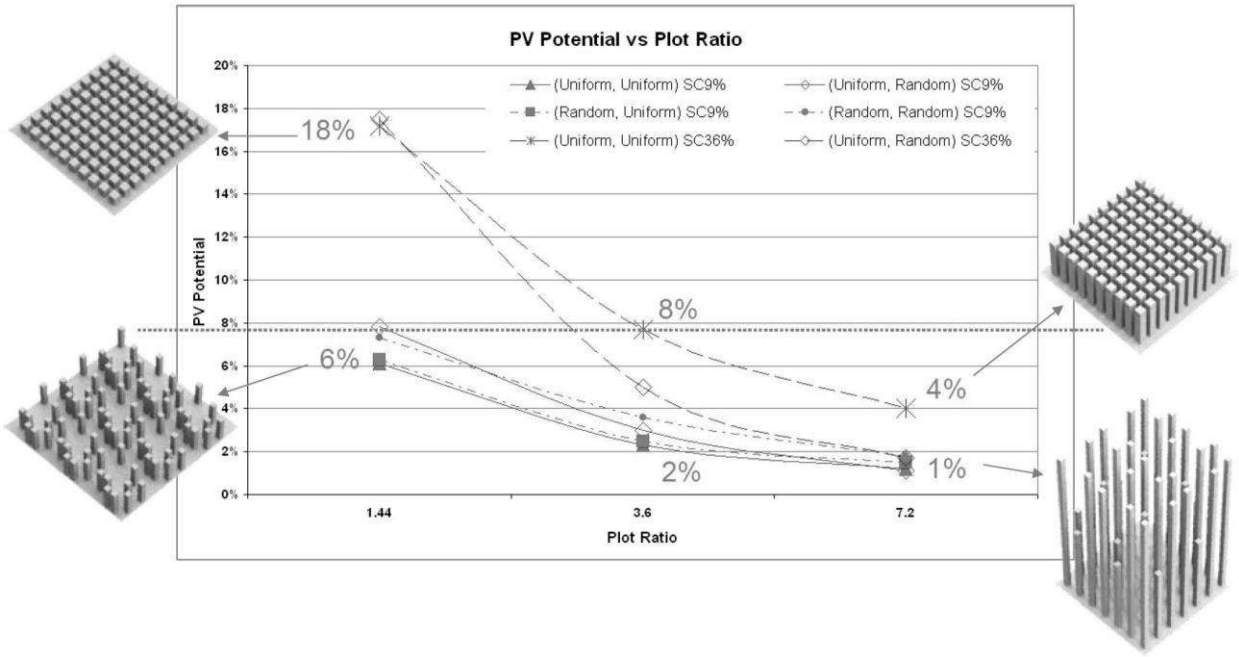


Figura 74: potencial solar (em cobertas e fachadas) para as seis formas genéricas de Cheng *et al*. (2006).

Conforme revisão da literatura sobre os métodos e indicadores empregados em análises sobre a relação entre forma urbana e energia solar (insolação e iluminação) recebida em espaços urbanos, destaca-se a importância quanto aos critérios de densidade, a altura construída, a distância entre os edifícios (prospecto médio), a área de envoltória, a orientação e o albedo.

A densidade cumpre papel crucial na disponibilidade de luz e sol nas superfícies construídas e deve ser trabalhada, fundamentando seus principais rebatimentos (vantagens e inconvenientes) em termos práticos, estratégicos, energéticos e de forma contextualizada.

II.2.4. Densidade, forma e energia nas cidades

De modo a complementar as discussões acerca dos indicadores da forma urbana, destaca-se aqui particularmente a importância das métricas que caracterizam a densidade dos espaços. A densidade, quando diretamente relacionada ao espaço urbano, possui diferentes definições e métricas, que são dadas conforme o objetivo, composição e escala. A densidade pode ser relacionada estatisticamente entre um número de pessoas ou atividades com uma determinada área, definindo assim, a densidade humana de uma região ou, ainda, com relação à superfície de espaços construídos e à uma determinada área, dando-nos a noção de densidade construída.

No contexto temático do presente trabalho, trata-se especificamente da densidade construída e seu impacto na forma urbana que poderá, por sua vez, produzir efeitos decisivos na qualidade dos espaços climáticos e no potencial energético solar de uma cidade.

No espaço urbano, a densidade pode ser definida como quantidade de apartamentos, de lotes, de edifícios ou de área construída, sobre a área total disponível seja de uma cidade, de um distrito, de um bloco ou de uma parcela.

Portanto, densidade também deve ser definida segundo uma escala espacial de referência (SALAT, 2011):

(i) na escala da cidade ou da aglomeração urbana, a relação é calculada entre a quantidade de espaço construído ou habitado pela área total da região, esta dada frequentemente em hectare (e.g. habitante/ha, habitação/ha, etc.), de modo a atribuir uma melhor noção à densidade existente.

(ii) na escala do bairro ou vizinhança, a densidade permite medir a relação entre o espaço construído local e o espaço urbano total disponível ou área bruta, que inclui vias, áreas verdes e/ou outras áreas de espaço público, dando noção do que chama-se de Taxa de Ocupação do solo urbano (TO) ou densidade construída bruta;

(iii) na escala do bloco, a densidade é limitada ao conjunto construído em parcelas do espaço privado, portanto não incluindo portanto áreas do espaço público, caracterizando o que se chama de densidade construída líquida;

(iv) na escala da parcela, fala-se de Coeficiente de Aproveitamento (CA). Essa métrica é bastante utilizada em códigos edilícios urbanos para definir a densidade total máxima permitida para construção em um terreno.

No entanto, como já discutido, isoladamente nenhum desses indicadores de densidade é capaz de exprimir uma forma urbana. Se tomarmos apenas um indicador, como por exemplo o número de unidades de habitação por hectare de espaço urbano, é possível dispor de idêntica densidade expressa em formas urbanas completamente diferentes (MOULINIÉ e NAUDIN-ADAM, 2005) (Figura 75).



Figura 75*:* três formas urbanas diferentes para densidades idênticas . Fonte : Adaptado de Moulinié e Naudin-adam (2005).

Da mesma forma, se a densidade for expressa apenas pelo cálculo do CA ou do TO ou da verticalidade de uma área, a resposta em termos de forma construída poderá também ser relativamente diversificada. A limitação do CA, é que este ignora a relação direta com a parcela, podendo gerar formas e densidade completamente diferentes (Figura 76) e do TO, por não corresponder a densidade real habitada e construída, impactando de formas diferentes na densidade real e percebida (Figura 76).

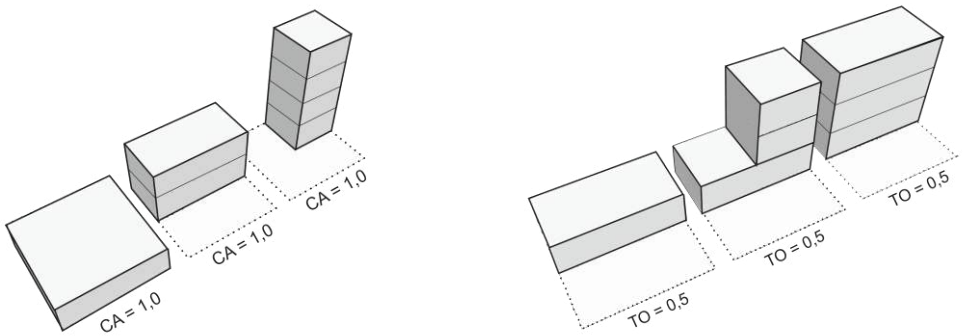


Figura 76: três formas e densidades urbanas distintas para o mesmo Coeficiente de aproveitamento =1,0 e mesma taxa de ocupação do solo=0,5, respectivamente. Fonte: ilustração do autor (2013).

Verticalidade também nem sempre é sinônimo de densidade, como estamos habituados à associar ou perceber. Contrariamente, torres implantadas em parcelas onde 80% do solo é deixado livre por razões de acessibilidade viária e direito ao sol, bairros com grandes conjuntos habitacionais (na forma de grandes torres ou barras), estariam, portanto, entre as formas menos densas, em termos de TO (Taxa de Ocupação do solo).

Ao comparar seis cidades do mundo, a partir de critérios de forma e estrutura (densidade, número de pavimentos, traçado das ruas, conectividade, etc.), Salat (2011) infere sobre o impacto da verticalidade na densidade. Comparando os tecidos urbanos de Kyoto, Shanghai e Guangzhou, o pesquisador mostra que, com densidades idênticas (em termos de CA), os edifícios de Shanghai são cinco vezes mais altos que os de Kyoto. Da mesma forma, Guangshou possui uma densidade duas vezes maior, porém com edifícios dez vezes mais altos que estas últimas (SALAT, 2011).

Dada essa relativa influência da densidade na forma urbana resultante, o conceito de densidade tem sido acompanhado de muita polêmica em debates científicos em torno da evolução dos modelos de cidade, especialmente quando essas questões se relacionam com a eficiência energética dos espaços.

A fim de melhor ilustrar essa relação entre densidade, forma, adequação ambiental, e eficiência energética, são apresentados três exemplos contrastados de tipologias encontradas na cidade contemporânea. Ressaltamos que o ponto de discussão é centrado nas tipologias urbanas numa escala distrital e ancoradas apenas em alguns parâmetros de *densidade construída*.

II.2.4.1. Cidade de forma dispersa

A partir da revolução industrial ocorreu em várias cidades um aumento populacional excessivo e a configuração espacial das cidades passou a não mais comportar uma alta densidade. Com isso, a relação entre o número de habitantes e o espaço por estes ocupados tornou-se um aspecto extremamente importante. A morfologia urbana e a tipologia das edificações precisaram ser de certa forma, controladas para que fossem alcançadas condições apropriadas de salubridade do espaço urbano. Para alguns planejadores, a melhor solução era a de inibir o êxodo rural e reduzir a densidade da cidade, construindo habitações unifamiliares espalhadas em subúrbios. A forma de intervenção urbana adotada, inicialmente na Inglaterra, e conhecida como cidades-jardins baseava-se em modelos de casas unifamiliares isoladas, implantadas em lotes cercados por jardins, e gerando uma ocupação de densidade muito baixa.

Um exemplo emblemático dessa prática pode ser ilustrado pela *Broadacre city* de Frank L. Wright e sua influência nos Estados Unidos. O arquiteto propunha uma densidade de 4 ha por família. Seu modelo de cidade consistia no que denominavam de antítese do conceito de cidade ou a

apoteose do subúsrbio, onde para cada família estadunidense seria dado um lote de um acre (4000m²) de terras federais e uma comunidade seria construída do nada. Essa tipologia urbana resultava numa densidade de 10 hab/ha. Tal modelo também propunha uma estação de trem, mas era baseado essencialmente no transporte individual. Muitas cidades norte-americanas hoje representam um pouco essa caricatura desse modelo que serviu de referência para muitas outras, principalmente no contexto da urbanização da América Latina. Nessas cidades, as tipologias são caracterizadas por habitações unifamiliares (muitas vezes idênticas) de até dois pavimentos e bem afastadas umas das outras, assinalando baixas densidades e verticalidade (Figura 77).

Em muitas cidades brasileiras, esse modelo foi seguido sob a forma de condomínios de portes variados que se encontram em alguns bairros, por vezes luxuosos, principalmente em subúrbios das grandes capitais. Porém, com a expansão dessas cidades, os loteamentos de habitats individuais muitas vezes tornam-se verdadeiros enclaves, murados e segregados. Em outras situações, a tipologia dispersa e distante obriga o emprego de recursos públicos para grandes extensões de redes de transporte, e há principalmente um deslocamento intenso de veículos individuais.



Figura 77: exemplo de cidades dispersas nos Estados Unidos e Inglaterra, respectivamente. Fonte: *GoogleEarth*® (2013).

Por outro lado, a tipologia dispersa no campo, de forma uniforme, terá possivelmente menor influência de efeitos como o da ilha de calor urbana. Este fenômeno é resultante das extensas alterações da paisagem natural feitas pelo homem, poluição devida ao tráfego - uma combinação do excesso de impermeabilização do solo, presença das edificações e redução de áreas verdes, entre outras causas. As cidades que apresentam uma tipologia dispersa, por estarem mais próximas do microclima rural, proporcionam melhores condições conforto nos ambientes exterior e interior.

Além disso, o espaço disponível e a pouca interferência de uma edificação sobre a outra, concorre para uma em menor rugosidade e maior porosidade do tecido, e que poderia resultar convenientemente no aumento do potencial de instalação de sistemas de produção de energia renovável, tais como as energias eólica e solar.

II.2.4.2. Cidades de forma compacta

Um segundo modelo importante de cidade é aquele que possui elevada densidade construída e muitas vezes, edificações justapostas, constituindo tecido urbano bastante compacto. Essas são características principais da maior parte dos centros antigos de muitas cidades, tal como aquelas do período colonial que existem nas regiões centrais de algumas cidades brasileiras, ou as cidades medievais e as cidades funcionalistas no contexto europeu.

Tomando como exemplo emblemático desse contexto o caso do modelo europeu de cidade compacta, tem-se uma tipologia urbana marcada pela alta densidade tanto de construções como da população, disposta em uma configuração orgânica e espontânea, dotada de ruas estreitas e edificações de altura uniforme. Esses centros guardam imóveis compostos por apartamentos

residenciais ou de casarões comerciais em quadras quase sempre fechadas, e por vezes, dotadas de pátios. Estes quase sempre estão implantados no limite da parcela urbana e possuem o mesmo alinhamento de fachadas e cobertas, caracterizando certa uniformidade na paisagem construída. Sem afastamentos laterais, apresentam, portanto, elevada taxa de ocupação do solo, caracterizando tecidos urbanos bastante densos e compactos.

No contexto do inchaço populacional pós-industrial europeu, esse modelo urbano tornou-se, em muitos casos, impraticável, pois este não conseguia suprir as condições básicas de higiene, salubridade e segurança dos espaços (CORBIN, 2008). Os surtos de epidemias que se instalaram nessa época, levaram à sistematização de um planejamento urbano para lidar com as questões sanitárias.

Surgem, nesse contexto histórico (pós-industrial), os códigos sanitários, de posturas e códigos urbanos e de obras, que entre outras questões, colocavam limites na apropriação do espaço urbano e criavam regras de recuo, de insolação e ventilação – ao nível do edifício e da cidade, além das regras posteriormente estabelecidas para circulação urbana.

Os principais planos implantados para responder aos problemas criados desses novos condicionantes, podem ser caracterizados como planos de reformas e de expansão, a exemplo de Paris e Barcelona, respectivamente (Figura 78).

Nos casos das renovações do século XIX, como a Paris de Haussmann, de fundo essencialmente higienista, uma maior porosidade do traçado foi estabelecida com a abertura de algumas vias e alargamento de outras. De modo que esses tecidos que apresentam efetivamente uma elevada densidade construída, encontram um equilíbrio com os vazios deixados para os espaços públicos. A relação da densidade (ou altura) e os espaçamentos das ruas acabam por modificar a percepção da densidade, como será visto mais adiante. Com o aumento da porosidade da malha, é incrementada significativamente a circulação do ar.

No caso da expansão de Cerdá em Barcelona, as mesmas características da reforma de Haussmann também foram consideradas e a elevada densidade existente conseguiu ser mantida, porém com outro tipo de configuração espacial. Com quadras regulares que se repetiam, Cerdá propunha um sistema viário hierarquizado e tipologias construídas que facilitavam a contínua expansão do seu plano. As quadras também fechadas, foram previstas chanfradas (ver Figura 78), de modo a permitir mais planos de fachadas com aberturas e maior fator de visão do céu. As quadras são dotadas de pátios mais amplos, possibilitando uma efetiva circulação do ar, insolação e iluminação dos apartamentos de fundo.

Nos dois exemplos de intervenções citados acima, ambas tomaram partido do desenho urbano e arquitetônico de suas tipologias para garantir um nível minimamente razoável de qualidade ambiental, principalmente em termos de insolação e iluminação, conforme foi visto anteriormente (seção II.2.2).



Figura 78: exemplos de cidades compactas e densas. Da esquerda para direita: a. extensão de Barcelona e b e c. renovação de Paris. Fonte: Alhzeiia, 2007; *GoogleEarth*® (2012).

Também a cidade de forma compacta e densa, a exemplo daquelas indicadas, podem conter uma grande diversidade. A mistura de usos e atividades encurta distâncias e reduz a locomoção motorizada. Há um estímulo natural para o desenvolvimento de relações locais, pois a habitação, trabalho e lazer estão mais próximos, respeitando a escala humana (SCUESSEL e SATTLER, 2010). O que se contrapõe ao que acontece com o modelo de densidade baixa da cidade dispersa que produzem maiores deslocamentos e as segregações espacial e social.

II.2.4.3. Cidade de forma vertical

O terceiro modelo de densidade das cidades é o modelo vertical (Figura 79). Impulsionadas pela tecnologia, as torres de grande altura e seus múltiplos apartamentos, surgem quase como emblema da modernidade e do progresso. Esse modelo apresenta elevada densidade humana e construída, com elevado coeficiente de aproveitamento. Porém em razão dos afastamentos existentes e, por vezes exigidos, podem apresentar menor taxa de ocupação do solo.

Esse modelo também consistiu em uma terceira resposta dada na época das primeiras expansões urbanas da época pós-industrial. Os CIAM (*Congres International d'Architecture Moderne*) lançaram, através da Carta de Atenas (CORBUSIER, 1933), diretrizes que defendiam as altas densidades aliadas a uma forma de ocupação verticalizada, e composta de arranha-céus sobre pilotis (que liberavam para os habitantes o solo permeado por áreas verdes), afastados de 200 a 300 metros uns dos outros. Mantinha-se uma elevada densidade em termos de aproveitamento do solo, mas promoviam uma ocupação efetiva do solo, efetivamente baixa. Um exemplo desse modelo é a *Cité Radieuse* de Le Corbusier.

Hoje, vários modelos de cidade vertical podem ser encontrados, e principalmente alguns modelos onde a densidade no solo é bastante superior à imaginada pelos modernistas do CIAM, além de características urbanas, muitas vezes apresentando setorizações de uso.

Se em alguns distritos de cidades estadunidenses, como Chicago, esse modelo encontra certa uniformidade em toda malha, nas cidades brasileiras esse processo de verticalização é dado de forma bastante irregular e não ocorre acentuadamente em toda sua estrutura urbana, e sim em alguns pontos característicos (e.g. beira-mar das principais capitais litorâneas ou nas avenidas de centros financeiros como São Paulo), porém tendo ao seu redor bairros de características horizontais, os quais sofrem pressões para o adensamento e mudanças de uso.

O rápido processo de verticalização, como é o caso de várias cidades brasileiras, repercute em importante impacto ambiental e estrutural, diante de frágeis instrumentos regulatórios, como será apresentado mais adiante nesse trabalho.

Da mesma forma que na "cidade compacta", essa estrutura urbana pode permitir o encurtamento de distâncias para o pedestre, limitações quanto ao uso individual de veículos motorizados, uma redução do custo em infra-estrutura, e a diversidade do uso do solo. Entretanto,

nem sempre em muitos bairros novos de cidades brasileiras, a tipologia vertical tem respondido à uma ocupação bastante setorizada, gerando bairros com torres de função (quase) exclusivamente residencial ou comercial. Já em bairros mais antigos, como o bairro de Copacabana no Rio de Janeiro, a elevada densidade é também associada à uma multifuncionalidade em termos de ocupação, o que permite uma elevada eficiência do uso do solo, e cuja diversidade possibilita certa autonomia aos habitantes do bairro.

Porém, na ausência de medidas regulatórias embasadas em condicionantes ambientais, essa tipologia urbana pode concorrer para condições de desconforto (exterior e interior), pois muitos espaços podem ficar sem insolação ou iluminação o ano inteiro e a circulação do ar comprometida. Quando não há espaçamentos razoáveis entre as torres, criam-se cânions profundos, onde a qualidade do ar fica prejudicada pela deficiente extração dos poluentes – principalmente na situação de grande circulação de veículos motorizados.



Figura 79: exemplos de cidades verticais no mundo. Da direita para a esquerda, Manhattan, Dubai e Hong Kong. Fonte: *GoogleEarth*® (2012).

Alguns exemplos de densidade podem ser encontrados na Figura 80.

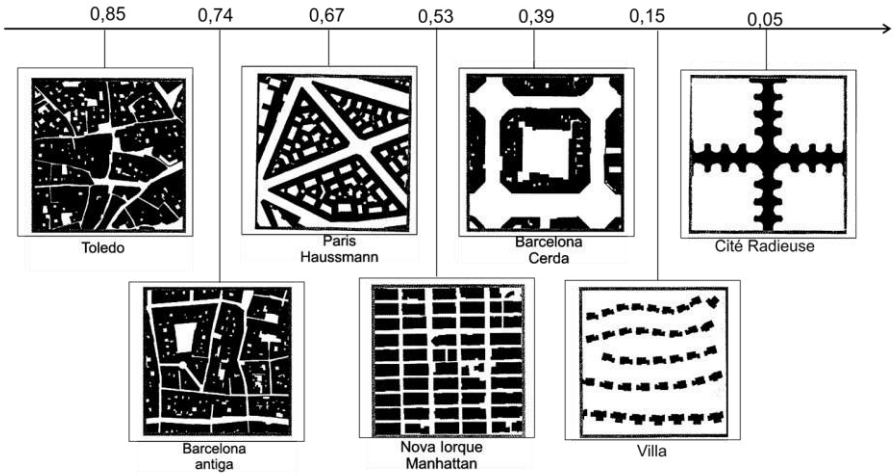


Figura 80: distintas densidades urbanas. Fonte: Adaptado de Salat (2011).

II.2.4.4.Densidade percebida

Outro aspecto importante relacionado com a definição de densidades, diz respeito à forma como a mesma é identificada.

Frequentemente, quando falamos de densidade, alguns valores estão implícitos. O termo "elevada" densidade, para alguns significa um uso eficiente do solo, diversidade, interação,

proximidade e, para outros, pobreza, violência e insalubridade. Já uma "baixa" densidade, para alguns pode expressar imagens de qualidade de vida, calma, propriedade privada exclusiva, família e para outros, segregação, isolamento, homogeneidade.

Salat (2011) trata da importância da percepção e da representação sensível da altura: "a densidade percebida aumenta com a altura dos edifícios e, essa noção possui, frequentemente, uma conotação negativa para os habitantes" (SALAT, 2011). Por outro lado, quando associada a outras tipologias de forma urbana, mais dispersas e horizontais, a verticalidade pode atribuir um caráter positivo de diversidade espacial, criando certa "granulometria" espacial na paisagem urbana, diversificando a densidade, deixando-a mais aceitável (MAUGARD, 2007).

Determinados valores, muitas vezes, surgem a partir de percepções sobre lugares reais e podem tornar-se parte de algumas agendas de planejamento. Nenhum desses valores está intrinsecamente relacionado a uma medida real de densidade, mas pode ser bastante difícil de quebrar certos paradigmas. Faz-se, portanto, necessário separar valores e ideias qualitativas de medidas quantitativas de densidade.

Segundo Arantes (2012), não há interesse em propor uma densidade se esta não representar qualidade de vida à população, conferindo oferta de serviços (acessibilidade aos serviços, comércios e equipamentos, transportes público, etc.). Nessa perspectiva, faz-se necessário reconsiderar análises e instrumentos que visam definir a densidade, para que busque a concepção "de uma cidade intensa e acolhedora" (MARIOLLE, 2007), uma cidade de diversidade, integrando temporalidade e as evoluções dos modos de vida, e permitindo adaptabilidade da ocupação das construções. Esta construção de uma densidade "racionalizada" ou revista a partir de determinados critérios, passa, sobretudo, pelo estudo da tipologia existente e sua evolução e adaptação, bem como pelo dimensionamento das construções. Florença Bordas-Astudillo (2003) estabelece uma relação entre alguns parâmetros da forma urbana e a percepção da densidade. Entre os parâmetros mais determinantes, o autor identificou, sobretudo, a altura das construções e a uniformidade do conjunto construído. Em relação ao primeiro parâmetro, quanto mais altos são os edifícios, mais seus usuários têm tendência a considerar o bairro como denso (BORDAS-ASTUDILLO, 2003). Num outro relatório publicado no mesmo ano, a APUR (2003) considerou a altura das construções como "um critério objetivo determinante na percepção da densidade" (APUR, 2003). Em relação ao segundo parâmetro citado (uniformidade), foi julgado de duas maneiras, de um lado, como sendo uma relação à escala humana, de modo que os pequenos edifícios facilitariam as trocas entre os habitantes; e por outro lado, como nos bairros Haussmannianos em Paris, a uniformidade do conjunto construído reforçaria o sentimento de pertencimento ao bairro (mesmo sendo um tecido extremamente denso, como visto anteriormente). Com efeito, Alain Sallez (2007) afirma que a continuidade das ruas e o gabarito urbano (disposição e altura das construções) influenciam a percepção que os habitantes têm da densidade (SALLEZ, 2007). Estes resultados são corroborados pelas conclusões dos trabalhos de Shelton (2008) que mostram que a variedade das construções é um fator predominante para a boa aceitação da densidade.

Da mesma maneira, Marry (2009) mostra que a diversidade (ou mistura) das formas urbanas pode ser um indicador de aceitabilidade da densidade: é necessário, por conseguinte, favorecer a variedade das tipologias de habitação, entre individual e coletivo, formas urbanas contínuas e descontínuas. Com base em vários exemplos de alojamentos e bairros em Paris, Zunino *et al*. (2009) considera a variedade arquitetônica e a imbricação dos volumes como instrumento que permite preservar a intimidade e a convivialidade do bairro. O seu relatório recomenda principalmente, favorecer "a diversidade e mistura das tipologias" no bairro, e "a dilatação do espaço através de quadras mais abertas, transparentes e permeáveis" (ZUNINO, NAUDIN-ADAM, *et al*., 2009).

II.2.4.5. Densidade e energia nas cidades

O debate relacionado com o modelo de densidade e da forma urbana mais adequada para as cidades têm sido também objeto de interesse dos pesquisadores e planejadores quando a problemática é a adaptação climática e eficiência energética dos espaços construídos. Os parâmetros de densidade mencionados podem contribuir seja como parâmetros de análise, seja como indicadores de extrema relevância na proposição de medidas de adaptação e prospecção contextualizadas. Sendo necessário, no entanto, quantificar a magnitude dessa relevância para que medidas possam ser priorizadas e atribuídos pesos correspondentes a determinadas situações pelos decisores urbanos. Este ponto faz parte de uma das preocupações do presente trabalho.

O forte adensamento e verticalização do solo urbano aliado à diversidade de funções (e.g. habitação, comércio, escola, cultura, etc.) pode encurtar distâncias, e reduzir a dependência do automóvel, limitar extensões dispendiosas em termos de redes (e.g. infraestrutura, comunicação, transporte, energia, água, etc.) e uma redução do consumo energético (CHENG, STEEMERS, *et al.*, 2006). Além disso, a adoção de uma densidade elevada pode permitir, no contexto de climas quentes, a redução dos ganhos solares excessivos nas superfícies construídas, pela projeção de sombras do entorno. Mas por outro lado, com essa elevada densidade, podem ser geradas condições de desconforto ambiental urbano (e.g. efeito da ilha de calor urbano, poluição olfativa e sonora, etc.) ou colocar restrições importantes para o uso de energias renováveis, como a solar ou eólica. Uma alta densidade vertical associada a certa heterogeneidade de altura pode representar condições climáticas desfavoráveis para fins de aproveitamento da energia solar, paradoxalmente devido ao aumento da projeção de sombras nas cobertas dos edifícios de menor altura. A redução do fator de visão do céu pode comprometer a qualidade da iluminação natural dos espaços. Por outro, a uniformidade da altura construída, quando associada a um menor afastamento entre edifícios, pode reduzir a qualidade ambiental tanto em termos de iluminação como de ventilação, devido a uniformidade e a baixa a permeabilidade da malha urbana.

Apesar de ser extremamente importante o conceito de densidade, quando por si só for aplicado às cidades, não há a possibilidade de identificação da qualidade ambiental, do desempenho climático ou de um potencial de geração de energia. Assim há a necessidade de um cruzamento deste indicadir com os demais indicadores da morfologia urbana, como será visto mais adiante, em função dos objetivos definidos.

Outrossim, ainda em torno desse debate, há em pesquisas urbanas atuais uma importante revalorização do conceito da densidade populacional elevada. Jane Jacobs (2000) considera as baixas densidades do modelo do subúrbio americano como o principal fator do declínio das cidades dos Estados Unidos. Segundo ela, baixas densidades reduzem a diversidade de usos das áreas urbanas, tornando-as mais desertas e acentuando problemas como criminalidade e vandalismo.

Segundo Haughton & Hunter (1994) densidades urbanas maiores tem sido consideradas importantes para se alcançar um desenvolvimento sustentável, pois:

(i) A grande concentração de pessoas maximiza o uso da infra-estrutura instalada, diminuindo o custo relativo de sua implantação e reduzindo a necessidade de sua expansão para áreas periféricas.

(ii) Altas densidades reduzem também a necessidade de viagens já que a concentração de pessoas favorece as atividades econômicas como comércio e serviço a nível local.

(iii) Por fim, elas encorajam o andar a pé e viabilizam a implantação de sistema de transportes coletivos.

Estudos realizados pelo Banco do Trabalhador da Venezuela (Banco Obrero) demonstraram que os custos da infra-estrutura urbana em função da densidade se comportam como uma parábola,

cujo ponto de "otimização", para o caso de Caracas, ficaria em torno dos 1000 hab./ha (FERRARI, 1979)(Figura 81).

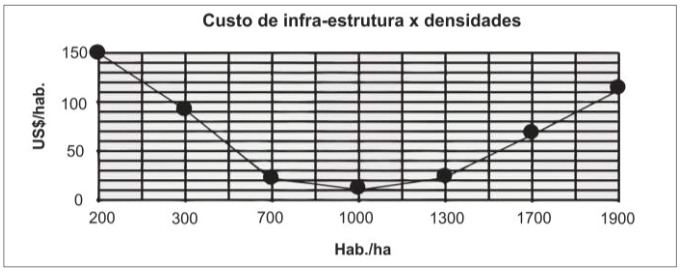


Figura 81: custo de infra-estrutura *versus* densidades.

O crescimento exponencial da população urbana no mundo, somado às dificuldades encontradas dos governos em suprir as suas cidades com infra-estrutura adequada e habitação para todo seu contingente populacional, tem levado à busca por proposições de formas de ocupação do espaço urbano que otimizem os recursos e promovam a qualidade de vida, além de minimizar os impactos sobre o meio ambiente.

Os diversos parâmetros que definem a morfologia urbana de uma cidade atuam, portanto, de modo crucial na resolução de várias equações (e.g. estrutural, ambiental, energético, social, econômico, etc.). No entanto, para responder a este desafio, torna-se indispensável considerar abordagens sistemáticas, interdisciplinares e de multicritério dentro de cada domínio de modo que as soluções para diferentes problemáticas possam compor um quadro de auxílio para tomada de decisões.

II.2.5. Abordagem hierarquizada e escolha dos indicadores da pesquisa

Após o levantamento dos diversos indicadores ambientais da forma urbana entre as diferentes temáticas e aplicações, será então definida e justificada a escolha do conjunto de indicadores representativos de modo a atender aos objetivos propostos.

Para a definição do conjunto de indicadores assumiu-se uma abordagem hierarquizada descendente (*top-down*). A fim de tratar problemas que possuem certo grau de complexidade e com múltiplos critérios, faz-se necessário identificar as partes constituintes do problema fundamental da pesquisa e tratá-las de modo a poder definir os objetivos a serem alcançados. Após, decompor esses objetivos através de indicadores adequados. Assim, chega-se a um conjunto de indicadores mais relevantes para a abordagem, passando pela decomposição hierarquizada do problema em quatro níveis: *sub-problemática > objetivo > critério > indicador* (Figura 82).

Esses indicadores morfológicos selecionados serão utilizados como parâmetros de entrada do método proposto nessa primeira abordagem metodológica do trabalho (ver itens I.3 e I.4) e como uma linguagem principal para o estudo até à apresentação dos resultados e a síntese. Portanto, a morfologia dos espaços será empregada como instrumentos de análise, linguagem e síntese.

A problemática fundamental do trabalho, conforme apresentado na introdução, consiste na integração da energia solar à concepção urbana em clima tropical que se divide em duas sub-problemáticas principais: minimização do consumo de energia em edificações urbanas e a utilização de energia renovável em edifícios urbanos.

O conjunto inicial de indicadores que foram selecionados, baseando-se na literatura sobre o assunto e na integração da abordagem desse trabalho, está representado no esquema arborescente da Figura 82 e na descrição sintética na Tabela 7.

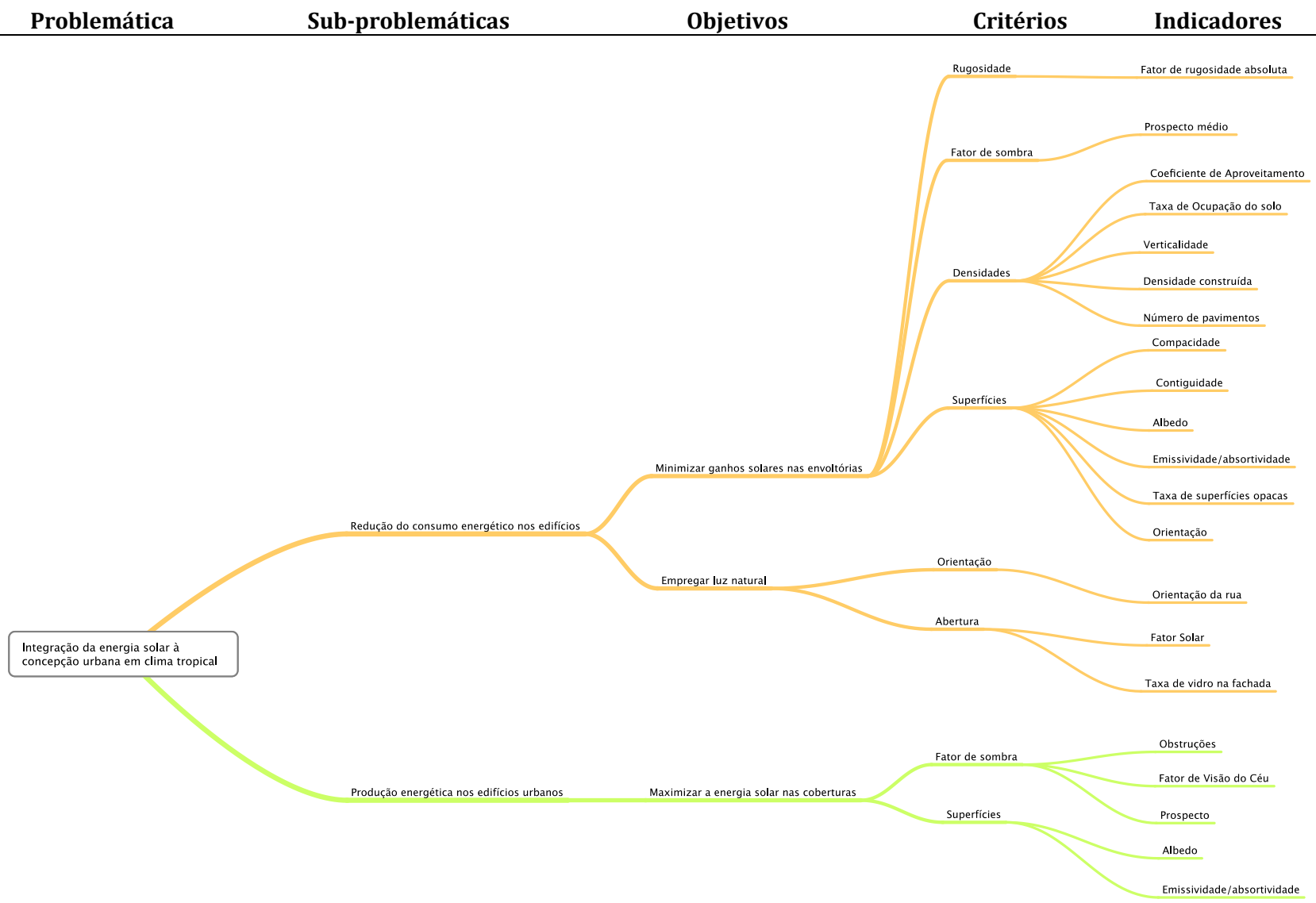
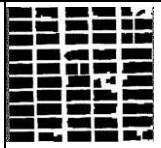


Figura 82: abordagem hierárquica de definição e escolha dos indicadores ambientais da morfologia urbana para estudo de caso.

Tabela 7: descrição dos principais indicadores da forma urbana utilizados nesse estudo.

Indicador/parâmetro **Definição / cálculo**	**Eq.**	**Exemplos/ referências** (SALAT, 2011)		
		Disperso	**Compacto**	**Vertical**
				
Altura média ponderada $H_{med} = \frac{\sum_i (h_{edf_i} \times S_{sol_i})}{S_{sol\ tot}}$ Onde, h_{edf_i} =altura do edifício *i*; S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício *i;* $S_{\mathrm{sol}_{tot}}$ =Área total construída no solo da malha;	Eq. 35	5,5	15,3	35,8
Desvio padrão da altura dos edifícios no interior da malha.	-			
Área construída no solo - Soma total no interior da malha.	-			
Área útil total construída A partir da altura foi deduzido o número de pavimentos (igual ao valor arredondado da altura dividida por 3). Multiplica-se em seguida, o número de pavimentos pela superfície no solo. $S_{tot} = \sum_i \left(\frac{h_{edf_i}}{3} \cdot S_{sol_i} \right)$ Onde, h_{edf_i} =altura do edifício *i.;* S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício *i.*	Eq. 36	2,0x10^5	2,0x10^6	4,0x10^6
Coeficiente de Aproveitamento (CA) A densidade do edifício é definida como sua área útil total construída dividida pela área construída no solo. $CA = \frac{S_{tot_i}}{S_{sol_i}}$ Onde, S_{tot} é a Área útil total construída do edifício *i*; S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício *i.*	Eq. 37	1,0	5,0	12,0
Área envoltória exterior - Determina a superfície de envoltória vertical exterior, representado por S_{env}.				
Coeficiente de forma (ou indicador de compacidade) Consiste na relação entre a área de envoltória exterior dos edifícios na malha e o volume destes elevado à potência 2/3. $C_f = \frac{S_{env\ ext}}{(V_{edf_i})^{2/3}}$	Eq. 38	0,86	0,64	1,50

Onde, $S_{env_{ext}}$ = Área da envoltória exterior; V_{edf_i} = Volume do edifício *i*.				
Contiguidade A contiguidade de um edifício é calculada como a área das paredes geminadas sobre a área total da envoltória. $$Cont_i = \frac{S_{env\ tot} - S_{env\ ext}}{S_{env\ tot}}$$ $S_{env_{tot}}$ = Área total da envoltória do edifício; $S_{env_{ext}}$ = Área da envoltória exterior.	Eq. 39	0,02	0,29	0,003
Número de edificações por hectare no interior da malha.				
Rugosidade absoluta Consiste na razão da soma das alturas ponderadas pela sua superfície pela superfície total do tecido urbano considerado (construído e não construído). $$R_g = \frac{\sum_{const} S_i * H_i}{\sum_{const} S_i + \sum_{vazio} S_j}$$ Onde, S_i é área construída do edifício *i*, H é a sua altura, e S_j é a área no elemento não construído *j*.	Eq. 40	0,8	7,1	14,3
Porosidade É relação dos volumes úteis abertos ao conjunto de volumes do tecido urbano considerado. $$P_o = \frac{\sum_{esp.abertos} \pi \cdot r_{hi}^2 \cdot P_i}{\sum_{esp.abertos} V_i + \sum_{constr.} V_j}$$ Onde, *Pi* é a profundidade do espaço aberto *i*; r_{h_i} é o raio hidráulico equivalente do espaço aberto *i; Vj* é o volume médio do volume construído *j;* e *Vi* é o volume médio da camada limite urbana acima do espaço aberto *i*. $$r_h = \frac{l \cdot h}{l + h}$$ Onde, r_h =raio hidráulico equivalente (JUDET DE LA COMBE, SESOLIS, *et al.*, 1991), cujo raio é o poro circular criando a mesma descarga para uma velocidade idêntica e dado para uma seção retangular. E onde *h* é a altura da camada limite urbana para a rua (altura média dos espaços construídos e não construídos adjacentes), e *l,* é a largura média da rua.	Eq. 41 Eq. 42	0,33	0,08	0,49
Densidade Construída (Ds) Corresponde à soma das áreas úteis construídas, dividido pela área total da malha. $$Ds = \frac{\sum_i S_{tot_i}}{S}$$ Onde, S_{tot} é a Área útil total construída do edifício *i;* S =Área total na malha;	Eq. 43	0,5	3,0	5,0

Taxa de ocupação do solo (TO) Corresponde à soma das áreas construídas no solo, dividido pela área total da malha. $$TO = \frac{\sum_i S_{sol_i}}{S}$$ Onde, S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício *i;* S =Área total na malha;	Eq. 44	0,15	0,65	0,53
Verticalidade $$V = h_{edf}^2 / S$$ Onde, h_{edf_i} =altura do edifício *i*; S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício *i;* $S_{\mathrm{sol}_{tot}}$ =Área total construída no solo da malha;	Eq. 45			
Prospecto médio Relação da altura média ponderada pela largura da rua. $$P_M = H_{med} / l$$ Onde, H_{med} =Altura média ponderada dos edifícios na malha; l = Largura da rua.	Eq. 46	0,55	3,9	3,2

II.3. Modelagem urbana: proposta de metodologia simplificada para análise tipo-morfológica

As pesquisas no domínio da modelagem urbana são cada vez mais numerosas. Com o rápido crescimento das cidades, as primeiras pesquisas nesse sentido, contribuíram para modelagem da dinâmica urbana em vários níveis, como o tráfego urbano (BANDO, HASEBE, *et al.*, 1995) (LECLERCQ, 2002), os fluxos de pedestres (HELBING, MOLNAR e MINGOTAUD, 1997) (KRETZ, 2007) (PICCOLI e TOSIN, 2011), ou ainda a dinâmica das populações (ELLERKAMP, 2001) (LOUAIL, 2010). Desde os anos 2000, a rápida evolução das ferramentas de informática permitiu um grande avanço nos modelos e nos ambientes computacionais de simulação urbana. Surgem novos tipos de simuladores influenciados por essas tecnologias, como os baseados no Sistema de Informação Geográfica (SIG), os autômatos celulares[35] ou os sistemas multi-agentes, que permitem considerar a multiplicidade de interações e a complexidade da cidade. Sobre os principais sistemas de modelagem da morfologia urbana e simulação dinâmica, é possível citar alguns projetos e ferramentas mais relevantes, tais como *Gigalopolis*[36] (CLARKE e GAYDOS, 1998) (JANTZ, GOETZ, *et al.*, 2010)o programa *UrbanSim*[37] (WADDELL e ULFARSSON, 2004), o programa *UrbanLab*[38] (CANEPARO, GUERRA e MASALA, 2006), o programa *Obeus*[39] (BENENSON, ARONOVICH e NOAM, 2001), Morphologic[40] (ADOLPHE, 2001) e *GENIUS*[41] (*GENerator of Interactive Urban BlockS*) (BONHOMME, MASSON e ADOLPHE, 2012).

Por meio do uso de modelos e técnicas SIG, muito progresso tem sido feito no campo da gestão da informação em grandes escalas urbanas, em auxílio ao processo de decisão e na integração de múltiplas temáticas de grande interesse para o planejamento urbano de novas cidades e ordenamento e planejamento da expansão urbana.

II.3.1. Uso do SIG na análise da forma urbana

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um sistema de informação que permite criar, organizar e apresentar dados alfanuméricos georeferenciados, assim como, produzir plantas e mapas. Entre diversos usos desse sistema, podem ser citadas as análises espaciais e morfológicas urbanas. Tais sistemas permitem a representação dos espaços construídos (traçado urbano, parcelas, topografia, uso do solo, forma dos edifícios etc.), em várias escalas, baseando-se em dados geométricos (pontos, vetores, polígonos ou malhas) (LAARIBI, 2000). Em outras palavras, consistem em conjunto de dados localizados no espaço, estruturados de forma a permitir a extração de sínteses que possam ser úteis à decisão.

---

[35] Grelha de células regulares que evolui conforme regras de base simples, visto que cada célula pode encontrar-se em um número finito de estados discretos, em intervalos de tempo discretos. A partir dessas regras simples, os autômatos celulares, no entanto, não conduzem a resultados muito surpreendentes pela sua complexidade (O'SULLIVAN e TORRENS, 2000). Enquanto que os autômatos celulares não permitem gerar objetos móveis, os sistemas multiagentes são conjuntos de agentes, ou seja, entidades autônomas capazes de perceber e de agir entre eles e com seu ambiente (FERBER, 1997).

[36] Desenvolvido pela Universidade da Califórnia de Santa Barbara e o Unised States Geological Survey, o projeto Gigalopolis permite prever o crescimento urbano através do mundo em várias escalas (regional, continental e mundial).

[37] Desenvolvido pelo Center for Urban Simulation and Policy Analysis da Universidade de Washington, o programa UrbanSIm permite modelar o desenvolvimento urbano e mais particularmente as interações entre a ocupação do solo, o planejamento ambiental e as redes de transporte.

[38] Desenvolvido pelo Politecnico di Torino, UrbanLab permite simular, visualizar e « visitar » em 3D o impacto dos projetos de ordenamento no território de Turin. A partir da percepção dos visitantes, permite modificar o projeto.

[39] O programa Obeus permite representar o ambiente urbano, conforme diferentes camadas de objetos e informações. Utiliza dados vetoriais para representação tanto de células como de agentes.

[40] Aplicativo SIG programado no MapaBasic/Mapinfo para tratamento e cálculo de indicadores de morfologia para dados urbanos precisos. Desenvolvido no Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA/ENSA de Toulouse) no âmbito do projeto de pesquisa SAGAcité.

[41] Plataforma SIG de modelagem e classificação da morfologia urbana, desenvolvida no Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA/ENSA de Toulouse) no âmbito do projeto de pesquisa francês MUSCADE.

Essa família de ferramentas SIG, e os da família CAD/CAO (*Computer Aid Design*) podem ser aplicadas à diversas disciplinas, inclusive ao urbanismo, e nas escalas espaciais (regional ou local). Assim como nos tradicionais CAD, o SIG permite organizar e tratar objetos em camadas diferentes (Figura 83), possibilitando manipular separadamente os atributos de diferentes classes de objetos (parcelas, vias, edifícios, topografia, etc.).

Três características fundamentais orientaram a escolha do SIG nesse trabalho, quando a abordagem é focada na análise da morfologia urbana:

(i) capacidade de manipular formatos de arquivos e dados heterogêneos (importar e/ou exportar textos, planilhas, imagens e dados vetoriais) e, portanto, de ser um sistema de gestão de dados extremamente aberto.

(ii) capacidade de realizar análise espacial: os SIG são instrumentos eficazes de manipulação de objetos e conhecimentos situados no espaço. As características ambientais dos projetos urbanos são, muitas vezes, bastante ligados a esta análise espacial da morfologia urbana, geométrica ou topológica e manipulam frequentemente conceitos de dimensão, forma localização, repartição ou proximidade.

(iii) possui saídas gráficas como mapas temáticos e dados numéricos que podem ser exportados ou reintegrados em outras análises facilitando a manipulação dos resultados.

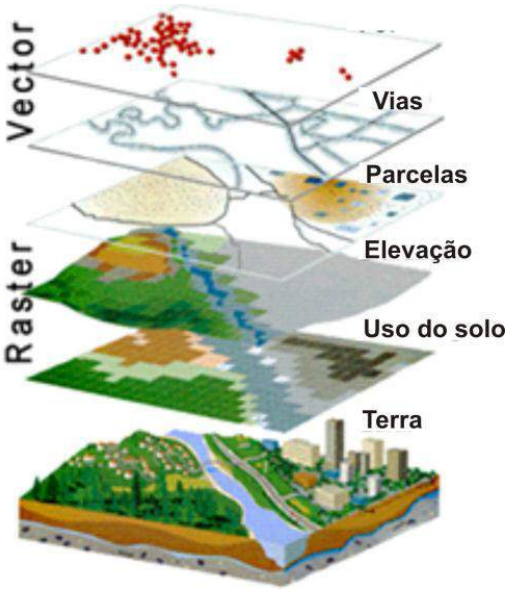


Figura 83: Esquema da representação gráfica das principais estruturas urbanas em SIG (Fonte: ESRI-ARCGIS®).

No que diz respeito ao processo de gestão da informação no SIG, tal sistema inclui, normalmente: (i) aquisição de dados de entrada; (ii) armazenagem, recuperação e gestão de banco de dados; (iii) exibição e geração de produtos/ resultados; (iv) uma interface do usuário (LAARIBI, 2000), conforme ilustra a Figura 84 abaixo.

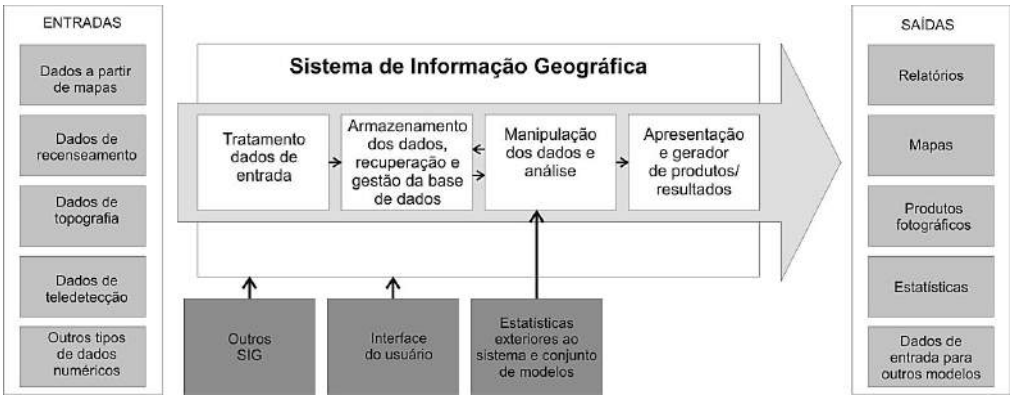


Figura 84: esquema dos componentes principais do SIG (Fonte: adaptado de Laaribi, 2000).

Além dos cinco "A" com os quais Denègre e Salgé (1997) definem os SIG: "adquirir, arquivar, acessar, analisar e abrir", esses sistemas têm a particularidade de fazer a gestão de dados referenciados que, comparado aos dados convencionais tipicamente descritivos, são associados aos objetos ou aos fenômenos que se caracterizam pela sua posição (coordenadas geográficas) e, muitas vezes, por uma forma geométrica (e.g. um polígono que representa a parcela de um terreno).

Os programas SIG utilizam uma base de dados, que corresponde a uma coleção estruturada de gráficos digitais, dados cartográficos que são a representação da realidade, e dados não-gráficos, chamados tabulares, que descrevem atributos relacionados espacialmente. Em síntese, um programa SIG tem a capacidade de associar um banco de dados a um elemento gráfico.

O SIG possui, portanto, uma importância fundamental para análise da morfologia urbana. Duas características bastante relevantes podem ser ainda destacadas (MOUDON, 1997):

- *Cruzamento de dados espaciais com dados socioeconômicos e ambientais* – permite relacionar atributos espaciais a dados quantitativos, possibilitando medir e analisar o espaço físico, em relação com as forças sociais, econômicas e ambientais que os originaram: por exemplo, os dados de censo demográfico podem ser relacionados às formas dos edifícios e a evolução do uso do solo.

- *Encadeamento de escalas* – as cartas inteligentes geradas pelos SIG podem permitir a realização de análises regionais com o nível de informação tão preciso quanto para a análise de uma única parcela. Em contrapartida, as análises no nível da parcela podem ser aplicadas a uma região inteira. Pela primeira vez, as análises morfológicas urbanas podem ser conduzidas em metrópoles urbanas contemporâneas e em vastas extensões urbanas ou suburbanas, graças ao SIG.

A grande vantagem desse tipo de ferramenta é a possibilidade de programar diversas rotinas de cálculo no auxílio ao estudo da cartografia, com a criação de cartas temáticas, como será aplicado na primeira etapa do desenvolvimento desse trabalho de tese (ver II.4.3.2).

No mercado existem diversas ferramentas SIG, porém com diferenças relacionadas com a interface, ou a disponibilidade de recursos. Pode-se citar: MapInfo, ArcGIS, OrbGIS, e o brasileiro SPRING.

II.3.2. Construção do modelo de cálculo

A partir dos conhecimentos adquiridos, procura-se agora apresentar uma abordagem metodológica simplificada que auxiliará a identificação dos padrões tipológicos para a forma urbana de qualquer cidade. A caracterização de configurações urbanas típicas a partir de indicadores ambientais da forma urbana permitirá lançar as primeiras bases de uma análise climática e energética que será melhor abordada ao final de capítulo.

Para elaborar essa metodologia, um programa computacional do tipo SIG (Sistema de Informação Geográfica) foi utilizado. O programa escolhido foi o ArcMAP/ArcGIS®[42]. Por meio deste aplicativo informático é possível criar, manipular, tratar e analisar dados urbanos, conforme foi citado no item anterior. Cada informação (ponto, linha ou polígono) consiste em um arquivo de forma (ou *shapefile*) que passa a representar, no caso da análise da forma construída de uma cidade: edifícios, ruas, lotes, jardins, etc. Essas informações podem ser georeferenciadas, ou seja, as coordenadas que representam sua posição geográfica real são consideradas e cada elemento da cidade tratado em camadas distintas. Para um conjunto de *shapefiles* (e.g. edifícios de um bairro) é gerada uma tabela de atributos que pode ser completada e manipulada, agregando informações que lhe sejam pertinentes.

Para que atributos, ou os indicadores ambientais definidos da forma urbana, possam ser inseridos nessa tabela inicial, foram utilizadas duas ferramentas principais do aplicativo: o Modelbuilder e o ArcToolbox. Como já indicam os nomes, o primeiro é um "construtor de modelos" e o segundo, uma "caixa de ferramentas" de geoprocessamento de dados. O Modelbuilder consiste em ambiente de programação computacional facilitada que permite programar de forma visual por meio de diagramas (Figura 85). Tudo o que é feito no diagrama é convertido no conhecido código *Python* ou em *VBScript*. Com isso, rotinas de cálculo podem ser programadas e indicadores automatizados. Ou seja, uma vez programados, qualquer base de dados que for inserida no programa pode ser tratada e os parâmetros calculados automaticamente, aplicando a rotina elaborada.

As informações inseridas no ArcGIS correspondem à formas em 2,5 D[43]. Assim, os dados são representados de duas formas, de um lado, por um plano (polígonos em 2D) e, do outro, por atributos associados a cada informação, reagrupados na mencionada tabela de atributos. Ao clicar-se em um *shapefile* correspondente aos edifícios, por exemplo, o programa abrirá uma tabela contendo todos os dados referentes ao edifício selecionado: altura, número de habitantes, densidade, rugosidade etc.

Para conhecimento de informações morfológicas desejadas, a rotina de cálculo foi criada baseando-se em indicadores já existentes (ADOLPHE, CHÂTELET, *et al.*, 2002) (BONHOMME, MASSON e ADOLPHE, 2012).

[42] Desenvolvido pela sociedade Americana *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*. Licença gentilmente cedida pelo *Laboratoire de Recherche en Architecture* (LRA) da *Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse* (ENSA).

[43] O termo **2,5D** (também denominado **2D e meio**, ou **pseudo 3D**) designa as tecnologias de imagem definidas entre 2D e 3D. No caso do ArcGIS, os edifícios são considerados como um polígono em 2D para os quais são cadastradas as alturas, mas não permitindo a definição de geometrias mais complexas/detalhadas.

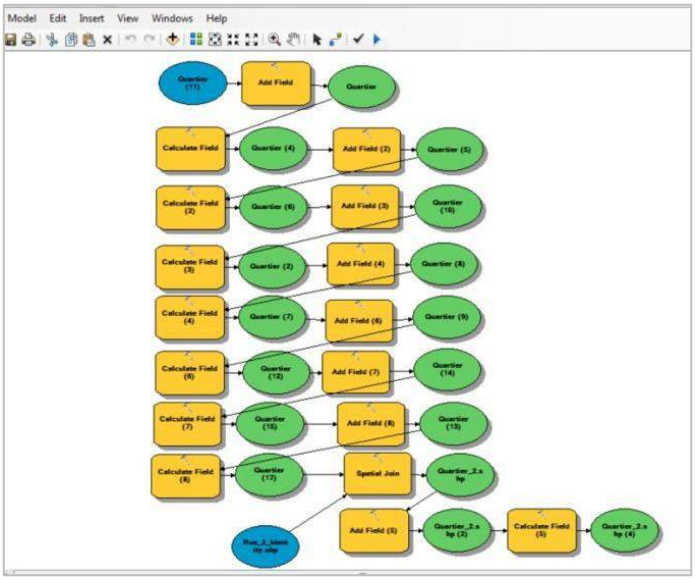


Figura 85: diagrama de programação e automação das rotinas de cálculo dos atributos morfológicos no ModelBuilder do ArcMAP/ArcGIS®.

II.3.3. Definição de uma resolução espacial

A fim de realizar a caracterização das áreas urbanas a partir do cálculo de atributos morfológicos, torna-se necessário definir a resolução mais apropriada para análise de um dado tecido urbano, em função de alguns aspectos mais relevantes do ponto de vista morfológico. Como o dimensionamento de uma malha requer um recorte de objetos urbanos (ruas, edifícios), este recorte pode ser mais ou menos importante, dependendo das características do tecido urbano em questão, não devendo ser muito pequena, para não representar apenas um fragmento pouco representativo do tecido urbano, nem demasiado grande que possa englobar estruturas muito diferentes.

Nesse sentido, procurou-se avaliar a modelagem em três diferentes resoluções, a fim de identificar qual resolução seria a mais apropriada para a cidade selecionada: Maceió-AL.

Como uma primeira aproximação, foi utilizada a própria repartição existente, calculando-se os indicadores para os 50 bairros da cidade. Esta abordagem preliminar foi comparada com os resultados obtidos para uma malha em duas resoluções: 500m x 500m e 250m x 250m (Figura 86). Para definição da resolução mais adequada da malha de estudo, foram realizados estudos estatísticos, visando analisar a homogeneidade dos elementos no interior das três resoluções espaciais consideradas.

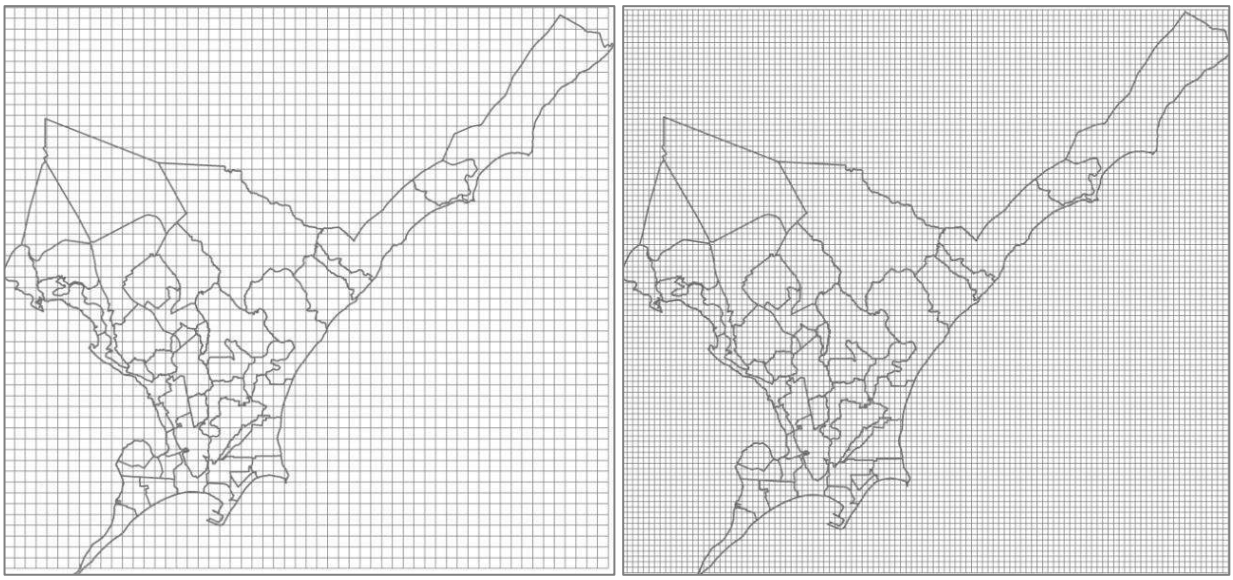


Figura 86: malha nas duas resoluções de análise: 500x500m e 250x250m.

II.3.4. Métodos estatísticos de tratamento de dados urbanos

Diante do grande número de dados obtidos, fez-se necessário interpretar estes dados e tentar extrair de uma grande massa de informações, conhecimentos úteis para uma análise teórica da morfologia urbana de Maceió e para auxiliar na continuidade do trabalho, na etapa de simulação e automatização dos procedimentos de análises de desempenho.

Nesse sentido, foram utilizados três métodos estatísticos de tratamento de dados. Inicialmente, foi realizada uma análise de correlação e covariância, com vistas a estabelecer como os parâmetros morfológicos relacionam-se e variam entre si, e sobre a força de interação dessa relação. E, em seguida, foi aplicada a técnica de análise de componentes principais (ACP), que em função da força de correlação entre as variáveis, permite identificar uma estrutura interna coerente, agrupando as informações mais relevantes. E, por último, foi utilizado o método de agrupamento estatístico de dados, a partir da identificação de padrões de comportamento entre os conjuntos de indicadores.

A análise de correlação consiste em técnica da estatística que permite medir a relação entre duas variáveis ou conjuntos de variáveis. As variáveis podem aumentar ou diminuir conjuntamente (correspondendo respectivamente a uma correlação positiva ou negativa). Uma variável pode aumentar enquanto a outra diminui (correspondendo a uma correlação inversa), ou ainda não apresentar alguma relação entre elas (nenhuma correlação). Para identificar essas características, utiliza-se uma medida chamada coeficiente de correlação, que representa a força de correlação; esse coeficiente pode variar de – 1 (perfeita correlação inversa) a 0 (nenhuma correlação) para + 1 (correlação positiva perfeita). Os cálculos de correlação são semelhantes aos da regressão de variáveis dependentes e independentes, mas para correlação não há nenhuma hipótese de causalidade (ou seja, enquanto as variáveis podem mudar juntas de alguma forma, uma variável não está necessariamente fazendo a outra mudar).

Inicialmente uma ampla gama de parâmetros foram lançados na rotina de cálculo, a fim de completar uma Análise de Componentes Principais (ACP).

Uma ACP consiste em uma análise estatística que pode ser usada para avaliar as inter-relações entre um grande número de variáveis, de modo a condensar a informação contida nelas em um conjunto menor de variáveis estatísticas, com uma mínima perda de informação. A utilização dessa

técnica de análise multivariada permite minimizar as redundâncias que possam existir, quando se pretende levar em consideração um número muito elevado de variáveis, possibilitando a captação da maior variabilidade dos dados em poucas componentes, tornando mais simples o mapeamento das informações. Os objetivos principais dessa técnica são (ALENCAR, 2009):

(i) Gerar novas variáveis em um número reduzido, mas que consigam expressar de modo satisfatório a informação contida no conjunto original de dados;

(ii) Reduzir a dimensão do problema que está sendo estudado, como passo prévio para futuras análises;

(iii) Eliminar, quando for possível, algumas variáveis originais, caso elas contribuam com pouca informação.

As ACPs mais significativas são selecionadas com base em seus próprios valores, e normalmente, um número muito menor de variáveis é necessário que anteriormente. Esses componentes principais, em seguida, podem ser analisados ainda por análise de regressão ou ANOVA/MANOVA.

Num segundo momento, lançou-se mão de uma análise de agrupamentos ou *clustering analysis.* Esta consiste em método de estatístico não-paramétrico, que visa identificar e agrupar objetos segundo a similaridade, conforme algum atributo ou característica particular que possuem, possibilitando a identificação de padrões de comportamento. A apropriação desta técnica visa uma melhor organização dos dados efetuada com a divisão em classes, facilitando sua compreensão e interpretação. O método de *k-means clustering* foi a técnica mais adequada para aplicação na metodologia desse estudo. O algoritmo deste método consiste em escolher uma partição inicial dos dados e, em seguida, modificar os membros de classes a fim de obter uma nova partição que revele melhor a estrutura natural dos dados iniciais. Assim, os pontos de k são especificados como centros de classes k, calculando-se a distância euclidiana entre cada elemento e os centros destes. Os elementos são, então, atribuídos à classe cujo centro é o mais próximo. Os centros de cada classe são, em seguida, recalculados e o procedimento é repetido, até que o algoritmo possa convergir para uma posição estável, minimizando a variância a cada iteração (DIDAY, LEMAIRE, *et al.*, 1982). A precisão do resultado é avaliada por meio da observação da variação intraclasse (dentro das classes) que deve ser minimizada e a variância interclasses (entre as classes) que deve ser máxima.

Ressalta-se que as classes tipológicas destacadas nesse trabalho são puramente morfológicas e independentes de seus usos.

Os métodos estatísticos descritos acima já foram empregados e indicados por outros trabalhos de pesquisa semelhantes, tal como em Wallemarcq, Marique e Reiter (2011) que empregaram várias ACPs a fim de classificar as quadras urbanas da cidade de Liège, por tipologias de demanda energética; e, Bonhomme (2013) que empregou também diversas ACPs, além do método de agrupamento (K-means) para classificação e cartografia das quadras urbanas na cidade de Paris, a fim de elaborar uma ferramenta de classificação e geração automática de quadras urbanas para análises urbanas prospectivas no contexto francês.

II.4. Aplicação do estudo à Maceió –AL

A cidade de Maceió, capital do estado de Alagoas, situada no Nordeste do Brasil (Figura 87), foi a cidade selecionada para a aplicação da metodologia proposta nesse trabalho. Nessa primeira etapa do método, que consiste na análise ambiental da forma construída, os dados urbanos de Maceió (contendo apenas atributos relativos à implantação e forma das suas edificações) são considerados como dados de entrada num modelo de análise simplificada da morfologia urbana (conforme apresentado no item anterior).

Mas antes de apresentar essa aplicação que permitirá chegar a uma análise da relação entre o contexto tipo-morfológico da cidade e o contexto climático local, será desenvolvida uma breve contextualização de modo a justificar a escolha desse sítio morfológico como objeto de estudo.

A dinâmica do movimento urbano de Maceió, no que diz respeito à produção de sua(s) forma(s) urbana(s) construída(s) e aos padrões de ocupação do solo está atualmente e, sobretudo, subordinada a dois principais atores: o mercado formal de terras e a legislação urbana edilícia.

Diante disso, será aqui apresentada inicialmente uma discussão do contexto ou problemática "morfo-socioeconômica"- sobre o panorama atual de desenvolvimento da forma urbana sob influência dos vetores socioeconômicos locais. Esta seencontra profundamente ligada ao contexto que chamaremos de "morfo-normativo" – que traz consigo os principais fatores da conjuntura normativa (e.g. Plano Diretor e código de urbanismo e edificações). Fatores determinantes de formas, práticas e definições de tipologias. As normas edilícias urbanas serão retomadas no contexto restritivo dos parâmetros morfológicos que alimentarão o modelo computacional dos cenários urbanos atuais e prospectivos, e que será enfocado no capítulo III.

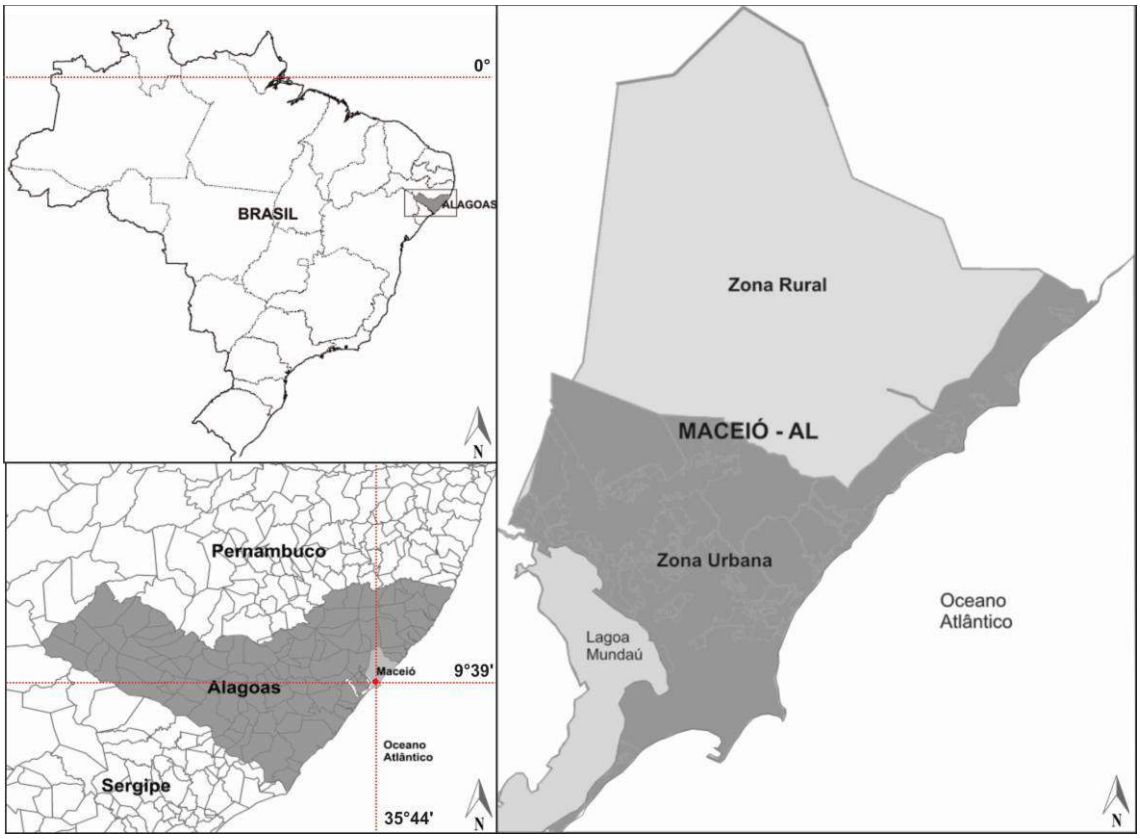


Figura 87: posição geográfica da capital alagoana Maceió e o detalhe da área urbana do município (Fonte: SEPLANDE, 2012).

II.4.1. Contexto "morfo-socioeconômico"

Cerca de 71,4% da população do estado de Alagoas reside nas áreas urbanas dos municípios (IBGE, 2010). Entretanto, nesta unidade da federação, a população urbana encontra-se extremamente concentrada na capital, Maceió, com 889.555 pessoas, ou seja 41% da população urbana alagoana, reside nesta cidade (IBGE, 2010) que por sua vez, possui 99% de sua população na área urbana do município. A área total de Maceió é de 513,5 km², sendo sua área urbana equivalente a 39% da área total com 191,8 km² (PMM, 2007). O processo de urbanização alagoano foi intensificado, nas últimas três décadas: de pouco mais de 630 mil habitantes na década de 1970 para mais de 2 milhões de habitantes em 2007 (IBGE, 2010).

Esse processo de urbanização que é bastante recente deu-se de forma rápida e intensa e não foi acompanhado de um planejamento ambientalmente adequado, tampouco socialmente justo. Maceió, entre várias outras cidades, é um exemplo quase emblemático do precário modelo fundiário urbano brasileiro. Modelo este bastante orientado pelo mercado da especulação imobiliária[44] e essencialmente orquestrado pelas classes sociais dominantes. Em função de tal prática ocorrem uma série de distorções que impedem, de um lado, uma distribuição mais justa da terra urbana e, do outro, uma ocupação de padrões tipológicos mais coerentes aos condicionantes, quer sejam estruturais de base (e.g. fornecimento de energia, água, rede de esgotamento, etc.), ou aos condicionantes ambientais (e.g. adequação da forma construída às restrições do sítio climático).

A concentração da posse da terra urbana pelas camadas mais privilegiadas economicamente, e o estoque dessa terra para efeitos especulativos advêm de uma prática de alguns setores da sociedade (classe média e alta), muitas vezes, atribuída à instabilidade da economia brasileira. A aquisição de lotes e imóveis em determinadas centralidades urbanas passou a ser um investimento de longo prazo. Tal demanda por terrenos mais valorizados, em função de uma infra-estrutura já instalada, provocou um crescimento vertical nas áreas mais centrais das cidades brasileiras. Com o objetivo de reduzir a participação do custo do terreno na unidade habitacional, passou-se a produzir um número maior de unidades por lote, o que fez com que as edificações ganhassem maior altura (CRUZ, 2001) (Figura 90).

Esse processo de verticalização, quando não regulamentado por lei específica, faz com que haja em decorrência, um congestionamento nas redes de serviços coletivos urbanos, obrigando a ampliação ou substituição dos mesmos por outros de maior capacidade, o que demanda significativa parcela de recursos públicos. Recursos que deixam de ser investidos em áreas urbanas muitas vezes, completamente desprovidas de infra-estrutura básica ocupada por população de menor faixa de renda. Em Maceió, 46% da população reside em assentamentos extremamente precários sem alguma condição básica de estrutura e salubridade de seus espaços (LINS, ZACARIAS e SCOTT, 2008).

O estoque de terras à espera de valorização faz com que surjam ao longo do tecido urbano uma série de vazios, representados por lotes individuais muitas vezes subutilizados, ou mesmo glebas ainda não loteadas, localizadas em áreas já estruturadas urbanisticamente. Maceió é um caso típico que representa esta situação, com metade de seu espaço urbano desocupado (CRUZ, 2001). Estudos mais recentes avaliaram a existência e os padrões desses vazios urbanos em três principais bairros da planície litorânea da cidade (Ponta Verde, Jatiúca e Pajuçara), e verificaram valores que vão de 6,5% a 28,5% de vazios, sendo que a grande maioria (cerca de 70%) correspondem à áreas de glebas (LINS, ZACARIAS, *et al.*, 2010) (LINS, ZACARIAS e SCOTT, 2008). Jatiúca, entre os bairros pesquisados por Lins et al (2008), é aquele com maior número de vazios (223 grandes vazios), apesar de fazer parte da área mais "consolidada" de Maceió. Além disso, nessas mesmas

[44] É uma forma pela qual os proprietários da terra urbana recebem uma renda transferida de outros setores produtivos da economia, o que ocorre principalmente através de investimentos públicos em infra-estrutura e serviços urbanos.

centralidades, observa-se hoje uma dinâmica urbana de verticalização gradual de extensas áreas ocupadas por edificações horizontais individuais (Figura 88). Essas edificações individuais têm sido sistematicamente demolidas e substituídas pela multiplicação de unidades em torres verticais em áreas centrais especuladas e em torno destas.



Figura 88: dinâmica urbana de verticalização gradual de extensas áreas ocupadas por edificações horizontais individuais em Maceió-AL.

A dinâmica mercadológica alimenta a manutenção desses vazios que se prolongam no sentido do litoral norte, com enormes glebas com forte tendência de expansão vertical no mesmo modelo dos bairros cada vez mais adensados da baixada litorânea de Maceió, porém com a permissão concedida na revisão do código do ano de 2001 de produzir edificações de até 20 pavimentos (limitada a alguns bairros). Do outro lado, a expansão imobiliária no sentido litoral sul, a partir da década de 70 (quando o processo de expansão urbana na orla marítima iniciava-se) desacelerou e ficou extremamente limitada devido à instalação da indústria química Braskem (antiga Sal-gema). O que fez perderem de valor as terras nesta região e hoje pudesse ser ocupada por habitações individuais horizontais de classes sociais menos favorecidas.

O modelo da cidade vertical em Maceió, no entanto, tem demonstrado bastante força, sobretudo, nos últimos anos e tem se disseminado por diversos distritos urbanos da cidade. Destacam-se a parte alta da cidade (bairros situados na conformação do tabuleiro), distritos dotados de certa diversidade de oferta de serviços e comércio, além da infra-estrutura já instalada. Também a procura por esse modelo tipológico vertical coletivo reflete também uma busca da população pela ideia da garantia de maior segurança. Um crescimento também importante, porém menos significativo no contexto urbano de Maceió, é o do condomínio coletivo horizontal, situados quase sempre distantes das centralidades, garantindo certo isolamento da cidade e aumentando a dependência e as distâncias percorridas pelos automóveis (Figura 89).



Figura 89: condomínio San Nicolas em Maceió-AL . Fonte: Internet.

Essa dinâmica urbana de cidades como Maceió, onde pouquíssimas áreas urbanas em sua malha podem ser efetivamente consideradas como áreas de forma urbana consolidada (consolidada no sentido de forma urbana engessada), é uma motivação para se investigar os padrões tipológicos

existentes de modo a possibilitar caracterizar o seu desempenho climático. Mas também vem possibilitar a uma proposição medidas de adaptação e estratégias energéticas para atendimento da demanda atual ou futura. É, portanto, de fundamental importância o conhecimento e descrição das características morfológicas e das tendências de ocupação na cidade de Maceió, para que seja possível serem estabelecidas estratégias mais adequadas de expansão horizontal e adensamento vertical das diferentes áreas da cidade, e coerentes com as condições climáticas e ambientais locais.

Diante desse contexto, no que tange o foco desse trabalho, alguns elementos merecem ser revistos: (i) o mercado de terras em áreas valorizadas tem definido uma densidade construída e um processo de verticalização extremamente importante nos espaços urbanos, sobretudo na planície litorânea, do centro ao litoral norte; (ii) a especulação imobiliária tem sido um dos principais responsáveis pela existência de grandes vazios urbanos nessas áreas ou de terrenos subutilizados ou ainda pela dinâmica de demolição do habitat individual e substituição por torres de várias unidades de habitação; (iii) forte tendência de reestruturação morfológica, com grande potencial de verticalização também na parte alta da cidade, sobretudo, nas bordas do tabuleiro; (iv) as tipologias arquitetônicas que têm definido a forma dos espaços urbanos de Maceió têm sido decididas, muitas vezes, pelas planilhas de maximização dos atores produtores de espaço.

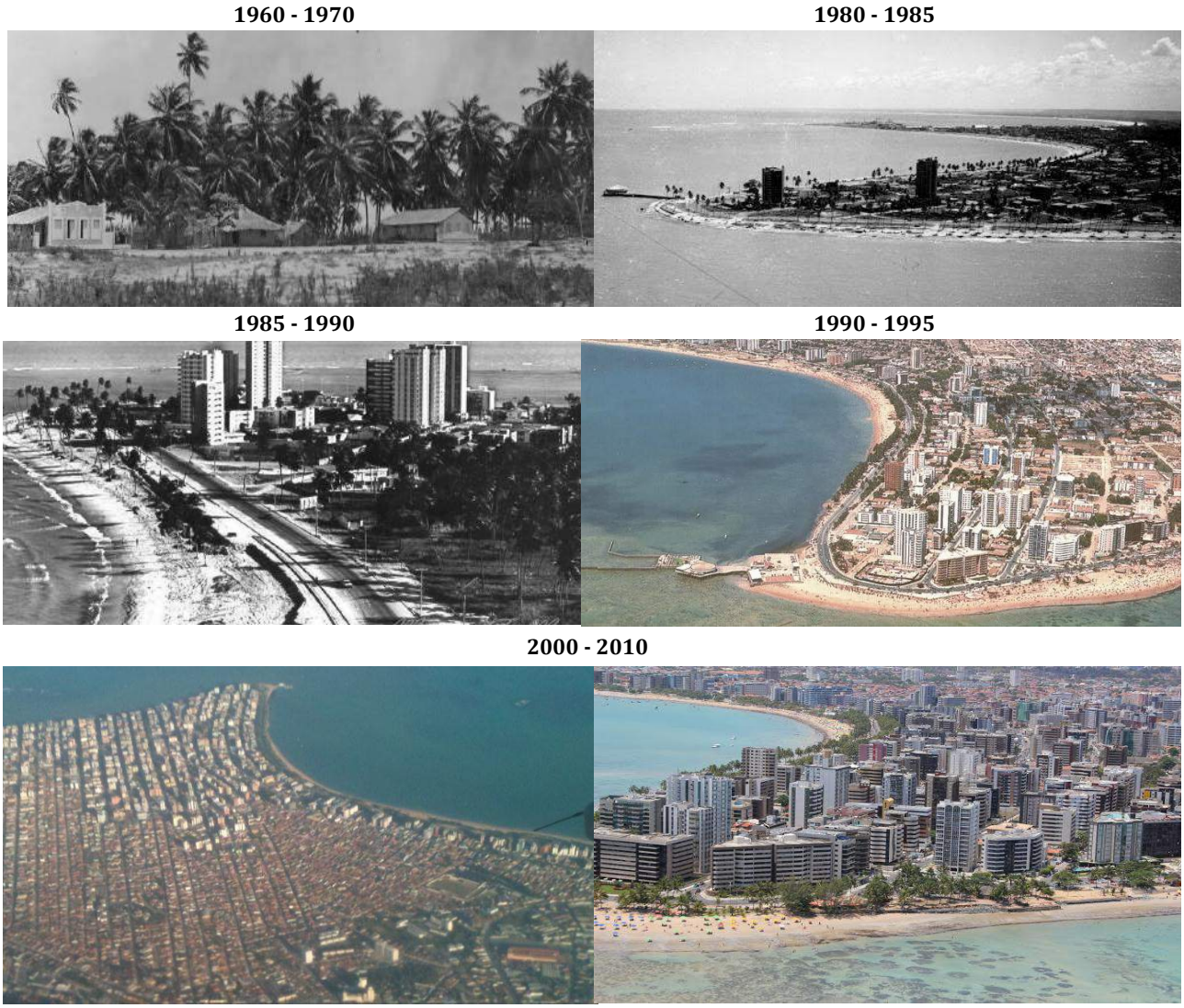


Figura 90: verticalização da planície litorânea de Maceió-AL (em destaque o bairro da Ponta verde).

II.4.2. Contexto "morfo-normativo"

Com a progressiva expansão urbana do município de Maceió (e.g. processo de verticalização, adensamento do solo, horizontalização, ocupações diversas, demolições etc.), o poder público tem que assumir sua responsabilidade de disciplinar estes processos. É, portanto, por meio de zoneamentos, definição de gabaritos, taxas de ocupação, índices de aproveitamento dos lotes e outros parâmetros restritivos, que a administração pública exerce, de certa forma, controle na forma e tipo de ocupação das terras urbanas. Tais parâmetros, que serão revistos mais adiante nesse trabalho, cumprem papel decisivo na definição da qualidade climática dos espaços.

A crescente verticalização maceioense, discutida no item anterior, iniciada em fins da década de setenta (Figura 90) gerou algumas preocupações na equipe responsável pela elaboração do primeiro Plano Diretor da cidade, concluído em 1982. Na época, ponderou-se sobre diversos condicionantes que necessitavam de restrições mais severas ao ato de construir nesta região, com o intuito de preservar o meio natural e a qualidade de vida no ambiente urbano. O conjunto de medidas propostas, teve desde o início uma oposição dos segmentos que atuavam junto ao mercado imobiliário, notadamente de associações de empresas da construção civil e imobiliárias (CRUZ, 2001).

Entre os principais argumentos utilizados para justificar a imposição das restrições construtivas normativas adotadas para a região, o que obteve maior ênfase, segundo Cruz (2001), foi a preservação de condições qualitativamente satisfatórias em termos de ventilação natural para as áreas posteriores à orla marítima, evitando o surgimento de um "paredão de concreto". Tal como pode ser verificado em centros urbanos que verticalizaram mais cedo, sem imposição de recuos obrigatórios, por exemplo, como no bairro de Copacabana na cidade do Rio de Janeiro. Entre estes, outros condicionantes urbanísticos orientaram decisões quanto à definição de determinados parâmetros morfológicos que serão discutidos mais adiante nesse capítulo.

A legislação municipal que rege o ato de construir na cidade de Maceió é fruto da aprovação do Plano Diretor (1982) e do Código de Obras pela Câmara de Vereadores, no ano de 1989. Esse instrumento legal foi revisto no ano de 1992, 2001, adquirindo sua forma atual (última atualização realizada em 2007).

A atual legislação urbanística para a cidade apresenta regras de parcelamento, uso e ocupação do solo urbano, indicando diretrizes de desenvolvimento urbano conforme vocação local de cada área da cidade. São apresentados parâmetros morfológicos e técnicos orientados de modo a atender exigências urbanísticas, ambientais, culturais, paisagísticas, sociais e econômicas.

A fim de definir as principais características e restrições quanto a ocupação e forma urbana da cidade, o território urbano de Maceió foi dividido em nove regiões administrativas que se subdividem em 31 zonas urbanas de ocupação (Figura 91).

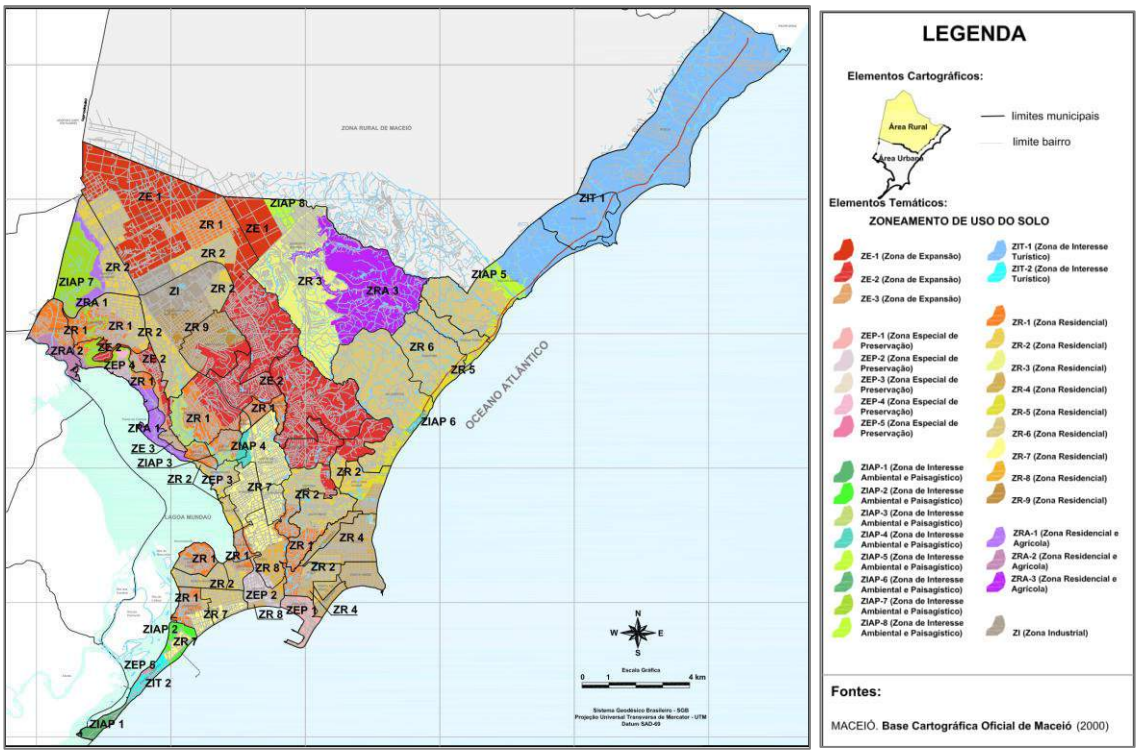


Figura 91: zoneamento de uso do solo urbano de Maceió. Fonte: PMM (2007).

Os diferentes usos normativos do solo urbano e seus respectivos parâmetros morfológicos restritivos serão na sequência do trabalho associados e discutidos na análise tipo-morfológica da próxima seção.

II.4.2.1. Os principais condicionantes da legislação urbanística

Entre os principais condicionantes urbanos e ambientais que definiram a elaboração do atual código edilício urbano de Maceió, foram: o cone do farol da marinha, o sombreamento dos logradouros, direito ao sol, diferenças de nível da topografia local, densidade e infra-estrutura. Esses condicionantes são discutidos a seguir.

- Cone do Farol da Marinha

Um dos principais condicionantes urbanísticos que tem definido o gabarito de vários bairros situados na baixada litorânea de Maceió, é o farol da marinha[45]. O farol de auxílio à navegação localiza-se em território militar, no bairro do Jacintinho, a uma cota de 55m em relação ao nível do mar. Sua distância horizontal à linha da costa é variável devido aos recortes do litoral. O mapa contendo o cone do farol e a área coberta por este é apresentado na Figura 92

No mapa nota-se a existência de dois eixos principais no sentido radial, tendo por centro o farol. Estes estão discriminados pelas letras A e B e são subdivididos em partes iguais. Cada uma dessas partes indica a cota em altura que as edificações podem atingir naquele determinado ponto. O eixo A coordena a área contida num ângulo de sessenta graus até encontro com o eixo B. A área

[45] Farol da Marinha local situado no bairro do Jacintinho (entre a planície litorânea e o tabuleiro). A fim de não ocultar o seu cone de luz de auxílio à navegação, o farol da marinha delimita a altura dos edifícios da orla da cidade, sendo os edifícios situados na beira-mar com altura máxima permitida de até 8 pavimentos. O cone do farol da marinha delimita a altura dos edifícios situados entre os bairros do Jaraguá e Cruz das Almas, principalmente na Região Administrativa 1 (ver mapa da Figura 91).

de abrangência do eixo B inicia a partir desse último até um ângulo de cento e vinte graus, contado no sentido horário.

Cada arco representado no mapa possui uma cota que corresponde a altura máxima que poderá atingir uma edificação naquela área. A altura permitida é reduzida conforme a proximidade com a linha costeira, formando um cone. Percebe-se, entretanto, que a linha costeira é interceptada em pontos diferentes por vários arcos, o que corresponde a limitações diferentes para a altura das construções a beira-mar. Como exemplo, identificamos no mapa os pontos 1 e 2. No ponto 1, a altura máxima permitida para uma edificação será de 20 metros, podendo alcançar em torno de cinco andares. Já no ponto 2, a altura máxima será de 34,80 metros, o que permite a existência de prédios com 11 pavimentos. As duas localizações analisadas encontram-se a beira-mar, e no entanto há diferença entre os limites impostos a cada uma pelo cone do farol (CRUZ, 2001).

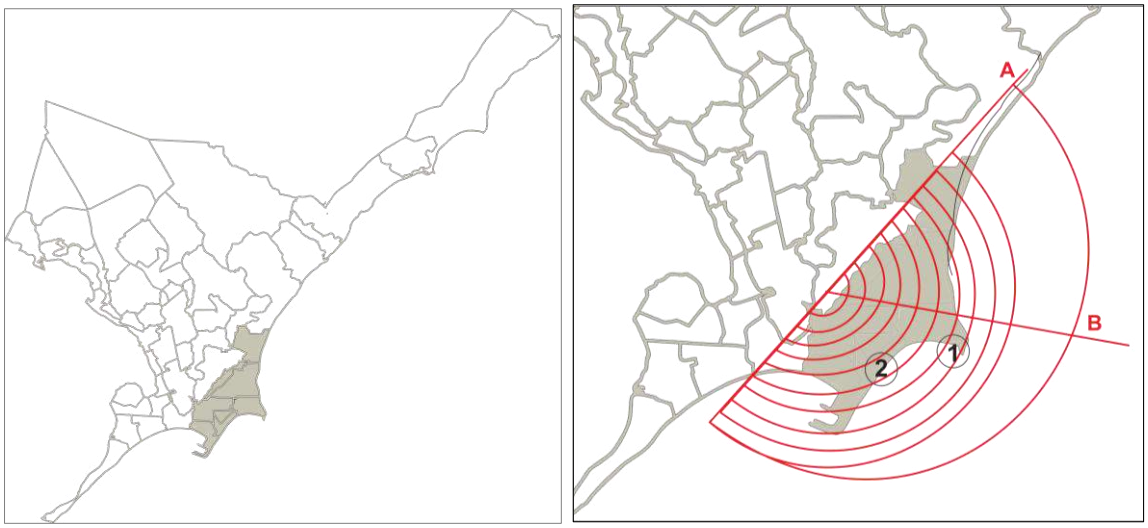


Figura 92: desenho esquemático do cone do farol de auxílio à navegação. Fonte: ilustração do autor.

Apesar do desenvolvimento da navegação por satélite, e o uso de sofisticados radares, o farol será sempre necessário para orientar aqueles que não dispõem de tais recursos tecnológicos ou em uma eventual pane nos instrumentos de navegação. O cone do farol, entretanto, não é um condicionante fixo e existe a possibilidade de ser alterado. Tanto pela mudança de localização do mesmo, como pela edificação de uma torre de maior altura. Tais soluções seriam de interesse exclusivo daqueles que representam os profissionais do mercado imobiliário e construtoras, o que só seria realmente vantajoso para os mesmos se a legislação voltasse a se basear no cone do farol como limite de altura para as edificações da orla marítima (CRUZ, 2001).

- Sombreamento dos logradouros

Em Maceió, uma cidade litorânea com forte apelo turístico, o uso de espaços para o lazer, como a praia, se estende até as últimas horas de sol do dia. Tal preocupação esteve presente quando das discussões da equipe que elaborou a primeira versão do plano diretor da cidade (1982). Praias urbanas que possuem em sua orla edificações de grande altura apresentam o problema de sombreamento precoce, como é o caso da praia de Boa Viagem, localizada na cidade do Recife, em Pernambuco (CRUZ, 2001)(Figura 93) e da praia de Copacabana no Rio de Janeiro.

Essa preocupação tem sido cada vez mais frequente e imposta nas regulamentações complementares em algumas capitais litorâneas, como no Rio de Janeiro (SMAC), impostas para os novos empreendimentos nos bairros da zona oeste (Barra da Tijuca e Recreio dos Bandeirantes).

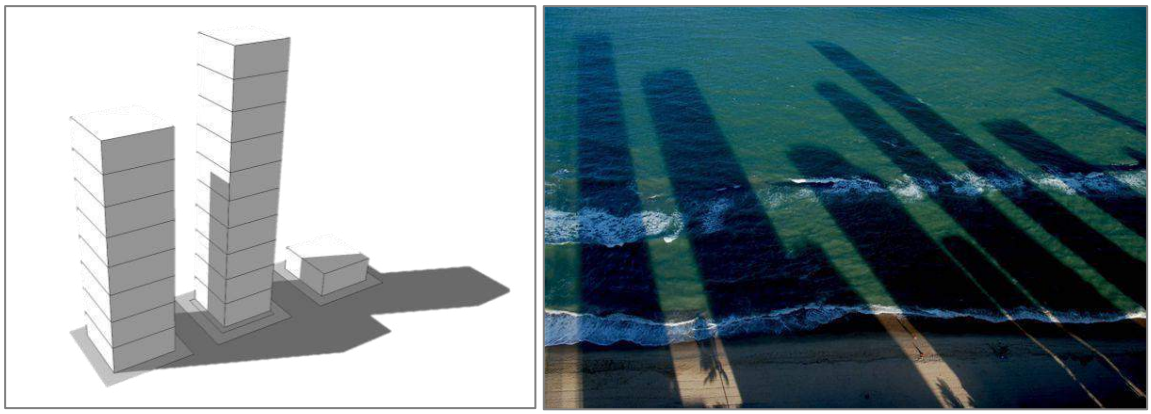


Figura 93: sombreamento dos edifícios e logradouros (Autor) e sombras dos edifícios verticais projetadas na praia de Boa Viagem, ena cidade de Recife. Fonte: Gabriel Mascaró (2010).

- Diferencial de nível entre região do tabuleiro e baixada litorânea

A diferença de cotas entre a região de tabuleiros e a planície litorânea, como será visto mais adiante (Figura 96), varia entre 40 a 50 metros. Preservar ao observador a percepção do relevo, fazendo com que o indivíduo pudesse utilizar-se de tal recurso como forma de orientação na cidade, também foi ponto de pauta nas discussões da comissão que elaborou o plano diretor da cidade (Figura 94). Evitar o que aconteceu em outras cidades, como Salvador, onde em muitos locais perde-se a noção da topografia natural devido à grande altura das edificações (CRUZ, 2001).

A vista do mar a partir da beira da encosta de bairros como Farol e Jacintinho foi outro aspecto considerado. Dessa forma, limitou-se o gabarito das edificações na baixada litorânea, de modo que estas não ultrapassassem a cota do *plateau*, permitindo a vista do mar àqueles que estivessem na parte alta da cidade.

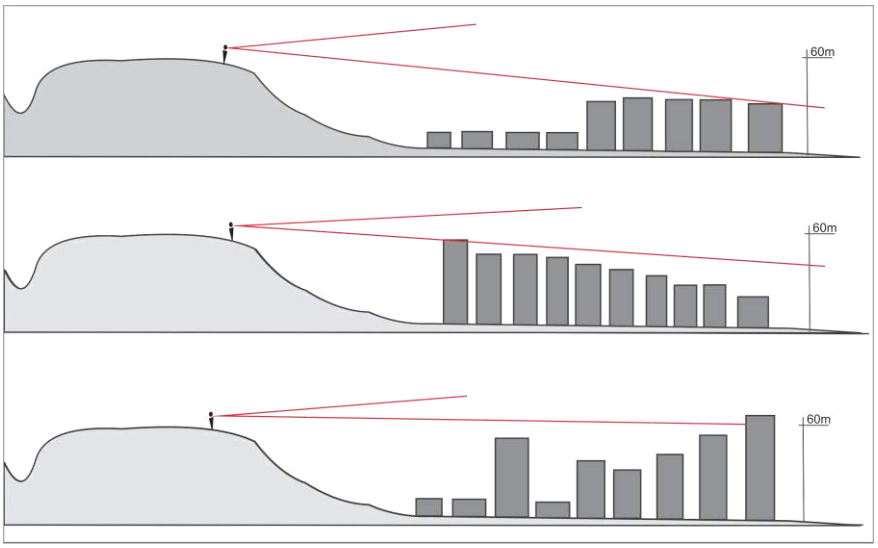


Figura 94: Diferencial de nível x altura das edificações. Fonte: adaptado de CRUZ (2001).

- Direito ao sol

Trata-se de um item muito relevante e de fundamental importância na qualidade, higiene e bom desempenho da habitação. Para preservar tal condição são utilizadas as fórmulas que estabelecem o recuo mínimo obrigatório, apresentadas na Tabela 8. Entretanto, a orientação do terreno não é

contemplada nessas fórmulas, não sendo, efetivamente, suficientes para garantir boas condições de insolação dos cômodos de uma edificação.

Há também na legislação municipal, um instrumento denominado de avanço compensatório. Trata-se de um recurso que permite ao projetista avançar sobre o recuo calculado na fórmula específica, desde que compense o avanço ampliando o recuo do lado oposto. Esse avanço pode ser realizado em até 50% de um plano de fachada, podendo avançar com a edificação até 1,50m do limite do lote nas laterais, 3,00m nos fundos e 5,00m na frente. Esse recurso pode resultar em edifícios vizinhos separados apenas por 3,00m de recuo entre suas fachadas laterais, o que dificulta bastante a iluminação natural dos apartamentos localizados nos primeiros andares (CRUZ, 2001).

Mais adiante nesse capítulo será apresentado o desempenho de tipologias de referência de Maceió e retomada a discussão sobre esses parâmetros.

- Densidade construída e infra-estrutura

A densidade populacional foi um dos temas abordados pela equipe que elaborou o Código de Urbanismo e Edificações da cidade, considerou ser necessário haver uma relação entre o índice adotado e a capacidade das redes de infra-estrutura que servem à região, a fim de evitar sobrecargas e, consequentemente a necessidade de ampliações.

No entanto, a crescente expansão do mercado imobiliário em alguns bairros da baixada litorânea tem causado problemas nos serviços básicos, como o abastecimento de água e energia elétrica. Os problemas relativos ao fornecimento de energia estão relacionados à saturação da rede, em função do aumento constante no consumo provocado pelo crescimento da densidade populacional da área, em função de sua verticalização. Houve a necessidade, recentemente, de ser construída uma nova subestação energética entre os bairros de Ponta Verde e Pajuçara, que iniciou sua operação já na capacidade máxima (CRUZ, 2001).

Assim, em decorrência do crescente adensamento do solo urbano esperado para os próximos anos nessas áreas e ao longo de toda a zona costeira da capital, fazem-se necessários estudos específicos sobre as principais problemáticas ambientais – tais como níveis de insolação, iluminação – e energéticas (consumo e produção local).

II.4.2.2. Os principais parâmetros restritivos do código

A fim de responder adequadamente aos condicionantes urbanos apresentados no item anterior, a atual legislação edilícia de Maceió estabelece em seu código alguns parâmetros restritivos. A seguir são apresentados os parâmetros de definição morfológica do conjunto de edificações urbanas e o impacto na malha urbana. Os parâmetros são os seguintes: número de pavimentos; taxa de ocupação; coeficiente de aproveitamento; afastamentos; área mínima; e testada.

(a) Número de pavimentos

É através do número de pavimentos que o código define a altura limite permitida aos edifícios. Por meio desse parâmetro é possível estabelecer o escalonamento condicionado pelo cone do farol da marinha, onde nas primeiras quadras da orla marítima essa altura não pode ultrapassar 8 pavimentos. Em outras zonas urbanas da cidade, esse limite pode ser de até 20 pavimentos, como é o caso dos lotes situados no bairro do Farol (parte alta da cidade).

O número de pavimentos definirá também o valor dos recuos progressivos exigidos para limitar a altura construída em algumas zonas urbanas (Tabela 8).

(b) Taxa de ocupação e Coeficiente de Aproveitamento do solo

A Taxa de Ocupação e Coeficiente de Aproveitamento são dois itens fundamentais na definição do perfil morfológico de ocupação da malha urbana. No código atual de urbanismo e edificação de

Maceió, a relação entre taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento é estabelecido de forma a condicionar o número de pavimentos a um percentual de ocupação da área do lote. Por exemplo, a taxa de ocupação máxima é fixada em 50% da área do lote para as UR-4 e 5 (Figura 95), e o coeficiente de aproveitamento é estabelecido em até 4 vezes a área desse lote. Observa-se que para ocupar a máxima área permitida do lote, o edifício comportaria no máximo 8 pavimentos. Dessa forma, o cômputo da área construída seria igual a quatro vezes a área total do lote. Caso se deseje edificar mais de oito pavimentos, é necessário diminuir a taxa de ocupação do lote para menos de 50%, a fim de não ultrapassar o coeficiente de aproveitamento 4.

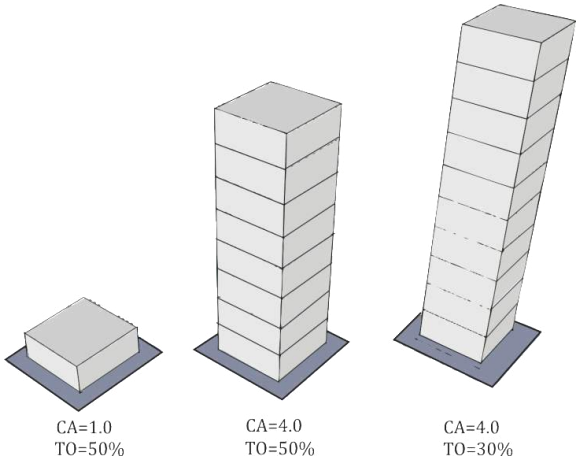


Figura 95: croqui esquemático mostrando a definição do parâmetro taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento. Fonte: ilustração do autor.

É relevante esclarecer que o binômio normativo "taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento" pode ser insuficiente para orientar a locação dos edifícios no lote. Corre-se o risco, por exemplo, de haver proximidade exagerada em algum dos lados do terreno, o que prejudicaria a qualidade ambiental das edificações vizinhas e do entorno urbano.

(c) Recuos mínimos e resultantes

Outro parâmetro restritivo do código é o afastamento. Neste são estabelecidos recuos mínimos obrigatórios relativos à frente, fundos e lateral do lote. Os recuos obrigatórios aumentam de acordo com o número de pavimentos do edifício e são calculados através de três fórmulas específicas, apresentadas a seguir:

Tabela 8 : fórmulas para cálculo dos recuos progressivos em edifícios verticais.

	FRONTAL	FUNDOS	LATERAL
Fórmulas para cálculo dos recuos mínimos obrigatórios	$5 + \left(\frac{n-2}{2}\right)$	$3 + \left(\frac{n-2}{2}\right)$	$1{,}5 + \left(\frac{n-2}{2}\right)$
n: Número de pavimentos Obs. é permitido avançar 1,00 m nos recuos frontal e fundos e 0,5 m nas laterais a partir do primeiro andar.			

Fonte: Código de Obras da Cidade de Maceió, 2007.

Tais fórmulas foram estabelecidas a fim de preservar o direito às condições de iluminação e ventilação natural da habitação e da área urbana. Estes aspectos serão melhor explicitados adiante.

Vale ainda ressaltar que nenhum desses parâmetros ou valores atribuídos foi estabelecido baseando-se em evidências ou estudos técnicos, apenas no bom-senso e recomendações qualitativas (CRUZ, 2001).

(d) Área mínima e testada do lote

Para determinados usos, como no caso ainda das UR-4 e 5 (áreas de bastante interesse à verticalização), são definidos valores mínimos de área do lote para cumprimento das restrições acima mencionadas. Nos bairros de Ponta verde e Jatiúca o lote mínimo exigido é de 450m² com testada a partir de 15m. Linha limítrofe entre o lote e o logradouro público que coincide com o alinhamento.

II.4.3. Análise tipo-morfológica

Antes das definições e do tratamento das características tipo-morfológicas urbanas que são necessárias para subsidiar análises posteriores sobre o desempenho de tipologias construídas de Maceió, faz-se necessário apresentar uma descrição sobre a morfologia do sitio natural e a estrutura global do tecido urbano da cidade.

Conforme indica Barbirato (1998), a configuração do relevo da cidade de Maceió se apresenta, basicamente, em três planos distintos (Figura 96 e Figura 97):

(i) região formada pela Planície Costeira, pela restinga de Maceió e pelo ambiente lagunar. Sua altitude varia entre 2 a 4 metros acima do nível do mar, e forma a chamada "baixada litorânea" (primeiro plano);
(ii) região ocupada pelo centro da cidade, conhecida como terraço estrutural do centro, com altitudes entre 8 e 10 metros acima do nível do mar (segundo plano);
(iii) região de tabuleiro, com cotas entre 40 a 50m acima do nível do mar, constituindo a chamada parte alta da cidade (terceiro plano).

A variação entre os três diferentes planos que marcam o relevo da cidade de Maceió é mostrado a seguir, em um perfil extraído do Mapa Geotécnico de Maceió (1987) (Figura 96) e no mapa (Figura 97), que mostram também o desnível resultante dessa conformação com a grota e a encosta. As regiões de grota e encostas são, muitas vezes, ocupadas por assentamentos humanos precários e/ou informais.

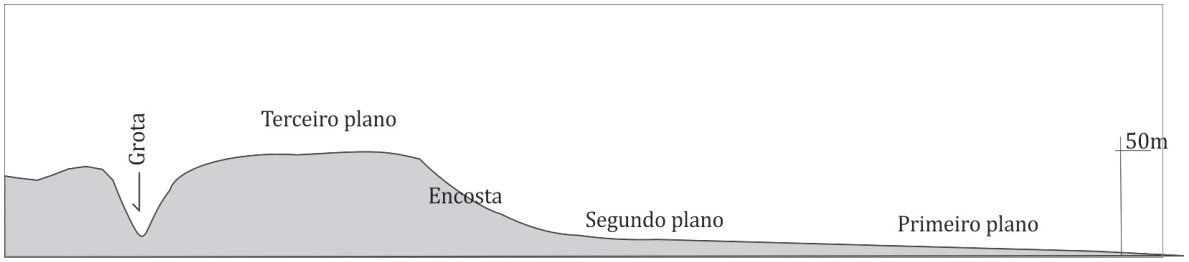


Figura 96: esquema dos três planos de relevo de Maceió. Fonte: ilustração do autor.



Figura 97: relevo da zona urbana do município de Maceió. Fonte: Adaptado de Base Cartográfica PMM (2001).

O traçado urbano dos principais eixos viários é radial, tendo como ponto de convergência o Centro da Cidade, um dos dois primeiros bairros de ocupação urbana de Maceió. A partir deste, partem eixos de ligação com o tabuleiro (avenida Fernandes Lima), o litoral norte (avenida Gustavo Paiva) e a planície lagunar (avenida Siqueira Campos).

O traçado original do centro da cidade é irregular, com ruas estreitas, por vezes tortuosas e com edificações construídas no limite dos lotes, tendo estreita testada e profundidade. Os loteamentos que surgiram a partir da década de 50, passaram a apresentar características mais regulares de traçado, em plano ortogonal e com lotes inicialmente pequenos de 15x30m, como o primeiro loteamento à beira-mar, Álvaro de Otacílio, que se estendia da praça Lyons até o Alagoas Iate Clube (CAVALCANTE, 2000), destinado à construção de residências de classe média.

II.4.3.1. Densidade construída e forma urbana de Maceió

A fim de caracterizar o perfil tipo-morfológico presente no tecido urbano de Maceió, os dados urbanos dessa cidade foram analisados e tratados. Vale ressaltar a dificuldade de disponibilização dos dados de cadastros territoriais da maioria das cidades brasileiras, inclusive Maceió, que consiste ainda em importante barreira para realização de pesquisas em urbanismo. Dados estes que quando existentes e disponibilizados, apresentam, muitas vezes, importante defasagem temporal. Os dados de Maceió utilizados nesse trabalho foram fornecidos pela Secretaria de Planejamento do Estado de

Alagoas (SEPLANDE). Os únicos dados vetoriais existentes na época da coleta para este trabalho consistiam em cadastros realizados no ano de 2005, em formato dwg (CAD), com camadas de construções, quadras, ruas e lotes.

Conforme já apresentado na seção anterior, por meio de um SIG (ArcMAP/ArcGIS®), foi possível converter e tratar estes dados em *shapefile* (arquivo de forma), o que também permitiu identificar algumas imprecisões no banco de dados vetoriais obtidos. Por exemplo, algumas áreas dos edifícios, quando da conversão em SHP (*shapefile*), apresentavam incorreções (áreas negativas ou muito pequenas), alguns polígonos foram abertos e diferentes tipos de superfícies (edifícios, estradas, vegetação) foram sobrepostos. Para evitar essas falhas, foram empregados alguns testes automáticos para filtrar as informações incoerentes, conservando somente aqueles que têm um significado físico relevante.

Aplicando as rotinas de cálculo criadas no ArcMAP® foi possível calcular os indicadores morfológicos (de densidade e forma) para o conjunto de dados de Maceió. Os indicadores considerados nessa análise foram descritos na seção anterior.

Conforme a metodologia já descrita (ver II.3), os indicadores foram calculados inicialmente para três malhas de resoluções diferentes (bairro, 500m e 250m).

Como pode ser verificado (ver **ANEXO C**), a análise e a classificação morfológica do tecido urbano de Maceió pela repartição atual de bairros, pode apresentar-se inadequada, visto a diversidade tipológica verificada ao longo destes últimos oito anos em alguns bairros. Um exemplo evidente desta constatação pode ser verificado nos resultados em uma estatística básica – com alguns parâmetros importantes relacionados com a densidade (e.g. altura média, coeficiente de aproveitamento e taxa de ocupação) – indicando o desvio padrão da altura média ponderada nos bairros situados nas centralidades litorâneas da cidade, tais como Ponta Verde, Jatiúca e Pajuçara. O desvio padrão indicou uma variação bastante importante entre as construções encontradas nesses bairros, o que pode ser justificado pelo processo acelerado de verticalização, onde existem edificações de grande altura, tendo ainda em sua vizinhança uma significativa fração de tipologias individuais.

Também, nessa análise estatística preliminar, comparando-se os resultados obtidos para as duas resoluções consideradas (malhas de 250m e 500m), verifica-se que há uma maior adequação com a malha intermediária de 500m (Tabela 9).

Tabela 9: resultados estatísticos dos dados de densidade para o tecido urbano de Maceió em duas resoluções de malha de cálculo.

Parâmetro	Observações		Mínimo		Máximo		Média		Desvio padrão	
	250	**500**	**250**	**500**	**250**	**500**	**250**	**500**	**250**	**500**
Altura média	2163	694	3,00	3,00	35,0	23,7	5,80	5,81	**2,77**	**2,51**
Densidade construída	2163	694	1,00	1,00	11,1	7,90	1,70	1,69	**0,93**	**0,84**
Coeficiente de aproveitamento	2163	694	0,00	0,00	3,50	0,60	0,27	0,11	**0,36**	**0,13**
Taxa de ocupação do solo	2163	694	0,00	0,00	0,70	2,10	0,15	0,21	**0,30**	**0,15**

Por meio do cálculo dos indicadores para esta malha selecionada, contendo então 694 células de análise, foi possível produzir alguns mapas temáticos com alguns importantes indicadores morfológicos para Maceió (Figura 98). Apresentam-se abaixo seis mapas temáticos, representando o coeficiente de forma (ou indicador de compacidade), a contiguidade, o coeficiente de aproveitamento, a porosidade, verticalidade e a rugosidade da malha, que caracterizam a forma urbana construída em Maceió (Figura 98).

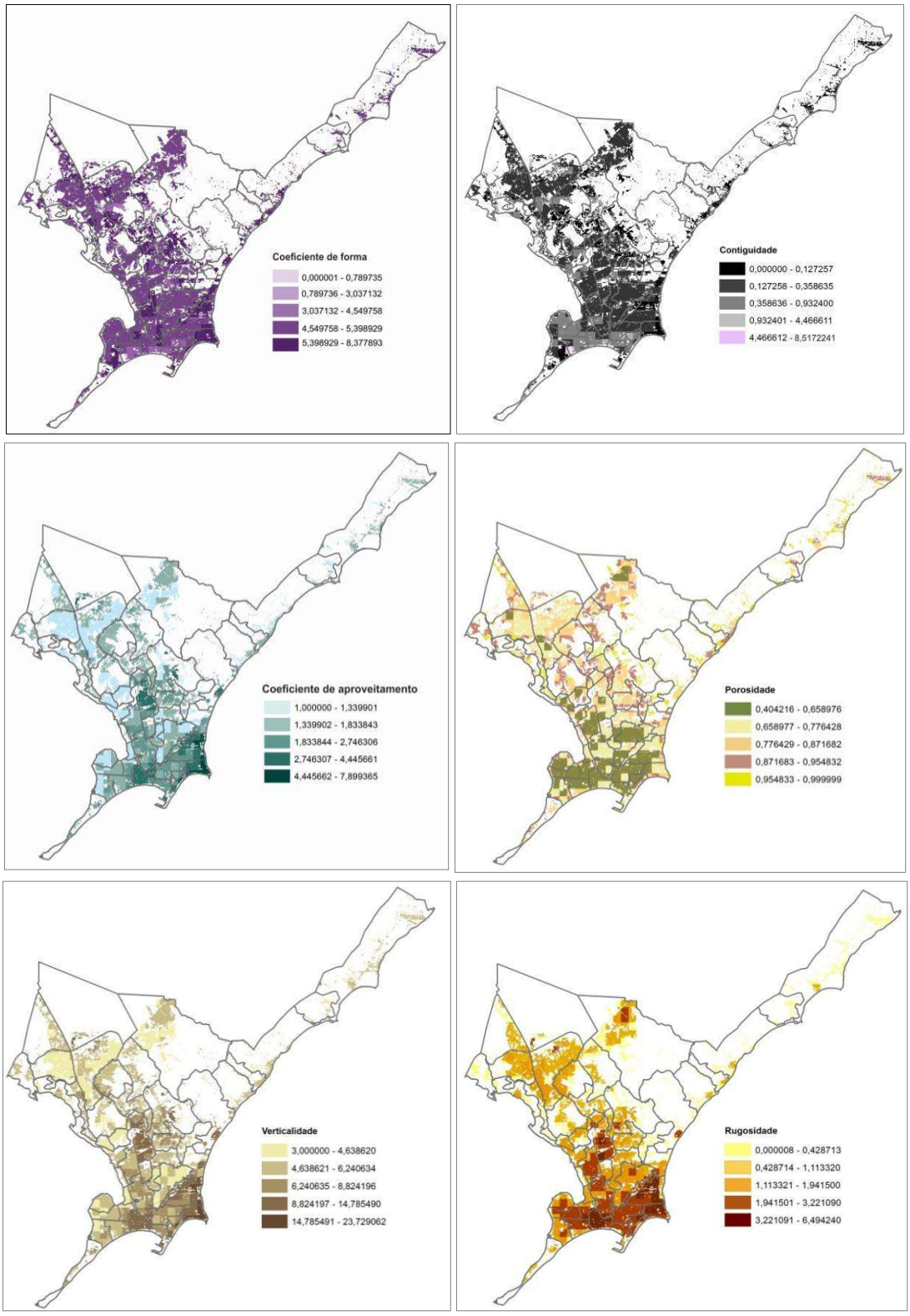


Figura 98: mapeamento da forma urbana de Maceió segundo alguns parâmetros morfológicos estudados.

O primeiro mapa apresenta uma caracterização do indicador coeficiente de forma, para as construções urbanas de Maceió. Este atributo descreve para a escala urbana a relação da superfície

das envoltórias expostas ao exterior, em relação aos volumes construídos (Tabela 7). Conforme já discutido anteriormente, quanto maior for este indicador, maior será a superfície exposta ao exterior, maior o aporte solar das fachadas, maior também a disponibilidade de luz natural nas mesmas. Este indicador é pertinente para o estudo do desempenho termo-energético dos edifícios, influenciando no cálculo teórico da demanda de energia (SALAT, 2011) (APUR, 2007) (ADENE., 2008) (CARLO e LAMBERTS, 2010).

Observa-se que, globalmente, para o tecido urbano de Maceió, o coeficiente de forma apresenta valores relativamente expressivos, (5,38 - 8,37) nos bairros situados nas centralidades da planície litorânea; e (0,70–5,03) nos bairros de maior densidade construída ao solo (maior taxa de ocupação do solo), como o centro da cidade e os bairros situados na orla lagunar, com a presença de edificações geminadas. De forma complementar, é possível verificar resultado similar para os valores do indicador de contiguidade. No entanto, convém se distinguir a contiguidade horizontal da vertical. Nos bairros situados na baixada litorânea, as novas construções verticais apresentam menor contiguidade horizontal (dado aos recuos obrigatórios impostos pelo código de urbanismo), mas por outro lado apresentam forte contiguidade vertical. Ou seja, na escala da unidade habitacional haverá menos superfícies de cobertas expostas ao exterior, dada a sobreposição de pavimentos em torres verticais. Característica que atuará de forma determinante no desempenho energético dos edifícios.

O terceiro mapa da sequência mostra as regiões mais ou menos adensadas da cidade, dadas pelo coeficiente de aproveitamento do solo. Em virtude do forte processo de verticalização das zonas da orla marítima da cidade, estas têm áreas mais densamente construídas, verticalizadas e, portanto, mais rugosas.

O quarto mapa hierarquiza valores referentes à porosidade da malha urbana, destacando-se áreas da baixada litorânea até o litoral norte, bem como regiões da periferia situadas no tabuleiro da cidade. Isto é dado, de um lado, aos espaços livres existentes e afastamentos dos edifícios verticais da classe 4, e do outro, à existência de edificações individuais dispersas em alguns bairros residenciais situados nas periferias da cidade.

Quanto à rugosidade, os valores mais importantes são obtidos para as áreas mais adensadas verticalmente e horizontalmente, nos conjuntos modernos da orla marítima ou no centro da cidade. As menos expressivas podem ser identificadas nos tecidos horizontais da periferia da cidade (horizontal disperso). A porosidade e rugosidade caracterizam o efeito global do tecido urbano no incremento ou na redução da velocidade média do vento, respectivamente, responsáveis por alterar significativamente a forma de deslocamento das massas de ar na trama urbana.

II.4.3.2. Cartografia de tipo-morfologias de Maceió

Com o intuito de identificar quais seriam os tipos morfológicos predominantes no tecido urbano de Maceió, os conjuntos de resultados obtidos foram analisados por meio de determinados métodos básicos de estatística, conforme já descritos no item II.3.4. Foram utilizados, a análise de correlação entre os indicadores, a análise de componentes principais (ACP) e, por fim, uma análise de agrupamento em classes tipológicas (*k-means*), permitindo a elaboração de uma cartografia de morfologias urbanas no tecido urbano.

Inicialmente foi analisada a matriz de correlação entre os indicadores calculados para as 694 zonas da malha (Tabela 10), a fim de observar se os mesmos são estatisticamente relacionados ou não. Observa-se que as correlações são, muitas vezes, bastante fortes entre certas variáveis, como destacado na cor laranja na matriz abaixo. O coeficiente de correlação é uma medida estatística destinada a quantificar a intensidade de uma relação linear entre duas variáveis. O coeficiente de correlação utilizado aqui é o coeficiente de *Pearson (r).* Este consiste em medida da variância

compartilhada entre duas variáveis. Existem outros tipos de correlação (e.g. correlação parcial), mas este não será considerado no trabalho devido ao relativamente grande número de variáveis estudadas.

Com esta análise estatística preliminar, realizam-se as primeiras observações sobre a relação, a intensidade e o tipo dessa relação (correlação fraca, moderada, perfeita - inversa ou direta) entre os indicadores. Apenas após as análises de ACP (a seguir), as variáveis que apresentarem informações redundantes poderão ser efetivamente eliminadas a fim encaminhar os dados morfológicos com mais consistência às análises de classificação por agrupamento estatístico (*clustering analysis*) do tecido urbano.

De acordo com os resultados obtidos, observam-se correlações bastante elevadas entre determinadas variáveis, como a altura ponderada e o coeficiente de aproveitamento (r = 0,99), o que era de se esperar, dada a estreita relação existente entre suas definições. Os elevados valores de correlação resultam, portanto, do fato de que certas variáveis possuem uma forte dependência entre elas. Valores intermediários indicam uma correlação moderada entre as variáveis, como a altura média ponderada e o volume construído (r=0,51), pois este último dependerá também de sua relação com a variável área construída. Da mesma forma, o desvio padrão da altura e a rugosidade do terreno terão uma correlação moderada (r=0,52), pois o primeiro define apenas o grau de heterogeneidade da altura, que pode corresponder a um tecido maior ou menor altura de rugosidade. Enquanto a rugosidade dependerá mais fortemente do indicador que define o volume construído (r=0,98). Outras variáveis possuem importante correlação negativa, como a porosidade e a rugosidade (r = -0,89). As características das variações obtidas entre alguns desses indicadores mencionados podem ser melhor examinadas nos gráficos da Figura 99 e Figura 101.

Ressalta-se que essas análises são, entretanto, relações estatísticas lineares que permitem examinar a força de relação (e a forma de variação) dos indicadores dois a dois, possibilitando extrair apenas algumas observações em termos morfológicos. Mais adiante, no Capítulo III, a magnitude de efeito de todos os indicadores serão examinados individualmente e por efeito de interação entre si, face às diferentes respostas climáticas de interesse (insolação e iluminação das superfícies construídas).

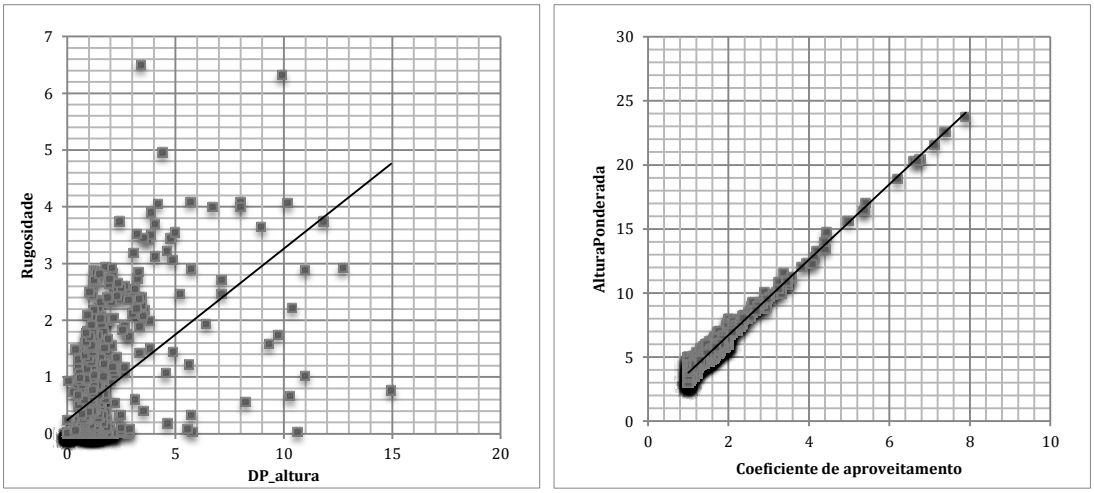


Figura 99: correlação linear entre os indicadores de: desvio padrão da altura e rugosidade (r=0,52); e coeficiente de aproveitamento e altura ponderada (r=0,98).

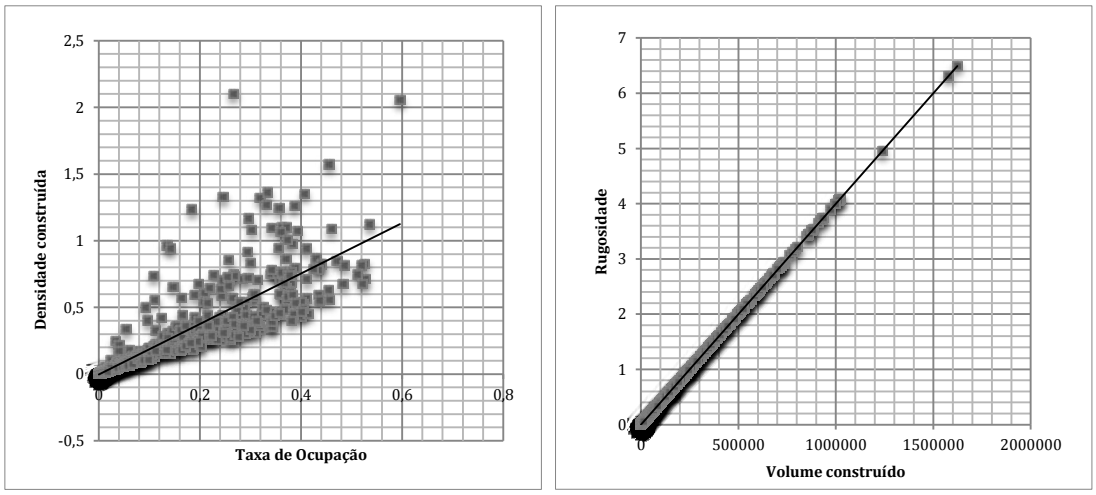


Figura 100: correlação linear entre os indicadores de: densidade total construída e taxa de ocupação (r=0,85); e rugosidade e volume construído (r=0,99).

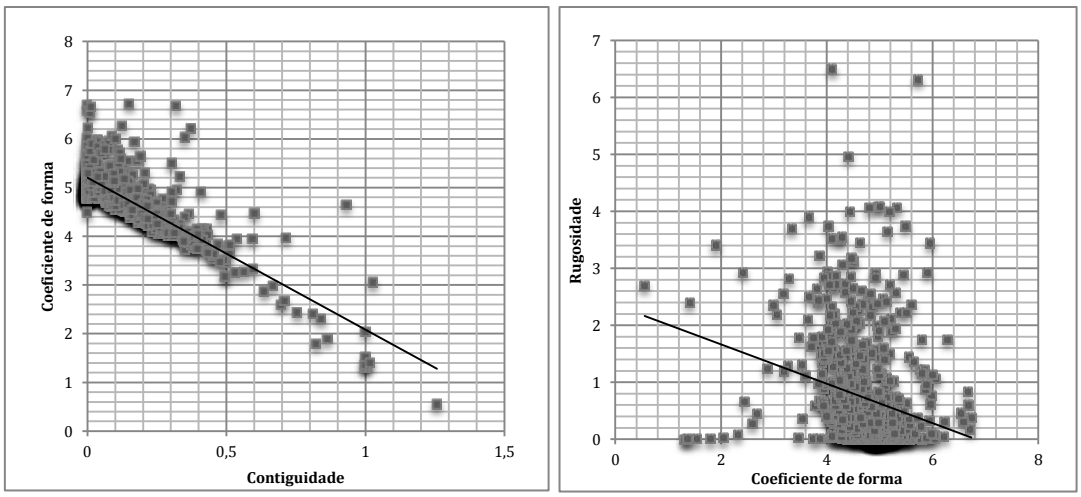


Figura 101: correlação linear entre os indicadores de: coeficiente de forma e contiguidade (r=-0,85); e rugosidade e coeficiente de forma (r=-0,23).

Tabela 10: Matriz de correlação para os parâmetros morfológicos aplicados ao tecido urbano de Maceió.

Variáveis	Nº Construções	Volume Construído	Desvio Padrão Altura	Área total construída	Taxa de Ocupação	Porosidade	Área de vazios	Densidade construída	Rugosidade	Coef. Aproveitamento	Contiguidade	Coeficiente de forma	Altura ponderada	Área Média construída
Nº Construções	1,00													
Volume Construído	0,68	1,00												
Desvio Padrão Altura	0,04	0,52	1,00											
Área total construída	0,63	0,98	0,55	1,00										
Taxa de Ocupação	0,91	0,89	0,22	0,85	1,00									
Porosidade	-0,91	-0,89	-0,22	-0,85	-1,00	1,00								
Área de vazios	-0,91	-0,89	-0,22	-0,85	-1,00	1,00	1,00							
Densidade construída	0,63	0,98	0,55	0,98	0,85	-0,85	-0,85	1,00						
Rugosidade	0,68	0,98	0,52	0,98	0,89	-0,89	-0,89	0,98	1,00					
Coef. Aproveitamento	-0,03	0,51	0,90	0,55	0,18	-0,18	-0,18	0,55	0,51	1,00				
Contiguidade	0,11	0,11	0,01	0,10	0,13	-0,13	-0,13	0,10	0,11	0,01	1,00			
Coeficiente de forma	-0,47	-0,24	0,13	-0,21	-0,37	0,37	0,37	-0,21	-0,23	0,12	-0,85	1,00		
Altura ponderada	-0,03	0,51	0,90	0,54	0,18	-0,18	-0,18	0,54	0,51	0,99	0,01	0,20	1,00	
Área Média construída	-0,11	0,18	0,40	0,20	0,02	-0,02	-0,02	0,20	0,18	0,50	0,03	0,20	0,51	1,00

(a) Resultado da primeira ACP

Para o processo inicial de identificação dentre as 14 variáveis (ou indicadores) indicados na Tabela 7, aquelas de real interesse para o trabalho, estas foram inicialmente analisadas entre si por meio de uma primeira análise de componentes principais (ACP). Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 102, onde é possível observar o autovalor[46] relativo às variáveis analisadas estatisticamente. A observação do diagrama de autovalores permite conservar aqueles situados acima do ponto de ruptura da queda da curva da função que relaciona a ordem e os autovalores. Assim, se dois fatores são associados a autovalores quase iguais, eles representam a mesma proporção de variabilidade e não há motivo, a princípio, de conservar um e não outro. Inversamente, uma forte diminuição entre dois autovalores sucessivos, leva a conservar na interpretação os fatores que a precederam (CATTELL, 1966).

Verifica-se que o primeiro eixo (F1 ou componente principal *1*) explicou 56,1% da variabilidade total dos dados, e as variáveis que tiveram maior peso na sua constituição foram, em ordem decrescente, o *volume construído*, a *rugosidade*, a *densidade construída* e a *taxa de ocupação*. Ou seja, entre as variáveis que atingiram maior valor, destacam-se a densidade construída e a taxa de ocupação do solo. Nota-se que esta componente principal explicou bem os agrupamentos em função de características relacionadas a densidade da forma construída na cidade (Tabela 11).

O segundo eixo (F2 ou componente principal *2*) explicou, por sua vez, 21,5% da variabilidade total dos dados e as variáveis mais importantes nisso foram, *coeficiente de aproveitamento* (CA), *altura ponderada* e *desvio-padrão da altura* (DP_altura). Como nesse caso, os valores mais altos foram obtidos com as variáveis de altura e CA, essa componente diferenciou bem os agrupamentos em função da verticalidade do tecido urbano. Juntas, as duas primeiras componentes principais contribuem para 77% da variabilidade dos dados.

[46] Quando se analisa os autovalores de um conjunto de dados, consegue-se conhecer de que forma as variâncias da matriz de correlações estão distribuídas. Em outras palavras, os autovalores representam o quanto da variância é explicada por cada fator.

O terceiro eixo (F3 ou componente principal 3) explicou ainda 14,9% da variabilidade dos dados e foi definido pelos indicadores de *coeficiente de forma* e *contiguidade*. Como essas variáveis são as mais elevados, essa componente pôde diferenciar o agrupamento em função da área de envoltória exterior das construções. Conforme visto anteriormente, esses indicadores caracterizam a superfície exterior do envelope em relação ao volume construído e a superfície de envoltória exterior em relação às superfícies contíguas (adjacentes a outros edifícios), respectivamente. Ao lado das duas primeiras, as três componentes principais explicam **91% da variabilidade** total dos dados.

O quarto eixo (F4) explica 5,3% da variabilidade dos dados e foi definido principalmente pelo indicador de *densidade*. E o quinto eixo (F5) explicou, por fim, apenas 2,1% da variabilidade, definido pelos indicadores *volume construído* e *rugosidade*, que conforme visto anteriormente, apresentam uma correlação bastante forte entre si. As cinco componentes explicam, portanto cerca de 98% da variabilidade dos dados morfológicos.

Examinando a curva decrescente de autovalores, é possível verificar que a curva diminui significativamente, chegando à uma variabilidade quase nula para os demais eixos, principalmente a partir da quinta variável (F5), o que levou a não inclusão dos demais vetores, F6 até F14, nas análises seguintes: segunda ACP e análise de agrupamento.

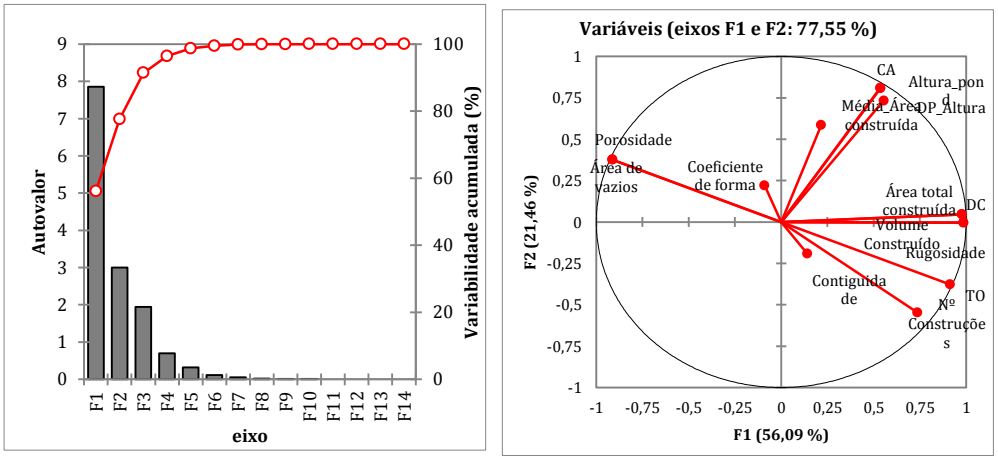


Figura 102 : representações gráficas da primeira ACP.

Tabela 11 : auto-vetores e pesos de cada variável para constituição das componentes principais da primeira ACP.

Indicadores da morfologia urbana	F1	F2	F3	F4	F5
Porosidade	-0,350	0,211	0,055	0,072	0,098
Área de vazios	-0,350	0,211	0,055	-0,072	-0,098
Coeficiente de forma	-0,037	0,126	**-0,695**	-0,072	-0,098
Contiguidade	0,056	-0,108	**0,696**	-0,073	-0,405
Média_Área construída	0,082	0,340	0,071	-0,054	-0,350
Coeficiente de aproveitamento	0,201	**0,471**	0,063	-0,148	0,126
Altura_ponderada	0,202	**0,470**	0,064	0,016	-0,002
DesvioPadrão_Altura	0,209	**0,427**	0,050	0,046	-0,006
Nº Construções	0,286	-0,310	-0,076	-0,131	0,143
Taxa de ocupação	**0,350**	-0,211	-0,055	-0,054	-0,350
Densidade construída	**0,369**	0,032	-0,023	**0,926**	-0,018
Rugosidade	**0,373**	0,003	-0,026	0,092	**0,630**
Volume Construído	**0,373**	0,003	-0,026	-0,258	**0,357**

(b) Resultados da segunda ACP

A partir das cinco componentes principais conservadas como mais relevantes na variabilidade dos dados obtidos na primeira análise, uma segunda ACP foi lançada, a fim de refinar a análise e eliminar possíveis redundâncias nas informações proporcionadas pelos fatores (Figura 103).

Verifica-se que o primeiro eixo (F1 ou componente principal *1*) dessa nova ACP, explicou 52% da variabilidade total dos dados, e as variáveis que tiveram maior peso na sua constituição foram, a *densidade construída* e a *rugosidade* (Tabela 12).

O segundo eixo (F2 ou componente principal *2*) explicou, por sua vez, 32,7% da variabilidade total dos dados e as variáveis mais importantes na sua constituição foram, a *contiguidade* e a *coeficiente forma*. Juntas, as duas primeiras componentes principais contribuem agora para 85% da variabilidade dos dados, apresentando, portanto, uma variabilidade acumulada entre os dois primeiros eixos mais representativa que na primeira ACP (Figura 103). Essa variabilidade acumulada indica um bom compromisso entre a **redução no número de componentes** (e indicadores morfológicos) e a **quantidade de informação** fornecida por estes (informação traduzida pela variabilidade dos dados proporcionada por cada uma).

E o terceiro eixo contribui ainda com 14% da variabilidade dos dados sendo constituído principalmente pelo fator altura ponderada. Juntas, as três componentes somam 98% dessa variabilidade.

O indicadores mais influentes conservados para a análise de agrupamento estão destacados em negrito na Tabela 12 abaixo, a saber: o *coeficiente de forma*, *contiguidade*, *densidade construída*, *rugosidade* e *altura ponderada*.

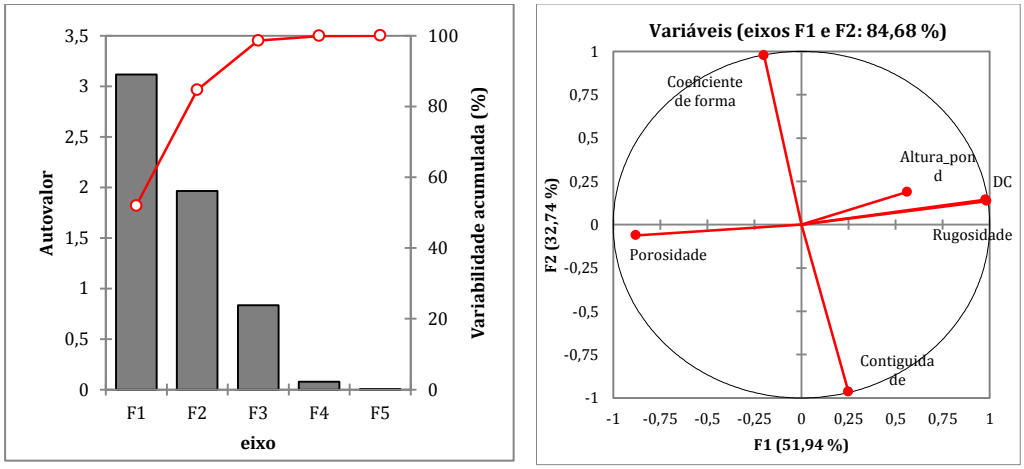


Figura 103: representações gráficas da segunda ACP.

Tabela 12 : auto-vetores e pesos de cada variável para constituição das componentes principais da segunda ACP.

	F1	F2	F3	F4	F5
Porosidade	-0,499	-0,044	0,466	0,721	0,059
Contiguidade	0,141	**-0,688**	0,074	-0,043	0,705
Coeficiente de forma	-0,113	**0,697**	-0,051	-0,053	0,702
Altura_ponderada	0,318	0,135	**0,876**	-0,334	-0,045
Rugosidade	**0,557**	0,097	-0,082	0,337	0,063
Densidade construída	**0,555**	0,103	-0,030	0,501	-0,021

(c) Análise de agrupamento

Conforme já discutido anteriormente (ver seção II.3.4), a análise de agrupamento (*clustering analysis*) consiste em agrupar automaticamente um amplo conjunto de dados num número menor de subgrupos ou classes, de modo que os dados agrupados sejam o mais estatisticamente similares possível entre si, baseado nos indicadores dos dados comparados (nesse caso, os indicadores definidos nas ACPs anteriormente). As ACPs no tópico anterior mostraram a capacidade de variabilidade dos dados de cada componente e do conjunto de indicadores morfológicos. São estes indicadores que permitirão, nessa etapa, melhor distinguir os grupos (*clusters*).

Para a análise de agrupamento dos mesmos dados, foram realizadas cinco iterações com dez repetições, convergindo a uma variância intraclasse de 20,55 e uma variância interclasse de 2,13 (Determinante=0,006). Na Tabela 13 abaixo pode ser encontrada uma síntese dessas informações por classe.

Em outras palavras, o método estatístico permitiu agrupar, portanto, células da malha de análise que apresentavam características morfológicas mais próximas, destacando a cada vez uma célula de referência que melhor representava um determinado conjunto de indicadores.

Tabela 13: resumo das iterações realizadas na análise de agrupamento.

Classe	**1**	**2**	**3**	4	**5**
Número de objetos	260	59	223	17	135
Variância intraclasse	0,71	1,02	4,11	16,26	4,23
Distância mínima ao centroide	0,09	0,17	0,33	0,68	0,34
Distância média ao centroide	0,77	0,89	1,31	3,55	1,82
Distância máxima ao centroide	1,64	2,74	17,61	7,86	4,34

Para cada uma dessas cinco classes estatísticas indicadas pelo método, foi possível descrevê-las atribuindo termos classificatórios correntes da literatura em morfologia urbana (ver Tabela 14).

Tabela 14 : cinco classes tipológicas urbanas segundo os cinco componentes principais.

Classe	Altura média ponderada	Coeficiente de forma	Contiguidade	Rugosidade	Densidade Construída (DC)
1 Horizontal disperso	4,223	4,75	0,071	0,104	0,08
2 Vertical baixo	9,112	5,18	0,022	0,252	0,88
3 Colonial contínuo	6,294	3,87	0,385	2,735	2,38
4 Vertical alto	17,042	4,94	0,226	1,578	4,15
5 Horizontal denso	5,157	3,66	0,036	1,714	0,75

Um gráfico bidimensional destaca a repartição obtida a partir da distribuição das células da malha de análise empregando dois indicadores, a *altura média ponderada* (eixo abcissas) e a *rugosidade* (eixo ordenadas) (Figura 104), de modo a determinar visualmente os segmentos.

Na sequência, essa classificação juntamente aos dados foram retornados à tabela de atributos no ArcGIS, (onde para cada célula da malha foi atribuída sua classe/grupo correspondente), a fim de ilustrar cartograficamente a distribuição das classes morfológicos na malha urbana de Maceió, conforme mostra a Figura 105. Nessa mesma figura ilustra-se também recortes da malha representativos de cada classe.

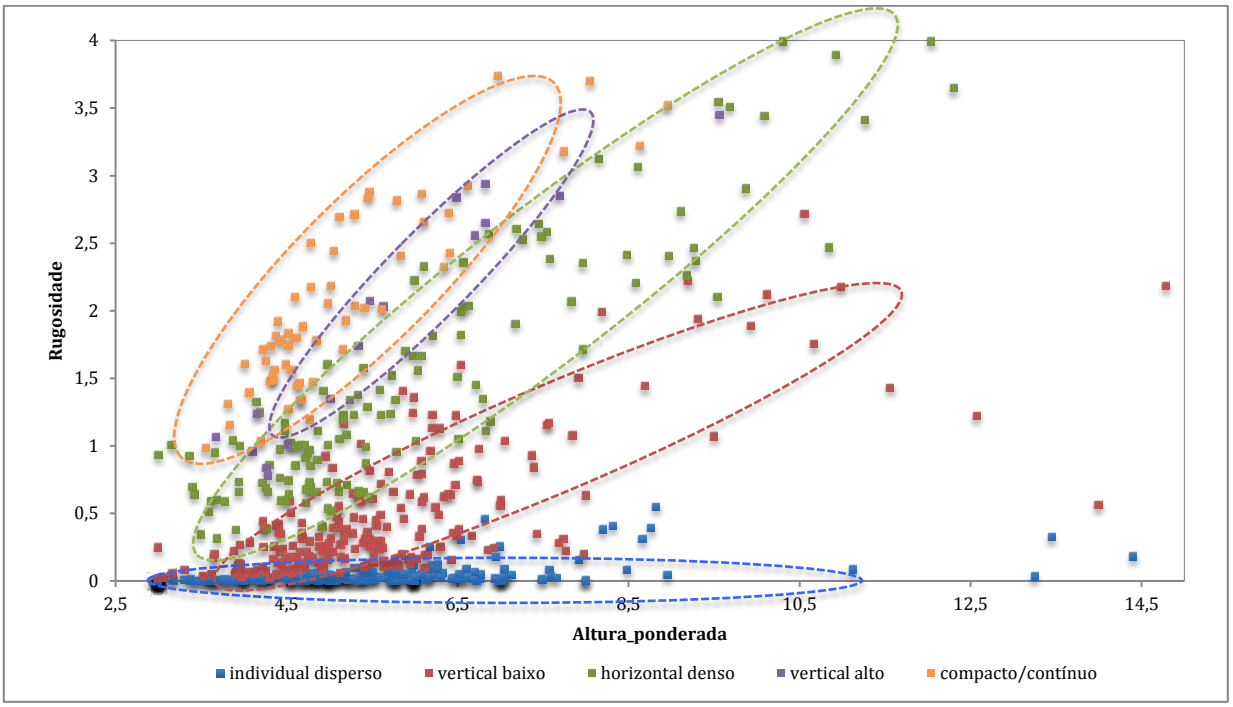


Figura 104: agrupamento estatístico em classes (morfológicas de referencia) em função dos indicadores da altura ponderada e da rugosidade.

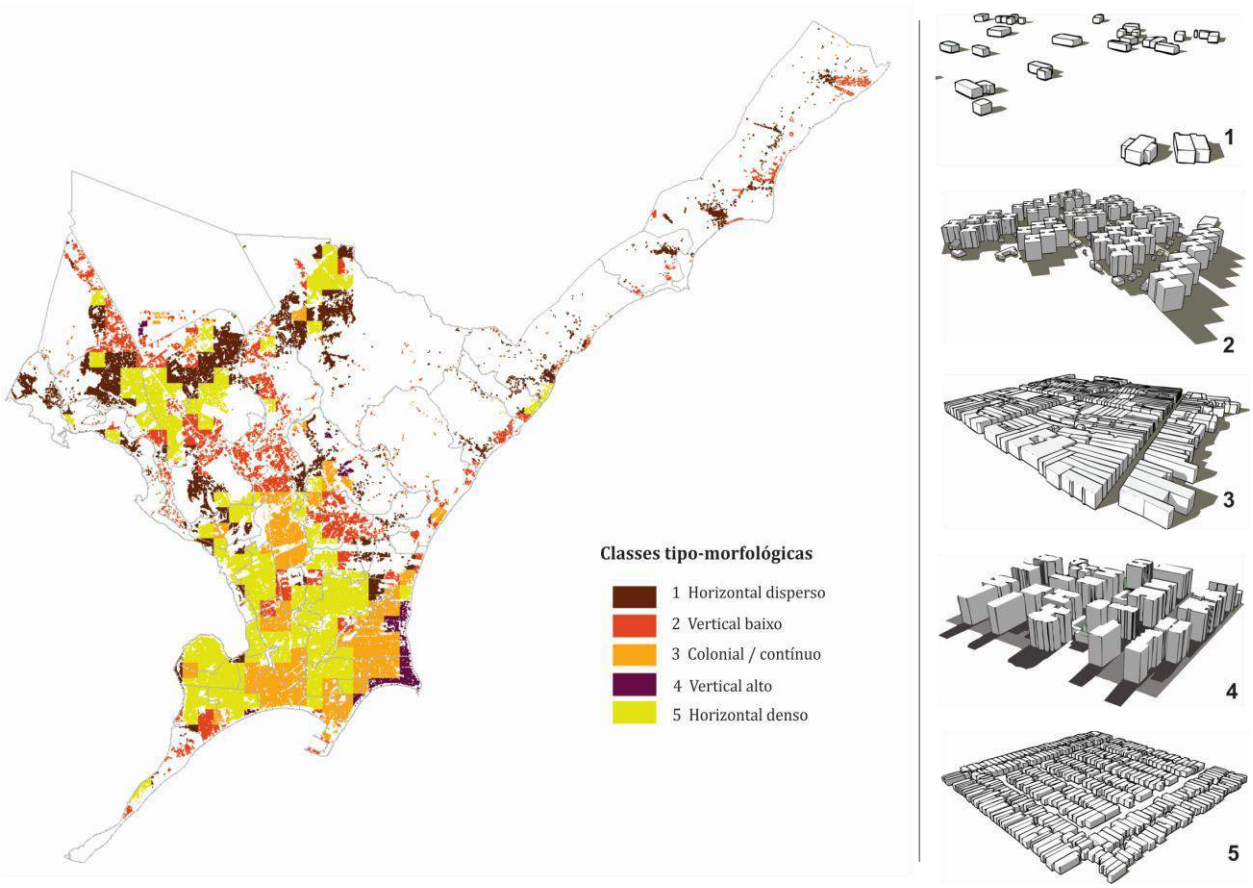


Figura 105: cartografia das classes tipológicas mais representativas da forma urbana de Maceió.

A seguir são apresentadas com mais detalhes as principais características morfológicas de cada uma das cinco classes morfológicas de Maceió. As análises propostas nessa etapa visam apenas descrevê-las morfologicamente, assinalando relações mais pertinentes com os principais aspectos climáticos – foco do presente trabalho. As questões relativas ao desempenho energético dessas classes (do ponto de vista do potencial solar de produção de energia, luz natural, insolação nas fachadas, etc.) serão melhor tratadas mais adiante na seção II.5.2.

(a) Classe 1 – Horizontal disperso

A classe 1 compreende, principalmente, os bairros da periferia da cidade, tecido caracterizado predominantemente, por ser horizontal com edificações residenciais individuais e isoladas (Figura 106). Essa classe representa 37% do tecido urbano de Maceió e apresenta uma Densidade Construída (bruta) muito pequena, de 0,08. As edificações têm alturas baixas, em média igual a 4,2 m, com 1 a 2 pavimentos. Em virtude de sua reduzida contiguidade (horizontal e vertical), os edifícios possuem grandes áreas de envoltória, em relação aos volumes construídos, caracterizando um tipologia urbana com alto valor para o coeficiente de forma (4,74).

A baixa densidade dessa tipologia urbana caracteriza edificações mais espalhadas em tecidos onde se encontram muitos vazios, o que configura menor interferência de uma edificação sobre a outra. A existência de menores prospectos e extensas áreas verdes não ocupadas proporcionam maiores aberturas para céu e, portanto, menores obstruções para insolação e iluminação das suas superfícies.

Conforme visto anteriormente, esse tipo de configuração, de um lado, tem um efeito menor sobre o fenômeno da ilha de calor urbana, mas são mais distantes essas localidades monofuncionais (zonas residenciais) em relação aos centros de serviços e comércio. O que contribui para a necessidade de deslocamento veicular individual ou, para classes sociais menos favorecidas, o aumento da dependência de transportes coletivos extremamente precários.



Figura 106: classe tipológica 1.

Essas áreas urbanas ocupadas por tipologias dispersas podem ser definidas como de quatro tipos:

- Loteamento de grandes glebas que deram origem a condomínios residenciais horizontais, com edificações isoladas, principalmente de alto padrão social (Litoral norte e Tabuleiro dos Martins).
- Áreas de bairro onde se verificam ainda grandes vazios urbanos de estratégia especulativa (bairro de Cruz das almas).
- Algumas áreas da periferia urbana nos bairros da cidade alta, como Tabuleiro, onde é possível verificar edificações de menor padrão de renda.
- Áreas de bairros à beira de encostas, como Santa Amélia à beira da lagoa Mundaú, também caracterizado por loteamentos em condomínios mais luxuosos.

Observa-se que essas áreas apresentam muitos terrenos vazios, muitas vezes, pela dificuldade de ocupação devido à topografia acidentada (e.g. encostas e grotas), caracterizando uma condição tipológica mais permanente. O bairro de Santa Amélia, que também apresenta trechos de grotas e encostas, possui sua ocupação nos tabuleiros, com habitações de classe média alta com casas luxuosas voltadas para a lagoa Mundaú. É uma área de ocupação recente o que resulta no fato de ser o bairro com maior área total de vazios (275.593,70 m^2), proporção esta que representa 51,04% do total da área do bairro (LINS, ZACARIAS e SCOTT, 2008).

O exemplar representativo dessa vizinhança urbana selecionada (planície litorânea ao norte do centro de Maceió), situa-se em Zona de Interesse Turístico 1 (ZIT-1) da cidade. Conforme legislação local, a ZIT-1 seria a área na cidade destinada, prioritariamente, ao incentivo das atividades comerciais e de serviços voltadas para o turismo, compatíveis com as demais ocupações locais, de uso residencial (PMM, 2007). Para esta zona urbana, são orientadas diretrizes restritivas para manutenção da horizontalidade da forma urbana, sendo permitida a construção de edificações de até no máximo quatro pavimentos, porém estas servindo apenas ao desenvolvimento de atividades voltadas para o turismo.

(b) Classe 2 – vertical baixo

A classe 2 cobre 9% do tecido urbano da cidade. Apresenta, entre outras tipologias, a habitação vertical coletiva com até 4 pavimentos. Essa tipologia, cada vez mais presente no espaço urbano das cidades brasileiras, a exemplo dos conjuntos surgidos, sobretudo na década de 1980, como o conjunto José Tenório no bairro da Serraria em Maceió (Figura 107). A tipologia é voltada para população de média e baixa renda. Caracterizam-se pela ocupação de toda uma quadra ou de áreas ainda maiores, muitas vezes, com arruamentos internos. Algumas vezes, são isolados por muros e/ou grades, e vigiados por guaritas. Reúnem edificações verticais em forma de prismas regulares, apresentando coeficiente de forma médio de 5,1 e, como esses blocos são quase sempre afastados uns dos outros, não existindo (ou poucas vezes existindo) superfícies adjacentes vizinhas ou contínuas (contíguas), o indicador da contiguidade (horizontal) é quase sempre igual a 0.

Ao observar-se o tecido presente nessa classe tipológica, quando composta desses conjuntos residenciais coletivos, os mesmos se encontram rodeados de habitações individuais, representando uma classe que pode ser descrita por certa heterogeneidade. Percebe-se igualmente a presença de zonas de vegetação importantes em algumas áreas (Figura 107).

As edificações presentes no recorte urbano de referência têm altura média 9,11m e o espaçamento entre os edifícios é bem menor quando comparado ao da classe 1, aumentando a influência, do ponto de vista climático, das edificações entre si (e.g. maior obstrução do entorno). O aumento do prospecto (altura maior que a distância entre os edifícios), nessa condição, pode acarretar menor insolação e iluminação nas fachadas, dependendo da orientação. Porém, a uniformidade da altura no interior dos conjuntos residenciais verticais baixos, pode favorecer, teoricamente, um maior potencial de insolação nas coberturas. O exame mais acurado desses aspectos será melhor abordado mais adiante.



Figura 107: classe tipológica 2

Algumas dessas tipologias residenciais são originárias dos programas de habitação de interesse social. Devido ao déficit habitacional no Estado, o Governo Federal tem investido na construção dessas tipologias através de programas como, por exemplo, o Programa de Arrendamento Residencial (PAR), financiado pela Caixa Econômica Federal. O número de empreendimentos residenciais inseridos no Programa tem crescido consideravelmente na cidade, conforme afirma Torres (2006):

> Em Maceió-AL, nota-se um aumento na produção de unidades verticais deste programa habitacional [Programa Habitação de Interesse Social] devido ao rápido crescimento da cidade nos últimos anos, gerando a necessidade de adensamentos que permitam a instalação de um maior número de famílias em uma menor unidade de área.



Figura 108: Edifícios multifamiliares do Programa de Arrendamento Residencial (PAR), em Maceió-AL . Fonte: Adolphe, 2013).

Quanto aos aspectos normativos da zona urbana onde se encontra nosso exemplar representativo, a classe examinada é classificada como Zona de Expansão urbana 2 (ZE-2), área na cidade com incentivo ao adensamento e verticalização alta, porém limitada, por norma, até no máximo vinte pavimentos (PMM, 2007).

(c) Classe 3 – colonial contínuo

A classe 3 representa 32% da superfície urbana construída da cidade e corresponde, principalmente, aos bairros do centro comercial da cidade, centro histórico, entre outros (Figura 109). Essas regiões são compostas de imóveis que variam de 1 a 4 pavimentos com altura média de 6,30m. Apresenta um indicador de coeficiente de forma médio menos elevado entre as classes tipológicas identificadas (3,86) e, complementarmente, a contiguidade ponderada mais expressiva. As edificações encontradas nessas regiões estão inseridas em tecidos pouco porosos, com espaçamentos bem reduzidos entre os edifícios. Edifícios estes, na maioria das vezes, geminados.

Tanto a taxa de ocupação do solo quanto o densidade construída (bruta) apresentam-se mais elevados nessa classe tipológica , de 0,74 e 2,38, respectivamente.



Figura 109: Ilustração da classe tipológica 3.

A maioria dos exemplares com as características dessa tipologia urbana são herdadas da arquitetura colonial portuguesa na cidade (Figura 110), principalmente nos bairros de Jaraguá, Poço, Centro e bairros vizinhos, bairros onde foi iniciado o processo de urbanização da capital alagoana.

Essa tipologia é caracterizada por lotes urbanos profundos e de pequena testada e construções situadas normalmente no limite do lote. Os arruamentos são também, em consequência, muito estreitos compondo uma trama urbana relativamente irregular. O exemplar representativo dessa vizinhança urbana situa-se na Zona Especial de preservação Cultural 2 (ZEP-2), tendo sua preservação direcionada à vocação comercial, de moradia, de lazer, de cultura e de turismo.

Conforme o código de urbanismo e edificações de Maceió, a Zona Especial de Preservação 2 (ZEP-2 Centro) divide-se em setores de preservação rigorosa, sujeito à rígido controle das edificações, respeitando verticalização baixa, de até 6 pavimentos (PMM, 2007).

Variações bastante próximas dessa tipologia podem também ser verificadas em diversos bairros da cidade, tais como nos bairros da cidade alta: Farol, Gruta, Bebedouro e Tabuleiro dos Martins.



Figura 110: tipologia herdada da arquitetura colonial portuguesa, no bairro do Poço, em Maceió-AL. Fonte: Autor, 2013.

(d) Classe 4 – vertical alto

Esta classe é composta principalmente por habitações situadas na orla marítima de Maceió, como as áreas construídas nos bairros da Ponta Verde, Pajuçara, Jatiúca e Mangabeiras (Figura 111).

Essa classe é a mais heterogênea que as anteriores, onde as formas e a altura podem variar (desvio padrão da altura média de 9,28 m), dada a presença ainda importante de edificações individuais baixas, que comportam outro tipo de forma. Por estar passando por um progressivo processo de verticalização, ainda bem recente, conforme já citado, essa classe tipológica compreende apenas cerca de 3% do tecido de toda a cidade (Figura 105).

Apesar da elevada Densidade Construída (4,15) e em virtude de um controle regulamentar mais importante nesses bairros (gabarito controlado e existência de recuos progressivos, possibilitando afastamentos mais expressivos entre as edificações), apresenta-se como um tecido de porosidade importante. Em função dos recuos, o coeficiente de forma é elevado (4,94) e a contiguidade horizontal baixa de 0,036.

Essa configuração morfológica é caracterizada por elevado prospecto médio (grandes alturas construídas para espaçamentos entre edifícios nunca superiores à 15m), oferecendo menor visão do céu a partir, sobretudo, das fachadas construídas. O que pode proporcionar menor nível de luz natural disponível nas fachadas, por exemplo . A presença dos recuos frontais e laterais entre os edifícios, por vezes generosos, podem, por outro lado, proporcionar condições mais favoráveis à circulação do ar na trama urbana, porém em menor intensidade (quando comparado com configurações mais dispersas) dada à grande rugosidade existente.



Figura 111: classe tipológica 4.

Conforme já apresentado anteriormente, a planície litorânea de Maceió encontra-se em crescente processo de valorização e adensamento populacional, devido a sua proximidade à orla marítima e à presença de infra-estrutura e serviços. No entanto, em meio a essas construções, observam-se ainda um número importante de terrenos vazios, uns localizados de forma concentrada, outros pontualmente, pelos bairros, com dimensões variadas, inclusive glebas de propriedade de grandes lobbies, construtoras, incorporadoras, imobiliárias, proprietários individuais e grupos hoteleiros que refletem a dinâmica do mercado imobiliário da região (LINS, ZACARIAS, *et al.*, 2010).

Essa classe também apresenta importante crescimento em diversos setores da cidade, como nos bairros situados na parte alta da cidade, (e.g. bairro do Farol). O exemplar representativo dessa vizinhança urbana, situa-se na Zona Residencial 4 (ZR-4). No código de urbanismo e edificações, a Zona Residencial do tipo 4 (ZR-4) é a área na cidade destinada à ocupação predominante do uso residencial, com verticalização restrita ao Cone do Farol da Marinha e com a possibilidade de implantação de atividades comerciais, de serviços e industriais quando compatibilizadas ao uso residencial.

(e) Classe 5 – horizontal denso

Classe composta, predominantemente, por habitat individual, mas em conformação urbana mais densa. Apresenta caráter bastante homogêneo, com poucas variações, que por vezes, podem ser

expressas nos volumes construídos de edificações que apresentam até dois pavimentos (altura média de 5,18 m).

A classe 5 cobre cerca de 19% da malha urbana de Maceió. Em virtude do baixo valor para o coeficiente de forma e elevada contiguidade (0,24), revela-se uma importante densidade construída, com edificações de volumes relativamente reduzidos, com poucas fachadas e aberturas voltadas para o exterior, o que pode comprometer a qualidade interna dos espaços. É possível citar as áreas construídas que se situam nos bairros do Vergel do Lago, Trapiche da Barra, Levada, entre outros (Figura 112).

Quanto à relação entre as áreas construídas e os vazios, essas zonas apresentam morfologia de baixa porosidade e elevada rugosidade (0,7 e 2,37, respectivamente).



Figura 112: classe tipológica 5.

Com muitas edificações situadas na planície lagunar, essa classe tipológica abrange alguns bairros com ocupações mais antigas da cidade, como Bebedouro e Trapiche da Barra, e que apresentam características distintas em relação à litorânea, refletidas no tipo e processo de ocupação. Principalmente ocupada por população de baixa renda, as pequenas edificações encontradas nessa localidade não possuem recuos ou afastamentos entre si. Localizam-se, algumas vezes, em conjuntos residenciais populares e/ou em áreas *non-aedificandi* à beira da lagoa Mundaú.

II.5. Estudo do desempenho solar das estruturas urbanas de Maceió

Nessa etapa, as informações morfológicas adquiridas são aplicadas em estudo climático específico ao contexto de Maceió. Mais precisamente, discute-se a influência de determinados indicadores tipo-morfológicos (rugosidade, prospecto médio e albedo) na modificação de algumas variáveis climáticas (velocidade do ar, radiação de onda curta e longa). Variáveis estas que poderão exercer influência, por sua vez, nas trocas radiativas superficiais das tipologias examinadas, conforme foi discutido no Capítulo I. A partir dessas análises, o desempenho solar das cinco tipologias urbanas de Maceió é, então, estudado (seção II.6).

II.5.1. Análise morfoclimática

II.5.1.1. Influência da rugosidade na velocidade do vento

No Capítulo I dessa tese, o perfil de climático da cidade de Maceió foi apresentado. No entanto, esses dados consistem em registros horários realizados em estação meteorológica localizada em área aberta e, portanto, livre da interferência de construções vizinhas. Via de regra, as medições em estações de meteorologia são feitas na altura padrão de 10m acima do solo. Características que não correspondem à realidade dos centros urbanos.

Para considerar um arquivo climático com dados do vento mais próximos daqueles possivelmente encontrados na malha de cada classe urbana de referência para a cidade de Maceió, o uso desses dados impõe a necessidade de correções. Para ser utilizada no modelo de cálculo desse trabalho (SRA), a velocidade medida para a altura de 10m, precisa passar por alguns ajustes em função da altura média dessas superfícies, como também para incluir o efeito produzido pelas diferentes características do entorno no qual se encontram.

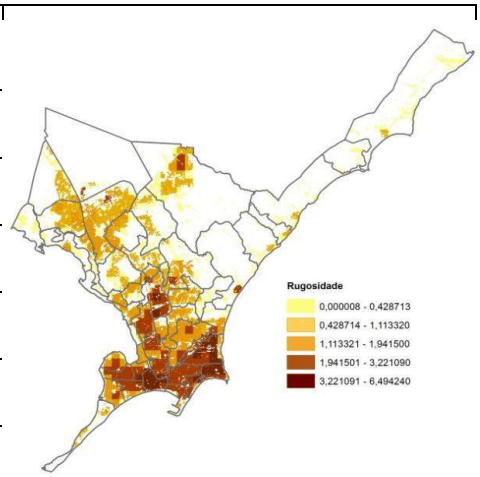
A morfologia construída nas cidades modifica a distribuição e a magnitude do escoamento do ar na malha urbana. Conforme visto ao fim do Capítulo I e no presente capítulo, os indicadores morfológicos mais relavantes identificados na literatura para qualificar e quantificar essa relação é, portanto, a altura da rugosidade e a porosidade do tecido urbano.

Assim, a velocidade do vento na altura das construções dependerá do entorno no qual estas construção encontram-se, Tabela 15. O indicador da rugosidade e o coeficiente indicados são aplicados aqui para encontrar a velocidade do vento em determinada altura do gradiente do vento para cada classe morfológica.

Em Maceió, os maiores valores de rugosidade encontram-se nas áreas mais adensadas e verticalizadas (ver Figura 98 e Tabela 15), nos conjuntos modernos da orla marítima (classe 4) ou no centro comercial da cidade (classe 3). As menos expressivas podem ser identificadas nos tecidos horizontais da periferia da cidade (classe 1).

Tabela 15: alturas de rugosidade média para diferentes sítios construídos.

Classes morfológicas de Maceió	Altura média da rugosidade calculada	Coeficiente $\boldsymbol{\lambda(z_o)}\lambda(z_o)$ correspondente (ALLARD e SANTAMOURIS, 1998)
Classe 1	0,1	0,21
Classe 2	0,3	0,24
Classe 3	2,8	0,24
Classe 4	3,6	0,25
Classe 5	1,7	0,24
Estação meteorológica (aeroporto)	0,05	0,19



Os valores da rugosidade calculada para Maceió foram incialmente comparadas com as classes tipológicas de rugosidade apresentadas por Allard e Santamouris (1998), verificando-se que para algumas morfologias construídas, havia diferenças, como para as classes 2, 3 e 5. Essas diferenças podem ser atribuídas ao fato de que a aproximação dada pela literatura assume possivelmente certa homogeneidade morfológica que pode não ser característica da maioria dos tecidos urbanos no Brasil, como em Maceió. Os valores calculados, que consideram as áreas construídas e dos vazios, foram consideradas nas avaliações desse trabalho.

A estimativa do perfil de vento pode ser obtida por (ALLARD e SANTAMOURIS, 1998):

$$\bar{v} = \frac{v^*}{k}\ln(\frac{z}{z_o}) \quad [\text{m/s}] \qquad \text{[Eq. 47]}$$

Onde K= constante de Von Karman (k=0,38).
E onde v^* e z_o são obtidos experimentalmente.
v^* =velocidade de atrito.
z_o= altura da rugosidade.

A equação apresentada (Eq.47) informa que o perfil de velocidade em função da altura (z) é influenciado pela rugosidade das superfícies sobre as quais o vento incide (obstáculos, terreno).

Nesta proposta de perfil de vento é considerado que a atmosfera encontra-se neutra, onde esta não sofre os processos convectivos de ascensão térmica diária (dia/noite) e o escoamento livre é constante ao longo do seu percurso (vento geostrófico). Ou seja, a altura de escoamento livre é constante para o ponto de medição (estação meteorológica) e para a cena urbana de análise (ALLARD e SANTAMOURIS, 1998).

Algumas pesquisas experimentais determinaram o valor para v^*, mas este fica restrito ao local onde foi realizado o estudo. De modo que se faz necessário usar outro recurso a fim de calcular v^* para qualquer altura. Assim, lança-se mão dos dados anemométricos de uma estação meteorológica próxima. Onde o vento é geostrófico, ou seja, constante no escoamento livre (não sofrendo influências da rotação da Terra – hipótese simplificadora utilizada pelos meteorologistas). A velocidade do vento geostrófico é idêntica em ambos locais (sítio da meteorologia e sítio urbano construído).

Com isso, é possível determinar uma relação entre os dois perfis de velocidade (sítio meteorologia/sítio urbano).

Define-se uma velocidade de referência $\bar{v}_{ref}$, como a velocidade média medida numa altura de 10m num sítio com rugosidade homogênea z_{oref}, igual a 0,05m (*terreno plano gramado*) (ALLARD e SANTAMOURIS, 1998).

$$\bar{v}(z) = \lambda(z_o)\, \bar{v}_{ref} \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \qquad \text{[Eq. 48]}$$

Onde $\boldsymbol{\lambda(z_o)}$ pode ser retirado da Tabela 15.

Esse método de cálculo simplificado foi empregado nessa etapa do trabalho para cada classe morfológica de forma isolada (Figura 113), não se levando em conta, por exemplo, os efeitos aerodinâmicos de uma classe de morfologia urbana sobre a outra ou da topografia do sítio urbano, nas várias escalas. Para cada caso, portanto, foi calculado o perfil logaritmo (tal como um ensaio em túnel de vento), em função de um perfil primário do vento, dado por uma situação de referência (sítio do aeroporto – estação meteorológica) e a altura média de rugosidade de cada classe em questão.

Depois de corrigido, esse perfil pode ser usado em algoritmos que estimam as pressões de vento nas superfícies das edificações e as taxas de fluxo de ar no interior das mesmas. Embora a (Eq.48) forneça uma estimativa da velocidade do vento no nível das edificações, algumas características das construções podem afetar o curso do vento ao redor das mesmas. A complexidade de cada configuração urbana deveria ser modelada com mais detalhe, porém, essas questões não pertencem ao escopo da nossa abordagem. Podendo ser objeto de trabalhos futuros. Procura-se nessa etapa, apenas indicar o efeito do fator da ventilação (componente importante em clima tropical quente e úmido) nas análises "morfoclimáticas" de interesse nesse trabalho e, por fim, sua influência no cálculo do fluxo radiativo, como será visto mais adiante.

Conforme já visto no capítulo anterior, o sítio urbano de Maceió é composto de edificações situadas em duas situações topográficas principais: uma grande planície litorânea, que se estende no eixo norte – sul da cidade, variando de 0 a 20m de altitude (compreendendo predominantemente a classe morfológica 4 e parte das classes 1 e 3) e, um planalto (tabuleiro) de até 50 metros de altitude (composto predominantemente de edificações horizontais das classes 1 e 5 e também da crescente classe 2, caracterizada por edifícios verticais baixos).

Com isso, observa-se classes construídas condicionadas a condições aerodinâmicas particulares, mas que nos permitem algumas aproximações metodológicas para previsão de um perfil de vento simplificado mais próximo da realidade, ver Figura 113.

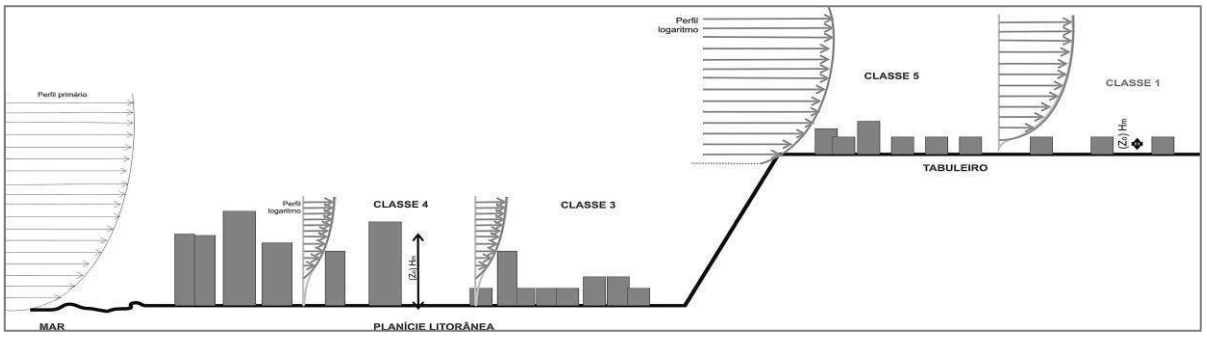


Figura 113: desenho esquemático dos perfis logaritmos do vento para classes morfológicas de referencia e influência da topografia e urbanização.

Como síntese desses resultados, apresenta-se abaixo os gráficos contendo as rosas do vento corrigidas com a velocidade do vento local, para cada classe morfológica de referência. Os gráficos permitem verificar reduções bastante significativas na intensidade da velocidade de referência

para os diferentes cenários urbanos quando comparamos os cenários entre si e com o cenário da estação meteorológica, mostrado no Capítulo I.

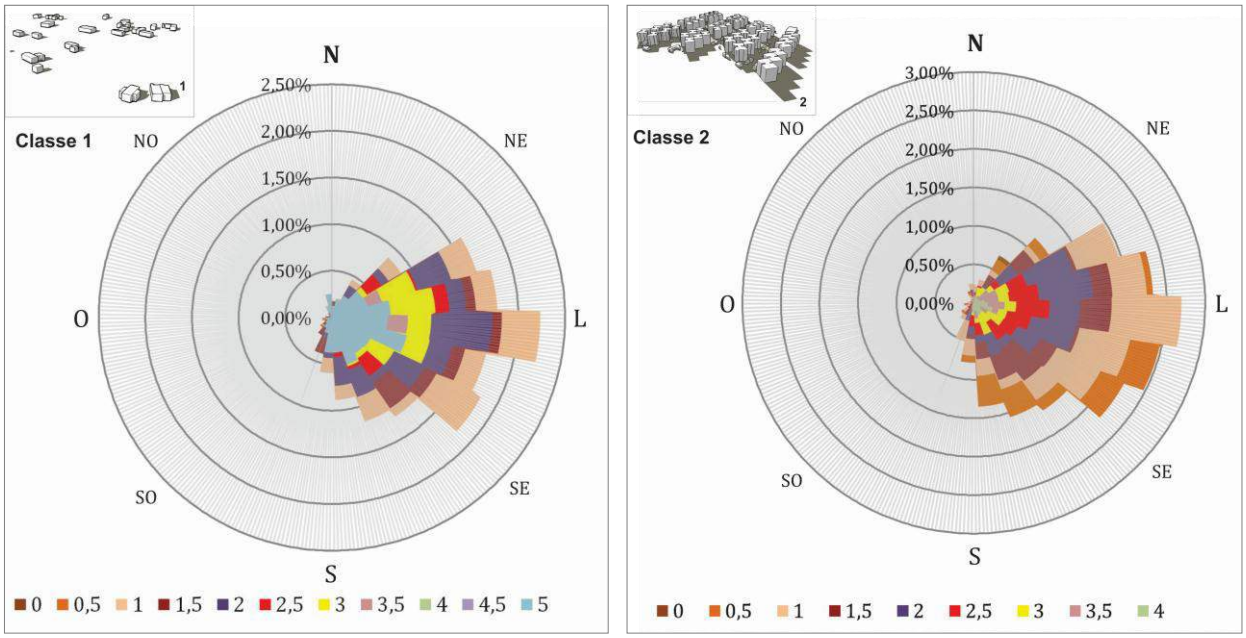


Figura 114: frequência da velocidade do vento por direção para classe 1 e 2.

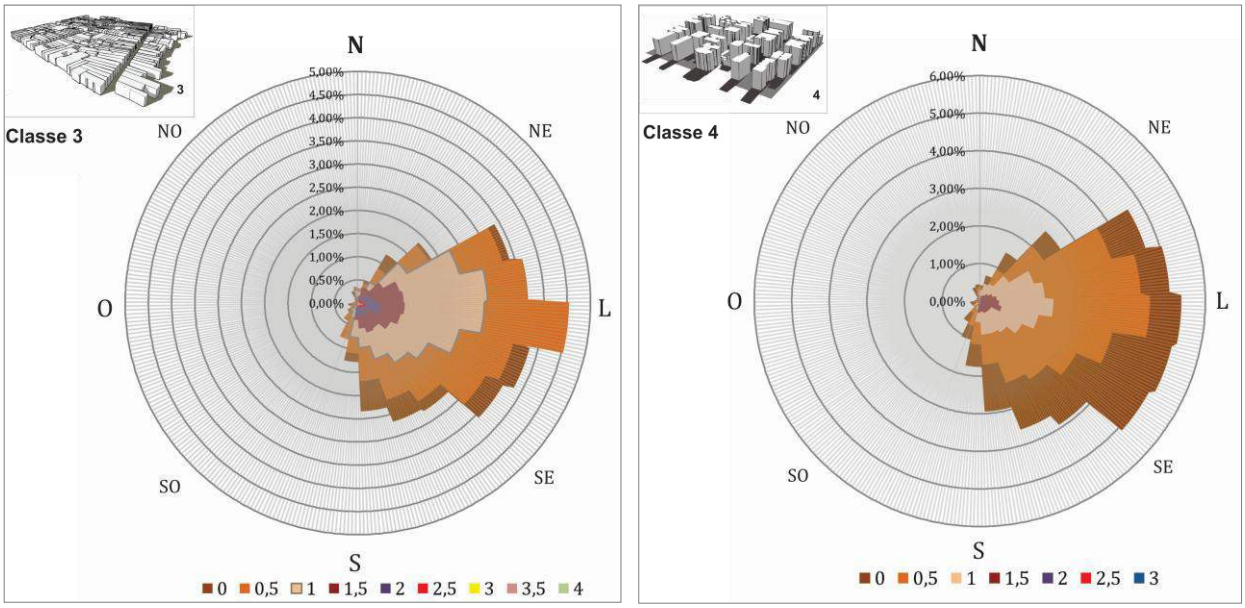


Figura 115: velocidade do vento corrigida para classe de rugosidade 3 e 4.

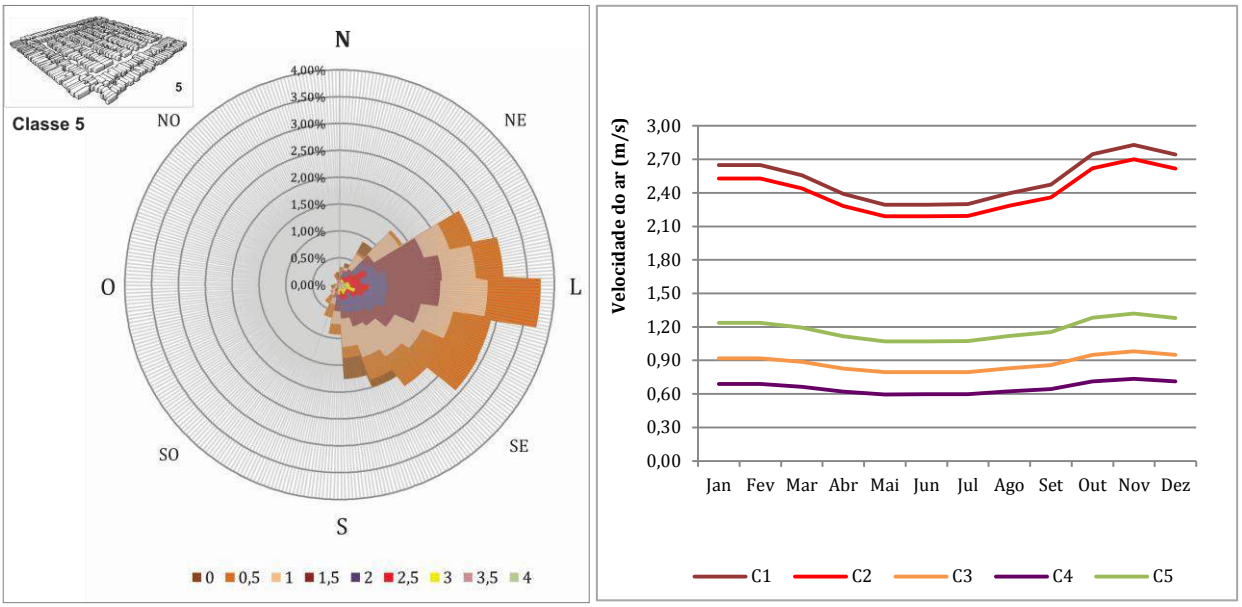


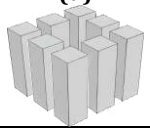
Figura 116: velocidade do vento corrigida para classe de rugosidade 5 e médias mensais de velocidade para as 5 classes.

II.5.1.2. Influência do vento na modificação do fluxo radiativo infravermelho

A fim de avaliar a relevância da rugosidade e velocidade do vento na modificação do balanço radiativo de superfícies construídas, bem como, testar a robustez da resposta do modelo de cálculo utilizado, realizou-se um estudo paramétrico simplificado. Para isso, um edifício genérico foi modelado em quatro situações distintas de entorno próximo: (a) o edifício isolado, (b) circundado de edifícios idênticos de mesma altura (5 metros), (c) circundado de edifícios idênticos de altura três vezes maior (15 metros) e (d) 7 vezes maior (35 metros). Com isso, será possível também avaliar o impacto do relevante indicador do prospecto urbano na intensidade da energia radiante de onda longa em meio urbano (Tabela 16).

Foram considerados dois perfis de velocidades baseados em dois contextos de rugosidade: o campo aberto, referente ao dado da estação meteorológica e, a rugosidade equivalente à uma classe de grande rugosidade (como a Classe 4). Para os demais parâmetros de entrada do modelo de cálculo, os valores foram considerados idênticos para todos os cenários, a fim de isolar o efeito que se deseja examinar. Os resultados são apresentados para o saldo de irradiação no espectro infravermelho (IV) para todas as orientações do edifício (Norte, Sul, Leste, Oeste e no plano horizontal da coberta do mesmo).

Tabela 16: parâmetros tipo-morfológicos dos modelos genéricos examinados.

	(a)	**(b)**	**(c)**	**(d)**
Parâmetros tipo-morfológicos				
Dimensões edifício estudado (x,y,z)(m)	(10, 10, 5)	(10, 10, 5)	(10, 10, 5)	(10, 10, 5)
Distância entre edifícios (m)	5	5	5	5
Altura dos edifícios do entorno (m)	-	5	15	35
Prospecto (H/L)	-	1	3	7
Altura de rugosidade média do bairro	0,05 e 3,6	0,05 e 3,6	0,05 e 3,6	0,05 e 3,6
Albedo (/)	0,2	0,2	0,2	0,2
Fração de vidro nas fachadas (/)	0,1	0,1	0,1	0,1

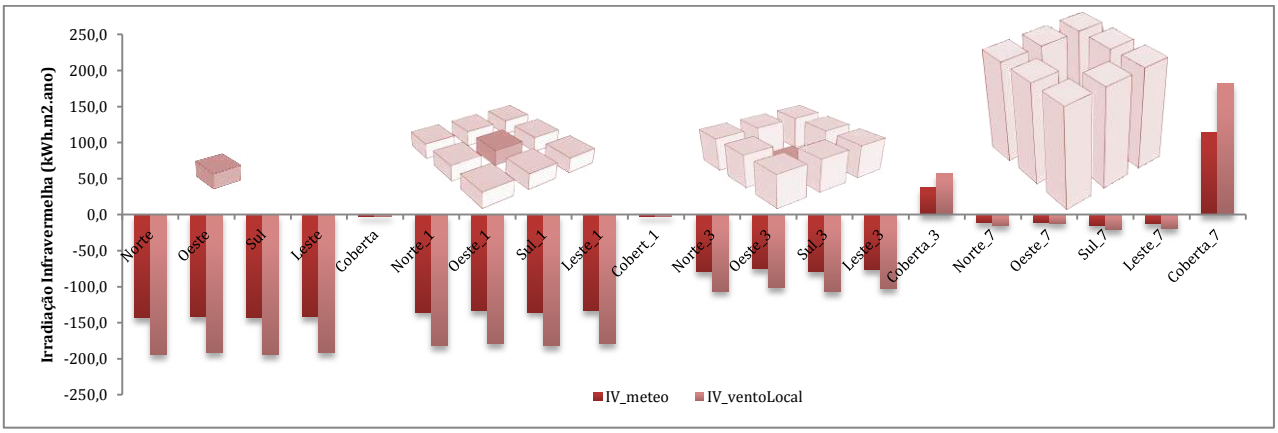


Figura 117: Saldo anual de irradiação infravermelha para taxas de velocidade do ar e prospectos diferentes.

Analisando os resultados apresentados, verifica-se que existe um impacto, relativamente pouco significativo, das trocas térmicas convectivas (influentes na temperatura sol-ar) sobre a irradiação infravermelha nas superfícies da envoltória (fachadas e cobertas) do edifício estudado (Figura 117). Os resultados mostram, portanto, que quanto maior a intensidade do vento (dada pela estação meteorológica nesse caso), evidentemente, mais intensas são as trocas convectivas da superfície com o meio e menor a radiação infravermelha emitida. Inversamente, com a redução da velocidade do vento, o edifício emite mais energia térmica radiante, pois que a diferença de temperatura entre as suas superfícies e o seu ambiente circundante passa a ser maior.

O efeito do movimento do ar como intensificador ou atenuador do efeito da emissão de radiação no infravermelho nas superfícies é, portanto, relativamente restrito. Foi verificado uma atenuação em valor absoluto no saldo anual de apenas cerca de 50 kWh/m².ano para o caso do habitat isolado e cerca de 10 kWh/m².ano para o caso de áreas urbanas bastante densas e verticalizadas. A modificação da velocidade do ar nessas estruturas promoveu uma atenuação na intensidade de emissão do infravermelho em torno de 25% no primeiro caso e de 30% no caso de construções verticais. Como impacto relativo, as trocas convectivas entre a superfície e o meio como modificador do saldo IV é significativo, no entanto, como impacto global absoluto pode ser desprezível.

É possível destacar também nesse estudo, o efeito importante da variação do parâmetro morfológico prospecto médio, que determina o impacto da obstrução do edifício estudado em relação ao seu entorno. Observando o resultado obtido entre os modelos, a variação do saldo radiativo IV é significativa. Entre o edifício isolado e o mesmo edifício circundado de torres de 35 metros, esse saldo pode variar em 88%. As superfícies verticais do edifício isolado, como não possuem obstruções no entorno, ao se aquecerem, irradiam energia térmica para o céu e para o solo do seu entorno. Como a temperatura do céu nos trópicos é bastante próxima da temperatura do ar, os planos verticais do edifício isolado vão trocar energia por radiação, principalmente, com o solo. Isso pode ser verificado, quando se observa o saldo da superfície da coberta que não tem "visão" do solo.

No entanto, ao circundar o edifício de torres verticais altas, o saldo no IV para as superfícies verticais aumenta, ou seja, as superfícies vão emitir para as demais superfícies verticais do entorno e o solo. Porém, também vão receber das mesmas, quase equilibrando o balanço. Já a superfície da coberta, que dificilmente irradiará para o céu e, tampouco irradiará para o solo, apresentará um saldo IV positivo, pois receberá energia radiante das torres do entorno.

Apesar de restrito, esse estudo permitiu demonstrar dois importantes fenômenos: o impacto da modificação do saldo IV em função da intensidade das trocas convectivas e a importante

influência da urbanização e verticalização – por meio do estudo da variação do prospecto médio – na intensificação da energia radiante IV nas superfícies.

II.5.2. Análise "morfosolar" por classe morfológica de referência

Nessa etapa, as cinco classes tipológicas urbanas de Maceió são submetidas à simulações computacionais, utilizando o Algoritmo Simplificado de Radiosidade (SRA). Busca-se estimar o saldo radiativo (no espectro solar, visível e infravermelho) nas superfícies das envoltórias construídas (coberta e fachadas), resultante das particularidades de cada configuração urbana. A partir desses dados, estima-se também a temperatura resultante dessas superfícies exteriores, bem como a energia transferida, pelo movimento do ar, entre essas superfícies e o meio circundante.

O objetivo dessa etapa é qualificar comparativamente o desempenho entre as tipologias urbanas representativas do tecido de Maceió (apresentadas na seção II.4.3.2) estabelecendo relações entre os parâmetros tipo-morfológicos que as definem (e.g. forma, densidade, implantação, albedo) e o comportamento radiativo dos envelopes das suas edificações. Comportamento este, que será dado tanto em termos do potencial das tipologias urbanas em produzir energia de fonte solar, como em termos do potencial que estas apresentam em reduzir o consumo de energia, tal como por meio do uso da iluminação natural.

Num primeiro momento, cada tipologia urbana de referência é analisada separadamente. Cada conjunto de informações morfológicas é confrontado com os resultados das simulações onde procura-se identificar relações de causa e efeito. Uma ficha síntese das características "morfosolares" principais de cada classe é apresentada. Num segundo momento, propõe-se uma análise comparativa onde as classes e seus desempenhos, dessa vez, são confrontados.

Para medir o desempenho das classes, empregamos também alguns critérios que definem, por exemplo, o potencial de utilização da energia solar (térmica e fotovoltaica) e de iluminamento ao nível das fachadas. Estes critérios foram definidos por outros autores, como em estudos recentes realizados por Compagnon, (2000), Compagnon (2004); Montavon, (2011); Zhang et al., (2012); Cheng et al., (2006). Os estudos buscaram definir uma série de limites (mínimos) de irradiação solar anual para fachadas e cobertas de edifícios que permitem viabilizar a instalação de sistemas de conversão da energia solar em energia térmica para aquecimento de água e eletricidade para diversos usos, bem como níveis mínimos de iluminância em fachadas.

Uma determinada tecnologia solar é, portanto, suscetível de ser economicamente viável para um dado local com base nos seguintes pressupostos:

a. para coletores solares térmicos, os valores mínimos de 400 e 600 kWh/(m².ano) são adotados por Montavon (2011) para fachadas e cobertas, respectivamente.

b. quanto ao fotovoltaico (PV), os valores de 800 e 1000 kWh/(m².ano) podem ser adotados como limites para fachadas verticais e cobertas, respectivamente (MONTAVON, 2010);

c. para a iluminação natural, Montavon (2011) e Compagnon (2004) assumem 500 lux como nível mínimo exigido no interior do edifício e um coeficiente de utilização de 0,05 – típico de aberturas verticais, obtendo um limite de 10000 lux em médias anuais para fachadas.

Scarazzatto (1995) propõe um método baseado no coeficiente de luz do dia. Para Maceió é indicado que o dia e mês de projeto é 11 de agosto, sendo apresentado valores mínimos do coeficiente de luz diurna CLD (%) para condições de céu encoberto, conforme as orientações de fachadas (Tabela 17):

Tabela 17:coeficiente de luz do dia e valores mínimos de iluminância por fachada em Maceió (SCARAZZATTO, 1995).

Fachadas	CLD (%)	Valor Mínimo fachada (lux)
Sul – Sudeste - Sudoeste	1,6	9375
Norte – Nordeste - Noroeste	1,3	11538
Oeste	1,4	10714
Leste	1,5	10000

Assim, o valor mínimo requerido é atendido mesmo com o céu encoberto ao longo do ano. Ou seja, situação em que não há nenhuma incidência direta dos raios solares nas fachadas.

Tabela 18: resumo dos valores mínimos propostos como critérios de análise do potencial para técnicas correspondentes.

Técnicas para produção de energia solar	Limites para sistemas em fachadas	Limites para sistemas em cobertas
Energia solar fotovoltaica	800 kWh/(m².ano)	1000-1100 kWh/(m².ano)
Energia solar térmica	400 kWh/(m².ano)	600 kWh/(m².ano)
Iluminação natural	9375 - 10714 lux - conforme fachada	

II.5.2.1. Definição das propriedades termo-radiativas das envoltórias

Para completar o quadro contextual do conjunto de variáveis pertinentes à abordagem do trabalho, são definidas as principais características radiativas das envoltórias das classes urbanas de Maceió. Com a geometria, o perfil climático e os materiais definidos, torna-se possível realizar as primeiras simulações e análises do desempenho radiativo (potencial solar, térmico e luminoso) das estruturas urbanas de referência para Maceió.

Conforme foi visto, após as interações que ocorrem na atmosfera, a radiação solar ao atingir as superfícies construídas (opacas), tem parte de sua energia refletida (conforme propriedades reflexivas das superfícies) e outra parte absorvida (conforme absortividade das mesmas). No caso de superfícies translúcidas, essa energia solar, além de refletida, absorvida, poderá ser transmitida diretamente pelo vidro, conforme sua transmissividade e fator solar. Uma vez aquecida, essas superfícies irradiarão energia de ondas longas que dependerá do seu poder emissivo (emissividade do material da superfície).

Tem-se, portanto, propriedades que caracterizam e determinam fenômenos que se passam em pelo menos dois espectros radiativos diferentes: o espectro solar (onda curta) e o espectro infravermelho (onda longa). Cada propriedade possui também uma série de outras variáveis que permitem detalhar, mais ou menos, a modelagem do fenômeno em função das hipóteses assumidas.

(a) Albedo e emissividade das estruturas urbanas (ou refletividade)

Conforme estudo realizado por Araújo *et al*. (2010) (Figura 118a), verifica-se que os maiores valores do albedo são encontrados nas zonas urbanas mais adensadas da cidade de Maceió, representado pela tonalidade amarela (com valores do albedo superiores a 21,96%), a tonalidade vermelha representa valores intermediários do albedo (com seu intervalo variando de 15,98 a 21,96%). Os autores observaram um aumento gradativo do albedo entre os anos pesquisados, onde os valores superiores a 15,98% são encontrados mais intensamente com o passar dos anos na cidade à medida que o processo de urbanização foi se intensificando, visto que em áreas com solos expostos ou pavimentados apresentam maior refletividade do que solos com vegetação, devido ao tipo de solo e da pouca capacidade que este tem em reter umidade. Os menores valores do albedo encontrados estão indicados pelas regiões com tonalidades azul escura e verde, significando que maior parte da área apresenta o albedo menor que 9,88% e entre 9,88% a 15,98% respectivamente.

A partir dessas informações, foi possível estimar o albedo para cada classe morfológicas de referência (Figura 118b).

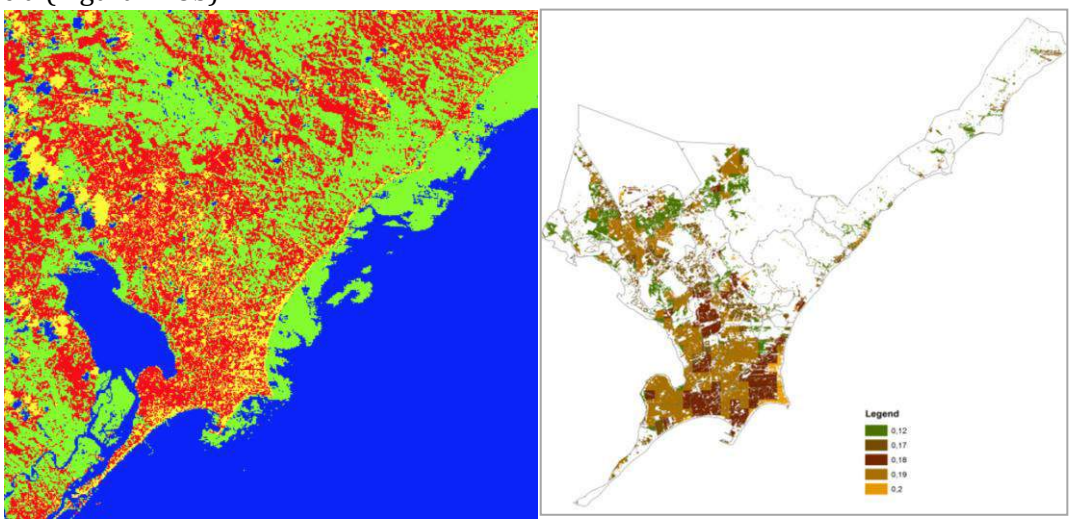


Figura 118: (a) albedo medido para a cidade de Maceió (em 2003) e (b) cartografia do albedo médio estimado para cada classe morfológica. Fonte: Araújo *et al.* (2010).

De acordo com as hipóteses simplificadores assumidas pelo modelo de análise (ver Capítulo I), a emissividade considerada para os materiais que compõem as superfícies das classes morfológicas, como em sua maioria não são metálicas[47] pode ser adotada como sendo de aproximadamente 0,9 (GIVONI, 2008).

Tabela 19: Emissividade de diferentes tipos de superfície. Fonte: Projeto de Norma da ABNT 02:135.07-002 (1998).

Tipo de superfície	Emissividade (ε)	Tipo de superfície	Emissividade (ε)
Chapa de alumínio (nova)	0,05	Reboco claro	0,85 / 0,95
Chapa de alumínio (oxidada)	0,12	Revestimento asfáltico	0,90 / 0,98
Chapa de aço galvanizada (nova)	0,25	Vidro comum janela	0,90 / 0,95
Caiação	0,90	Pintura branca	0,90
Concreto aparente	0,85 / 0,95	Pintura amarela	0,90
Telha de barro	0,85 / 0,95	Pintura vermelha	0,90
Tijolo aparente	0,85 / 0,95	Pintura preta	0,90

(b) Síntese das propriedades termo-físicas consideradas nas simulações

Para completar a caracterização das especificações termo-físicas das estruturas urbanas de Maceió, o quadro abaixo resume todas as variáveis consideradas na modelagem física. Para tais variáveis foram atribuídos valores aproximados em função dos materiais comumente empregados na prática de construção local.

[47] Superfícies metálicas, especialmente metais polidos, possuem uma emissividade bastante baixa e, consequentemente absorve e emite muito pouco a irradiação de ondas longas (GIVONI, 2008).

Tabela 20 : propriedades termo-físicas consideradas nas simulações.

Principais variáveis	Unid.	Classe 1		Classe2		Classe 3		Classe 4		Classe 5	
											
		Cob	Par	Cob	Par	Cob	Par	Cob	Par	Cob	Par
Transmitância térmica	W/m^2K	2,00	1,85	2,25	1,85	4,55	1,85	2,2	1,85	4,55	1,85
Capacidade térmica	$kJ/m^2.K$	32	161	77	161	18	161	77	161	18	161
Condutividade		1,05	0,9	1,75	0,9	1,05	0,9	1,75	0,9	1,05	0,9
Albedo fachadas	-	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Emissividade	-	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
VIDROS											
Abertura nas fachadas	%	-	0,50	-	0,50	-	0,20	-	0,50	-	0,20
Transmitância térmica vidros	W/m^2K	-	5,70	-	5,70	-	5,70		5,70	-	5,70
Fator solar médio dos vidros	-	-	0,83	-	0,83	-	0,83		0,83	-	0,83

Os valores indicados na tabela acima foram retirados das especificações contidas nas normas brasileiras.

II.5.2.2. Análise e síntese dos resultados

Na parte inicial do capítulo, um conjunto de indicadores foram escolhidos e empregados com auxílio de técnicas estatísticas na caracterização e repartição do tecido urbano de Maceió em conjuntos de formas urbanas predominantes. Cinco recortes representativos das cinco classes morfológicas estatísticas de referencia são utilizados nessa abordagem para predição do comportamento energético radiativo ao nível das envoltórias construídas, o que permitirá, nessa etapa, estabelecer a relação entre forma urbana e energia.

Retomamos aqui os seguintes indicadores (de forma e densidade) que auxiliarão nessa análise: o coeficiente de aproveitamento (CA), a taxa de ocupação do solo (TO), número de pavimentos (NP), a verticalidade (vert), o coeficiente de forma (Cf), a contiguidade (Ct), o prospecto médio (Pr), a densidade total construída (Ds), a porosidade (Po) e a rugosidade (Rg). À título ilustrativo, dois outros indicadores foram também incluídos nesta análise: o fator de visão do céu (FVC) e o intervalo de sombreamento. O FVC é utilizado para quantificar a visão de céu de uma estrutura urbana. Esse indicador oferece noção análoga ao indicador do prospecto médio das ruas. Porém, este último de forma mais ampla e de mais fácil apreensão pelo planejador, se pensarmos na posterior apropriação do conhecimento na prática do desenho urbano. O conjunto de sombras projetadas para períodos representativos do ano (solstícios e equinócios) e o FVC foram calculados com auxílio do programa Ecotect®.

O segundo conjunto de informações consiste no cálculo do saldo de radiação (solar, visível e infravermelha) nas envoltórias construídas. Os resultados obtidos foram tratados em escala temporal do ano e do mês e na escala espacial da média das fachadas e cobertas do recorte examinado. Ou seja, apresenta-se um valor acumulado anual e mensal para a média de fachadas e cobertas para cada uma das três variáveis mencionadas (saldo radiativo solar, visível e infravermelho). Um teste de robustez que nos auxiliou nesta definição será apresentado no próximo capítulo.

Para completar a análise, utilizam-se os dados de radiação obtidos para estimar a temperatura das envoltórias exteriores, bem como a energia emitida por essas superfícies para o meio circundante através de trocas convectivas dadas em função da velocidade do vento. A temperatura de superfície é estimada utilizando o modelo da temperatura sol-ar. Este modelo considera que a temperatura superficial é apenas influenciada pelas condições ambientais externas (fluxos radiativos e convectivos). A condução térmica no envelope da edificação não é, portanto, considerada nessa abordagem. Interessa-se apenas pelas trocas radiativas e pelas trocas convectivas relacionadas, na camada exterior do edifício, de modo que a penetração da onda térmica

no ambiente do edifício através desse envelope não é levada em conta nesse estudo. Os resultados obtidos, todavia, poderão ser bastante úteis como dados de entrada de outros modelos, como no estudo do comportamento termo-energético de edificações situadas em cenas urbanas similares as examinadas.

(a) Desempenho solar da CLASSE 1

A classe 1 consiste em tipologia horizontal composta predominantemente por habitat do tipo individual isolado e de pouca altura. As edificações presentes no recorte representativo dessa classe tipológica encontram-se bastante espaçadas entre elas, devido à presença frequente de jardins privados e a implantação de edificações em grandes lotes e em bairros ainda pouco urbanizados na periferia da cidade. Essas particularidades de uso e ocupação do solo urbano caracterizam um tecido de baixa densidade.

Com edificações de até no máximo 2 pavimentos e distantes umas das outras, essa tipologia produz menos sombras projetadas nos edifícios do entorno (Figura 119) e, assim, apresentam importante potencial de aproveitamento da energia solar por metro quadrado de superfície de coberta, que recebe irradiação em média de 2056,7 kWh/(m².ano). A disponibilidade total de energia solar das superfícies verticais é também bastante expressiva, em média anual de 400 kWh/(m².ano). como resultado de um maior fator de visão do céu, o nível de iluminância nessas fachadas são bastante favoráveis ao amplo uso da iluminação natural no interior das edificações. A iluminância calculada é superior em média anual à 12000 lux (Tabela 21).

No entanto, esse tipo de conformação urbana dispersa, de habitat individual, pode também representar um maior aporte solar potencial para o interior da edificação, dado a maior exposição das superfícies, tanto verticais como horizontais, que pode conduzir à condições desfavoráveis de conforto térmico. Em baixas latitudes, as cobertas (se não forem projetadas adequadamente ou aproveitadas para geração de energia solar) podem ser responsáveis por grande parte dos ganhos indesejáveis de energia recebidos pelos edifícios.

Observa-se que este estudo baseia-se, sobretudo, nos importantes aspectos tipo-morfológicos relacionados à concepção da forma urbana (e.g. geometria, proporção, volume, área de envoltória, implantação, albedo), não sendo considerados outros aspectos relacionados ao detalhamento de fachadas (e.g. dispositivos de proteção solar). Aspectos esses que podem também influenciar na qualidade do desempenho final dos envelopes quanto ao excesso de radiação incidente, reduzindo mais ou menos o aporte solar potencial.

Em virtude dessa maior exposição solar dos envelopes das edificações, as suas superfícies apresentam, portanto, elevada temperatura sol-ar, sempre acima da temperatura do ar. No entanto, dada a reduzida interferência do entorno urbano nas edificações, as superfícies tanto verticais como horizontais conseguem emitir o calor absorvido durante o dia em forma de irradiação no espectro infravermelho, em média anual de -140 kWh/(m².ano). Essa média corresponde ao saldo anual, calculado para a média das fachadas, entre o que estas recebem e emitem ao longo do dia e do ano para as demais superfícies construídas (edifícios e solo) e para o céu, em função do ângulo de obstrução.

Conforme visto na seção anterior, a classe 1 possui tecido urbano de baixa altura de rugosidade construída e maior porosidade, indicadores de menor interferência das edificações na qualidade e intensidade do escoamento do ar no interior da malha construída. Isso é dado à qualidade dispersa da implantação das edificações na malha e a baixa altura média construída. Com isso, a velocidade do ar calculada em função dessas características é mais próxima da encontrada na estação meteorológica em situação de campo aberto. O que pode ser bastante favorável para a promoção potencial de ventilação natural para as edificações. A partir desses dados, também foi

possível completar a análise, prevendo-se a energia "retirada" das superfícies pelo movimento de ar, por troca térmica convectiva com o ar circundante, que pode ser de até 171 kWh/(m².ano).

Observando o comportamento sazonal nos gráficos com saldo mensal de radiação para os dois espectros (solar e infravermelho), é possível verificar valores máximos na estação seca (correspondente aos meses de verão) e valores mínimos para os quatro meses de maior nebulosidade (meses de chuva durante o inverno). Assim, observa-se claramente o impacto da variação do tipo de céu ao longo do ano. Na condição de céu encoberto, característico dos meses de abril a agosto, o saldo no infravermelho é bastante reduzido, devido à maior emissão de onda longa da atmosfera para o sítio urbano e menor emissão de energia radiante das estruturas para o céu.

A radiação solar é também, por sua vez, reduzida nos meses de inverno, porém de forma menos expressiva. Devido à presença mais frequente de uma maior cobertura de nuvens nesse período, a radiação direta é reduzida, em detrimento da radiação difusa que é ampliada. Os dados para o saldo da radiação solar consistem em valores das duas componentes associadas.

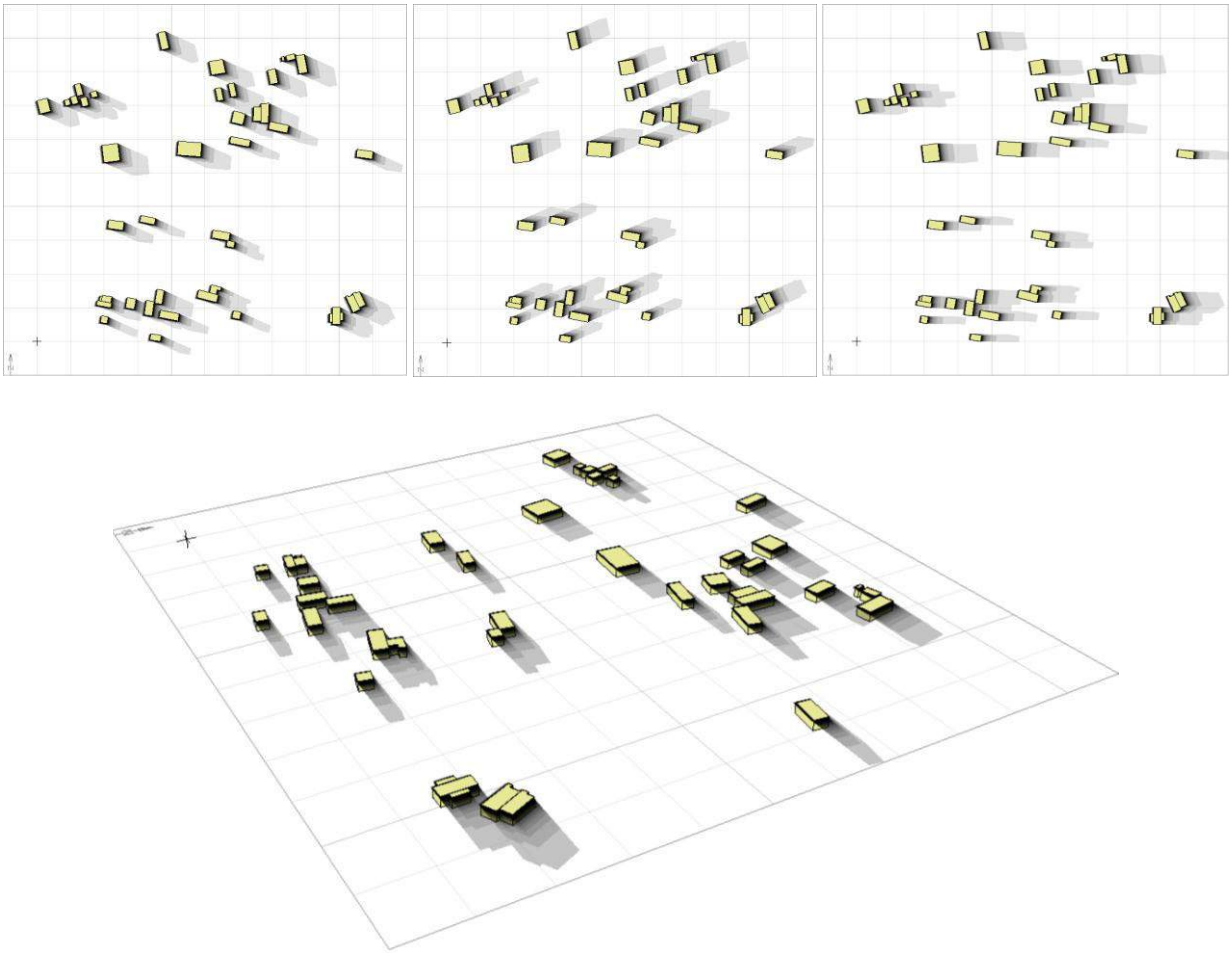
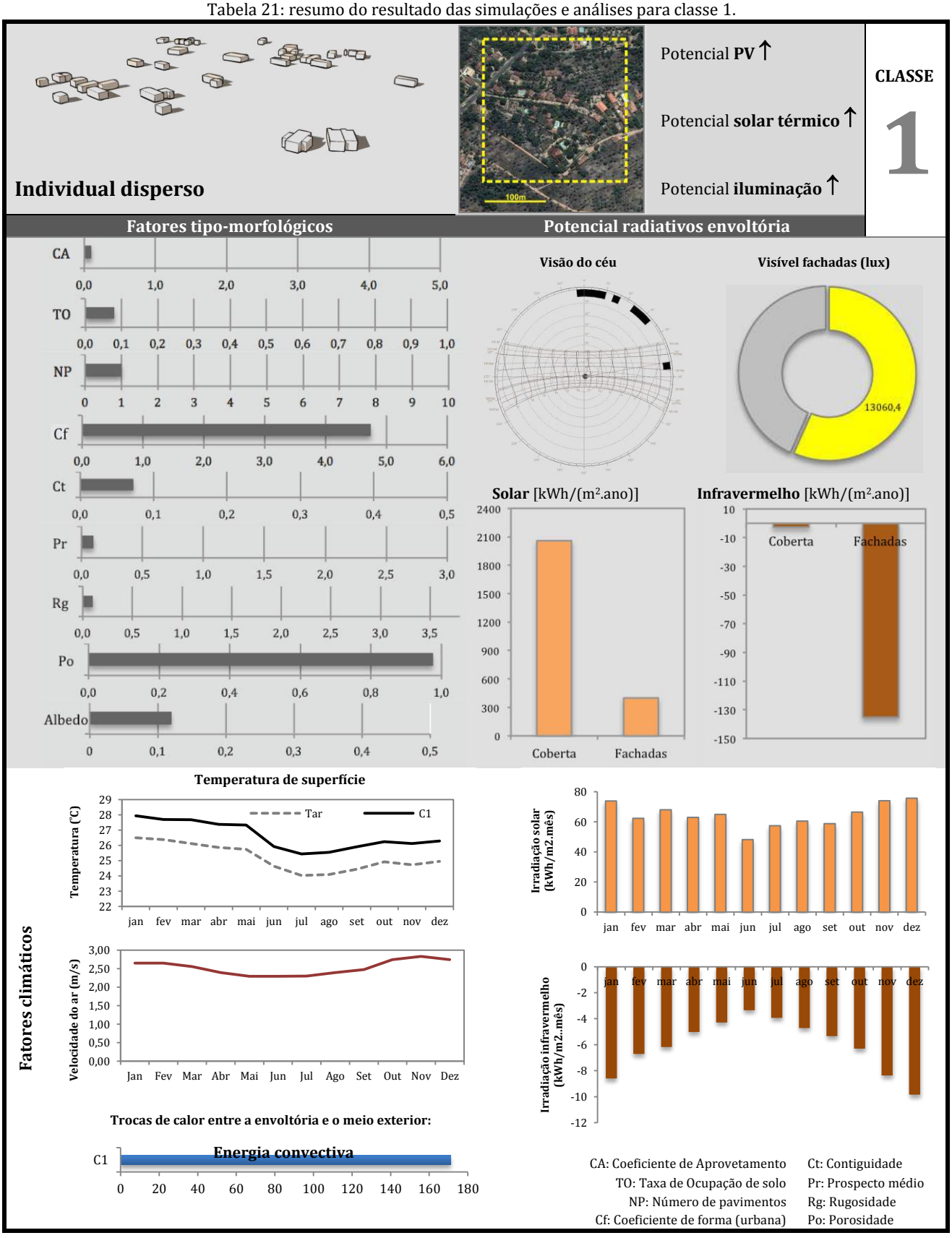


Figura 119: estudo da projeção de sombra para a classe 1, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30.

Tabela 21: resumo do resultado das simulações e análises para classe 1.



(b) Desempenho solar da CLASSE 2

A classe 2, com edificações predominantemente verticais de até 4 pavimentos, porém de maior heterogeneidade vertical, apresenta média de irradiação anual nas suas coberturas de cerca de 7% menor que a classe 1 (Tabela 22), o que não restringe seu aproveitamento para conversão em energia (solar e fotovoltaica), conforme limites mínimos exigidos. No entanto, se levarmos em conta a disponibilidade de área de coberta por pavimento, que nessa tipologia corresponderia em média à 4 pisos com 4 unidades habitacionais, teríamos um aproveitamento total menos expressivo (cerca de 500 kWh/(m².ano)/piso), que para o fotovoltaico, quando comparado com o limite mínimo (1000 kWh/(m².ano), poderia ficar limitado ao uso parcial por unidade habitacional ou empregado para áreas de uso coletivo. Se compararmos ao limite para conversão em energia solar térmica, o potencial solar por piso atenderia de forma mais satisfatória.

A verticalidade e densidade que caracterizam esse tecido implicam também em menores níveis de iluminância em média nas fachadas, cerca de 9000 lux. A verticalidade, mesmo que moderada, e a proximidade dos blocos de edifícios nessa cena urbana pode produzir sombras nas suas fachadas (Figura 120), o que explica um nível de iluminância (em média anual) que pode ser insuficiente quando comparado às exigências definidas no item anterior.

Por outro lado, esta configuração urbana pode representar um potencial de conservação de energia superior que a classe anterior, dada justamente a essa redução de área de coberta por unidade habitacional e ao sombreamento parcial das fachadas. Com o aumento do número de pavimentos e redução da superfície de envoltória por habitação exposta à intensa radiação solar direta nessa latitude, o aporte solar térmico pode ser em média menos expressivo, melhorando a eficiência energética dos edifícios.

Apesar de um fator de visão do céu, em geral, menor que na classe anterior, as superfícies apresentam temperatura superficial apenas ligeiramente menores que na classe 1, porém, sempre um pouco mais elevada que a temperatura do ar durante o dia. Com maior interferência do entorno urbano, as superfícies verticais emitem menos intensamente o calor absorvido durante o dia em forma de irradiação no espectro infravermelho para o céu, e recebem mais a influência da energia radiante emitida pelas demais superfícies, gerando um saldo, em média anual de -80 kWh/(m².ano), cerca de 43% menos que na tipologia de forma urbana dispersa.

A classe 2 possui tecido urbano de rugosidade construída maior que a classe 1, o que explica uma velocidade do vento mais moderada, cerca de 20% menor em média que na classe 1. Com taxas menores de velocidade do vento, uma menor quantidade de energia acumulada é retirada por convecção das superfícies para o meio (cerca de 143 kWh/(m².ano)).

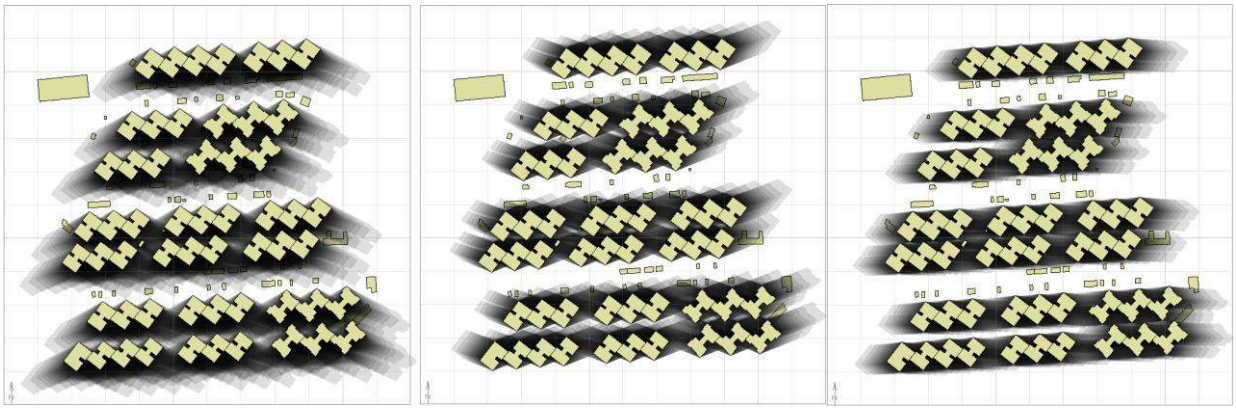
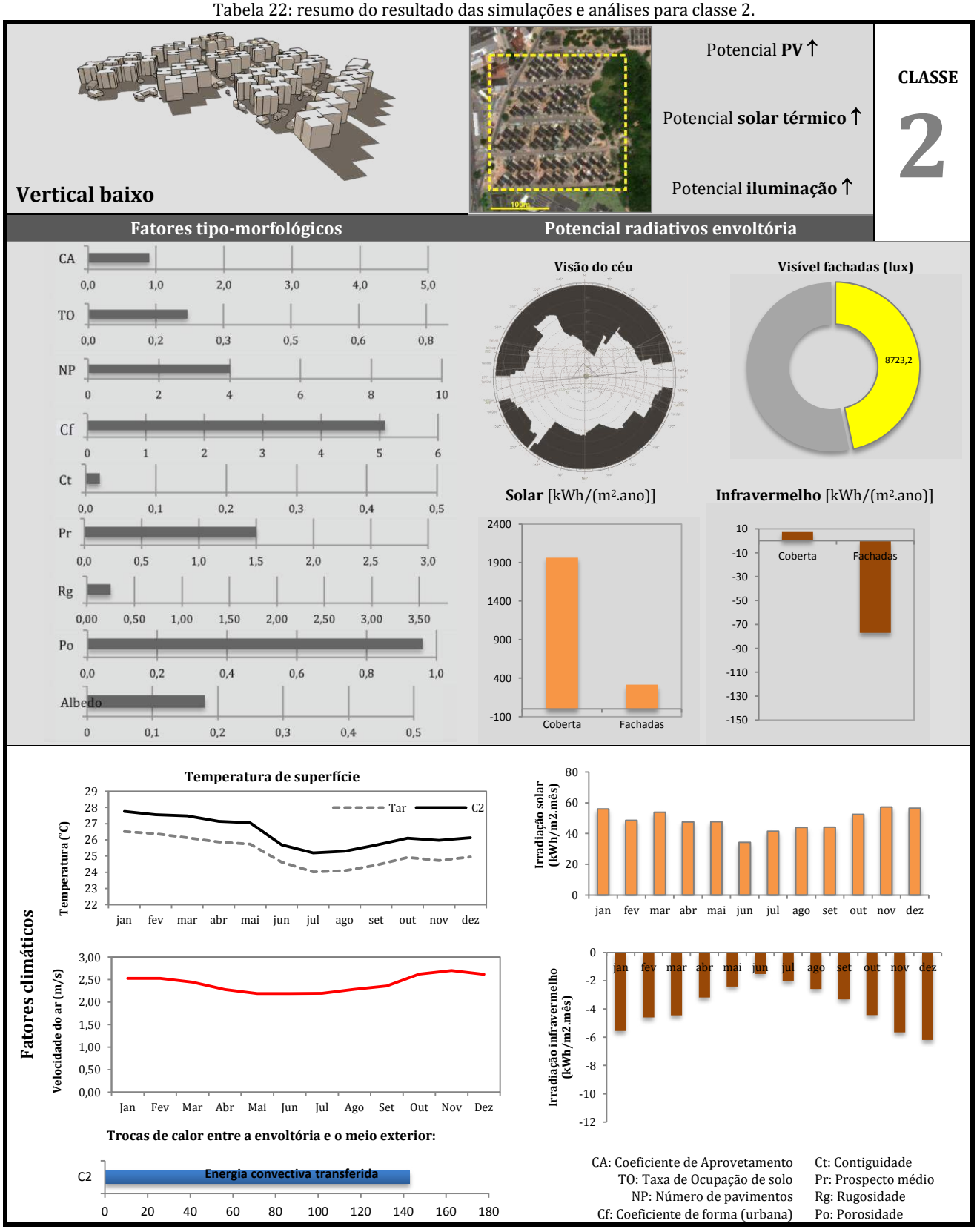


Figura 120: estudo da projeção de sombra para a classe 2, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30.

Tabela 22: resumo do resultado das simulações e análises para classe 2.



(c) Desempenho solar da CLASSE 3

A classe 3 apresenta taxa de ocupação do solo e coeficiente de aproveitamento mais elevados, o que pode proporcionar, de um lado, uma área importante em termos de potencial disponível para captação solar nas superfícies das cobertas e, do outro, níveis inferiores de energia solar e luminosa incidente nas fachadas, em média de 242 kWh/(m².ano) e 7706 lux, respectivamente.

Este conjunto tipológico de edificações predominantemente geminadas, de elevada densidade construída, pode, mesmo assim, oferecer um potencial favorável a instalação de sistemas de conversão de energia solar nas cobertas (1944 kWh/(m².ano)), devido ao reduzido desvio-padrão da altura média construída. No entanto, se levarmos em conta a relação da área da coberta pela área ocupada, na estimativa desse potencial, poderíamos ter esta irradiação da coberta dividida por dois ou até três pavimentos (reduzindo o potencial de utilização para cerca de 900 kWh/(m².ano)/piso). Como para a classe 2, esse potencial de aproveitamento, para atender toda a demanda de ocupação dos edifícios, poderia ficar restrito ao uso apenas parcial da eletricidade via sistema fotovoltaico de geração, porém um bom aproveitamento global da energia solar térmica (cujo limite mínimo é de 800 kWh/(m².ano)).

O espaçamento entre os edifícios, no entanto, é em média bastante reduzido – característica do traçado colonial de ruas estreitas e edifícios implantados, muitas vezes, no limite do lote - o que pode tornar o potencial solar nas fachadas bastante desfavorável, ao mesmo tempo que pode comprometer a qualidade ambiental dos espaços interiores. Sobre esse último aspecto, é possível ser verificado através de dois indicadores: a temperatura de superfície, a energia radiante no espectro infravermelho e a energia convectiva (Tabela 23).

Com elevada rugosidade, a taxa de velocidade média do vento que pode ser encontrada nesse tipo de tecido pode ser também bastante reduzida. Pela média estimada, tem-se que a energia convectiva trocada da superfície para o meio externo é de cerca de 123 kWh/m².ano.

Quanto ao saldo da energia radiante no espectro infravermelho, este é de cerca de -55 kWh/m².ano. Ou seja, nesse saldo as superfícies ainda emitem mais que recebem, porém em menor proporção que quando comparado aos resultados das classes 1 e 2. Isso pode ser explicado pelas características morfológicas já mencionadas que conferem menor abertura das estruturas urbanas para o céu, dificultando a dispersão do calor acumulado ao longo do dia, o que pode contribuir para condições desfavoráveis de conforto exterior.

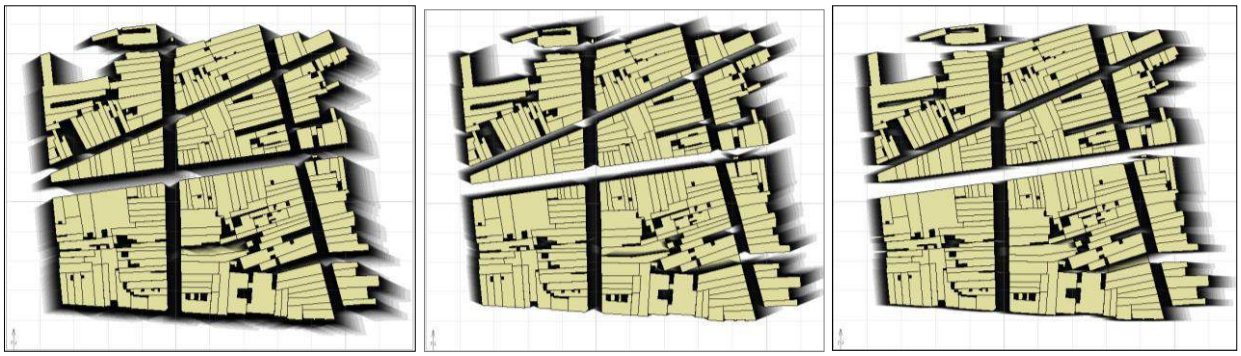
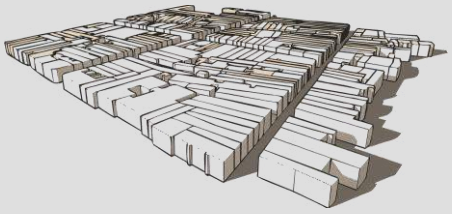


Figura 121: estudo da projeção de sombra para a classe 3, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30.

Tabela 23: resumo do resultado das simulações e análises para classe 3.



Colonial contínuo



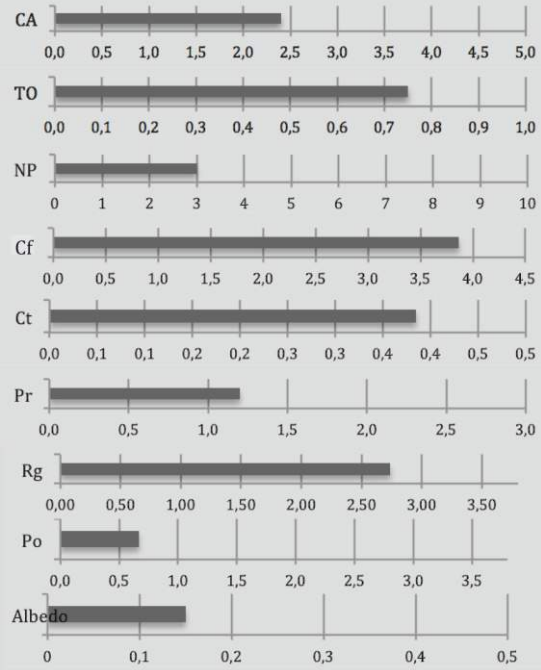
Potencial **PV** ↑ (Parcial)

Potencial **solar térmico** ↑

Potencial **iluminação** ↓

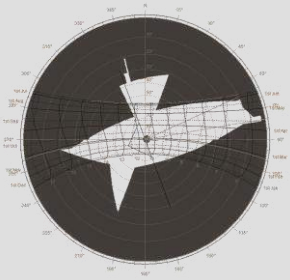
CLASSE 3

Fatores tipo-morfológicos

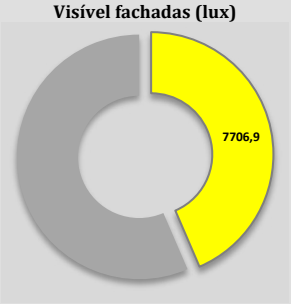


Potencial radiativo da envoltória

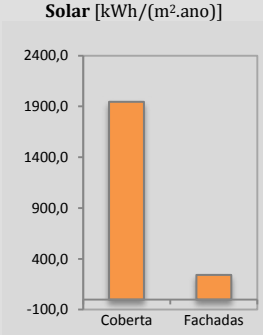
Visão do céu



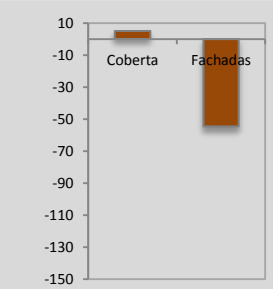
Visível fachadas (lux)



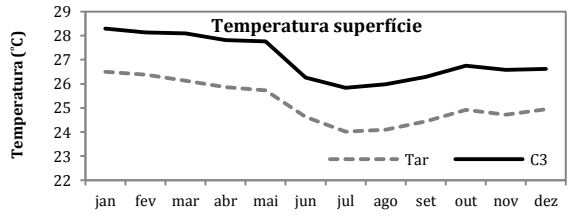
Solar [kWh/(m².ano)]

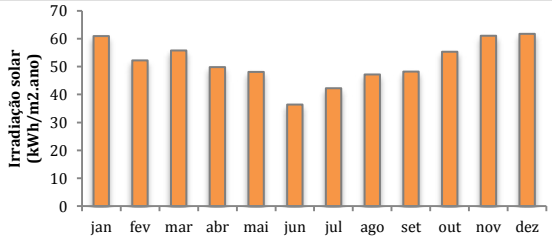


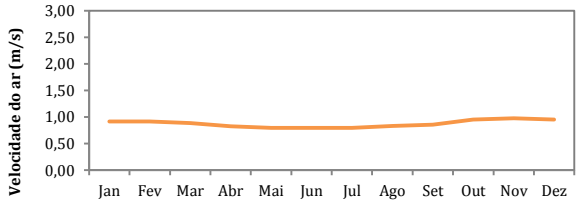
Infravermelho [kWh/(m².ano)]

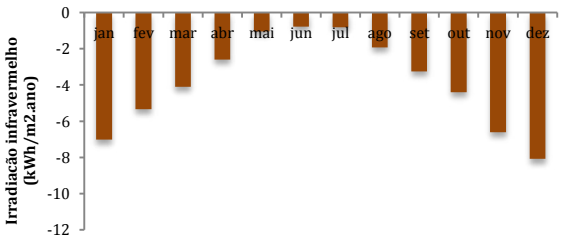


Fatores climáticos

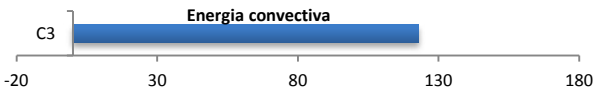








Trocas de calor entre a envoltória e o meio exterior:



CA: Coeficiente de Aproveitamento
TO: Taxa de Ocupação de solo
NP: Número de pavimentos
Cf: Coeficiente de forma (urbana)
Ct: Contiguidade
Pr: Prospecto médio
Rg: Rugosidade
Po: Porosidade

(d) Desempenho solar da CLASSE 4

A classe 4 é composta principalmente por habitações em torres verticais de até 10 pavimentos, mas com importante desvio padrão da altura média (cerca de 9,28 m). Por essa razão, pode apresentar o menor potencial solar e menor disponibilidade de iluminamento nas suas fachadas entre as classes examinadas (cerca de 1934 lux, em média). Apesar de certa heterogeneidade na altura construída, o saldo de irradiação solar encontrado na coberta é bastante importante (cerca de 1900 kWh/m².ano), porém se a irradiação disponível por superfície de coberta for dividida pela área total ocupada, este potencial de aproveitamento é bem inferior.

Ressalta-se novamente, a importância dos indicadores morfológicos de densidade construída (Taxa de ocupação, Coeficiente de Aproveitamento e Verticalidade) na determinação da viabilidade e rentabilidade no real aproveitamento da energia solar potencialmente recebida na superfície da coberta. Nessa classe, se estimarmos o saldo solar da área de coberta disponível pela área ocupada de um edifício de 8 pavimentos, o potencial de utilização seria em média de apenas 237 kWh/(m².ano).

Esta sobreposição das unidades de habitação em torres verticais implica, portanto, na redução do coeficiente de forma, ou seja, menos superfícies expostas ao exterior, ou maior contiguidade vertical. Essas características morfológicas conduzem, de um lado a um desempenho desfavorável em termos de acesso à luz natural no interior dos espaços, mas do outro, a uma redução do aporte solar. A Figura 61 ilustra a superposição diária de sombras projetadas diária (8h as 16h) para os três dias representativos da posição do solar (equinócios e solstícios), mostrando o elevado percentual de sombras para as superfícies urbanas nessa classe.

A classe 4 é a classe que possui maior altura de rugosidade e, portanto, maior redução da taxa média de velocidade do vento estimada. Essa característica e a menor temperatura superficial encontrada (devido ao maior sombreamento das estruturas), conferem menor energia convectiva trocada da superfície das envoltórias para o meio (cerca de 83 kWh/m².ano). O saldo de energia radiante no infravermelho é também mais reduzido, cerca de -35kWh/m².ano.

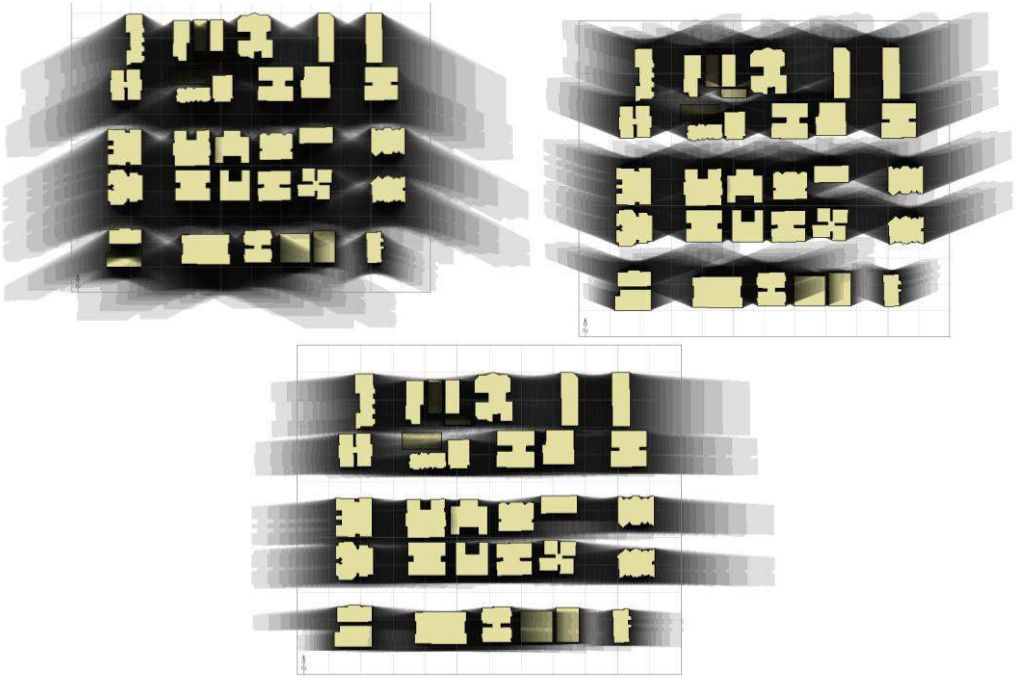
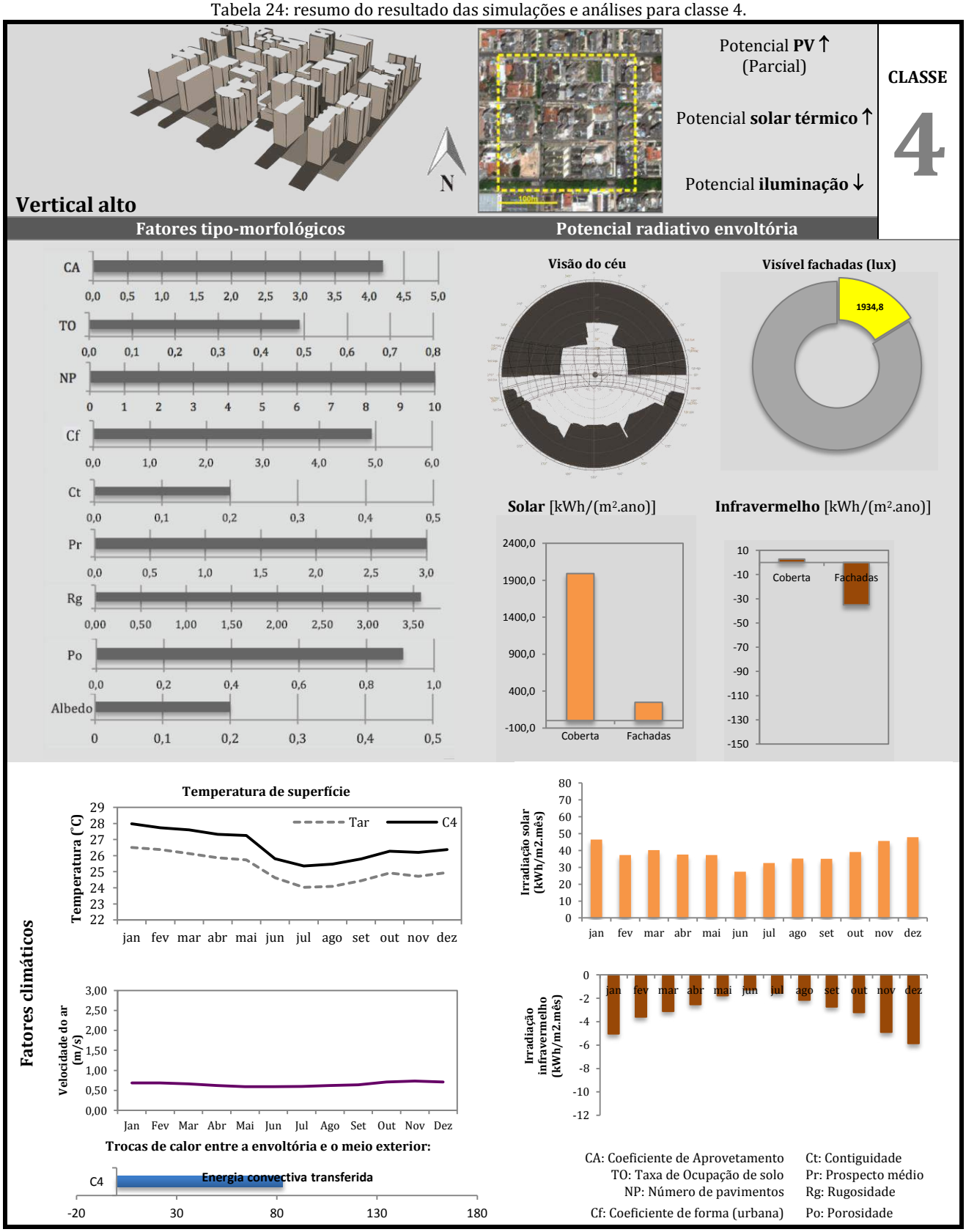


Figura 122: estudo da projeção de sombra para a classe 4, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30.

Tabela 24: resumo do resultado das simulações e análises para classe 4.



(e) Desempenho solar da CLASSE 5

A classe 5 composta, predominantemente, por habitat individual horizontal denso, apresenta caráter bastante homogêneo, com poucas variações, que por vezes podem ser expressas nos volumes construídos de edificações que apresentam até 2 pavimentos (altura média de 5,18 m). Em virtude de sua baixa heterogeneidade na altura construída e elevada densidade, os edifícios podem produzir mais sombras nas fachadas, mas não ao nível das cobertas (Figura 123), podendo apresentar um forte potencial de aproveitamento da energia solar disponível nessas superfícies. O saldo de radiação solar encontrado na coberta é em média de 2026 kWh/(m².ano).

Esta configuração urbana típica de diversas zonas urbanas de Maceió, apresenta elevada densidade construída no solo (taxa de ocupação de 56% em média) e edificações próximas, mas nem sempre justapostas (ou geminadas) como na classe 3. A distância entre edifícios é relativamente baixa e largura das ruas uniformemente mais amplas que na classe 3.

Essas características explicam, de um lado, a existência de uma área potencial importante de coberta sem que haja obstrução de entorno, tornando-se bastante compatível para instalação tanto de sistemas para conversão de energia térmica como fotovoltaica. E, do outro, um nível satisfatório para promoção de luz natural, porém um aporte solar que pode ser bastante significativo, dada a elevada incidência solar em fachadas (cerca de 303 kWh/m².ano) (Tabela 25).

Além disso, a rugosidade desse tecido é relativamente baixa. Com taxa média razoável de velocidade do vento, as trocas convectivas são mais expressivas que na classe 4. A energia convectiva que sai da superfície exterior do edifício para o meio urbano circundante é de cerca de 149 kWh/m².ano, 45% maior que a classe 4 e 23% menor que a classe 1, também horizontal.

O amplo fator de visão do céu (apenas menor que a classe 1) e maior contraste entre as temperaturas de superfície e o ar (quando comparado às demais classes), é possível explicar o elevado saldo de irradiação no infravermelho, de -97 kWh/(m².ano).

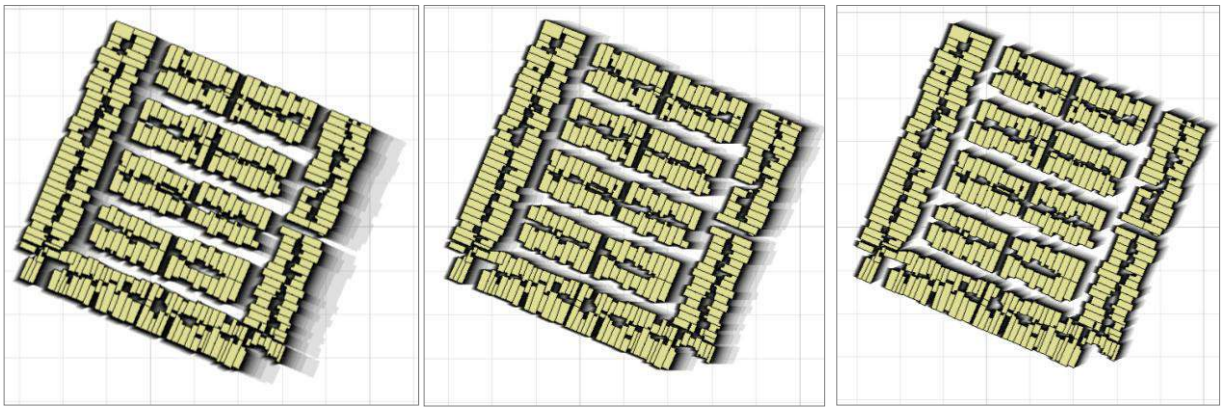
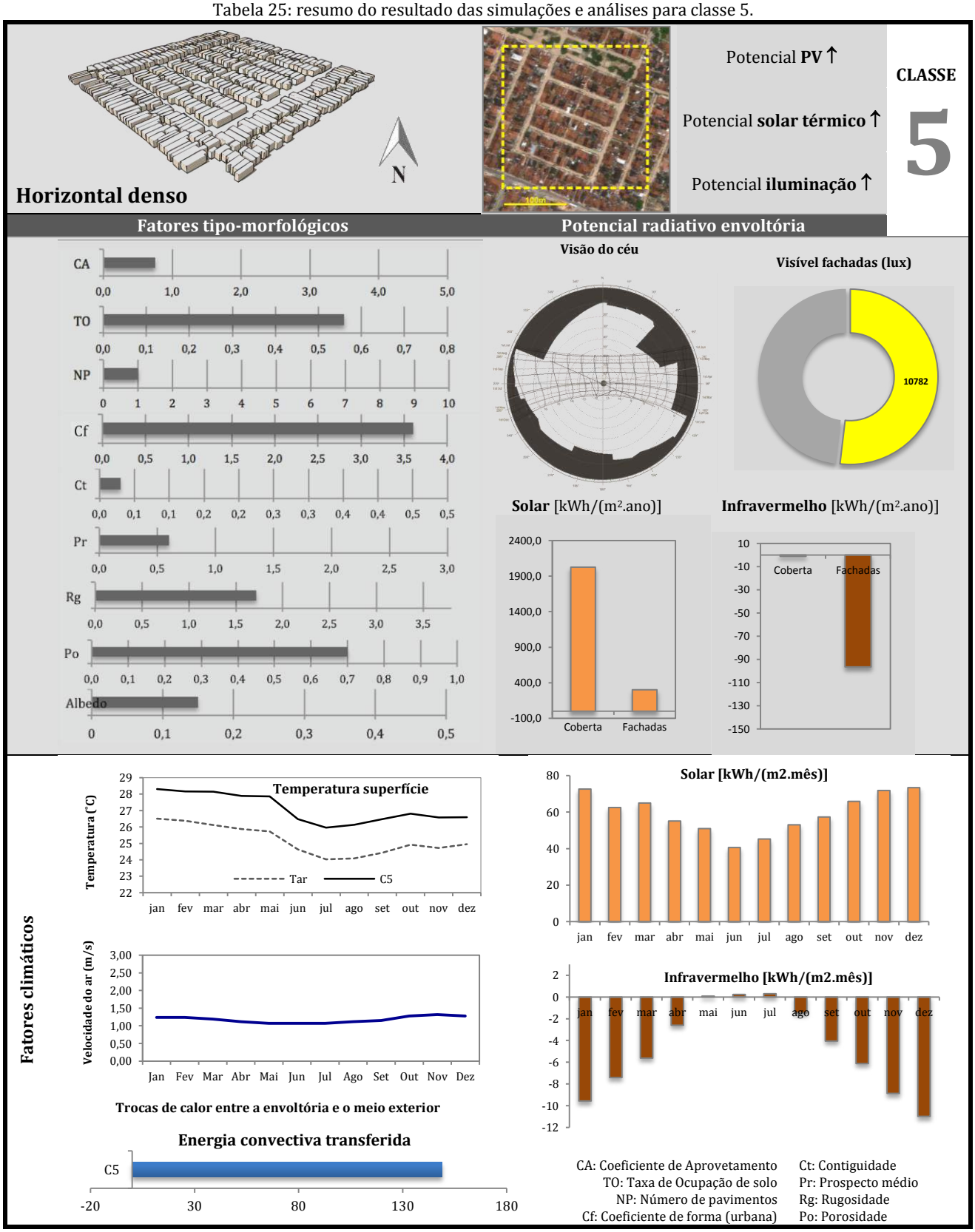


Figura 123: estudo da projeção de sombra para a classe 5, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30.

Tabela 25: resumo do resultado das simulações e análises para classe 5.



II.5.2.3. Síntese comparativa dos resultados

Observando os dados para irradiação solar nas cobertas de todas as classes de referência, foi possível verificar um desvio-padrão relativo bastante reduzido (inferior a 3%), demonstrando um importante potencial solar da cobertura dos edifícios para todas as tipologias identificadas neste estudo. Fica demonstrado que há pouca influência do entorno construído na produção do efeito de sombreamento em cobertas, por exemplo. De fato, para fins de aproveitamento da energia solar, a trajetória solar em baixas latitudes favorece bastante a captação desse recurso por meio das cobertas em diversas formas construídas, principalmente, se o desvio-padrão da altura construída do entorno não for muito importante.

No que diz respeito à disponibilidade da energia radiante nas superfícies verticais (fachadas), em todos os espectros examinados, importantes distinções podem ser feitas entre as classes. Como pode ser observado, devido ao impacto do sombreamento das estruturas verticais, quando a altura solar é menor, os níveis de irradiação solar pode variar entre cerca de 400 kWh/(m².ano) para forma urbana com edificações horizontais afastadas (classe 1) e, 242 kWh/(m².ano) para forma urbana composta de edifícios justapostos com o menor fator de visão do céu médio e maior sombreamento das poucas fachadas expostas ao exterior (classe 3). O desvio-padrão relativo entre as classes, para o saldo de radiação solar em fachadas, é de 21%.

Na Tabela 26 e na Figura 124 e Figura 127, são apresentados os resultados obtidos para a média anual das energias radiantes (no espectro de onda curta, do visível e de onda longa) por metro quadrado na coberta e das fachadas[48] de edifícios situados em cada uma das cinco classes morfológicas de Maceió.

Tabela 26: resumo dos resultados em estatística anual por classe morfológica.

	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4		Classe 5	
	Coberta	Fachadas	Coberta	Fachadas	Coberta	Fachadas	Coberta	Fachadas	Coberta	Fachadas
Saldo de radiação de onda curta (kWh/m².ano)	2059,4	399,4	1962,7	314,3	1944,6	242,6	1991,5	247,9	2026,3	303,8
Saldo de radiação de onda longa (kWh/m².ano)	-2,59	-135,1	7,5	-76,9	5,0	-54,7	2,7	-35,1	-1,2	-96,6
Nível de iluminação no envelope (Lux)	-	13060,4		8723,2	-	7706,9	-	1934,8	-	10782,1

A Figura 124 indica os resultados obtidos para o saldo de radiação de onda curta e longa apenas para as superfícies horizontais (cobertas dos edifícios) das cinco classes. Verifica-se, como era de se esperar, que estas superfícies recebem expressivamente maior incidência da radiação solar, porém o que emitem no espectro infravermelho é bem menos relevante. Isso pode ser explicado pela temperatura do céu nessas regiões ser bastante próxima da temperatura do ar, o que restringe o potencial de emissão das superfícies para o céu. No entanto, se observarmos, existe uma diferença no comportamento entre as classes nesse aspecto. As duas classes verticais apresentam saldo positivo no infravermelho. O que significa que, não apenas estas emitem muito pouco para o céu como, em média, recebem energia nesse espectro das edificações vizinhas. Isso pode ser atribuído à maior heterogeneidade na altura construída nessas classes cuja verticalidade é característica predominante, mas ainda não consolidada, conforme visto anteriormente. Devido a característica pouco expressiva do infravermelho ao nível da coberta, a Figura 125 mostra apenas, e como mais detalhe, o saldo de radiação solar encontrado nas cobertas e a diferença, relativamente baixa, encontrada entre as classes.

[48] Valor referente à média ponderada das fachadas.

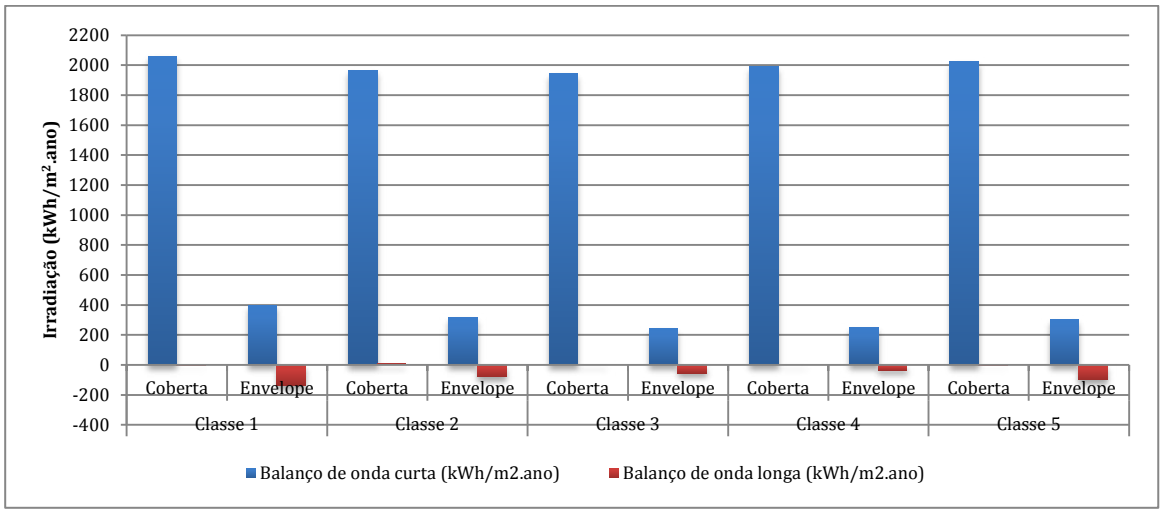


Figura 124: irradiação anual nos dois espectros (onda curta e onda longa) e o saldo radiativo na superfície da coberta para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió.

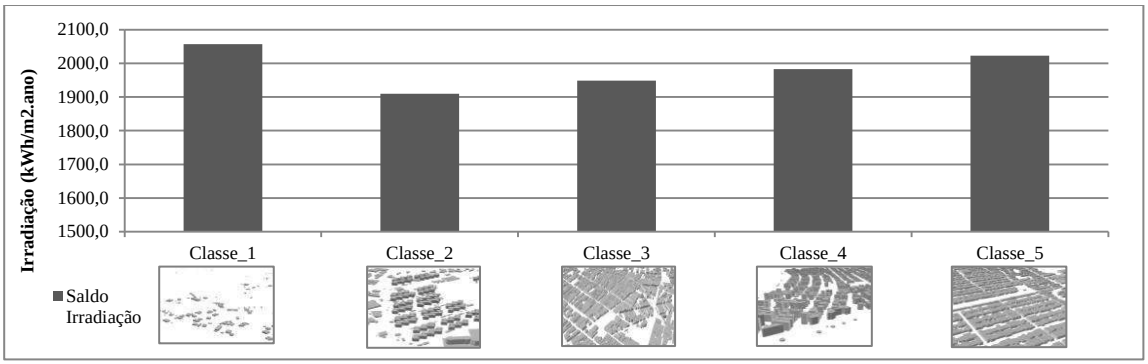


Figura 125: irradiação solar anual na superfície da coberta para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió.

A Figura 126 apresenta os resultados das mesmas variáveis-respostas para as fachadas, onde é possível observar menor expressão na magnitude da radiação solar recebida nestas superfícies em relação à incidência em cobertas, porém, trocas radiativas no espectro infravermelho apresentam-se mais significativas. Na classe 1, de forma urbana mais dispersa, menos densamente construída e de maior fator de visão do céu (maior abertura para céu), o saldo no infravermelho é mais negativo, pois os espaçamentos entre as edificações permitem que essas fachadas emitam mais para o céu e para demais superfícies.

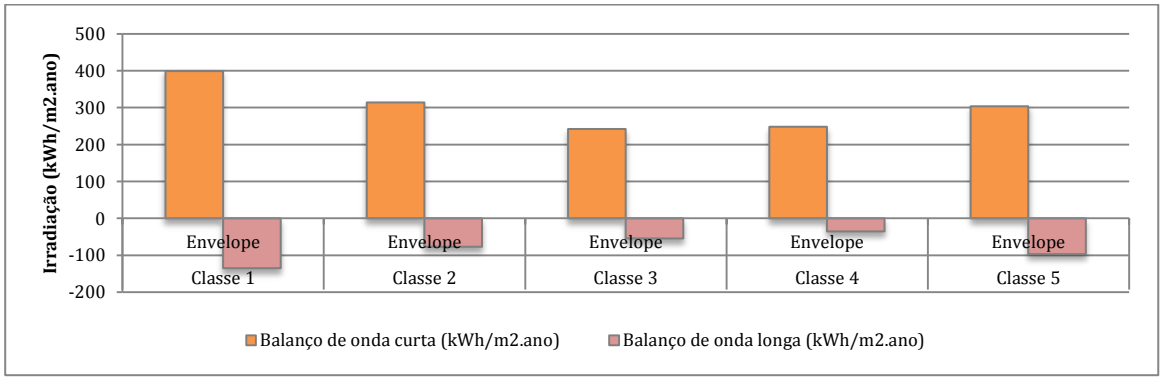


Figura 126: irradiação anual nos dois espectros (onda curta e onda longa) e o saldo radiativo na superfície das fachadas para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió.

A disponibilidade de energia solar no espectro visível nas superfícies verticais pode variar bastante conforme o contexto urbano, como pode ser verificado no gráfico da Figura 127. Assim como a energia nos demais comprimentos de onda do espectro solar, os efeitos de incidência, reflexão, obstrução, etc., ocorrem de forma similar no visível. Quanto menor o espaçamento entre os edifícios e mais altos eles forem, menor será o fator de visão do céu e da trajetória solar, menos frequente, portanto, será a incidência direta da energia luminosa nas superfícies construídas. Nesse estudo, examinamos apenas a disponibilidade de iluminação em fachadas. Devido ao maior sombreamento destas em cenas urbanas verticalizadas, a classe 4 apresentou-se como a forma urbana de menor média de iluminância. De forma contrastada, as classes horizontais 1 e 5, proporcionaram generosos valores para iluminância em suas fachadas. Apesar de possuírem densidade e implantação bem distintas, o baixo gabarito proporcionou para essas classes uma relação de prospecto (altura/largura da rua) mais aceitável do ponto de vista do acesso solar e de luz nas suas superfícies construídas.

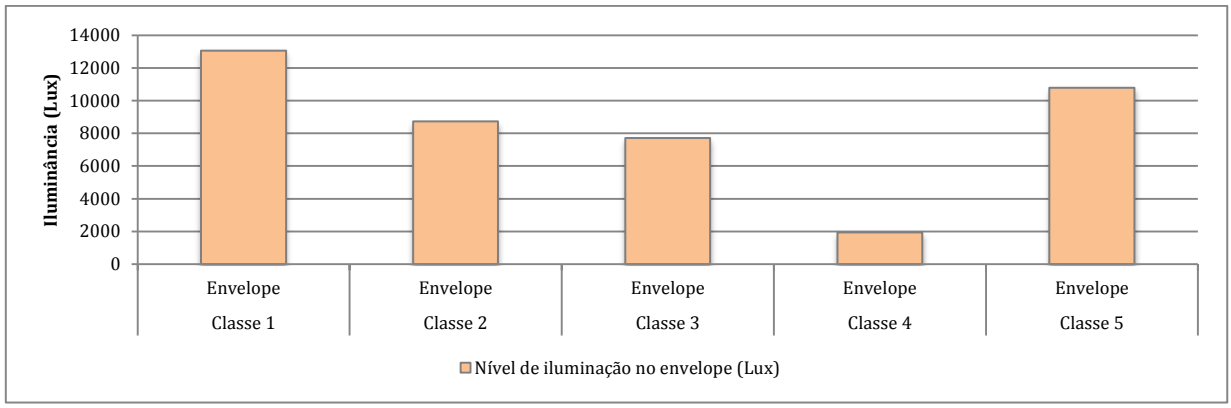


Figura 127: iluminância média anual na superfície das fachadas para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió.

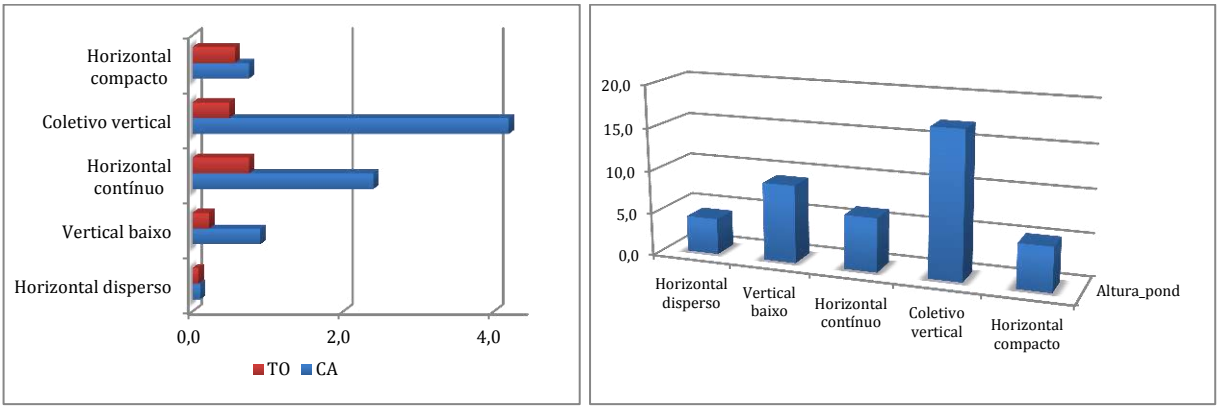


Figura 128 : comparativo para a taxa de ocupação (TO), coeficiente de aproveitamento (CA) e altura média ponderada entre as classes tipo-morfológicas de Maceió.

Se considerarmos que cada pavimento de um edifício vertical corresponde uma unidade de ocupação e cuja coberta é compartilhada, o potencial de aproveitamento e rentabilidade do uso energia solar por pavimento poderá ser dado em função da verticalidade construída ou do coeficiente de aproveitamento do solo urbano. Esse potencial ponderado pela densidade ocupada é apresentado na Tabela 27.

Tabela 27: disponibilidade em percentual para as fachadas e cobertas para as três técnicas de aproveitamento da energia solar, para as cinco tipologias.

	Energia solar térmica		**PV**		**Iluminação natural**	
	Fachadas	Coberta	Fachadas	Coberta	Fachadas	Coberta
Classe 1	52,3%	100%	0,2%	100%	93,5%	-
Classe 2	16,1%	100%	0%	100%	32,2%	-
Classe 3	2,7%	100%	0%	100%	17%	-
Classe 4	5,4%	100%	0%	100%	0,1%	-
Classe 5	17,5%	100%	0%	100%	66%	-

Do ponto de vista da disponibilidade do recurso solar em envoltórias, a densidade, vista apenas em termos de ocupação do solo ou do coeficiente de aproveitamento ou número de pavimentos isoladamente (comuns nas legislações urbanas brasileiras), conforme discutimos na seção II.4.2.2, pode não ser um indicador relevante de desempenho do ponto de vista do controle e potencial solar.

No entanto, as relações que podem ser estabelecidas entre altura e afastamentos na escala urbana, como no prospecto médio (ou fator de visão do céu), a altura de rugosidade e porosidade, podem ser decisivos no comportamento radiativos das envoltórias. Como pode ser constatado na modificação da temperatura de superfície entre as classes examinadas e na velocidade do vento (Figura 129), respectivamente.

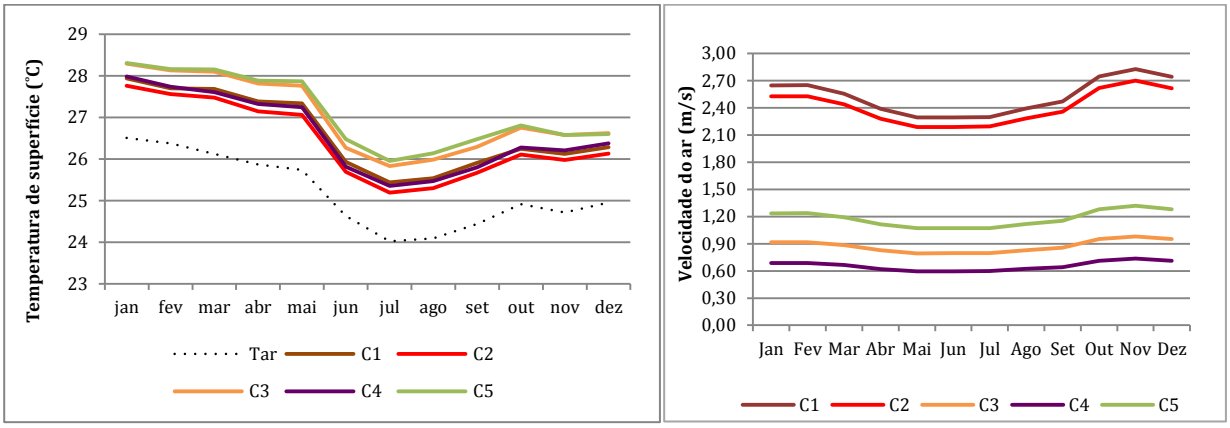


Figura 129: temperatura média ponderada das superfícies dos edifícios para as cinco classes morfológicas de referencia de Maceió e em linha tracejada, a temperatura média do ar, por mês.

Entre as 5 classes morfológicas urbanas examinadas, as tipologias horizontais, 1 e 5, bem como a classe de forma urbana contínua (classe 3) - apresentaram as temperaturas de superfície de seus edifícios (temperatura média ponderada das envoltórias) mais elevadas. Isso pode ser dado à uma maior exposição das amplas áreas de cobertura (caso da classe 3) à irradiação solar e, da envoltória voltada ao exterior dos edifícios da classe horizontal 5, nesse último caso especialmente, dado ao seu reduzido prospecto médio e reduzida verticalidade. Fatores estes que podem levar a uma maior insolação das superfícies construídas.

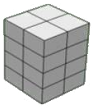
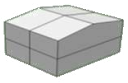
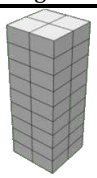
A classe 1 (horizontal disperso) apresenta ainda maior espaçamento entre os edifícios e, portanto, menor obstrução do entorno e menor sombreamento dos edifícios entre si, podendo apresentar, por consequência, maior nível de incidência da radiação solar na superfície de suas evoltórias. De um lado, seu desempenho em termos de carga térmica solar é bastante desfavorável, e do outro, seu potencial solar ao nível das cobertas para conversão em energia (solar térmica e fotovoltaica) é bastante elevado.

As classes de menor temperatura superficial são as mais verticalizadas (classe 2 e 4) e de maior heterogeneidade de altura. Tipologias que também apresentam maiores prospectos, menor visão do céu e, por consequência, que produzem maior sombreamento das suas superfícies verticais.

Ressalta-se que como foi analisado apenas uma amostra restrita de cinco casos representativos da malha urbana em um dado contexto, a identificação da magnitude de efeito de cada indicador em relação aos parâmetros de análise (trocas radiativas em envoltórias) poderá ficar restrita à esses casos, podendo apresentar viés de análises. Por essa razão, no capítulo III, empregamos metodologia estatística para avaliar o impacto e a sensibilidade dos indicadores da forma urbana nas respostas de interesse.

A Tabela 28 abaixo resume os principais indicadores e resultados obtidos nessa primeira abordagem metodológica do trabalho.

Tabela 28: resumo comparativo das principais características "morfosolares"das cinco tipologias de Maceió.

Indicadores	 **Classe 1**	 **Classe 2**	 **Classe 3**	 **Classe 4**	 **Classe 5**
Área construída no solo (m^2) ou área da coberta	1416,5	9492,0	31552,0	27190,4	22792,4
Área total construída (m^2)	1581,6	25615,7	93233	237367,8	34188,5
Número de pavimentos (/)	1,13	4	3	10	1
Área da envoltória (m^2)	3050,4	39564,9	131376	15330,2	60617,9
Volume construído (m^3)	5774,8	79609,0	238339	712923,6	102565,6
Coeficiente de forma	4,75	5,18	3,87	4,94	3,66
Taxa de ocupação	0,08	0,22	0,75	0,49	0,56
Coeficiente de aproveitamento	0,08	0,88	2,38	4,15	0,75
Albedo (/)	0,12	0,18	0,15	0,20	0,15
Nível de iluminância nas fachadas (Lux)	13060,4	8723,2	7706,9	1934,8	10782,1
Irradiação total disponível na coberta (kWh/m^2)	2056,8	1970,2	1949,7	1994, 2	2025,1
Irradiação disponível / pavimento (kWh/m2.ano)	2458,8	569,25	729,06	280,1	1553,4
Irradiação total disponível nas fachadas (kWh/m^2)	264,3	237,3	187,9	212,8	207,2

Conclusões do Capítulo II

Nesse capítulo buscou-se desenvolver e aplicar um método de avaliação do potencial solar em tipo-morfologias urbanas, a partir da definição de um sistema de indicadores "morfo-solares" da forma urbana. Esse indicadores da forma foram empregados para caracterização e identificação de estruturas urbanas representativas do tecido da cidade de Maceió. Cinco classes de tipo-morfologias urbanas predominantes nesse tecido foram reconhecidas por métodos estatísticos (ACP e método de agrupamento) e com auxílio de um SIG. A técnica de análise de componentes principais (ACP), permitiu identificar os indicadores morfológicos mais expressivos e de informações mais relevantes. E, o método de agrupamento estatístico de dados possibilitou, na sequência, repartir o tecido urbano a partir da agregação de características morfológicas predominantes.

Verificou-se no contexto de Maceió, a presença de uma crescente verticalização em pontuais centralidades e crescente horizontalização das periferias, características morfológicas fortemente atreladas às peculiaridades da renda imobiliária da terra e aos frágeis instrumentos regulatórios. Identificar essas tipologias nos permitiu estudá-las a partir da aplicação de modelos físicos de simulação. De modo que, para cada tipo, seu desempenho e o potencial solar de produção energética foram estabelecidos. Esse diagnóstico inicial sobre os espaços existentes nos permitiu estabelecer relações importantes entre a forma urbana e o balanço radiativo e a disponibilidade de iluminação natural nas superfícies de fachadas e cobertas das edificações.

A partir dos resultados obtidos nessa etapa, foi possível verificar um importante potencial solar da cobertura dos edifícios para todas as tipo-morfologias de referência identificadas neste estudo para a cidade de Maceió-AL, demonstrando inicialmente pouca influência do entorno construído na produção do efeito de sombras em cobertas, por exemplo. De fato, para fins de aproveitamento da energia solar, a trajetória do sol em baixas latitudes favorece bastante a captação desse recurso por meio das cobertas em diversas formas construídas, principalmente, se o desvio-padrão da altura construída do entorno não for muito importante.

No entanto, esse potencial de aproveitamento quando ponderado pela densidade ocupada (número de pavimentos e/ou unidade de ocupação), estabelece-se de outra forma. Verificou-se uma importante dependência da verticalidade, do coeficiente de aproveitamento e da taxa de ocupação para adequabilidade otimizada do potencial solar das construções urbanas. Destacando-se o elevado potencial das vizinhanças urbanas predominantemente horizontais e de grandes superfícies construídas no solo, como em alguns bairros da periferia da cidade e de centralidades como no bairro situado no tabuleiro da cidade. A verticalização das construções na cidade, ao minimizar a superfície de envoltória exposta à radiação solar por unidade habitacional, reduz o potencial solar para produção de energia descentralizada por metro quadrado habitado, mas pode, por outro lado, contribuir para a redução dos ganhos térmicos por aporte solar nesses envelopes construídos, podendo melhorar as condições de conforto interior e, assim, reduzir a demanda energética. No entanto, para algumas tipologias, isso comprometeu expressivamente no nível de iluminação natural recebidos pelas edificações.

Esses resultados contribuíram para responder a hipótese formulada no início da pesquisa, que afirmava a influência determinante dos parâmetros da forma construída no potencial energético, tanto em termos de potencial de aproveitamento para produção quanto de potencial de redução da demanda.

A partir do uso de determinados indicadores da forma (em função da relevância aos condicionantes solares em estudo) foi possível, portanto, construir relações importantes entre as características morfológicas de uma dada tipologia e o comportamento físico obtido pela mesma. De modo que esses indicadores podem ser referidos e empregados na prática da concepção permitindo

esboçar tendências importantes de desempenho qualitativo das formas, corroborando para a segunda hipótese assumida na pesquisa.

O Capítulo II aprofundou as relações entre os indicadores morfológicos e o potencial solar das estruturas urbanas reconhecidas, porém apenas a partir de uma análise mais objetiva por meio do planejamento de uma amostra estatística das variações desses indicadores é que será possível avaliar efetivamente a influência relativa dos mesmos. Esssa aplicação será abordada no Capítulo III.

CAPÍTULO III
Análise de sensibilidade dos fatores tipo-morfológicos

Objetivo geral do Capítulo III

Diante dos condicionantes solares apresentados no Capítulo I, dos fatores tipo-morfológicos identificados na literatura e das tipologias de referência definidas no Capítulo II, passamos agora ao processo de análise paramétrica e prospectiva desses fatores de projeto para concepção e adaptação das tipologias examinadas.

Diante do amplo conjunto de parâmetros da forma urbana que estão implicados na definição do balanço de radiação das fachadas de edifícios, conforme discutimos nos capítulos precedentes, torna-se imprescindível conhecer quais desses fatores são mais pertinentes e significativos no que concerne aos objetivos investigados. Para isto, antes de passar às simulações de cenários prospectivos, realizamos um teste de sensibilidade por meio de um planejamento fatorial de projetos, que permitirá identificar os fatores mais influentes no processo investigado, e também auxiliar na modelagem do estudo de otimização.

Dado o caráter interdisciplinar da tese e a fim de apoiar a leitura e compreensão dos conceitos empregados nesse capítulo, apresenta-se também ao final um breve glossário onde constam as principais definições e referências sobre otimização multicritério e tratamento estatístico de dados.

A Figura 130 apresenta esquematicamente a estrutura do Capítulo III.

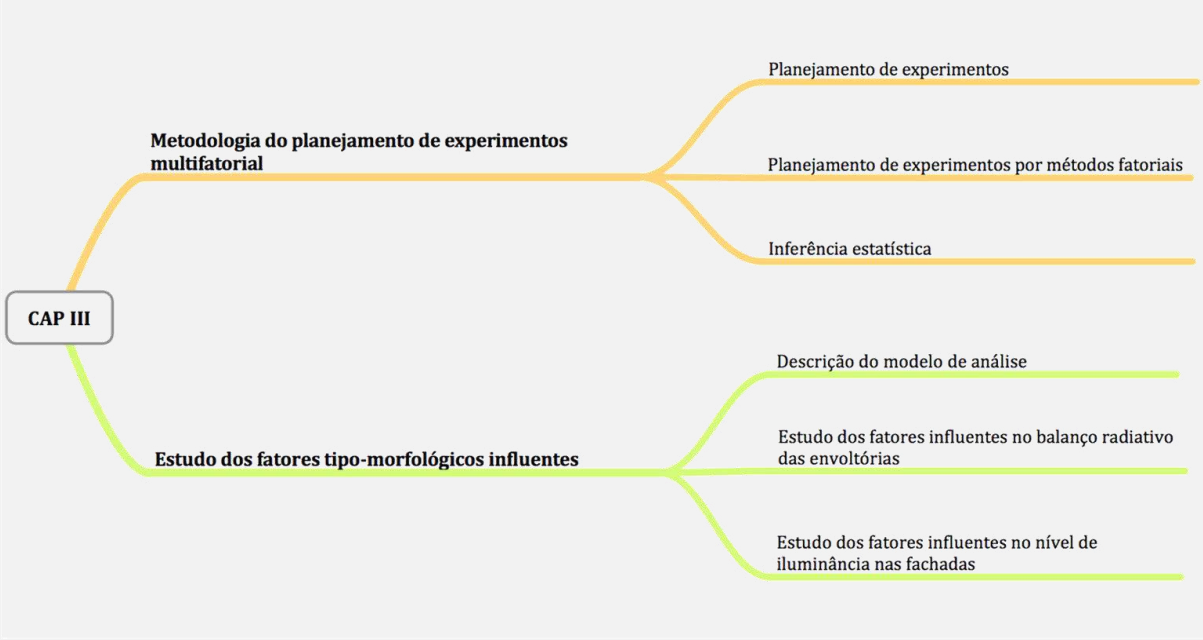


Figura 130: estrutura do capítulo III.

Palavras-chaves: análise de sensibilidade; planejamento de experimentos; método fatorial fracionado.

III.1. Metodologia de planejamento de experimentos multifatorial

> "O grande objetivo de toda ciência é cobrir o maior número possível de fatos empíricos por dedução lógica, à partir do menor número possível de hipóteses ou axiomas (...)" Einstein, A.

A fim de iniciar qualquer processo de projeto, faz-se necessário caracterizar o problema a ser tratado e modelado de uma forma mais adequada e completa possível. Ou seja, procurar caracterizar adequadamente as variáveis de projeto, os requisitos, restrições e objetivos a serem alcançados.

Um dos aspectos determinantes da complexidade do problema é o número de variáveis de projeto envolvidas. Pois, quanto maior o número de variáveis, mais complexo torna-se o problema, e amplia-se assim, o número de configurações a serem estudadas.

No caso da aplicação de uma metodologia de projeto por otimização, como proposto nesse trabalho, inúmeras variações de forma podem ser geradas, porém o processo pode ser extremamente dispendioso, se mal planejado.

Diante dessa dificuldade, a utilização de estratégias capazes de identificar as variáveis mais significativas do problema, surge como uma boa alternativa para reduzir a complexidade do estudo/projeto. Estas estratégias consistem em verificar como cada variável (ou fator) de projeto modifica uma dada resposta de interesse. Para realizar esse teste de sensibilidade, é necessário examinar um conjunto de configurações para as quais variamos cada um dos fatores de projeto e verificamos se a variação em cada fator induz modificações importantes ou não na resposta.

Nessa avaliação preliminar, é possível identificar quais fatores apresentam realmente um impacto importante e quais apresentariam efeito desprezível nas respostas de interesse. Os fatores desprezíveis podem, por exemplo, serem considerados como fatores constantes no problema sem perda de representatividade nas avaliações de otimização. A partir de testes estatísticos simples é possível conhecer a magnitude de efeito das variáveis envolvidas.

Por exemplo, no âmbito do presente trabalho, buscamos formas mais adaptadas tendo como resposta de interesse: a disponibilidade de irradiação e iluminação nas envoltórias dos edifícios, na escala urbana.

Para realizar esse teste de sensibilidade, faz-se necessário planejar os experimentos ou projetos, de modo à evitar viés nas escolhas e nas análises. Com um grande número de fatores e um amplo intervalo de valores para cada um (que chamaremos aqui de níveis), o espaço de busca pode torna-se extremamente largo, quase infinito. De modo que avaliar todo esse espaço seria também improvável.

Para resolver esse problema, pesquisadores desenvolveram uma metodologia estatística que auxilia no planejamento de projetos ou planejamento de experimentos (do inglês *Design Of Experiments*, DOE). Seu princípio básico permite variar de uma só vez todos os níveis de todos os fatores, discretos ou contínuos, a cada experiência, de maneira programada e racional.

Esta seção fornece uma introdução para o uso de planejamento estatístico de experimentos para uma adequada avaliação inicial do comportamento de fatores envolvidos em um projeto. A aplicação no estudo e a definição do modelo e variáveis a serem tratadas por essa estratégia serão apresentados mais adiante ainda nessa seção.

Rodrigues e Iemma (2009) destacam que a metodologia do planejamento experimental é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística e, é capaz de fornecer informações importantes e seguras sobre o modelo em análise, proporcionando a minimização do caráter empírico que envolve a metodologia clássica de tentativa e erro em projetos.

Segundo Montgomery (2001), o planejamento estatístico de experimentos refere-se ao processo de planejar o experimento de modo que dados apropriados quando analisados por métodos estatísticos, possam ser coletados, resultando em conclusões válidas e objetivas. Assim, destaca-se a importância de dois aspectos em qualquer problema experimental: o planejamento do experimento e a análise estatística dos dados, estando esses aspectos intimamente relacionados, uma vez que o método de análise estatística depende diretamente do planejamento empregado.

A técnica de planejamento de experimentos foi estudada e proposta por volta do ano de 1920, pelo cientista britânico Ronald A. Fisher e, consiste em uma sistematização de experimentos, com o intuito de maximizar o conhecimento obtido por meio de dados experimentais. De modo geral, o planejamento de experimentos é uma técnica utilizada para se planejar a amostra a ser executada. No caso particular do presente trabalho, essa metodologia orienta a definição de quais configurações geométricas urbanas serão inicialmente avaliadas, de modo a satisfazer basicamente dois objetivos: obter maior precisão e confiabilidade estatística possível nas conclusões acerca das respostas obtidas destes experimentos e a menor quantidade de experimentos/configurações necessária para efetuar as análises estatísticas iniciais desejadas. Logo, essa é uma técnica de bastante interesse para vários setores de projeto (e.g. na engenharia civil, na indústria de produtos e outros estudos paramétricos diversos), pois seu emprego é capaz de proporcionar resultados mais confiáveis e com redução de tempo e custos.

Dentro do contexto do planejamento de experimentos, faz-se necessário definir alguns conceitos importantes para auxiliar no entendimento dos tópicos que se seguem.

• **Fatores**: são as variáveis de projeto identificadas das quais dependem as respostas de interesse. Durante os experimentos, os fatores são alterados e as respostas de interesse são observadas possibilitando a inferência de considerações acerca do modelo estudado.

• **Respostas**: consistem nos parâmetros de saída de interesse do modelo em estudo, que descrevem como o sistema responde em função dos fatores definidos.

• **Efeito**: impacto ou mudança na resposta produzida pela mudança do nível do fator. O termo efeito principal é frequentemente utilizado ao se referir aos efeitos dos fatores primários do experimento (MONTGOMERY e RUNGER, 2009), é o efeito individual que cada fator tem sobre a resposta, sem considerar os possíveis efeitos de interação entre os fatores. O efeito referente às interações mede o diferencial de um fator quando o outro fator muda de nível.

•**Interação**: consiste no fato de um fator não produzir o mesmo efeito na resposta a diferentes níveis de outro fator. Quando isso ocorre, pode-se constatar que há interação entre os fatores, ou seja, dois ou mais fatores experimentais influenciam o parâmetro de resposta juntos e separadamente os efeitos não podem ter seu fator de causa identificado. Montgomery e Ruger (2009) ressaltam que quando a interação entre os fatores é grande, os efeitos principais correspondentes apresentam pouco significado prático, pois podem estar mascarados, sendo, desta forma, mais importante identificar e estudar a interação entre os fatores.

• **Análise de sensibilidade**: consiste na investigação sistemática do efeito causado na resposta em função da variação das variáveis de entrada do modelo. Os resultados desta análise podem ser utilizados como base da seleção das variáveis a serem consideradas na continuidade do estudo de otimização. Assim, o objetivo da análise sensibilidade é identificar para quais variáveis o sistema em estudo é mais sensível, possibilitando desta forma a eliminação das variáveis que não produzem efeitos significativos.

Para um adequado planejamento de experimentos, Montgomery (2001) sugere que sejam seguidas as seguintes etapas:

1. Caracterização do problema: nesta etapa deve ser feito um adequado delineamento do problema real estudado de modo a caracterizá-lo e melhor compreendê-lo para possibilitar sua modelagem.

2. Definição dos objetivos: a medida objetiva de eficiência desejada deve ser não tendenciosa, específica, mensurável e de resultado prático.

3. Escolha dos fatores de influência e níveis: nesta etapa devem-se escolher os fatores variáveis do modelo, os intervalos viáveis de variação desses fatores e os níveis específicos nos quais cada experimento será realizado. É importante investigar todos os fatores que possam ser importantes. Segundo Montgomery (2001), quando o objetivo é a varredura dos fatores ou caracterização do processo, é mais adequado manter baixo o número de níveis de fatores (em geral, são usados dois níveis).

4. Seleção das variáveis de resposta: os parâmetros de respostas a serem avaliados devem necessariamente fornecer informações relevantes acerca dos experimentos realizados, de modo a permitir uma caracterização adequada do problema.

5. Determinação de um modelo de planejamento de experimento: define-se o método a ser utilizado para definição dos experimentos a serem realizados em função das características já definidas nas etapas anteriores.

6. Condução do experimento: execução da simulação de cada experimento definido.

7. Análise dos dados: métodos estatísticos devem ser usados para a análise dos resultados obtidos dos experimentos executados, conduzindo a conclusões objetivas e confiáveis.

8. Conclusões e recomendações: com base na análise estatística dos dados é possível obter conclusões práticas sobre a influência dos fatores nas respostas de interesse, bem como a correlação e interação entre fatores. A partir dessas conclusões, algumas ações podem ser recomendadas, como a não consideração de determinados fatores, a inclusão de novos parâmetros de resposta, entre outras. O planejamento de experimentos realizado com base na sequência sugerida acima proporciona uma série de vantagens, tais como: bom entendimento estatístico do problema, viabilizando a identificação das principais causas de variação na resposta de interesse; fornece dados que, a depender do problema, podem ser utilizados para geração de metamodelos, ou superfícies de resposta, possibilitando uma exploração inteligente e de baixo custo do domínio do problema; fornece um ponto de partida para análises de otimização.

Experimentos planejados são geralmente empregados sequencialmente. Em princípio, tendo como base o sistema inicialmente modelado, em geral mais complexo e com muitas variáveis controláveis, a realização dos experimentos planejados tem um caráter exploratório. Nesta etapa, tem-se como objetivo identificar quais variáveis são mais importantes. Experimentos subsequentes são utilizados no intuito de refinar essa informação e determinar possíveis ajustes nas variáveis críticas e, dessa forma, melhorar o processo.

Após todos os ajustes realizados com base nos dados obtidos por meio dos experimentos inicialmente realizados, a etapa final consiste na aplicação de métodos de otimização na busca pela configuração ótima desejada, ou seja, dos valores das variáveis que resultam no melhor desempenho do processo em estudo. Logo, experimentos estatisticamente bem planejados aplicados previamente ao processo de otimização propriamente dito proporcionam eficiência e economia à análise como um todo.

III.1.1. Planejamento de experimentos por vários fatores

O método do planejamento de experimentos (DOE) permite o estudo de numerosos fatores, mantendo-se o número de ensaios em níveis razoáveis, pois uma de suas aplicações principais está na procura dos fatores influentes. O experimentador pode reduzir o tempo de trabalho, diminuindo o número de pontos de experiência por fator, sem ser obrigado a limitar o número de fatores, como ocorre no método clássico da experimentação. Esta técnica permite ter uma boa amostra de projetos, evitando subjetividade nas análises, bem como eliminando observações redundantes (MONTGOMERY, 2001).

Entre todos os fatores estudados, apenas alguns apresentarão influência significativa na variação das respostas. Em função dos resultados obtidos, será fácil escolher os novos pontos experimentais para esclarecer alguns aspectos de um estudo. Desta maneira, todos os fatores terão sido detectados e estudados, mantendo-se o numero de experiências dentro do justo necessário.

Existem diversos métodos de planejamento de experimentos, com diferentes estratégias de delineamento e recomendados para diferentes abordagens. Cabe ao projetista, com base nas características do problema que deseja analisar, definir qual o método mais apropriado para aplicação. Tendo como foco uma análise estatística dos dados experimentais para posterior inferência acerca da significância do efeito dos fatores nas respostas de interesse, alguns aspectos podem ser considerados. Os experimentos devem ser representativos das variações dos fatores envolvidos, possibilitando a análise da magnitude do efeito causado na resposta pela variação dos fatores dentro de seus respectivos intervalos de variação. Nessas análises, é importante cobrir da forma mais completa o campo do possível, de modo a evitar viés nos resultados. Além disso, para possibilitar uma adequada análise estatística, é recomendado que os experimentos sejam definidos de modo a garantir uma baixa correlação entre os fatores envolvidos, evitando-se obter resultados tendenciosos.

A título de exemplificação, a Figura 131 e Tabela 29 ilustram um exemplo, com três fatores de projeto, na definição de oito experimentos utilizando um método aleatório de seleção. Para esse exemplo, a Tabela 29 apresenta as coordenadas dos experimentos definidos e a Tabela 30 apresenta as correlações lineares obtidas entre os fatores. Para comparação, apresenta-se na Figura 132, um exemplo de definição dos experimentos utilizando o método de planejamento fatorial. As coordenadas dos experimentos definidos por esse método são apresentadas na Tabela 31 e as correlações obtidas entre os fatores são apresentadas na Tabela 32. Os dados apresentados na Tabela 30 e na Tabela 32 são referentes ao coeficiente de correlação de Pearson das variáveis de entrada consideradas nesse exemplo ilustrativo. Também chamado de coeficiente de correlação produto-momento, esse parâmetro mede o grau da correlação linear, bem como a direção dessa correlação, entre duas variáveis. Esse coeficiente, normalmente representado por 1 assume apenas valores entre -1 e 1. Quando $\rho = 1$, é possível afirmar que há uma correlação linear perfeita positiva entre as variáveis. Por outro lado, quando $\rho = -1$, afirma-se que há uma correlação linear negativa perfeita entre as variáveis.

Quando $\rho = 0$, constata-se que as variáveis não dependem linearmente uma da outra, mas ainda é possível que haja uma dependência não linear entre as mesmas. Para as correlações onde $0 < \rho < 1$ ou $-1 < \rho < 1$, cabe ao avaliador interpretar se o grau de correlação obtido é significativo ou não. Em geral, correlações são consideradas significativas quando $\rho \geq |0{,}7|$.

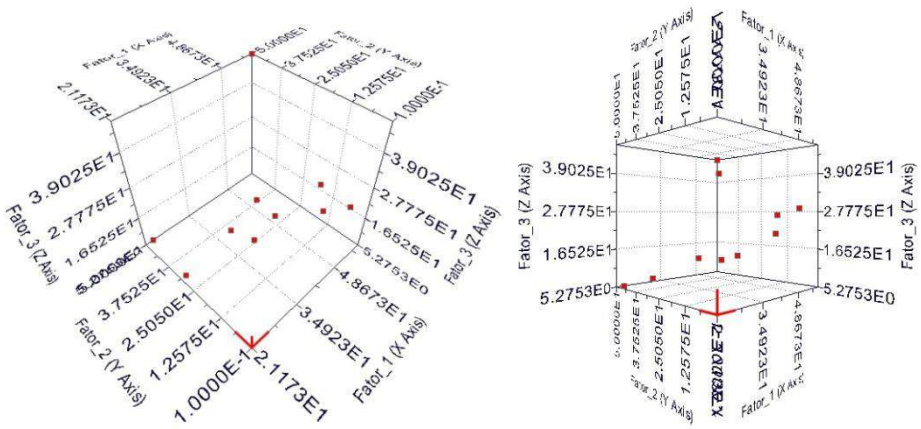


Figura 131: estratégia experimental com fatores distribuídos aleatoriamente. Fonte: ilustração do autor, 2012.

Tabela 29: coordenadas dos fatores da amostra distribuídos aleatoriamente.

Experimentos	Fator 1	Fator 2	Fator 3
0	45,98	22,27	14,34
1	23,29	50,00	5,27
2	58,00	50,00	47,62
3	56,64	16,73	20,63
4	21,17	27,82	10,21
5	47,73	33,36	12,05
6	52,80	5,64	36,27
7	49,28	0,1	28,54

A Figura 131 mostra os oito pontos, correspondendo aos oito experimentos, derivados da combinação dos três fatores de investigação combinados, distribuídos aleatoriamente no espaço de busca. Nesse tipo de método de exploração de oportunidades de projeto, os experimentos são definidos de modo a cobrir ao máximo o domínio do problema, mas podem, fatalmente, privilegiar regiões específicas do espaço e resultar em uma correlação significativa dos fatores, não sendo adequados para inferência estatística, uma vez que podem gerar conclusões equivocadas. Por outro lado, essa abordagem proporciona uma boa avaliação exploratória do domínio do problema, possibilitando o conhecimento do comportamento do problema analisado nos pontos de análise e inclusive a identificação de regiões de interesse dentro do domínio.

Tabela 30 : Matriz de correlação linear entre os fatores envolvidos no caso de uma amostra aleatória.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Fator 1	**1,000**	-0,333	0,732
Fator 2	-0,333	**1,000**	-0,159
Fator 3	0,732	-0,159	**1,000**

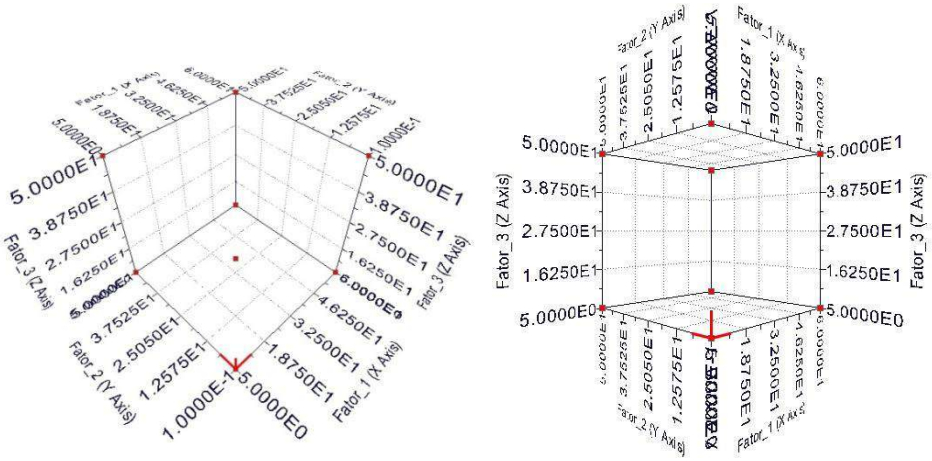


Figura 132: planejamento de experimentos por método fatorial. Fonte: ilustração do autor, 2012.

Tabela 31:coordenadas de uma amostragem de experimentos definida por método fatorial.

Experimentos	Fator 1	Fator 2	Fator 3
0	5	0,1	5
1	5	0,1	50
2	5	50	5
3	5	50	50
4	60	0,1	5
5	60	0,1	50
6	60	50	5
7	60	50	50

Tabela 32: matriz de correlação entre os fatores combinados por método fatorial.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Fator 1	**1,000**	0,000	0,000
Fator 2	0,000	**1,000**	0,000
Fator 3	0,000	0,000	**1,000**

No segundo exemplo, com a definição dos experimentos por meio do método fatorial (Figura 132) observa-se que os experimentos são distribuídos uniformemente no domínio do problema e resultam em uma correlação nula dos fatores. Nesse exemplo específico, foram considerados apenas dois níveis e os experimentos delineados representam os valores extremos dos fatores, conforme pode ser observado na Figura 132 e na Tabela 31. Por meio desses exemplos, observando a distribuição dos experimentos no domínio do problema, é possível constatar que, se os mesmos estiverem concentrados em determinada parte do domínio, a correlação entre essas variáveis será alta, situação ilustrada na Tabela 32. Com essa abordagem, o conhecimento do comportamento do modelo em estudo pode ficar limitado a uma determinada região do domínio do problema e não gerar resultados representativos do comportamento global do sistema em relação aos fatores que o definem. Existem técnicas de planejamento de experimentos, a exemplo do fatorial, onde se obtém uma distribuição mais adequada e com correlação nula entre os fatores, proporcionando o conhecimento do comportamento global do sistema em estudo.

A escolha pela técnica de planejamento a ser utilizada depende fortemente da quantidade de experimentos que se deseja, ou que se tenha disponibilidade de realizar. A depender do custo de cada análise individual, seja financeiro ou em termos de demanda computacional, a quantidade de experimentos a ser executada fica limitada. Esse é um fator que deve ser considerado no momento da escolha do método de planejamento a ser adotado, tendo em mente a definição de uma amostra representativa do domínio com o menor custo associado possível.

Entre os diversos métodos de distribuição de projetos no domínio de busca, é possível citar algumas categorias (MODEFRONTIER, 2013):

• **Definição pelo usuário**: baseado em experiência prévia do projetista, o qual define quais parâmetros serão avaliados nos experimentos. Essa técnica é adequada apenas quando o projetista, ou experimentalista, possui bastante experiência e um bom conhecimento técnico sobre o sistema avaliado e seu comportamento. Essa técnica possui duas desvantagens: (a) quando a suposição inicial não possui resultados desejados, sendo necessário nesse caso a definição de uma nova suposição que, por sua vez, pode também não levar a resultados desejados e esse processo continuar por um período muito longo sem garantia de sucesso; (b) a segunda desvantagem é quando as suposições iniciais produzem um bom resultado, porém não há garantias de que a melhor solução foi encontrada e de que os dados obtidos são suficientes para possíveis inferências sobre o comportamento do sistema (MONTGOMERY, 2001).

• **Métodos exploratórios**: utilizados para conhecimento do comportamento global do modelo em estudo. Esses métodos eliminam conclusões subjetivas e permitem uma boa amostragem do espaço de busca e podem ainda auxiliar na identificação de um melhor ponto de partida para uma subsequente análise de otimização ou como base para criação de uma superfície de resposta. Nessa categoria estão inclusos os métodos: *Random Sequence* (sequência aleatória), *Sobol* (sequência uniforme pseudo aleatória), *Latin Hypercube* (Hipercubo Latino), *Cross Validation* (Validação Cruzada).

• **Métodos para análise estatística**: categoria de técnicas mais indicadas para realizar análises estatísticas confiáveis dos dados obtidos por meio dos experimentos. Por meio desses métodos é possível avaliar os efeitos principais dos fatores na resposta de interesse, bem como as interações entre fatores, possibilitando a identificação das variáveis de projeto mais significativas para o problema. O comportamento global do modelo também é conhecido por meio desses métodos. Fazem parte dessa categoria os métodos: *Full Factorial* (Fatorial Completo), *Reduced Factorial* (Fatorial Fracionado), *Cubic Face Centered* (Cubo de Face Centrada), *Box-Behnken, Plackett Burman* e *Latin Square* (Quadrado Latino).

III.1.2. Planejamento de experimentos por métodos fatoriais

No presente estudo, utiliza-se métodos para análise estatística, mais especificamente, os métodos fatoriais. Entre os planejamentos com foco em análise estatística para posterior inferência dos resultados, os métodos fatoriais são os mais utilizados quando vários fatores são de interesse em um experimento, como no caso do estudo desenvolvido neste trabalho. Em função dessa justificativa, apenas os métodos fatoriais serão detalhados nesta seção. Informações mais detalhadas sobre outros planejamentos experimentais podem ser encontradas em Fisher (1971), Montgomery (2001), Rodrigues e Iemma (2009).

III.1.2.1. Projeto simples (ou de um fator por vez)

A estratégia de avaliação de um fator por vez (*one factor at a time*) consiste em selecionar uma configuração de referência como ponto de partida e a partir dessa configuração inicial variar um fator por vez, mantendo-se os demais fatores com valores constantes. Para cada experimento realizado observa-se o comportamento da resposta de interesse em função da variação de cada fator. Observa-se que este é um método de fácil implementação, entretanto estatisticamente ineficiente, uma vez que não permite identificar possíveis interações entre os fatores, podendo fatalmente gerar conclusões equivocadas. A quantidade de experimentos necessários quando da utilização da estratégia de um fator por vez é dada por:

$$n = 1 + \sum_{i=1}^{k}(n_i - 1) \qquad \text{[Eq. 49]}$$

onde k é a quantidade de fatores considerados, e n_i é a quantidade de níveis considerados para o fator *i.*

III.1.2.2. Fatorial completo

Por experimento fatorial completo entende-se que, em cada tentativa completa ou réplica do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas (MONTGOMERY e RUNGER, 2009). A partir dessa abordagem as variáveis sofrem variações conjuntas, ao invés de uma por vez.

Esta estratégia é mais eficiente que a abordagem um fator por vez, já que permite que os efeitos de um fator sejam avaliados nos diversos níveis dos outros fatores, conduzindo a conclusões que são válidas dentro da abrangência das condições experimentais (MONTGOMERY, 2001) e, é a única forma de descobrir interações entre os fatores. Por outro lado, o fatorial completo apresenta como desvantagem o crescimento exponencial das combinações de níveis com o aumento do número de fatores.

Neste método, o número de experimentos é definido por:

$$n = \prod_{i=1}^{k} n_i$$

[Eq. 50]

A ilustração abaixo exemplifica esquematicamente um caso de definição dos experimentos utilizando o método fatorial completo, de três fatores e cinco níveis (n=5^3), resultando em 125 projetos.

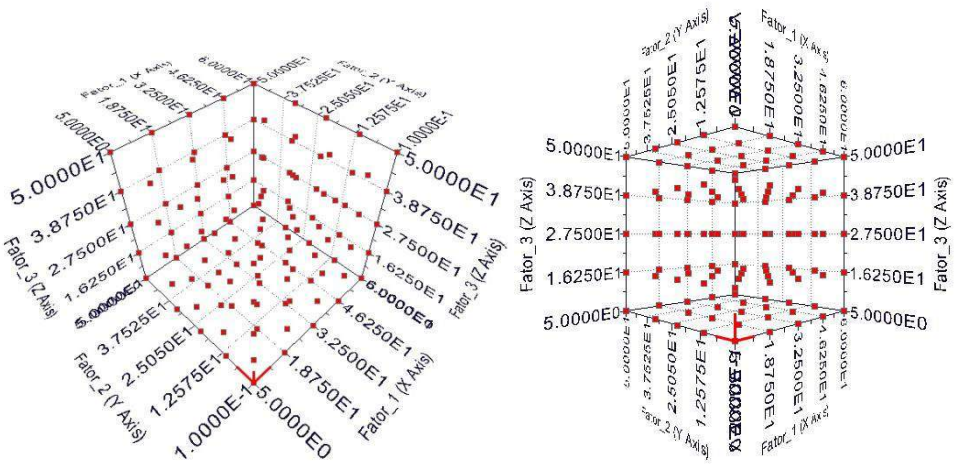


Figura 133: distribuição dos projetos no espaço de busca conforme estratégia experimental de fatorial completo Fonte: ilustração do autor, 2012.

Uma estratégia comumente utilizada para redução de custos é a diminuição dos níveis considerados para cada fator. O planejamento fatorial completo de dois níveis, por exemplo, denominado fatorial 2^k , define para cada fator dois níveis de valores, alto (+) e baixo (-), gerando 2^k experimentos, sendo k o número de fatores considerados. Segundo Montgomery e Runger (2009) o planejamento fatorial 2^k é um dos mais importantes tipos de planejamento fatorial, particularmente útil nos estágios iniciais de um trabalho experimental quando muitos fatores definem o sistema analisado. Num fatorial completo de dois níveis (2^k), o exemplo acima () passaria a ter um intervalo de duas variações para os três fatores de projeto considerados, ou seja: 2^3 (ou 8 projetos/ experimentos). Porém, mesmo na abordagem de dois níveis, quando o número de variáveis/ fatores

é muito elevado, um fatorial completo pode resultar numa quantidade de projetos extremamente grande.

III.1.2.3. Fatorial fracionado

Conforme comentado na seção anterior, à medida que o número de fatores em um experimento fatorial 2^k aumenta, o número de experimentos gerados também aumenta, podendo inviabilizar a aplicação do planejamento completo.

Nesses casos, observa-se também um aumento do número de interações de maior ordem. Em geral, essas interações de ordem elevada são negligenciáveis para o experimento, podendo-se focar apenas nos efeitos principais e nas interações de baixa ordem (MONTGOMERY, 2001). Para tanto, recomenda-se a aplicação do método fatorial fracionado, bastante utilizado em diversas aplicações, uma vez que permite reduzir o número de tratamentos e consequentemente, o custo de realização do experimento.

Experimentos fatoriais fracionados são recomendados na fase inicial de exploração do espaço de busca, denominada "filtragem de fatores" (do inglês *factor screening*), para avaliação do comportamento global do sistema, e identificação das variáveis mais significativas ao modelo. Montgomery (2001) afirma que nessa situação é melhor manter um pequeno número de níveis dos fatores. A aplicação deste método, na etapa inicial dos tratamentos, possibilita a identificação, com baixo custo associado, das variáveis mais significativas ao modelo em análise, ou seja, aquelas que produzem um efeito maior na resposta de interesse. Após essa identificação prévia, seguem-se com as análises em um modelo menos complexo, com uma menor quantidade de fatores variáveis, o que reduz o espaço de busca e torna o processo de otimização mais eficaz.

Montgomery e Runger (2009) exemplificam que em um planejamento fatorial com cinco fatores e dois níveis cada (2^5), cinco graus de liberdade correspondem aos efeitos principais, dez graus de liberdade correspondem às interações de segunda ordem e dezesseis graus de liberdade correspondem às interações de ordens mais altas. Nos estudos iniciais de um projeto ou sistema, de um modo geral, há pouco interesse nessas interações de ordens mais altas.

Um planejamento fatorial fracionado é construído selecionando um subconjunto de tamanho 2^{k-p} de todos os pontos possíveis de um planejamento fatorial completo 2^k, sendo p o número referente à fração do planejamento completo que se deseja simular. Uma abordagem bastante utilizada é a meia fração de um planejamento completo, representada por 2^{k-1}. Embora esse seja um planejamento que permite uma grande redução no número de experimentos requeridos, é possível utilizar frações ainda menores capazes de fornecer quase tanta informação útil quanto uma maior economia. Informações mais detalhadas sobre o delineamento desses experimentos podem ser encontradas em Rodrigues e Iemma (2009), Montgomery e Runger (2009) e Montgomery (2001).

Martins *et al*. (2012) aplicou recentemente o método de planejamento de experimento por fatorial fracionado, fazendo interagir algumas variáveis da geometria urbana (largura, profundidade, altura, recuos, largura da rua e orientação). Tais variáveis de geometria foram elaboradas a partir dos parâmetros do código de edificações, para análise do impacto das construções no microclima urbano de uma cidade situada em clima tropical semi-árido no Brasil. Optou-se, portanto, por um fatorial de apenas dois níveis e de baixa ordem, devido ao elevado tempo de cálculo exigido pelo modelo computacional de simulação dinâmica microclimática utilizado na investigação, o modelo ENVImet®. Para preparar uma amostra significativa de experimentos, o intervalo considerado para cada variável de geometria (largura, profundidade e altura) foi estabelecido, baseando-se no padrão de construções do parque imobiliário identificado para a cidade estudo de caso. A distribuição dos projetos no espaço de busca, gerados conforme o

método do fatorial fracionado está ilustrado na Figura 134 e os modelos amostrais resultantes na Figura 135. Os resultados das simulações desses experimentos e análise de sensibilidade por parâmetro, encontra-se melhor detalhado em Martins, Adolphe e Krause (2012).

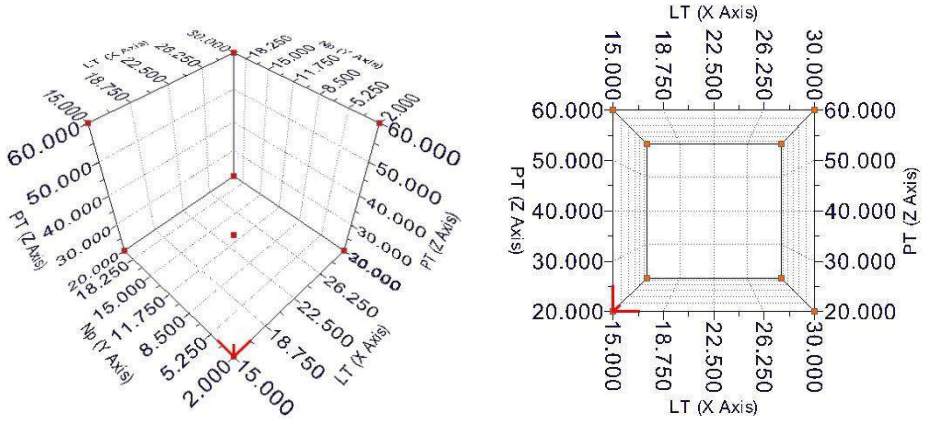


Figura 134: Distribuição dos experimentos/projetos no espaço de busca delimitado, por fatorial completo de dois níveis. Fonte: Ilustração do autor, 2012.

Tabela 33: matriz de correlação entre os fatores combinados por método fatorial.

	Largura (LT)	Nº pavimentos (Np)	Profundidade (PT)
Largura (LT)	**1,000**	0,000	0,000
Nº pavimentos (Np)	0,000	**1,000**	0,000
Profundidade (PT)	0,000	0,000	**1,000**

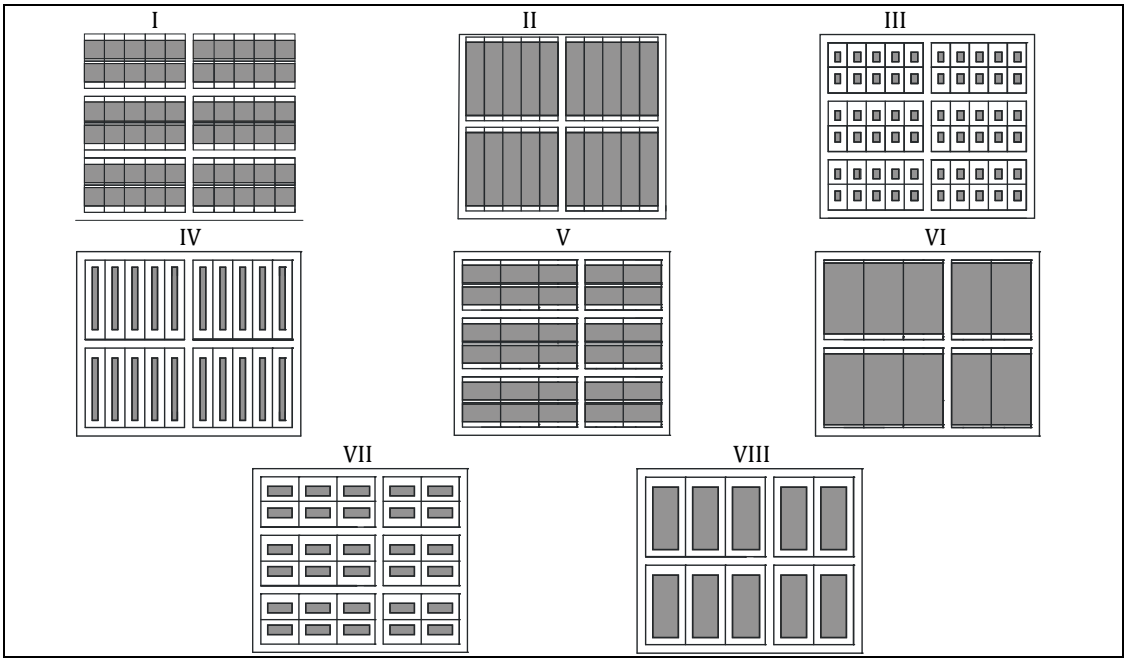


Figura 135: amostra projetos urbanos resultantes. Fonte: Martins *et al*., 2012.

Em função das vantagens descritas, proporcionadas pela aplicação do planejamento fatorial fracionado em testes de sensibilidade, o mesmo foi escolhido para ser empregado na metodologia do presente trabalho.

III.1.3. Inferência estatística

Para que seja possível fazer generalizações sobre uma amostra planejada de projetos, ou seja, retirar as informações que sejam relevantes sobre a significância dos fatores envolvidos nesses projetos, na nossa resposta de interesse, faz-se necessário realizar uma avaliação estatística.

No âmbito estatístico emprega-se bastante o conceito de população e amostra. Chama-se de população, o conjunto de todos os elementos ou resultados que descrevem um fenômeno de interesse do investigador. Enquanto a amostra consiste em uma parte (subconjunto) representativa de tal população.

No contexto deste trabalho, o inferir sobre a população, deve ser compreendido como o inferir sobre o comportamento radiativo de estruturas urbanas. Nesse sentido, amostras referem-se ao subconjunto de informações obtidas nas simulações realizadas por meio dos experimentos planejados.

Em geral, as informações desejadas acerca da população são desconhecidas. Por sua própria natureza e definição, a população é um ente teórico, em geral, inatingível (RODRIGUES e IEMMA, 2009). Dessa forma, um dos principais objetivos da ciência estatística é fornecer regras consistentes e probabilisticamente confiáveis para possibilitar a inferência de conclusões sobre as características da população de interesse. Logo, a análise de amostras e a utilização da metodologia de planejamento experimental constituem alternativas importantes.

O planejamento de experimentos busca, portanto, definir amostras representativas da população. A partir dos resultados obtidos por meio destes, procura-se observar as variações provocadas na resposta de interesse pelas variações nos níveis dos fatores envolvidos. A inferência sobre o comportamento da população é fundamentada na análise estatística dessas variações observadas nas amostras.

III.1.3.1. Teste de hipótese

De modo geral, a metodologia seguida quando da aplicação de uma análise estatística de determinado sistema consiste em formular hipóteses e, com base em observações amostrais, verificar a validade de tais hipóteses. Nesse contexto, Montgomery e Runger (2009) definem hipótese como uma afirmação sobre os parâmetros de uma ou mais populações, sendo o procedimento que leva a uma decisão acerca de uma hipótese particular, denominado teste de hipótese.

Ressalta-se que o planejamento experimental e a análise estatística dos resultados estão interligados, de modo que devem ser considerados de maneira sucessiva dentro da metodologia de análise seguida. O encadeamento ideal de etapas a serem consideradas para análise estatística dos dados de determinado sistema, encontra-se esquematizado na Figura 136.

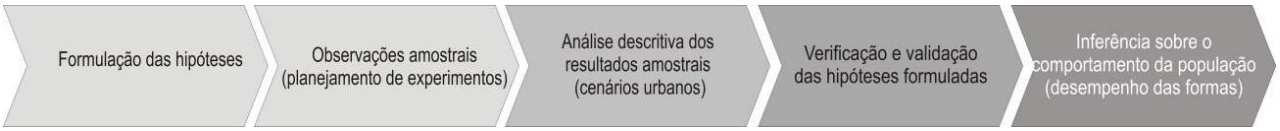


Figura 136: esquema sequencial do método científico estatisticamente planejado. Fonte: ilustração do autor.

No contexto deste trabalho, a hipótese que se pretende verificar por meio do planejamento estatístico de experimentos é a seguinte: as variáveis da forma urbana identificadas na literatura (e.g. Prospecto médio, Albedo, Altura construída, etc.) são possivelmente relevantes na definição da disponibilidade de irradiação e iluminação das envoltórias. Com base nessa hipótese, estabelece-se uma hipótese estatística a ser verificada de que há variação na média das respostas de interesse quando são impostas variações nos fatores envolvidos.

Uma vez que a hipótese estatística formulada envolve comparação de médias, o teste de hipóteses respectivo é classificado como paramétrico, já que é baseado em parâmetros da amostra. Rodrigues e Iemma (2009) ressaltam que a validade dos resultados obtidos através dos métodos paramétricos é fortemente dependente da normalidade dos dados analisados. Ainda, segundo esses autores, salvo raras exceções, resultados de análises estatísticas efetuadas através de métodos paramétricos não são confiáveis se os dados não pertencem a amostras extraídas de populações com distribuição normal.

Entretanto, na maioria das situações reais, não se pode garantir que a população seja bem modelada por uma distribuição normal. Para verificar a normalidade da amostra avaliada, faz-se necessário realizar testes de aderência com os de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov (SHAPIRO e WILK, 1965; ROYSTON, 1983; CIRILLO e FERREIRA, 2003). Para o caso particular de amostras grandes (n>30, sendo n o tamanho, ou número de observações da amostra), é possível assumir a normalidade da amostra avaliada tendo como base o Teorema Central do Limite (ver MONTGOMERY e RUNGER, 2009). De acordo com esse teorema, para uma amostra suficientemente grande, a distribuição de probabilidade da média amostral tende a uma distribuição normal. Nesse caso, a média das médias amostrais será a média populacional, ou seja:

$$\mu = \bar{X} = \frac{\sum \bar{X}}{n} \qquad \text{[Eq. 51]}$$

E a variância das médias amostrais é proporcional à variância populacional:

$$V(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n} \qquad \text{[Eq. 52]}$$

Onde, μ e σ^2são, respectivamente, a média e a variância da população, e $\bar{X}$ e $V(\bar{X})$ são, respectivamente, a média e a variância amostrais.

A formulação do teste de hipóteses consiste na definição de duas hipóteses antagônicas:

- Hipótese nula (H_0): consiste na hipótese de igualdade, afirmando determinada característica que se deseja verificar. Essa hipótese é tida como verdadeira até que evidências estatísticas indiquem o contrário. Em geral, é uma afirmação acerca de algum parâmetro da população (e.g. média, desvio padrão, entre outras);

- Hipótese alternativa (H_1): consiste na hipótese contrária a afirmada pela hipótese nula.

Conforme observado, as hipóteses formuladas devem ser opostas, nunca ocorrendo de ambas serem simultaneamente verdadeiras. A rejeição da hipótese nula envolve a aceitação imediata da hipótese alternativa.

Como a intenção do teste de hipóteses considerado neste trabalho é avaliar se as variáveis de projeto têm influência significativa nos parâmetros de resposta de interesse, a estratégia adotada consiste em separar as observações amostrais obtidas em duas partes e comparar as médias de ambas. Mais especificamente, a metodologia adotada para avaliação e inferência estatística segue as seguintes etapas (MONTGOMERY, 2001):

(I) Com base nos dados amostrais definidos pelo planejamento de experimentos, as variáveis são relacionadas com as respostas correspondentes obtidas.

(II) Em seguida, é feita a ordenação em ordem crescente do vetor variável de projeto, sem perder a informação correspondente da resposta de interesse.

(III) Os vetores das variáveis de projeto são divididos em duas partes, considerando como referência para divisão o ponto central do intervalo de variação considerado para cada

variável. Obtêm-se, então, dois conjuntos de dados, aqui denominado de superior (+) e inferior (-).

(IV) Calcula-se a resposta média da parte inferior (μ-) e da parte superior (μ+) dos dados amostrais e, essas respostas médias são, então, comparadas para avaliar a magnitude de efeito de cada variável de projeto nas respostas de interesse.

Apresenta-se na abaixo, um exemplo esquemático, destacando as etapas seguidas para a análise estatística como base para o teste de hipótese por diferença entre médias.

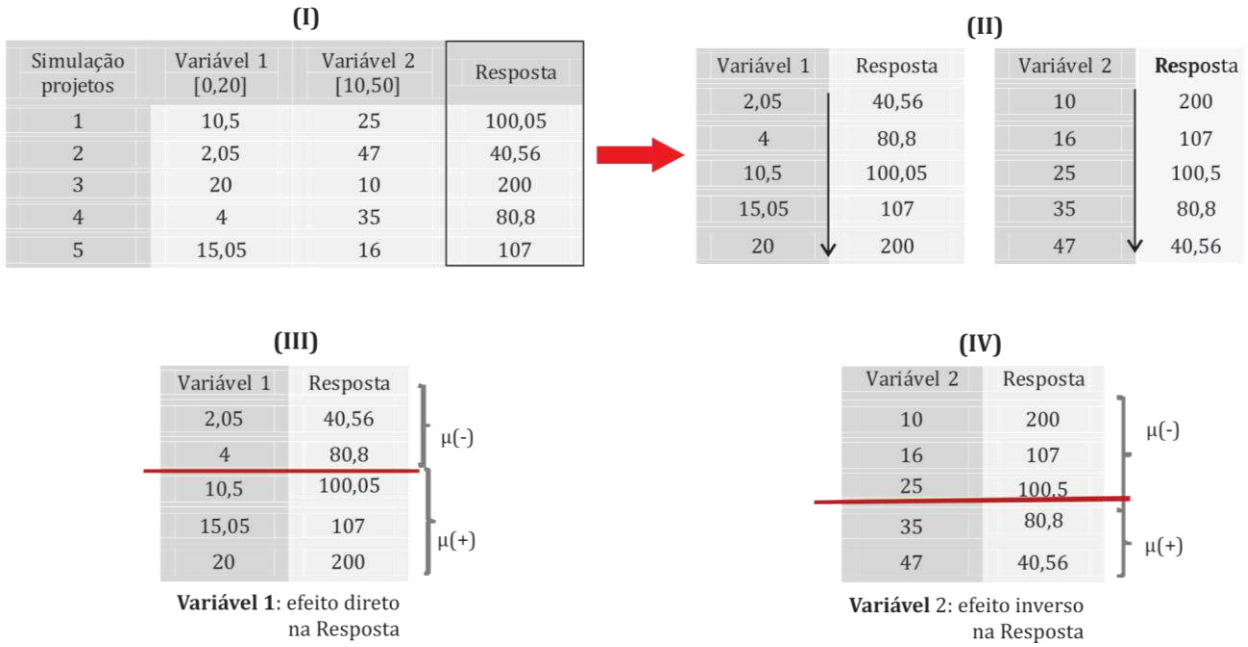


Figura 137: etapas da estratégia adotada de análise estatística. Fonte: ilustração do Autor, 2012.

A partir dessa abordagem, ao se verificar a igualdade das médias de ambas as partes da amostra avaliada (μ- e μ+), é possível afirmar que a variável em questão não produz efeito significativo na resposta de interesse, uma vez que esta variação não se apresentou como significativa na resposta. Nesse caso, a variável em questão pode ser desconsiderada no processo de otimização sem perda de representatividade do problema analisado, sendo a mesma considerada constante em todo o processo, assumindo um valor apropriado definido pelo projetista.

Com esse intuito, considera-se neste trabalho o teste *t* de *Student* para inferência de médias de duas amostras. As hipóteses são definidas da seguinte forma (MONTGOMERY, 2001):

$$H_0: \mu_+ - \mu_- = \Delta \quad \text{[Eq. 53]}$$

$$H_1: \mu_+ - \mu_- \neq \Delta \quad \text{[Eq. 54]}$$

Onde, μ_+ *e* μ_- são as médias das populações comparadas e Δ, o valor de diferença entre as médias a ser considerado no teste.

Sejam $\bar{X}_-, \bar{X}_+, S_-^2, S_+^2$, as médias e as variâncias das amostras, respectivamente. O valor esperado de médias das amostras é dado por:

$$E(\bar{X}_+ - \bar{X}_-) = \mu_+ - \mu_- \quad \text{[Eq. 55]}$$

Assim, $\bar{X}_+ - \bar{X}_-$ é um estimador não tendencioso (sem viés) da diferença de médias (MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

A diferença entre as médias constitui a magnitude. Ou seja, o valor do efeito causado no parâmetro de resposta dado em função de uma determinada variação na variável de projeto. O teste de hipótese complementa essa informação, indicando se a magnitude de efeito observada é ou não significativa, a partir da incorporação de parâmetros de variância na análise.

A variância de $\bar{X}_+ - \bar{X}_-$ é dada por:

$$V(\bar{X}_+ - \bar{X}_-) = \frac{\sigma^2}{n_+} + \frac{\sigma^2}{n_-} = \sigma^2\left(\frac{1}{n_+} + \frac{1}{n_-}\right) \quad \text{[Eq. 56]}$$

Onde, n_+ e n_- são os tamanhos das partes superior e inferior, respectivamente, das amostras avaliadas e σ^2 é a variância da população.

As variâncias das amostras são dadas por:

$$S_+^2 = \frac{\sum(x_+ - \bar{X}_+)^2}{n_+ - 1} \quad \text{[Eq. 57]}$$

$$S_-^2 = \frac{\sum(x_- - \bar{X}_-)^2}{n_- - 1} \quad \text{[Eq. 58]}$$

Onde, x_+ e x_- correspondem às observações das partes, superior e inferior, da amostra, respectivamente.
Um estimador combinado da variância da população em termos das variâncias amostrais é dado como segue:

$$S_p^2 = \frac{(n_- - 1)S_-^2 + (n_+ - 1)S_+^2}{n_- + n_+ - 2} \quad \text{[Eq. 59]}$$

Este consiste em média ponderada das variâncias das amostras S_-^2 e S_+^2 , sendo os pesos da ponderação dependentes dos dois tamanhos das amostras n_+ e n_-. Assim, observa-se que a primeira parte da amostra contribui com $(n_- - 1)$ graus de liberdade para S_p^2 e a segunda parte da

amostra contribui com $(n_+ - 1)$ graus de liberdade. Consequentemente, S_p^2 tem $n_- + n_+ - 2$ graus de liberdade (MONTGOMERY E RUNGER, 2009).

Para utilizar o test *t* de *student* para comparação de médias, define-se a estatística de teste como segue:

$$t = \frac{|\bar{X}_+ - \bar{X}_-| - \Delta}{S_p\sqrt{(\frac{1}{n_+} + \frac{1}{n_-})}} \quad \text{[Eq. 60]}$$

Como na hipótese nula deseja-se afirmar a igualdade entre as médias, sendo essa hipótese a ser tratada, assume-se Δ=0 e a estatística de teste torna-se:

$$t = \frac{|\bar{X}_+ - \bar{X}_-|}{S_p\sqrt{(\frac{1}{n_+} + \frac{1}{n_-})}} \quad \text{[Eq. 61]}$$

Assim, o teste *t* consiste em usar os dados da amostra para calcular a estatística *t* e, depois, compará-la com a distribuição *t* de *Student,* para identificar a probabilidade de ter sido obtido o resultado observado, caso a hipótese nula seja verdadeira. Em outras palavras, com o valor calculado da estatística de teste *t*, observa-se a função densidade de probabilidade da distribuição *t* de *Student* e calcula-se a área abaixo dessa função para valores maiores ou iguais ao valor calculado *t*. Essa probabilidade também é chamada de *p*-valor.

Essa região delimitada (Figura 138) é denominada região crítica e corresponde aos valores onde a estatística de teste leva a rejeição da hipótese nula, caso essa área (equivalente à probabilidade) seja menor do que um determinado valor estabelecido (α). Se o valor calculado *t* for menor do que o valor crítico (t_{cr}) estabelecido, ou seja, caso *t* não esteja dentro da região crítica, a hipótese nula é aceita. Caso contrário, a hipótese nula é rejeitada. É importante ressaltar que aceitar H_0, não significa que a hipótese nula seja verdadeira, mas apenas que não existe evidência suficiente para rejeitá-la.

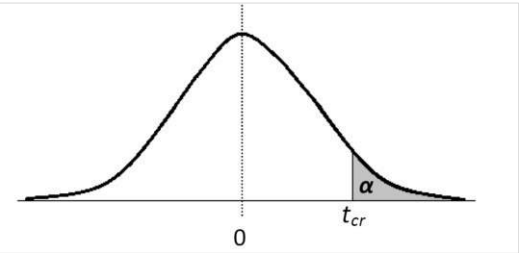


Figura 138: esquema ilustrativo da região crítica do teste de hipótese.

Como o teste de hipóteses é baseado em algumas amostras, há sempre riscos de erro envolvidos. O procedimento de decisão pode conduzir a uma entre duas conclusões erradas: pode-se rejeitar a hipótese nula, sendo ela verdadeira (Erro tipo I) ou falhar ao rejeitar a hipótese nula quando ela for falsa (Erro tipo II).

Os mecanismos de erros de um teste estatístico encontram-se representados na Tabela 34.

Tabela 34: mecanismos de erro de um teste estatístico.

Decisão	**Falha em rejeitar H_0**	**Rejeitar H_0**
H_0 é verdadeira	Erro tipo I	Não há erro
H_0 é falsa	Não há erro	Erro tipo II

A probabilidade do Erro tipo I é também chamada de nível de significância e, é denotada por α. Rodrigues e Iemma (2009) afirmam que, em geral, o nível de significância $\alpha = 0{,}05$ (equivalente a um nível de confiança de 95%) é muito bem aceito pela comunidade científica.

Em resumo, as etapas para realização do teste de hipóteses consistem em:

1. Enunciar claramente as hipóteses;
2. Fixar o nível de significância α e determinar as regiões críticas do teste;
3. Calcular o valor da estatística de teste;
4. Decidir em rejeitar ou não a hipótese nula.

O presente trabalho emprega o método fatorial fracionado para planejamento de experimentos a fim de obter amostras representativas que viabilizem a análise de sensibilidade do comportamento dos parâmetros de morfologia urbana estudados. Para inferir sobre o comportamento obtido para os resultados (variáveis-resposta), o teste *t* de Student é adotado, como base para o teste de hipótese na identificação das variáveis de projeto mais significativas, ou seja, que causam maior impacto nas respostas de interesse.

A análise de sensibilidade (ou a magnitude de efeito) proporciona uma melhor compreensão do comportamento do modelo em estudo e fornece informações sobre a significância das variáveis de projeto, o que possibilita a simplificação do modelo para análise de otimização. O processo de otimização adotado nesse trabalho será exposto mais adiante.

III.2. Estudo dos fatores tipo-morfológicos influentes

Pelas razões já anunciadas anteriormente, aplica-se no estudo a metodologia do planejamento de experimentos para avaliar a influência relativa dos principais fatores tipo-morfológicos na disponibilidade da irradiação e iluminação natural nas fachadas dos edifícios urbanos. Nessa etapa, apresentamos os principais dados de entrada desse planejamento: descrição do modelo urbano simplificado considerado apenas para o teste estatístico, definição das variáveis (fatores) envolvidas, definição do intervalo de variação, definição das ferramentas de avaliação e geração paramétrica de projetos, etc.

III.2.1.1. Ferramentas empregadas para geração e avaliação paramétrica de projetos no âmbito do estudo

Para conduzir a aplicação dessa metodologia, foram utilizados dois programas computacionais: o programa **Citysim**, desenvolvido por Robinson (2011), para as simulações das trocas radiativas em ambiente urbano (ver capítulo I) e o programa **modeFRONTIER®**, que consiste em ferramenta de otimização multidisciplinar, para análise dos planejamento estatístico de experimentos e, que também será empregado, posteriormente, para o estudo de otimização.

O *software* modeFRONTIER® é um ambiente de projeto/concepção e otimização, programado para acoplar ferramentas CAD e CAE (*Computer Aided Engineering*), elementos finitos, análises estruturais, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), entre outros. Trata-se de programa com interface para usuário (GUI) escrita em Java que realiza uma otimização a partir da modificação dos valores atribuídos para variáveis de entrada e análise de dados de saída, que podem ser definidos como objetivos e/ou restrições de projeto.

III.2.1.2. Modelo simplificado e dados de entrada

Diante de um número relativamente elevado de fatores implicados no estudo e do tempo de simulação requerido, torna-se apropriado planejar uma amostra que seja representativa, sem ser tão exaustiva, desse grande espaço de busca. Para isso, empregou-se um planejamento estatístico de experimentos pelo método dos fatoriais fracionados, como descrito no item III.1.2.3. Essa fração fatorial é escolhida de modo a explorar o chamado princípio da *esparsidade dos efeitos* em estatística, que permitirá obter resultados representativos usando um fatorial reduzido do esforço de um fatorial completo (item III.1.2.2), eliminando observações redundantes e, assim, reduzir o tempo e os recursos necessários para essa análise inicial.

Nesse estudo, que compreende quatorze fatores tipo-morfológicos urbanos iniciais (ver Tabela 35 abaixo), um planejamento fatorial completo em dois níveis definiria 16384 (2^{14}) experimentos/cenários. Para uma meia-fração desse planejamento (ou seja, 2^{14-1} projetos) seriam exigidos apenas metade desse último, ou seja, **8192 avaliações**. A partir dos resultados obtidos dessa avaliação estatística, os efeitos principais e a interação dos fatores nos parâmetros de resposta considerados foram também testados quanto à sua significância por meio do teste *t* de *Student* (ou teste de hipótese estatística).

Assim, os dados são obtidos a partir de simulações computacionais de cenários urbanos submetidos a um conjunto de condições climáticas específicas. Cada experimento definido pelo método fatorial fracionado representa uma dada configuração urbana a ser avaliada. A proposta é verificar a significância das variáveis de projeto e suas interações com os parâmetros de resposta. Em estatística, um resultado é denominado estatisticamente significante se este for improvável que tenha ocorrido por acaso, conforme uma probabilidade limite pré-determinada: o nível de significância (também conhecido como *erro do tipo I*).

Para elaboração desse primeiro teste estatístico que visa explorar o espaço de busca possível de projetos, foi utilizado um modelo geométrico de base simplificado, a partir do qual foi possível estabelecer variações contrastadas conforme método estatístico de análise mencionado.

Nesse sentido, foi adotado um modelo de 25 edifícios urbanos que variam em todas as suas dimensões (largura, profundidade e altura) e que possuem espaçamentos também variáveis entre eles, em dois eixos principais de arruamento, Norte-Sul e Leste-Oeste, conforme Figura 139 abaixo. A partir dessas variáveis de base foi possível avaliar a variação de um conjunto de fatores morfológicos: verticalidade, prospecto médio, coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação e coeficiente de forma.

Além disso, foram atribuídas variações possíveis de características dessas envoltórias, tais como: intervalos de fração de abertura em vidro por fachadas, e propriedades térmicas e radiativas, tais como: albedo, transmitância térmica dos elementos opacos e dos vidros, além do fator solar.

Nessa análise inicial, foram utilizadas variações extremas de valores possíveis de serem encontrados, de modo a compor o espaço de busca estatístico da forma mais completa possível, a fim de evitar resultados viesados e/ou redundantes e apreender a sensibilidade dos fatores quanto à resposta de interesse.

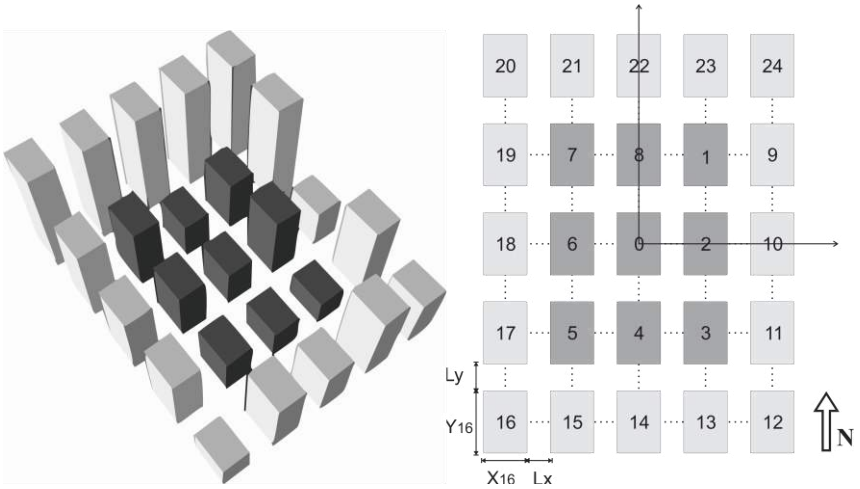


Figura 139: modelo simplificado utilizado de base no estudo estatístico. Fonte: ilustração do autor (2012).

Tabela 35: intervalos para o conjunto de fatores tipo-morfológicos considerados no estudo.

Altura (H)	**Largura (X)**	**Profundidade (Y)**	**Distância entre edifícios**	**Fator Solar (FS)**	**Transmitância térmica vidro**	**Transmitância fechamentos**	**Fração de abertura**	**Coeficiente de aproveitamento (CA)**	**Taxa de ocupação (TO)**	**Coeficiente de Forma (Cf)**	**Verticalidade (Vert)**	**Prospecto médio (PM)**	**Albedo**
m	m	m	m	/	W/m²K	W/m²K	%	/	/	/	/	/	/
3	4	4	3	0,1	1,3	0,7	0,2	0,3	0,05	0,4	0,01	0,6	0,1
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
50	40	40	30	0,9	5,0	4,8	0,9	10,3	0,85	1,0	0,8	3,9	0,9

III.2.1.3. Parâmetros de resposta

Para esse estudo de sensibilidade, serão considerados como variáveis de resposta: os balanços de energia radiativa nos espectros de onda curta e longa, e o nível de iluminância nas fachadas. Os gráficos e análises dos resultados serão apresentados nessa ordem.

III.2.1.4. Resolução temporal do estudo

Conforme foi observado no perfil climático para cidade de Maceió, no capítulo I, os dados (meteorológicos) encontrados para radiação solar (direta e difusa) em um ano climático para esta cidade, apresentam uma variação relativamente reduzida, principalmente quanto à componente difusa. Os valores da componente direta, no entanto, passam por uma queda um pouco mais expressiva no período de inverno, devido ao aumento da cobertura de nuvens (ver Figura 21), especialmente, durante os meses de junho a agosto. Em baixas latitudes são observadas geralmente pequenas variações meteorológicas em termos de temperatura e umidade ambiente e radiação solar.

Dada a esta reduzida variação climática ao longo do ano em contextos de clima tropical, para esta abordagem do estudo de sensibilidade, serão tratados os dados na escala temporal anual, tanto para o balanço de energia radiante, quanto para o nível de iluminância nas envoltórias. Assume-se que esta reduzida variação no nível de irradiação ao longo do ano não modificaria a relação de influência existente entre os fatores tipo-morfológicos e a variação nas respostas de interesse (balanço de radiação e iluminação natural nas fachadas).

III.2.1.5. Resolução espacial e dados de saída

A fim de definir em qual escala espacial seriam tratados os dados de saída da modelagem computacional, foi realizado um rápido teste de robustez. Duas possibilidades foram inicialmente consideradas. Dada uma vizinhança de 25 edifícios, considerou-se sua influência em: (a) um bloco de 9 edifícios no interior da malha; (b) em um edifício de referência (Figura 140). Sempre considerando-se separadamente as diferentes orientações das fachadas e a cobertura.

Assim, foram extraídos resultados anuais para as fachadas e cobertura de cada um dos nove edifícios dessa ilha interna e esses resultados foram comparados com a média das fachadas e coberta do bloco. Para identificar os desvios possíveis da média em relação a resposta individual de cada edifício, foi calculado o desvio padrão relativo (ver Tabela 36).

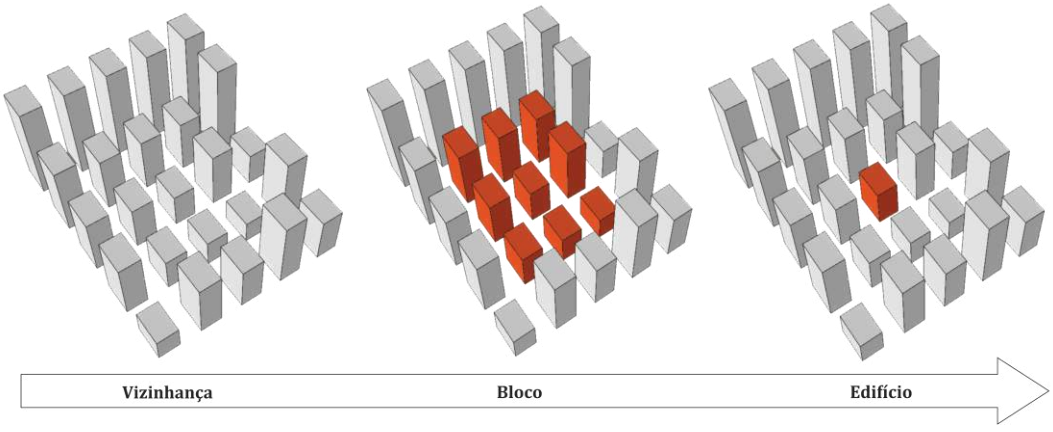


Figura 140 : ilustração das escalas consideradas na abordagem. Fonte : ilustração do autor. Fonte: ilustração do autor (2013).

Tabela 36: irradiação solar média anual (kWh/m^2.ano) para nove edifícios e para a média do bairro por fachada e o desvio relativo entre estes.

	VALORES MÉDIOS PARA O **BLOCO**		VALORES MÉDIOS PARA CADA EDIFÍCIO [kWh/m^2.ano]								
	MÉDIA [kWh.m^{-2}]	**DESVIO PADRÃO RELATIVO**	**EDIFÍCIO 1**	**EDIFÍCIO 2**	**EDIFÍCIO 3**	**EDIFÍCIO 4**	**EDIFÍCIO 5**	**EDIFÍCIO 6**	**EDIFÍCIO 7**	**EDIFÍCIO 8**	**EDIFÍCIO 9**
OESTE	898,4	2,6%	955,0	987,8	951,4	986,6	958,2	987,2	956,7	951,0	956,8
NORTE	769,0	0,7%	764,0	774,5	765,3	779,2	762,7	776,2	766,9	768,7	763,8
LESTE	785,2	0,1%	786,1	786,6	784,9	785,6	784,0	784,5	785,6	785,5	784,2
SUL	702,6	0,8%	699,8	712,6	697,0	711,6	699,9	709,4	697,3	698,2	697,3
COBERTA	1803,6	0,1%	1804,5	1804,2	1804,1	1803,9	1802,4	1804,7	1802,0	1804,6	1801,9

Para este teste, foram encontrados desvios da média bastante reduzidos. Para a média das fachadas na escala do bloco foi encontrado um desvio entre 0,1% e 2,6% e um desvio de 0,1% para a média da coberta.

Com isso, para esta modelagem do planejamento de experimentos, serão consideradas como variáveis de saída as médias (do saldo anual de energia radiante) das fachadas (nas quatro orientações mencionadas) e a média das cobertas do bloco de edifícios no interior de cada vizinhança urbana estatística.

III.2.1.6. Resolução espectral

O presente estudo considera para o meio urbano, os balanços das trocas radiativas nas faixas espectrais de onda curta (radiação solar), de onda longa (radiação térmica); e faixa visível (luz natural).

III.2.2. Estudo dos fatores tipo-morfológicos influentes no balanço radiativo das envoltórias construídas

Com base na hipótese estatística assumida (onde se afirma que os quatorze fatores tipo-morfológicos urbanos investigados representam um impacto significativo na resposta do balanço de radiação de onda curta e no saldo infravermelho em todas as superfícies construídas em qualquer cena urbana no contexto climático de Maceió), foi realizada uma análise de sensibilidade a partir do método do planejamento estatístico experimental fatorial fracionado para 2^{14-1} projetos. Assim, foram examinadas as duas respostas para a média das cobertas e para a média das superfícies verticais nas quatro orientações, Norte, Sul, Leste, Oeste, separadamente.

Para cada uma das cinco superfícies, são apresentados os resultados em termos de: impacto global das variáveis tipo-morfológicas em cada uma das respostas (solar e infravermelho), magnitude de efeito e a significância desses testes estatísticos.

III.2.2.1. Impacto das variáveis tipo-morfológicas no balanço radiativo na superfície da Coberta

(a) Impacto global dos fatores na irradiação de onda curta e de onda longa da Coberta

A partir dos resultados obtidos para a amostra de cenários urbanos examinados, foi possível realizar uma primeira análise do impacto global dos fatores tipo-morfológicos.

A Figura 141 apresenta a contribuição de cada fator de projeto para os parâmetros de resposta de interesse: irradiação de onda curta e onda longa na coberta dos edifícios.

Verifica-se o impacto preponderante de alguns fatores, tais como o albedo e o prospecto médio (ou a relação entre altura construída e distância entre edifícios). Esses dois fatores juntos contribuem em mais de 40% nas trocas radiativas de onda curta nas superfícies horizontais das cobertas e, mais 50% nas trocas radiativas de onda longa, entre todos os fatores examinados.

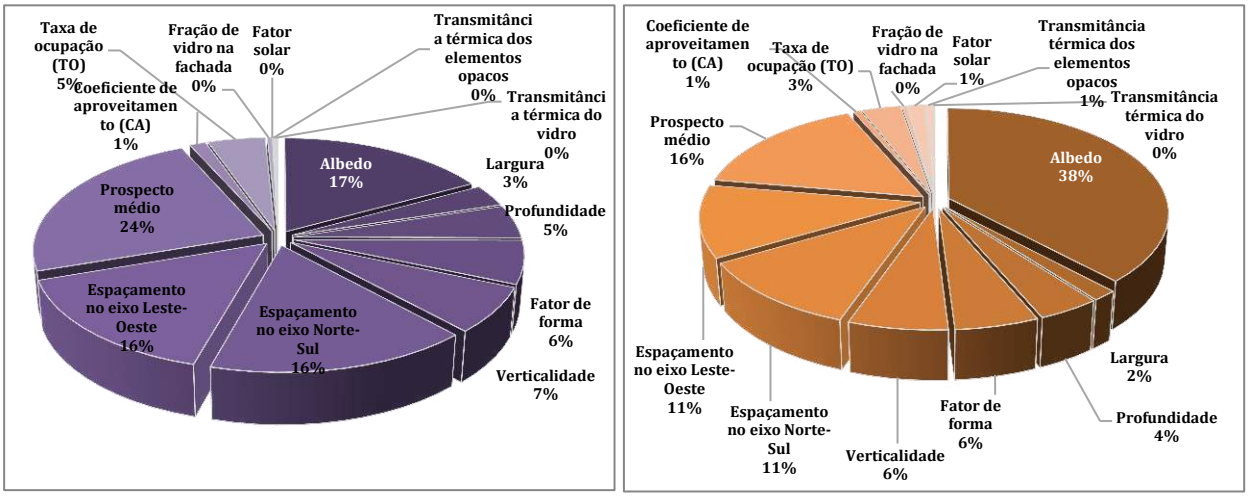


Figura 141*:* contribuição dos fatores morfológicos em relação ao balanço de radiação de onda curta e onda longa nas cobertas, respectivamente (*overall student test*).

(b) Magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas no balanço radiativo na superfície da Coberta

A partir dos gráficos apresentados a seguir nas Figura 142 Figura 143, é possível identificar a magnitude e a direção desse impacto (ou seja, se a variação do efeito é dada na mesma direção da resposta ou na direção inversa). Essa informação nos permite qualificar a intensidade da contribuição, a hierarquia e o sentido do impacto de cada fator para o problema. Porém, só por meio da inferência estatística que será possível determinar a significância desse teste, como será discutido na sequência.

Por meio dos resultados obtidos, verificamos que o *prospecto médio* e o *albedo* são os fatores que mais contribuem para as respostas de interesse, porém em direções opostas. Isto é, o aumento do *prospecto médio* produzirá um decréscimo na disponibilidade da irradiação de onda curta nas cobertas, enquanto que o aumento no *albedo*, produzirá acréscimo nessa mesma resposta. Da mesma forma para os espaçamentos entre os edifícios. O aumento dos recuos entre as construções ou o aumento na largura das ruas e avenidas produzirão um aumento na irradiação encontrada nas superfícies das cobertas. Esse resultado pode ser explicado, pois quanto menor o prospecto médio e maior as distâncias entre as construções, menos obstruções e menos sombras serão projetadas nessas superfícies, aumentando a contribuição direta e difusa da energia solar incidente.

Em relação à resposta no espectro infravermelho, esses mesmos fatores apresentam, por vezes, efeitos em direção diferente à resposta no espectro solar. Um exemplo disso é a distância entre edifícios. Quanto maior a distância, maior será a capacidade da superfície examinada em emitir radiação térmica para o céu. Pois essa capacidade de emitir é diretamente proporcional ao fator de visão do céu a partir da superfície estudada. Por essa razão, quanto maior o prospecto médio, menor será a energia radiante emitida. Lembra-se que o prospecto relaciona a altura dos edifícios pelo espaçamento entre eles.

Fatores como a *taxa de ocupação* e *fator forma* apresentam efeito direto na resposta da irradiação solar em cobertas, visto que estão relacionados com a quantidade de superfície construída e exposta ao ambiente exterior, respectivamente. De modo que, quanto maior a área de

exposição, maior a quantidade de irradiação recebida. Da mesma forma, para a resposta no infravermelho, quanto maior for a superfície da coberta, maior a emissão de energia radiante.

No entanto, a variação exercida nos resultados de energia nesses dois espectros, para a escala urbana considerada, pode se dar de forma distinta. Quando os fatores tipo-morfológicos variam, o impacto na resposta da irradiação solar pode ser da ordem de até dez vezes maior que o impacto na resposta do infravermelho. Por exemplo, se variarmos o fator *espaçamento no eixo norte-sul,* considerando o valor máximo do seu intervalo de variação, a sua contribuição será de cerca de 100 kWh/m².ano em termos de irradiação solar recebida na coberta (Figura 142), enquanto a contribuição no saldo infravermelho para esta mesma variação será de cerca de 10 kWh/m².ano (Figura 143), apenas 10% do que esse fator contribui para elevar a irradiação no espectro solar na superfície das cobertas.

Dados da inferência estatística de todos esses resultados serão discutidos na sequência, de modo a complementar essas informações.

(c) Teste de hipótese estatística

Conforme dito anteriormente, a hipótese nula indica que a variável não produz efeito significativo na resposta de interesse, enquanto a hipótese alternativa, indica o contrário, ou seja, a variável testada possui efeito significante. Um intervalo de confiança de 95% (significância de 0,05) foi levado em conta. Se a significância calculada – probabilidade de errar em rejeitar a hipótese nula quando esta é verdadeira – **for superior a 0,05**, a hipótese nula não é rejeitada, o que significa que a **variável não é significativa**. No caso onde a significância **for menor que 0.05**, a hipótese nula é rejeitada e é possível dizer que a **variável em questão é influente**.

As tabelasTabela 37 eTabela 38 apresentam informações sobre a magnitude do efeito, a significância e o teste estatístico *t* de *student.* O valor crítico desse último é 1,65, considerando o intervalo de confiança de 95%. Nas tabelas, os dados dos fatores para as quais a hipótese nula foi rejeitada estão destacados na cor violeta e laranja, ou seja, fatores significativos para a resposta da irradiação de onda curta e onda longa na superfície da coberta, respectivamente.

A magnitude de efeito, conforme já mencionado, indica a relação entre o fator e a resposta: os valores negativos na tabela indicam, portanto, uma relação inversa.

Observando os resultados obtidos, verifica-se que além das variáveis, *transmitância térmica* (elementos opacos e vidros), *fator solar* e *fração de vidro* das fachadas, os fatores morfológicos: *largura* dos edifícios, *coeficiente de aproveitamento* e *verticalidade*, apresentaram menor contribuição à resposta de irradiação solar, quando analisados entre os demais fatores considerados.

A título de exemplificação, se compararmos a magnitude do fator *largura* de edifícios com o *albedo*, é possível perceber a relevância relativa desses fatores. Se o *albedo* equivalente for o valor extremo do intervalo considerado (ou seja, um albedo de 0,5, correspondente à superfícies de cor branca envelhecida, por exemplo), a contribuição desse fator isoladamente, para a irradiação solar nas cobertas, será de cerca de 106 kWh/m².ano, enquanto que a *Largura* dos edifícios possui uma magnitude de efeito correspondente à 19 kWh/m².ano.

Essa é uma primeira abordagem a fim de qualificar a contribuição de cada fator e hierarquizá-lo conforme seus efeitos principais para uma superfície horizontal. A seguir, serão apresentados os efeitos principais dos mesmos fatores para as superfícies verticais em quatro orientações diferentes e, ainda os efeitos de interação entre os fatores na resposta. Assim, será possível efetuar análises mais conclusivas com respeito à influência dos parâmetros examinados.

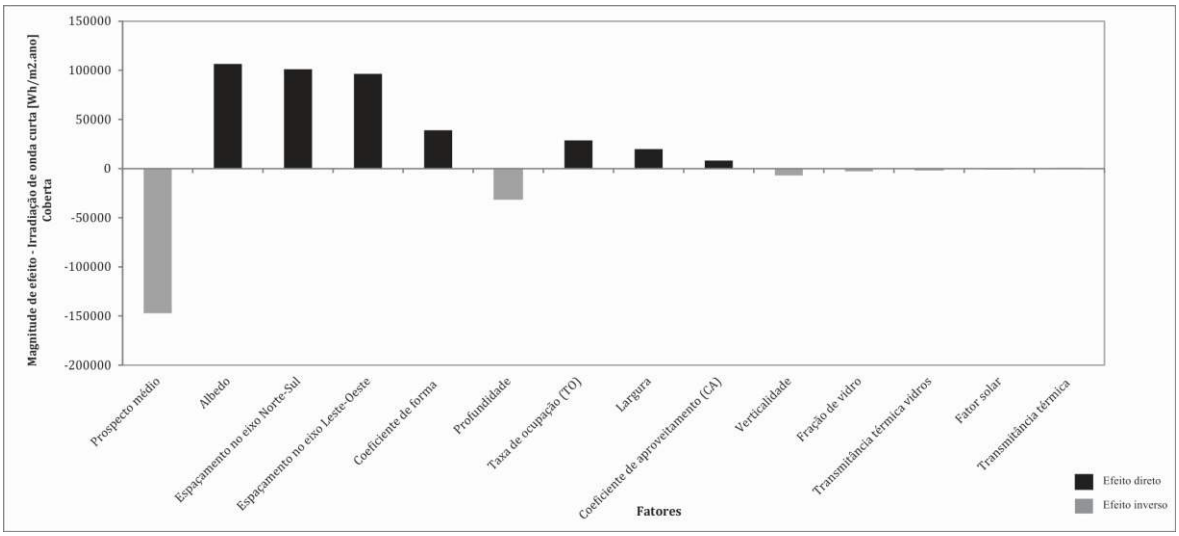


Figura 142: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas em relação ao saldo de energia radiativa de onda curta na superfície da coberta.

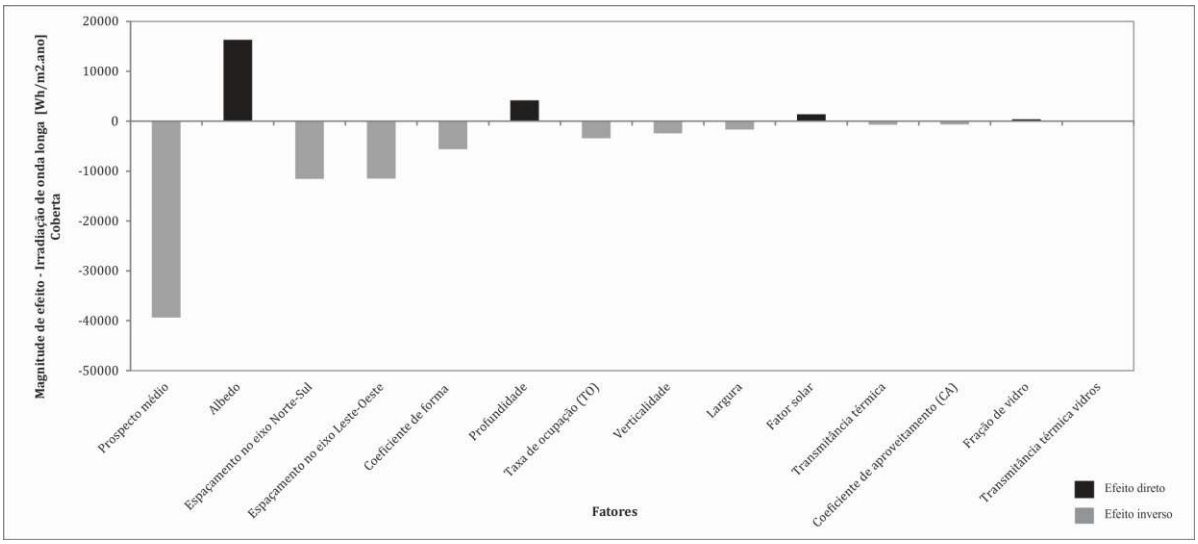


Figura 143: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas em relação ao balanço de radiação no espectro infravermelho na superfície da coberta.

Tabela 37*:* resultados do teste de significância para o balanço de radiação de onda curta na superfície da coberta.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [kWh/m².ano]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Prospecto médio	-147,1	0,00	8,18
Albedo	106,4	0,00	8,15
Espaçamento no eixo Norte-Sul	101,1	0,00	7,64
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	96,5	0,00	7,22
Coeficiente de forma	39,1	0,01	2,39
Profundidade	-30,9	0,02	2,12
Taxa de ocupação (TO)	28,8	0,02	2,05
Largura	19,8	0,09	1,35
Coeficiente de aproveitamento (CA)	8,2	0,33	0,43
Verticalidade	-7,0	0,35	0,37
Fração de vidro	-2,7	0,42	0,18
Transmitância térmica vidros	-1,2	0,46	0,08
Fator solar	-0,9	0,47	0,06
Transmitância térmica	0,6	0,48	0,04

Tabela 38: resultados do teste de significância quanto ao resultado na radiação de onda longa na superfície da coberta.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [kWh/m².ano]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Prospecto médio	-39,3	0,00	19,63
Albedo	16,3	0,00	3,55
Espaçamento no eixo Norte-Sul	-11,5	0,00	3,73
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	-11,5	0,00	3,71
Coeficiente de forma	-5,6	0,06	1,57
Profundidade	4,1	0,09	1,31
Taxa de ocupação (TO)	-3,4	0,17	0,92
Verticalidade	-2,4	0,27	0,60
Largura	-1,6	0,29	0,52
Fator solar	1,4	0,33	0,44
Transmitância térmica	-0,7	0,42	0,21
Coeficiente de aproveitamento (CA)	-0,6	0,43	0,15
Fração de vidro	0,4	0,45	0,12
Transmitância térmica vidros	0,0	0,49	0,02

III.2.2.2. Balanço radiativo na superfície da Fachada leste

(a) Impacto global dos fatores na irradiação de onda curta e de onda longa nas Fachadas verticais leste e oeste

A Figura 144 e Figura 146 abaixo apresentam proporcionalmente a contribuição de cada fator para os mesmos parâmetros de resposta do item anterior, mas agora em relação às superfícies verticais de orientação leste e oeste.

Verifica-se o impacto preponderante dos seguintes fatores: *albedo*, *prospecto médi*o e *espaçamento entre edifícios no eixo norte-sul*. Esses três fatores juntos contribuem em quase 60% e 50% nas trocas radiativas de onda curta nas superfícies verticais leste e oeste, respectivamente. Já no infravermelho, o impacto do albedo possui contribuição isoladamente evidenciada (com 34%) nas duas orientações. Isso pode ser dado ao fato de que, quanto maior o albedo da superfície, menos radiação no espectro solar é absorvida pela superfície (já que uma fração importante dessa energia é refletida) e, portanto, essa superfície passa a emitir menos energia radiante no comprimento de onda longa

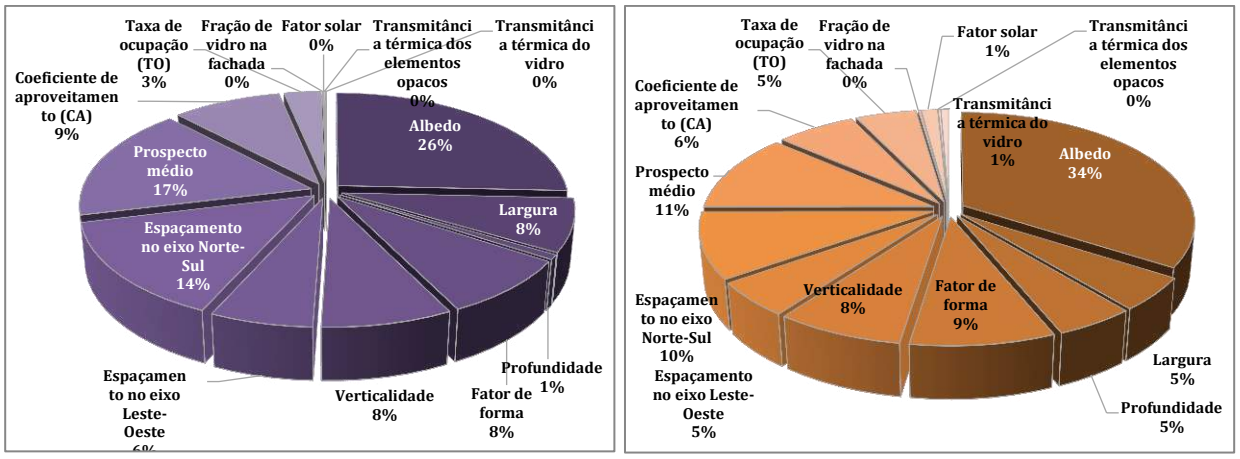


Figura 144: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas respostas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada Leste (*overall student test*).

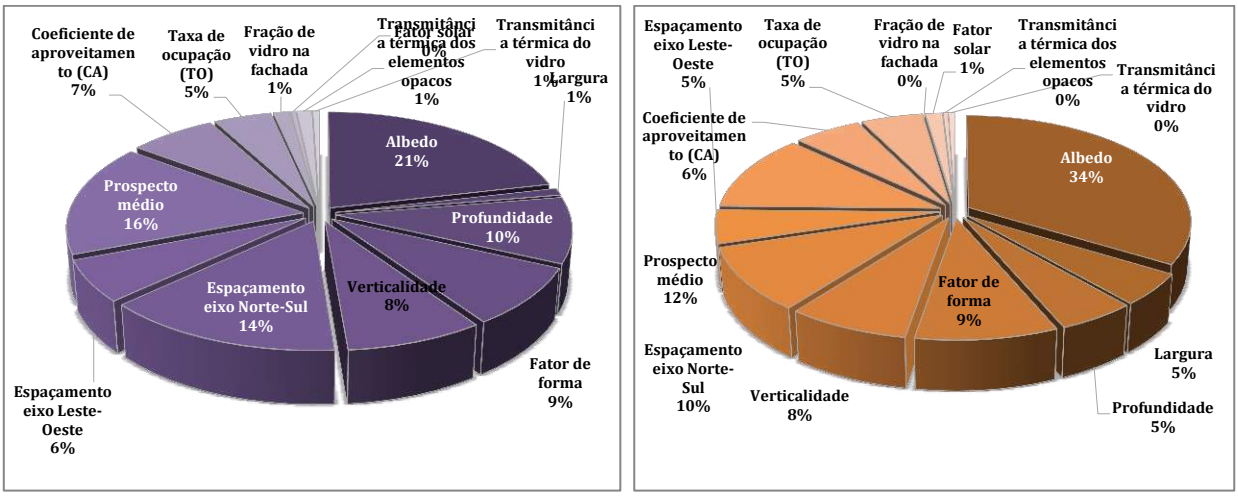


Figura 145: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas respostas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada oeste (*overall student test*).

(b) Magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas no balanço radiativo na Fachada leste e oeste

De acordo com as informações obtidas na Figura 146 e Figura 147, a magnitude do efeito do *albedo*, assim como para a superfície da coberta, também é direta para as fachadas verticais leste e oeste. Para o *prospecto médio*, o efeito é inverso, ou seja, o aumento da altura em detrimento do espaçamento entre os edifícios, reduz a resposta global em termos de radiação de onda curta, na média dessas superfícies.

A *verticalidade*, dessa vez, tem uma influência mais relevante e direta no balanço da energia radiante no espectro solar recebido por essa superfície, visto que a área da superfície de incidência aumentará com o acréscimo na altura construída. Edifícios de grandes superfícies verticais associados a espaçamentos bastante amplos no eixo de maior incidência solar (nesse caso, rua no sentido Norte-Sul) favorecerão, portanto, o aumento direto do saldo de irradiação de onda curta nesta superfície Leste.

O *coeficiente de forma* dos edifícios em relação à resposta de irradiação para as superfícies tanto leste como oeste, apresentou influência direta, ou seja, o aumento da superfície da envoltória exposta para o exterior em relação ao volume construído, implicará em maior superfície exterior de captação radiante para um menor volume total construído.

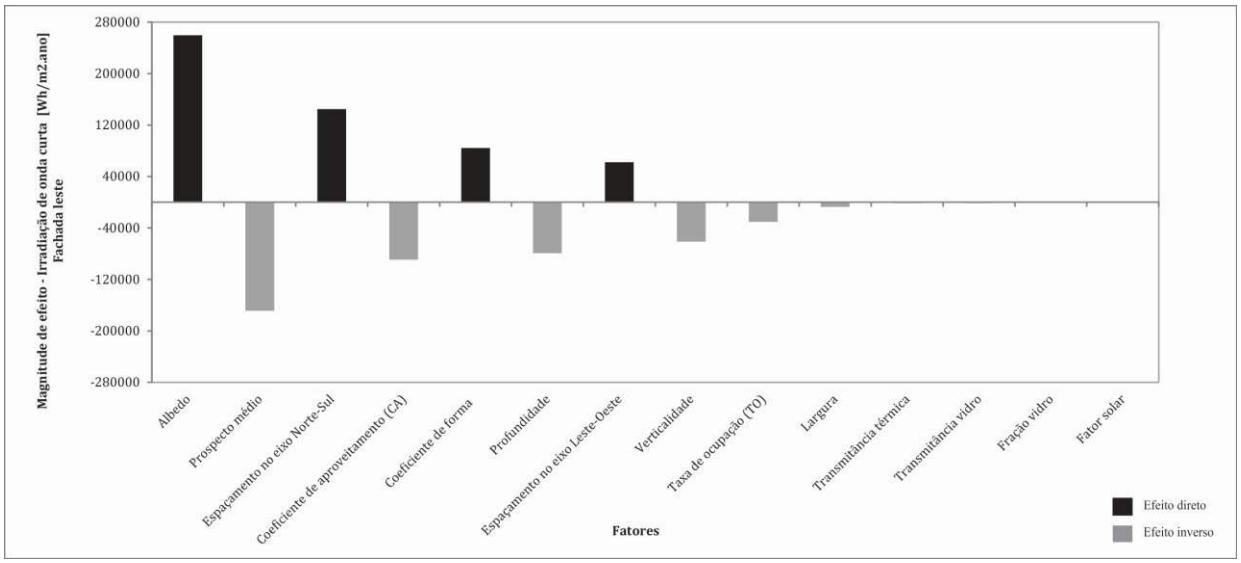


Figura 146: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de energia radiante de onda curta na superfície vertical leste.

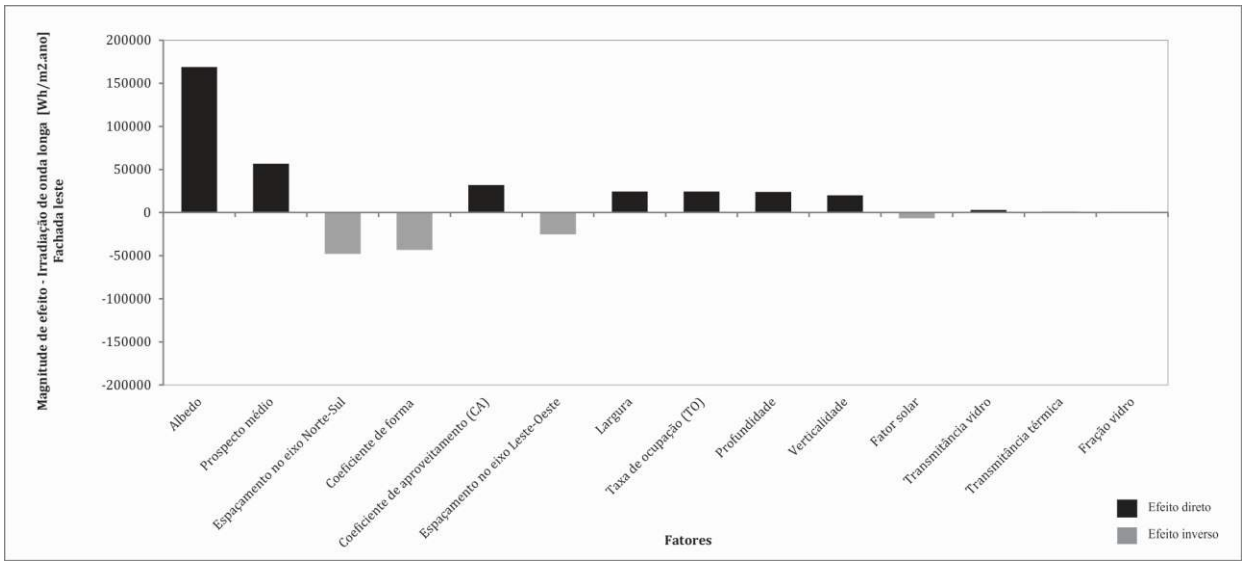


Figura 147: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de radiação infravermelha na superfície vertical leste.

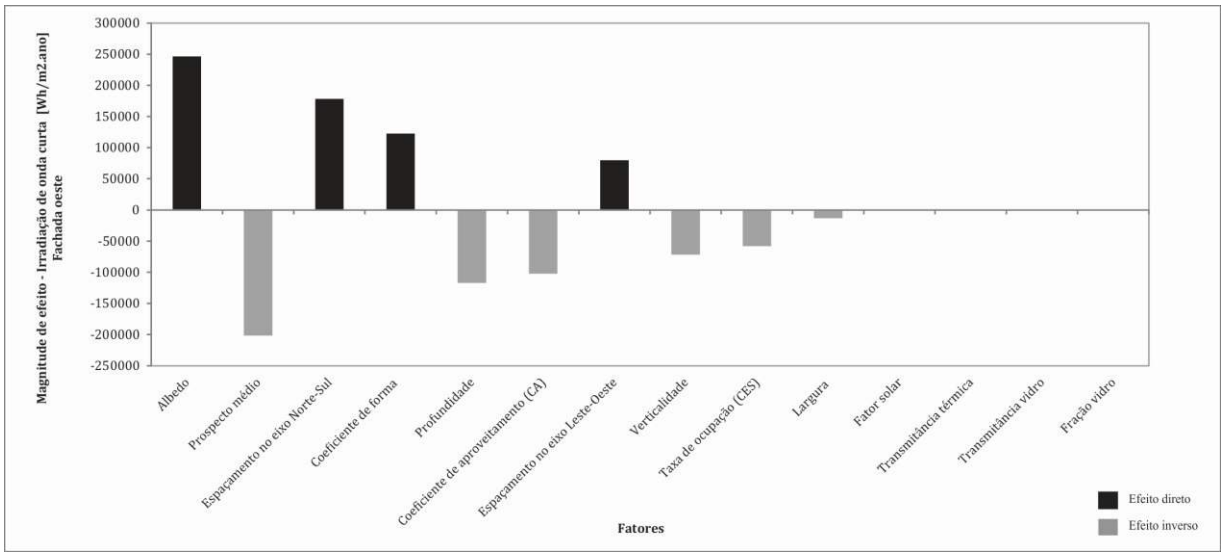


Figura 148: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de energia radiante de onda curta na superfície vertical oeste.

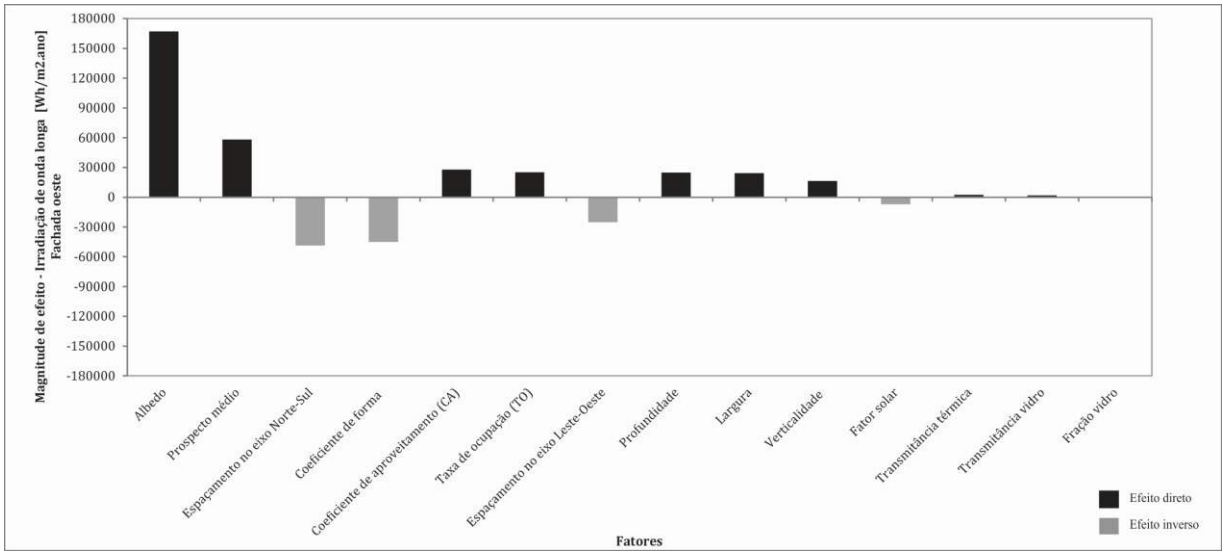


Figura 149: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a radiação infravermelha na superfície vertical oeste.

(c) Teste de hipótese estatística

Da Tabela 39

Tabela 42 são destacados os fatores significativos para a resposta da irradiação de onda curta e onda longa na superfície da fachada leste e oeste, respectivamente.

Dentro do intervalo de confiança estabelecido, verifica-se que as variáveis: *largura* dos edifícios, *fator solar, transmitância térmica dos elementos opacos e dos vidros*, bem como a *fração de abertura* em vidro, não oferecem evidência suficiente para que sejam considerados significantes para as duas respostas (superfícies leste e oeste) de saldo anual de radiação solar.

De acordo com as informações obtidas, se levarmos em conta valores máximos do intervalo possível de variação estabelecido nesse estudo para o albedo e o espaçamento no eixo norte-sul, a contribuição de cada um seria equivalente à um incremento de 259 e 144 kWh/m².ano,

respectivamente, para a fachada leste. Já considerando o *prospecto médio* mais elevado (o que seria equivalente a um cânion urbano mais estreito e profundo), a magnitude de efeito desse fator na irradiação solar recebida nas fachadas leste e oeste seria de cerca de -168 e -201 kWh/m^2.ano, respectivamente. Enquanto a largura representaria uma redução de apenas 7 kWh/m^2.ano e 13 kWh/m^2.ano, respectivamente.

No espectro infravermelho, o *coeficiente de forma* dos edifícios apresentou influência de variação inversa tanto para irradiação emitida pela superfície leste como oeste. Ou seja, o aumento da superfície da envoltória exposta para o exterior em relação ao volume construído, implicará em maior superfície exterior de emissão de energia radiante para um menor volume total construído.

Tabela 39: resultados do teste de significância no balanço de radiação de onda curta na superfície leste.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [kWh/m².ano]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	259,5	0,00	16,92
Prospecto médio	-168,8	0,00	6,23
Espaçamento no eixo Norte-Sul	144,7	0,00	7,08
Coeficiente de aproveitamento (CA)	-89,2	0,00	2,66
Coeficiente de forma	84,5	0,00	4,05
Profundidade	-79,0	0,00	3,62
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	62,2	0,00	2,82
Verticalidade	-61,2	0,01	2,17
Taxa de ocupação (TO)	-30,3	0,15	1,03
Largura	-7,1	0,37	0,32
Transmitância térmica	-1,1	0,48	0,05
Transmitância vidro	-1,0	0,48	0,05
Fração vidro	-0,5	0,49	0,02
Fator solar	-0,3	0,49	0,02

Tabela 40: resultados do teste de significância no balanço de radiação infravermelha na superfície leste.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [kWh/m².ano]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	168,8	0,00	27,19
Prospecto médio	56,7	0,00	5,35
Espaçamento no eixo Norte-Sul	-47,9	0,00	4,03
Coeficiente de forma	-43,3	0,00	2,79
Coeficiente de aproveitamento (CA)	31,9	0,01	2,53
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	-25,2	0,02	2,07
Largura	24,5	0,02	2,01
Taxa de ocupação (TO)	24,3	0,04	1,72
Profundidade	24,0	0,03	1,97
Verticalidade	20,0	0,10	1,29
Fator solar	-6,7	0,29	0,54
Transmitância vidro	2,9	0,40	0,24
Transmitância térmica	1,1	0,46	0,09
Fração vidro	0,8	0,47	0,06

Tabela 41: resultados do teste de significância para o balanço de radiação de onda curta na superfície oeste.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [kWh/m².ano]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	246,4	0,00	12,81
Prospecto médio	-201,6	0,00	7,45
Espaçamento no eixo Norte-Sul	178,2	0,00	8,10
Coeficiente de forma	122,6	0,00	5,47
Profundidade	-117,1	0,00	4,97
Coeficiente de aproveitamento (CA)	-102,2	0,00	3,27
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	79,7	0,00	3,29
Verticalidade	-71,8	0,01	2,31
Taxa de ocupação (TO)	-58,0	0,02	2,05
Largura	-13,2	0,29	0,53
Fator solar	-0,4	0,49	0,02
Transmitância térmica	-0,3	049	0,02
Transmitância vidro	-0,3	0.49	0,01
Fração vidro	-0,1	0,50	0,00

Tabela 42: resultados do teste de significância na radiação infravermelha na superfície oeste.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [kWh/m².ano]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	167,1	0,00	26,20
Prospecto médio	58,3	0,00	5,57
Espaçamento no eixo Norte-Sul	-48,5	0,00	4,08
Coeficiente de forma	-45,0	0,00	2,89
Coeficiente de aproveitamento (CA)	28,0	0,03	1,77
Taxa de ocupação (TO)	25,2	0,03	1,79
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	-25,1	0,02	2,06
Profundidade	24,8	0,02	2,03
Largura	24,3	0,03	1,99
Verticalidade	16,4	0,14	1,05
Fator solar	-7,0	0,28	0,57
Transmitância térmica	2,4	0,42	0,19
Transmitância vidro	1,8	0,44	0,15
Fração vidro	0,1	0,49	0,00

III.2.2.3. Balanço radiativo na superfície da Fachada norte e sul

(a) Impacto global dos fatores na irradiação de onda curta e de onda longa nas Fachadas verticais norte e sul

A Figura 150 e Figura 151 abaixo apresentam a contribuição de cada fator tipo-morfológico para respostas de irradiação solar e infravermelha em relação às superfícies verticais de orientação norte e sul

Da mesma forma que para as superfícies verticais de orientação leste e oeste, verifica-se o impacto preponderante dos seguintes fatores para a resposta nas fachadas norte e sul: *albedo*, *prospecto médi*o e *espaçamento entre edifícios no eixo leste-oeste*. Esses três fatores juntos contribuem em quase 60% e até 70% nas trocas radiativas de onda curta nas superfícies verticais norte e sul, respectivamente. No infravermelho, o impacto do *albedo* possui contribuição isoladamente evidenciada, assim como foi também verificado para as fachadas leste-oeste (contribuição global de 34%) nas duas orientações.

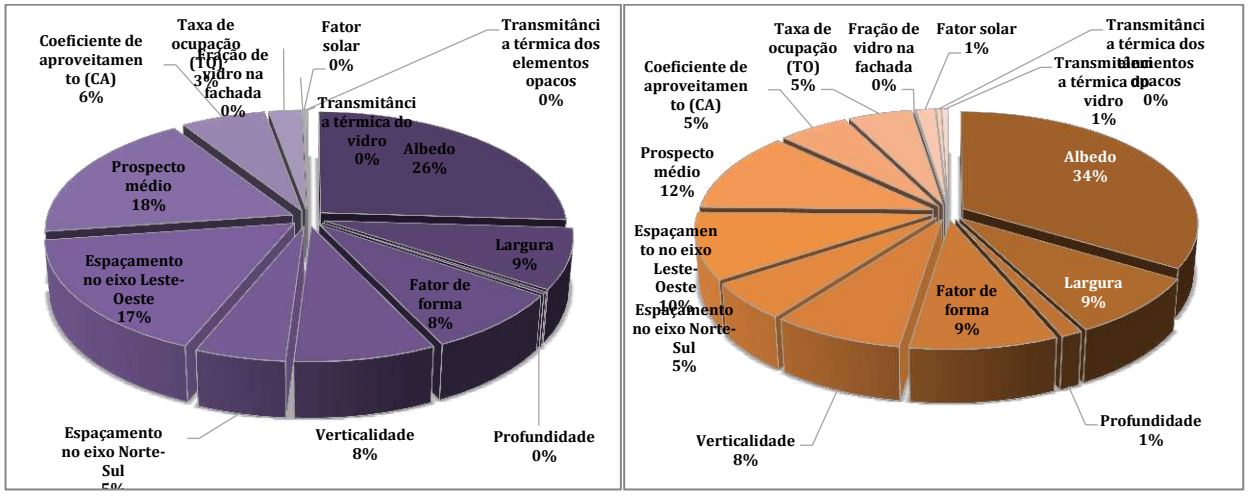


Figura 150: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas respostas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada norte (*overall student test*).

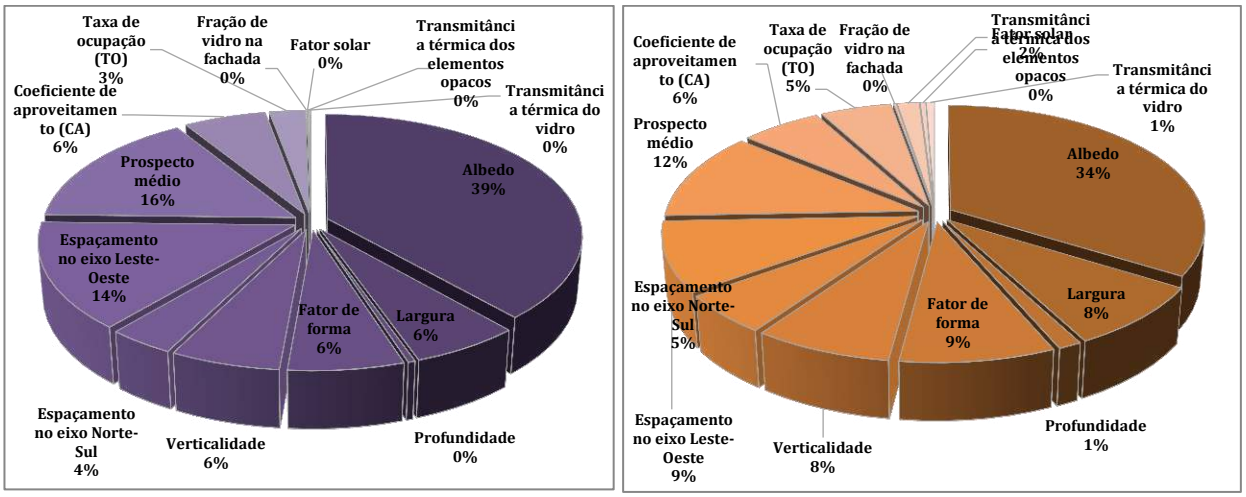


Figura 151: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada sul (*overall student test*).

(b) Magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas no balanço radiativo na Fachada norte e sul

Conforme os resultados obtidos e ilustrados na Figura 152 e Figura 153, a magnitude do efeito do *albedo*, assim como para as demais superfícies analisadas precedentemente, também dá-se de modo direto para as fachadas verticais norte e sul. Para o *prospecto médio*, o efeito também é inverso, ou seja, o aumento da altura em detrimento do espaçamento entre os edifícios, irá reduzir a resposta global em termos de irradiação de onda curta, na média dessas superfícies.

A *largura*, para essas superfícies, apresenta uma influência mais relevante e direta no balanço da energia radiante no espectro solar, visto que esta dimensão corresponde à área de superfície voltada para o norte e para o sul (Figura 139). Edifícios de grandes superfícies nessa dimensão associados a espaçamentos bastante amplos no eixo de maior incidência solar (nesse caso, rua no sentido leste-oeste) favorecerá, portanto, o aumento direto do saldo de irradiação de onda curta nas superfícies norte e sul.

Destaca-se ainda o efeito inverso do *coeficiente de aproveitamento (CA)* no saldo de irradiação solar e efeito direto no saldo do infravermelho, para superfície norte. Esse fator relaciona a área total útil construída pela área construída no solo. Quanto mais vertical for o edifício (não sendo considerados recuos compensatórios), maior será o valor de CA, maior será o potencial de projeção de sombras nas superfícies verticais estudadas.

A magnitude de efeito e significância desses resultados serão discutidos mais adiante.

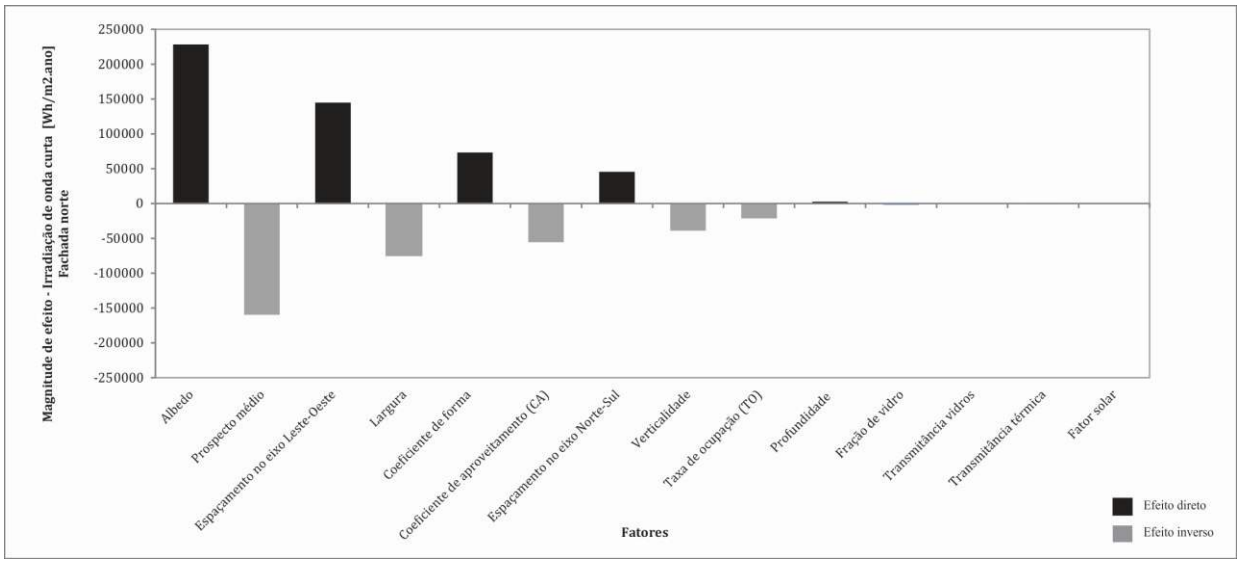


Figura 152: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto balanço de radiação solar na superfície vertical norte.

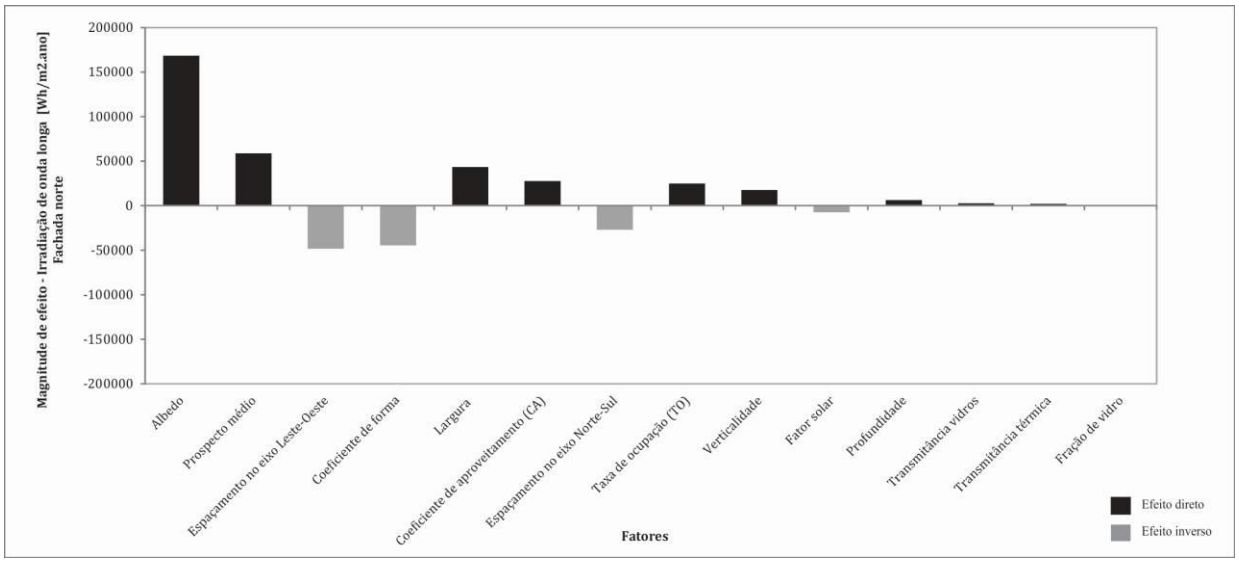


Figura 153: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a radiação infravermelha na superfície vertical norte.

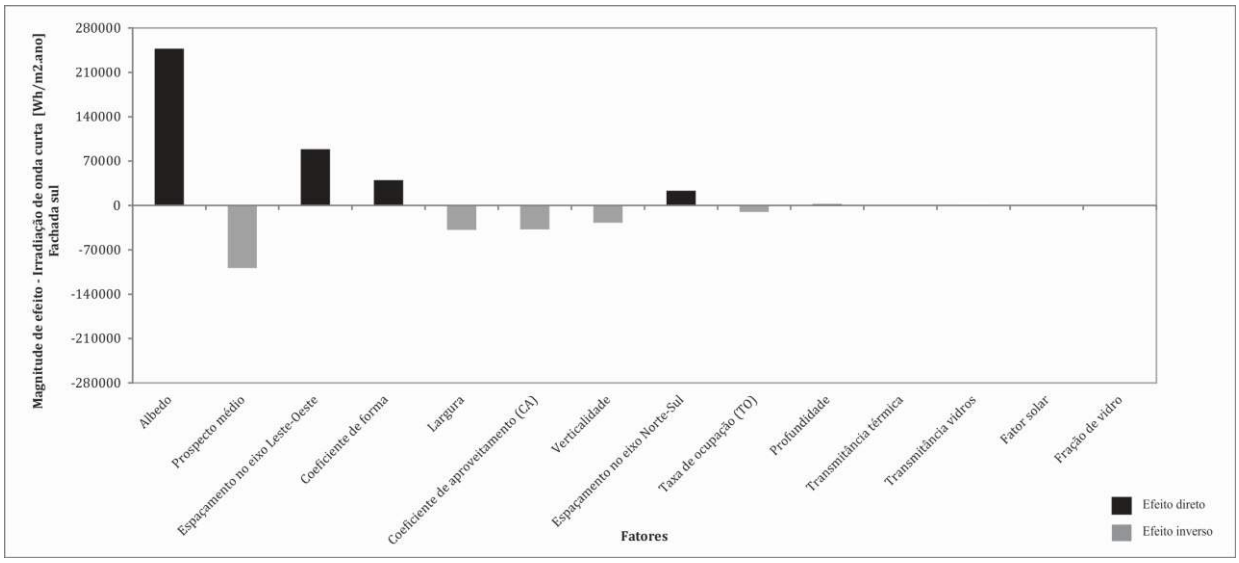


Figura 154: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de radiação solar na superfície vertical sul.

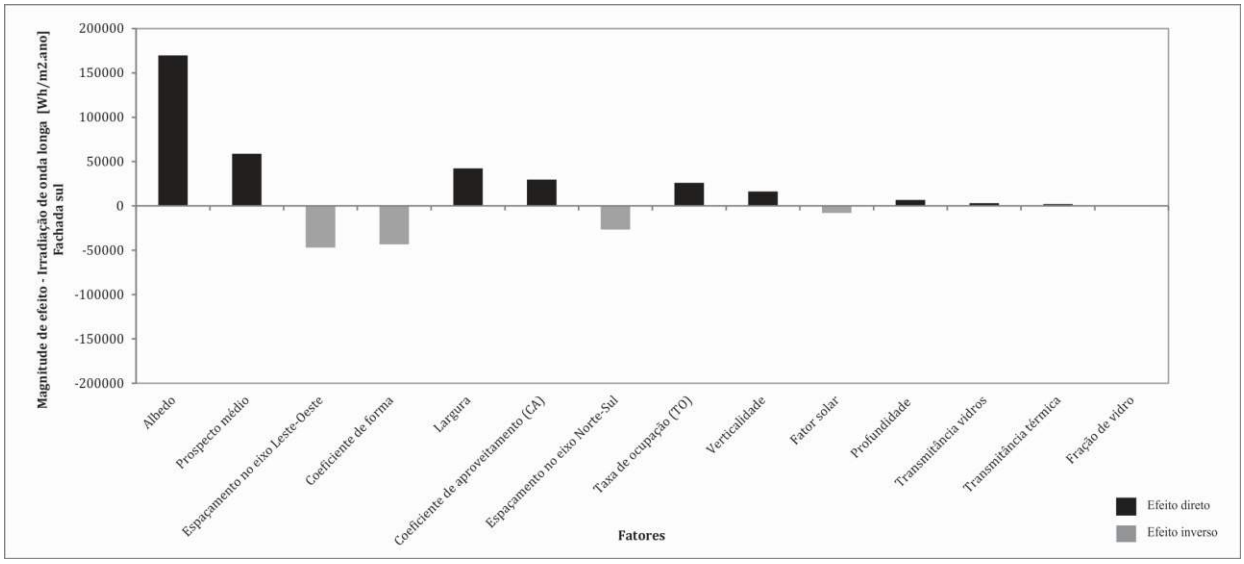


Figura 155: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de radiação infravermelha na superfície vertical sul.

(c) Teste de hipótese estatística

Da Tabela 43 a Tabela 46, são destacados os fatores significativos para a resposta da irradiação de onda curta e onda longa na superfície da fachada norte e sul, respectivamente.

Dentro do intervalo de confiança estabelecido, verifica-se que as variáveis: *profundidade* dos edifícios*, a verticalidade, a taxa de ocupação, o fator solar, transmitância térmica dos elementos opacos e dos vidros*, bem como a *fração de abertura* em vidro, não oferecem uma evidência suficiente para que sejam considerados de importância para as duas respostas (superfícies norte e sul) de saldo anual de radiação solar, face aos demais fatores considerados.

Conforme as informações obtidas, se levarmos em conta valores máximos do intervalo possível de variação estabelecido nesse estudo para o *albedo* e o *espaçamento no eixo leste-oeste*, a contribuição de cada um seria equivalente a um incremento de 228 e 247 kWh/m².ano,

respectivamente, para a fachada norte e sul. Já considerando o *prospecto médio* mais elevado, a magnitude de efeito desse fator na irradiação solar recebida nas fachadas norte e sul seria de cerca de -159 e -98 kWh/m².ano, respectivamente. Enquanto a *verticalidade* representaria uma redução de cerca de 38 kWh/m².ano e 27 kWh/m².ano, respectivamente.

No espectro infravermelho, o *coeficiente de forma (Cf)* dos edifícios apresentou influência de variação inversa tanto para irradiação emitida pela superfície norte como sul. Ou seja, o aumento da superfície da envoltória exposta para o exterior em relação ao volume construído, implicará em maior superfície exterior de emissão de energia radiante para um menor volume total construído. Essa emissão para um valor extremo do *Cf* seria da magnitude de 44 e 43 kWh/m².ano, para as superfícies norte e sul, respectivamente.

Tabela 43: resultados do teste de significância no balanço de radiação de onda curta na superfície vertical norte.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [kWh/m².ano]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	228,5	0,00	16,44
Prospecto médio	-159,7	0,00	6,34
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	144,9	0,00	8,15
Largura	-74,4	0,00	3,83
Coeficiente de forma	73,4	0,00	4,11
Coeficiente de aproveitamento (CA)	-55,4	0,03	1,87
Espaçamento no eixo Norte-Sul	45,5	0,01	2,30
Verticalidade	-38,8	0,06	1,53
Taxa de ocupação (TO)	-21,3	0,20	0,84
Profundidade	2,6	0,44	0,13
Fração de vidro	-1,6	0,46	0,08
Transmitância vidros	0,7	0,48	0,03
Transmitância térmica	-0,6	0,49	0,03
Fator solar	-0,3	0,49	0,01

Tabela 44: resultados do teste de significância na radiação infravermelha na superfície vertical norte.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [kWh/m².ano]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	168,4	0,00	25,27
Prospecto médio	58,8	0,00	5,43
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	-48,4	0,00	3,99
Coeficiente de forma	-44,5	0,00	2,86
Largura	43,4	0,00	3,56
Coeficiente de aproveitamento (CA)	27,6	0,04	1,72
Espaçamento no eixo Norte-Sul	-27,0	0,01	2,18
Taxa de ocupação (TO)	24,9	0,04	1,73
Verticalidade	17,6	0,13	1,11
Fator solar	-7,4	0,27	0,59
Profundidade	6,3	0,30	0,50
Transmitância vidros	2,6	0,41	0,21
Transmitância térmica	2,0	0,43	0,16
Fração de vidro	-0,2	0,49	0,02

Tabela 45: resultados do teste de significância no balanço de radiação de onda curta na superfície vertical sul.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [kWh/m².ano]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	247,4	0,00	25,68
Prospecto médio	-98,7	0,00	3,96
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	88,9	0,00	5,10
Coeficiente de forma	40,0	0,00	2,37
Largura	-38,4	0,02	2,12
Coeficiente de aproveitamento (CA)	-37,7	0,10	1,28
Verticalidade	-27,1	0,12	1,17
Espaçamento no eixo Norte-Sul	23,4	0,10	1,28
Taxa de ocupação (TO)	-10,2	0,34	0,40
Profundidade	2,0	0,45	0,11
Transmitância térmica	-0,9	0,47	0,05
Transmitância vidros	0,9	0,47	0,05
Fator solar	0,1	0,49	0,00
Fração de vidro	-0,1	0,50	0,00

Tabela 46: resultados do teste de significância na radiação infravermelha na superfície vertical sul.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [kWh/m².ano]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	169,7	0,00	26,18
Prospecto médio	58,8	0,00	5,47
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	-46,9	0,00	3,87
Coeficiente de forma	-43,2	0,00	2,76
Largura	42,4	0,00	3,48
Coeficiente de aproveitamento (CA)	29,7	0,03	1,85
Espaçamento no eixo Norte-Sul	-26,7	0,01	2,16
Taxa de ocupação (TO)	26,1	0,03	1,82
Verticalidade	16,4	0,15	1,03
Fator solar	-8,0	0,26	0,64
Profundidade	6,7	0,29	0,54
Transmitância vidros	3,2	0,39	0,25
Transmitância térmica	2,0	0,43	0,16
Fração de vidro	-0,3	0,48	0,02

III.2.2.4. Análise comparativa por fator tipo-morfológico

Para concluir as discussões dessa primeira abordagem do estudo de sensibilidade, onde são considerados o efeito principal ou efeito isolado de cada fator tipo-morfológico na insolação dos edifícios, apresentam-se algumas comparações entre os fatores, o desvio relativo entre os resultados da magnitude de efeito por fachada e a hierarquização dos fatores por superfície examinada.

Na Tabela 47 e Tabela 48, são apresentados os resultados sobre a magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos para a irradiação solar e infravermelha em cada superfície.

Tabela 47: magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos na irradiação solar de todas as superfícies examinadas.

	Fatores tipo-morfológicos	**Magnitude de efeito** [kWh/m².ano]				
		Coberta	**Fachada leste**	**Fachada oeste**	**Fachada norte**	**Fachada sul**
1	**Prospecto médio**	-147,2	-168,8	-201,6	-159,7	-98,7
2	**Albedo**	106,5	259,5	246,4	228,5	247,4
3	**Espaçamento no eixo Norte-Sul**	101,2	144,8	178,2	45,5	23,4
4	**Espaçamento no eixo Leste-Oeste**	96,5	62,2	79,7	144,9	88,9
5	**Coeficiente de forma**	39,1	84,5	122,6	73,4	40,0
6	**Profundidade**	-30,9	-79,1	-117,1	2,6	2,0
7	**Taxa de ocupação (TO)**	28,8	-30,3	-58,1	-21,3	-10,2
8	**Largura**	19,8	-7,2	-13,2	-74,4	-38,4
9	**Coeficiente de aproveitamento (CA)**	8,2	-89,2	-102,3	-55,4	-37,7
10	**Verticalidade**	-7,0	-61,3	-71,8	-38,8	-27,1
11	**Fração de vidro**	-2,7	-0,5	-0,1	-1,6	-0,1
12	**Transmitância térmica vidros**	-1,2	-1,1	-0,3	0,6	0,9
13	**Fator solar**	-0,9	-0,4	-0,4	-0,3	0,1
14	**Transmitância térmica**	0,6	-1,1	-0,3	-0,6	-0,9

Tabela 48: magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos na irradiação infravermelha de todas as superfícies examinadas.

	Fatores tipo-morfológicos	**Magnitude de efeito** [kWh/m².ano]				
		Coberta	**Fachada leste**	**Fachada oeste**	**Fachada norte**	**Fachada sul**
1	**Prospecto médio**	-39,3	56,7	58,2	58,8	58,8
2	**Albedo**	16,3	168,8	167,1	168,5	169,8
3	**Espaçamento no eixo Norte-Sul**	-11,6	-47,9	-48,5	-27,0	-26,7
4	**Espaçamento no eixo Leste-Oeste**	-11,5	-25,2	-25,1	-48,4	-46,9
5	**Coeficiente de forma**	-5,6	-43,3	-45,0	-44,5	-43,2
6	**Profundidade**	4,2	24,0	24,8	6,3	6,7
7	**Taxa de ocupação (TO)**	-3,4	24,3	25,2	24,9	26,1
8	**Verticalidade**	-2,4	20,0	16,4	17,6	16,4
9	**Largura**	-1,6	24,5	24,3	43,4	42,4
10	**Fator solar**	1,4	-6,7	-7,0	-7,4	-8,0
11	**Transmitância térmica**	-0,7	1,1	2,4	2,0	2,0
12	**Coeficiente de aproveitamento (CA)**	-0,6	31,9	28,0	27,6	29,7
13	**Fração de vidro**	0,4	0,8	0,1	-0,2	-0,3
14	**Transmitância térmica vidros**	0,0	2,9	1,8	2,6	3,2

Prospecto médio

Ao contrastar a magnitude de efeito desse parâmetro isoladamente para a resposta de irradiação solar nas cinco superfícies analisadas, verifica-se que o impacto é produzido de forma mais expressiva para a fachada oeste, de forma mais ou menos equivalente para as fachadas leste, norte e coberta (desvio relativo de 20%) e, comparativamente, bastante menos expressiva para a fachada sul (Tabela 47). Quando o prospecto atinge o máximo valor do intervalo de análise, o que seria equivalente a um prospecto de 3,9, o seu impacto na redução da insolação na fachada oeste é o mais amplo. Essa redução da irradiação na fachada oeste é de cerca de 200 kWh/m².ano. Enquanto que na fachada sul, esse impacto na redução é menor, cerca de 98 kWh/m².ano, representando uma diferença, em termos de contribuição na redução, de cerca de 50%.

Essa diferença pode ser explicada pelo tempo e intensidade de insolação nessas orientações em função da trajetória solar para Maceió (Figura 47 – Capítulo I). Apesar de intensa, a insolação de verão na fachada sul ocorre de outubro a fevereiro, ou seja, quatro meses por ano. De modo que o impacto do prospecto médio dos edifícios em projetar sombras e interceptar a insolação nessa fachada, reduzindo a quantidade de irradiação na fachada sul, é proporcionalmente menor. Apesar de ligeiramente ao norte, a trajetória solar em baixas latitudes, como Maceió, possui a altitude solar bastante elevada, quase vertical, ao longo de todo ano, e é quase simétrica, com o sol nascendo quase sempre completamente a leste e se pondo a oeste.

No espectro infravermelho, o prospecto médio apresenta efeito significativo direto na irradiação encontrada nas superfícies verticais, e um impacto inverso significativamente menor na superfície da coberta. O desvio relativo entre o efeito para as fachadas verticais é quase nulo, ou seja, a contribuição desse fator morfológico é equivalente no acréscimo de energia radiante de onda longa em todas as fachadas. Quando o prospecto é máximo, essas superfícies tendem a receber 58 kWh/m².ano mais do que emitem, deixando o saldo positivo (Tabela 48). No entanto, para a superfície da coberta, esse efeito é contrário ao sentido de variação do prospecto. Isso pode ser dado ao fato de que essa superfície horizontal, emitirá uma parcela para a abóbada celeste, pois sua abertura para o céu é maior que para as superfícies verticais. Além disso, as cobertas tendem a receber menos influência das demais superfícies construídas (solo e fachadas verticais).

Albedo

No que diz respeito ao albedo, o impacto desse fator na irradiação solar encontrada nas diferentes fachadas também pode ser diverso. A elevada reflexão das superfícies (principalmente fachadas e solo) produzirá um incremento na insolação das fachadas verticais de forma relativamente equivalente entre elas (desvio relativo de 11%)(Tabela 47). Porém, se compararmos o impacto que é produzido nessas superfícies verticais ao produzido na superfície horizontal da coberta, essa diferença pode ser de até 60%.

Se atribuímos um valor elevado ao albedo das superfícies, a contribuição desse fator no incremento de radiação nas fachadas verticais pode ser de até 259 kWh/m².ano para as fachadas verticais e, apenas 106 kWh/m².ano para a coberta.

A superfície horizontal da coberta recebe potencialmente menos influência das reflexões das demais superfícies da cena urbana. De modo que a tendência dessa superfície é refletir mais em direção ao céu e receber, apenas eventualmente, uma contribuição refletida das demais superfícies verticais, caso haja uma diferença importante de altura (desvio padrão de altura) entre as edificações.

Guardadas as devidas proporções, o mesmo tipo de variação ocorre para a influência do albedo na irradiação infravermelha da coberta em relação às diferentes fachadas verticais. A magnitude de efeito do albedo nas fachadas é da ordem de dez vezes maior que para as cobertas (Tabela 48). O aumento do albedo nas paredes verticais produzirá maior inter-reflexão e ganho em termos de irradiação solar, conforme discutido acima. Esse processo levará ao aquecimento das paredes, aumentando assim, as trocas radiativas de onda longa. A coberta, por sua vez, receberá menos influência desse fenômeno.

Essa diferença relativa na magnitude de efeito do albedo pela orientação, pode gerar diversas escolhas, que poderá ser dada em função dos objetivos/critérios considerados.

No caso desse trabalho, vislumbram-se dois cenários possíveis. Um primeiro, onde o objetivo é minimizar a irradiação solar recebida por todas as fachadas e coberta, de modo a minimizar a carga térmica dada ao ganho solar importante no contexto climático analisado. E, um outro cenário, onde o objetivo é minimizar essa irradiação nas fachadas verticais e maximizá-la ao nível da coberta, de modo que, além de buscar melhorar o desempenho energético dos edifícios pela redução da carga térmica solar nas fachadas, procura-se também tornar os prédios eficientes em termos de um potencial de produção de energia via solar.

Assim, elevar o prospecto no eixo norte-sul, reduzir o albedo das superfícies verticais das fachadas leste e oeste e elevar o albedo das cobertas podem ser estratégias eficazes para redução da insolação nas edificações. No entanto, outros requisitos devem ser levados em conta simultaneamente nessa equação, como a disponibilidade de luz nos espaços. Essa resposta será também analisada na seção III.2.3. Outrossim, metodologias de projeto paramétrico por otimização,

como será abordado na próxima seção do presente capítulo, auxiliará na busca pelo conjunto formal que oferecerá melhor desempenho respeitando determinadas restrições.

Espaçamentos entre edifícios

Conforme já discutido, os espaçamentos entre edifícios produzirão efeito mais ou menos importante em função do eixo de orientação do afastamento. Para superfície da coberta, evidentemente, quanto maior o afastamento nos dois eixos, maior a irradiação incidente. No entanto, para as quatro orientações examinadas, destaca-se o efeito relativo bastante significante da magnitude de efeito do espaçamento no eixo norte-sul para incremento de 178 kWh/m².ano para a superfície oeste. A contribuição do afastamento no eixo norte-sul para as fachadas de exposição leste e oeste chega a ser de mais de 60% se comparada com a contribuição do fator espaçamento no eixo leste-oeste para as fachadas de exposição norte-sul.

Quanto ao impacto no infravermelho, o aumento do espaçamento entre edifícios contribuirá para as fachadas de seus respectivos eixos de orientação, em maior emissão de radiação de onda longa. Esse fator isoladamente, se levado ao valor máximo de seu intervalo, ou seja um espaçamento de 30 m entre os edifícios, produzirá uma emissão da ordem de 47 kWh/m².ano das fachadas. Isso é dado à redução da influência das superfícies entre elas e o aumento do fator de visão do céu a partir dessas fachadas.

Coeficiente de forma

Com um desvio relativo dos valores encontrados para as diferentes fachadas de 43%, o coeficiente de forma também possui maior magnitude de efeito na fachada oeste. Quanto maior o coeficiente de forma, maior a exposição das fachadas verticais para insolação. A contribuição isolada desse fator para o incremento de irradiação na fachada oeste é de 122 kWh/m².ano.

Já para a magnitude do impacto no espectro infravermelho, esse desvio relativo é bem menor entre as fachadas. No entanto, a diferença é bastante significativa entre a magnitude produzida para as fachadas e a coberta. Essa diferença é da ordem de 90% e pode ser explicada pelo mesmo fenômeno já explicitado precedentemente. As superfícies verticais tendem a participar mais intensamente das trocas radiativas com as demais superfícies urbanas (outras fachadas verticais e superfície do solo), de modo que quanto maior o coeficiente de forma (ou a superfície de envoltória exposta a estas trocas), maior a capacidade destas superfícies em emitir energia radiante.

Profundidade e Largura

As dimensões largura e profundidade dos edifícios produzem um impacto e significância também em função da orientação da superfície examinada, assim como para a avaliação dos espaçamentos.

Quanto maior a profundidade, ou maior a dimensão no eixo leste-oeste, maior a máscara de sombras projetadas nos edifícios da quadra examinada nas fachadas leste e oeste. De forma similar, é possível explicar a magnitude de efeito inversa para a largura, ou dimensão no eixo norte-sul.

Taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento

Os fatores que determinam a densidade construída têm uma significativa importância para as fachadas examinadas. Destaca-se o efeito do coeficiente de aproveitamento para superfícies verticais, como a superfície oeste, pois este fator morfológico caracterizará a densidade total, definindo, assim, a altura construída e, consequentemente, a área das superfícies verticais expostas à insolação. Considerando valores extremos para o CA, sua magnitude de efeito inversa poderá representar uma redução de até 102 kWh/m².ano para a fachada oeste, de maior insolação. E, menos significativa para a superfície horizontal da coberta, já que a área construída horizontalmente, que poderia produzir um efeito direto importante na insolação dessa superfície,

pode ser compensada inversamente pela altura construída que, portanto, poderá representar maior máscara de sombra para a mesma.

Verticalidade

O fator verticalidade, sendo a altura ponderada pela área construída dos edifícios, apresenta comportamento semelhante ao fator de densidade CA.

Transmitância térmica, fator solar e fração de vidro

Como esperado, variações dadas em fatores como *transmitância térmica* dos componentes das fachadas (elementos opacos e vidro) e *fator solar* não produzem modificações importantes nas respostas de interesse, pois se tratam de fatores que definem desempenho energético no interior do edifício, não interferindo de forma significativa, comparada aos demais fatores examinados, nas interações entre superfícies exteriores, com relação à irradiação solar recebida, refletida ou emitida por estas para os demais edifícios em uma cena urbana.

No que diz respeito à *fração de vidro* por fachada, esse fator poderia modificar a componente refletida, alterando o saldo de radiação solar resultante nas fachadas e até mesmo na coberta. No entanto, tal variável não é evidenciada como influente nas análises de sensibilidade. Esse resultado pode ser atribuído a várias razões: uma delas, diz respeito a uma das hipóteses simplificadoras assumidas pelo próprio modelo empregado nas avaliações, já explicitada no Capítulo I desse manuscrito. O modelo SRA/Citysim, que calcula trocas radiativas na escala urbana, considera que todas as superfícies da cena urbana são lambertianas, ou seja, que refletem a energia radiante incidente de forma uniformemente difusa (superfícies difusoras ideais). Conforme já dito no Capítulo I, essa simplificação é, todavia, aceitável e apropriada para avaliações na escala espacial e temporal urbana considerada.

O algoritmo de radiosidade utilizado não considera o cálculo em superfícies especulares, diferente das técnicas de raio-traçado, frequentemente empregadas em simulações dinâmicas na escala do edifício (ver Capítulo I). Na escala do edifício, a existência de uma fração expressiva de vidro em fachadas do entorno, poderia representar um incremento em termos de energia radiante refletida para uma dada hora do dia, em um dado ponto de avaliação no plano de trabalho no interior de uma sala de um edifício. Ao avaliar um valor instantâneo de irradiação ou iluminação para um dado ponto, o fator *fração de vidro* poderia apresentar uma significância importante[49].

No entanto, na escala espacial urbana e, em termos de saldo anual (escala temporal do ano), esse comportamento pontual fica combinado numa média de variações (e.g. média dos diferentes ângulos de incidência, fluxo solar, etc.), de modo que esse impacto individual do fator *fração de vidro* passa a ser bem menos relevante. Assim, a média da variação do fluxo solar em fachadas se aproximará do que seria uma superfície lambertiana, reduzindo as diferenças encontradas entre os modelos. Além disso, no contexto urbano estudado nesse trabalho, o uso de grandes superfícies envidraçadas é pouco representativo das práticas construtivas tradicionais locais, conforme já visto anteriormente.

Da mesma forma é possível explicar a magnitude reduzida desse fator nas trocas radiativas de onda longa nas superfícies. Dada a escala espacial e temporal de análise, foi assumida a hipótese simplificadora de que as superfícies da cena urbana avaliada consistem de corpos cinzas (emissividade igual a absortividade) e que estas estariam circundadas por um meio isotrópico (de uma temperatura média). Ou seja, nesta escala, simplificam-se os detalhes das fachadas, onde cada uma é considerada como uma superfície relativamente homogênea, também em termos de

[49] A *fração de vidro* por fachada é considerada no modelo de cálculo do Citysim para estimar o desempenho energético no interior dos edifícios da cena urbana. O cálculo do balanço energético das edificações não faz parte do escopo desse trabalho.

temperatura (calcula-se uma temperatura superficial média por fachada). Não sendo consideradas, portanto, as variações de emissividade e absortividade em cada componente, inclusive o percentual de vidro, de cada fachada.

Tabela 49: hierarquização da magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos na irradiação solar por fachada.

Fatores tipo-morfológicos	**coberta**	**leste**	**oeste**	**norte**	**sul**
Albedo	2	1	1	1	1
Coeficiente de aproveitamento (CA)	9	4	6	6	6
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	4	7	7	3	3
Espaçamento no eixo Norte-Sul	3	3	3	7	8
Coeficiente de forma	5	5	4	5	4
Fator solar	13	14	11	14	13
Fração de vidro	11	13	14	11	14
Largura	8	10	10	4	5
Profundidade	6	6	5	10	10
Prospecto médio	1	2	2	2	2
Taxa de ocupação (TO)	7	9	9	9	9
Transmitância térmica	14	11	12	13	11
Transmitância vidros	12	12	13	12	12
Verticalidade	10	8	8	8	7

Tabela 50: hierarquização da magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos na irradiação infravermelha por fachada.

Fatores tipo-morfológicos	**coberta**	**leste**	**oeste**	**norte**	**sul**
Albedo	2	1	1	1	1
Coeficiente de aproveitamento (CA)	12	5	5	6	6
Espaçamento no eixo Leste-Oeste	4	6	7	3	3
Espaçamento no eixo Norte-Sul	3	3	3	7	7
Coeficiente de forma	5	4	4	4	4
Fator solar	10	11	11	10	10
Fração de vidro	13	14	14	14	14
Largura	9	7	9	5	5
Profundidade	6	9	8	11	11
Prospecto médio	1	2	2	2	2
Taxa de ocupação (TO)	7	8	6	8	8
Transmitância térmica	11	13	12	13	13
Transmitância vidros	14	12	13	12	12
Verticalidade	8	10	10	9	9

Outro aspecto importante a ser ressaltado é a hierarquização da importância dos fatores por fachada (Tabela 49 e Tabela 50). Observa-se, por exemplo, a magnitude de efeito mais relevante do *albedo* na maximização da insolação nas fachadas verticais (norte, sul, leste e oeste), em detrimento da coberta. Aspecto que pode ser levado em conta no contexto de redução de cargas térmicas no interior dos edifícios. Da mesma forma, para o fator *prospecto médio*, que passa a ser mais relevante, inversamente, na insolação da coberta.

Esses resultados podem auxiliar também na priorização de estratégias de forma ainda mais precisa, se cruzarmos as informações dos parâmetros com a questão da sua relevância por orientação, podendo gerar formas urbanas mais diversas. As diferentes possibilidades de solução serão ainda melhor exploradas por meio da aplicação de uma metodologia de otimização.

Foi destacado nesse estudo de sensibilidade, o efeito isolado de fatores, observando seu comportamento diante das respostas de interesse em intervalos extremos de variação. Para melhor explorar o estudo paramétrico da forma urbana, faz-se necessário considerar também o efeito de interação entre os fatores, como será discutido adiante. Além disso, por meio da metodologia de

otimização, será possível identificar combinações paramétricas intermediárias (soluções compromisso entre os objetivos), tendo-se em conta ainda outras restrições urbanas locais.

III.2.2.5. Efeitos de interação entre os fatores tipo-morfológicos

Como diretrizes conclusivas do estudo de sensibilidade anterior, poder-se-ia dizer que não foi encontrada evidência de que variações nos fatores: *fator solar*, *transmitância térmica* dos elementos opacos e translúcidos, a *fração de abertura em vidro*, possam produzir modificações relevantes nas variáveis respostas examinadas. Além disso, fatores como *taxa de ocupação* e *verticalidade* apresentaram significância relativa (aos demais fatores) menos relevante.

No entanto, para evitar o erro de excluir prematuramente fatores que possam representar um impacto que seja importante no estudo, faz-se necessário examinar estatisticamente também o efeito combinado entre essas variáveis para mesma resposta. Para isso, foram também avaliados gráficos de probabilidade normal (*half normal plot*). Estes consistem representações gráficas do valor absoluto do efeito estimado em comparação com as probabilidade normais cumulativas (MONTGOMERY, 2001).

O gráfico de probabilidade normal pode ser útil para distinguir os efeitos mais significativos (canto superior direito dos gráficos) e menos significativos (inferior esquerdo), considerando tanto os efeitos principais como os de interação de primeira ordem. A existência de uma forte interação significa que o efeito de uma variável depende da resposta da outra.

Os gráficos da Figura 156 e Figura 165 apresentam a magnitude de efeito para os fatores isolados ou, como se denomina em estatística, *efeito principal* e também o *efeito de interação*. Nesses resultados, quando os fatores interagem, pode ocorrer uma diferença de grandeza importante na resposta ou uma diferença de direção nessa resposta. Se existir sinergismo entre os fatores, a interação é positiva (representado nos gráficos pelos quadrados na cor preta). Se existir antagonismo, a interação é negativa (quadrados na cor cinza).

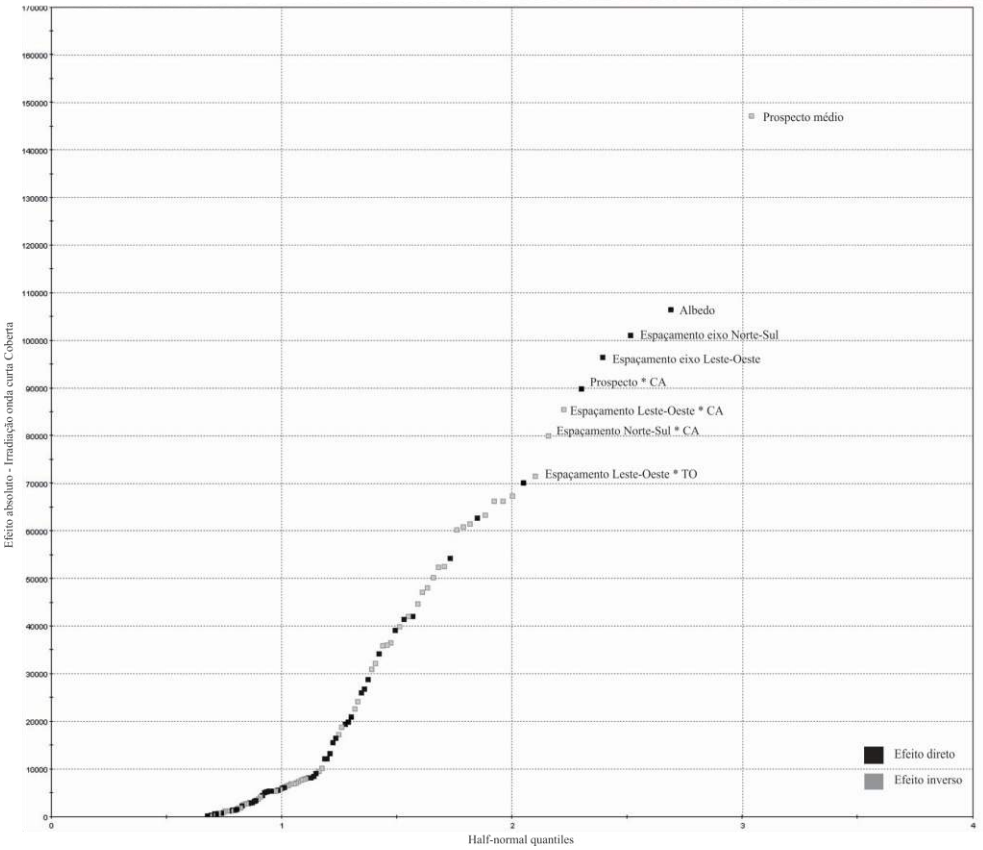


Figura 156: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta resultante na superfície da coberta.

O gráfico da Figura 156 representa os efeitos principais e de interação dos fatores para a resposta do balanço radiativo de onda curta na superfície da coberta. Verificam-se nesses resultados os efeitos de fatores isolados (ou efeitos principais) como os identificados no item precedente, ou seja, a importância do *albedo*, do *prospecto médio* e do *espaçamento* no dois eixos de orientação. Entretanto, nota-se ainda um relevante efeito de interação entre o fator *coeficiente de aproveitamento* (CA) e dos dois últimos fatores mencionados. O CA apresentou isoladamente um efeito direto desprezível no aumento da irradiação na coberta, da ordem de apenas 8 kWh/m².ano (Tabela 49). Todavia, o efeito desse fator quando considerado associado ao fator *prospecto médio*, por exemplo, passa a representar um significativo impacto na resposta de 90 kWh/m².ano.

Esse resultado parece consistente, visto que quanto maior o CA, potencialmente maior será a área da superfície de incidência na coberta e, assim, maior será a energia solar recebida. O *prospecto médio*, sendo a relação da altura pela largura da rua e afastamentos, representará um efeito inverso nessa resposta, pois quanto maior a média da altura construída, maior poderá ser o impacto das sombras projetadas pelos edifícios do entorno na superfície das cobertas, reduzindo assim a energia solar incidente.

O efeito dessa interação, no entanto, passa a ter um efeito direto na resposta. De modo que aumento do CA, ou da densidade total construída dos edifícios, passa a compensar a perda da variação direta do prospecto.

Para a resposta em termos de irradiação de onda longa, destaca-se também o efeito de interação do CA, da *verticalidade* e da *taxa de ocupação*(TO). Se o fator *verticalidade* representava um efeito inverso desprezível, quando analisado isoladamente, de magnitude igual -2,4

kWh/m².ano, quando este fator interage com o *albedo*, a contribuição passa a ser de cerca de 25 kWh/m².ano, dez vezes maior.

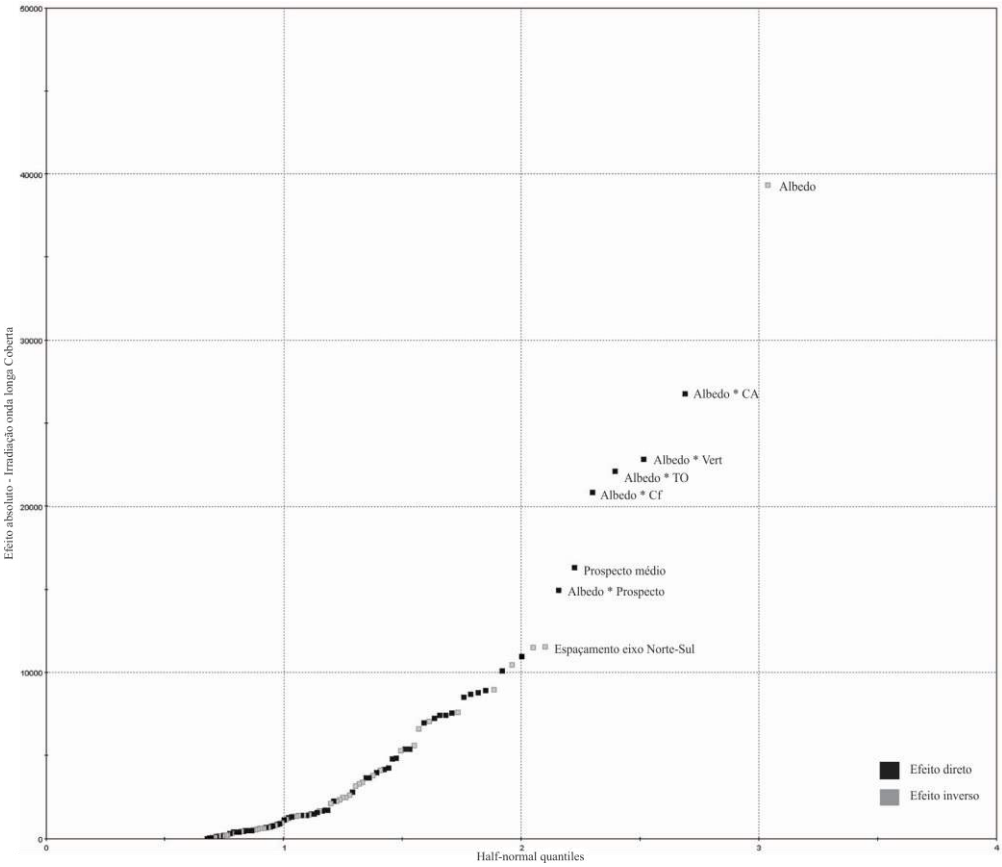


Figura 157: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda longa resultante na superfície da coberta.

Os gráficos da Figura 156 e Figura 160 apresentam os efeitos principais e de interação dos mesmos fatores para a resposta do balanço radiativo de onda curta na superfície das fachadas leste e oeste. Verificou-se nesses resultados o efeito direto principal do *albedo* e do *prospecto médio*, conforme discutido anteriormente. Foi verificado ainda um relevante efeito de interação *albedo* + *verticalidade* e o *albedo* + *coeficiente de forma*. Todos esses fatores já apresentavam isoladamente algum efeito significativo (Tabela 39), porém a magnitude da interação apresentou diferenças importantes. A *verticalidade* isoladamente que havia apresentado uma magnitude de impacto inversa, representando uma redução na resposta de 61 e 71 kWh/m².ano para as fachadas leste e oeste, respectivamente, apresentou um efeito de interação com o *albedo* de 170 e 155 kWh/m².ano de redução da irradiação solar nas superfícies das fachadas leste e oeste, respectivamente. Destaca-se, portanto, a contribuição preponderante da *verticalidade* nessas análises.

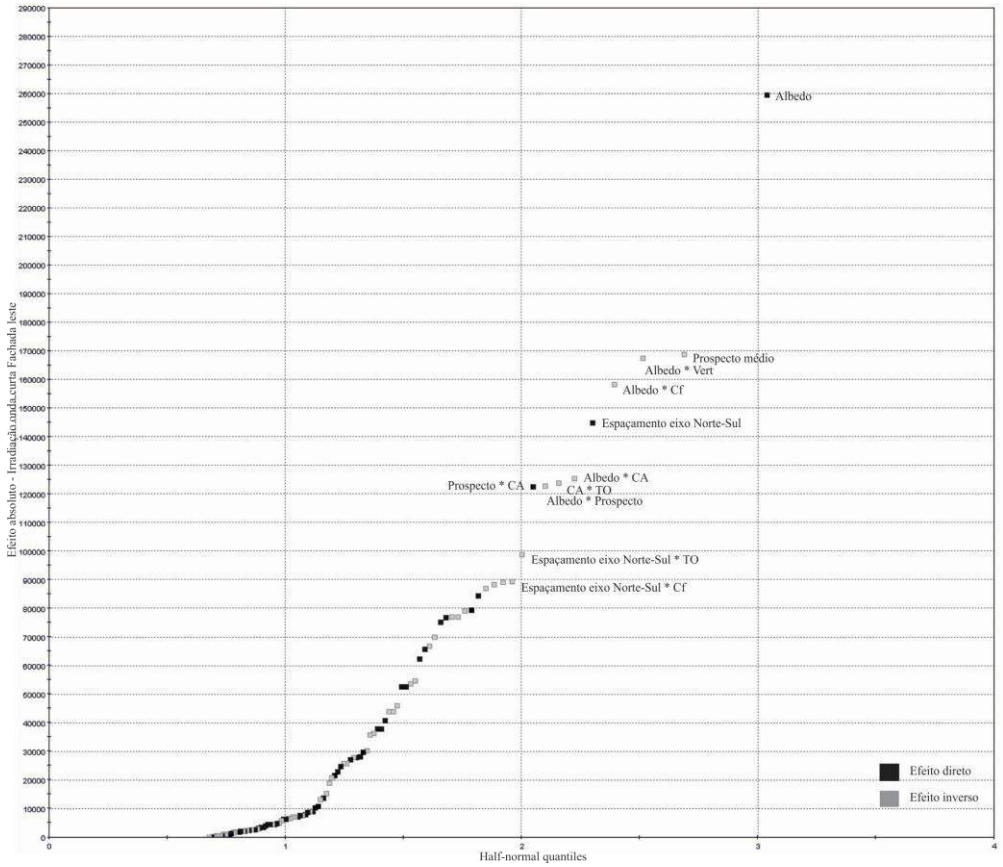


Figura 158: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta resultante na superfície da fachada leste.

Para a resposta em termos de irradiação de onda longa, evidencia-se também o efeito de interação do *albedo* com o CA, com o *prospecto médio* e com a *taxa de ocupação*(TO) (Figura 159 a Figura 161). Se o fator *CA* representava um efeito desprezível, quando analisado isoladamente, de magnitude igual 31 e 28 kWh/m².ano (leste e oeste), quando este fator interage com o *albedo*, a contribuição passa a ser de 135 e 122 kWh/m².ano, para as fachadas leste e oeste, respectivamente.

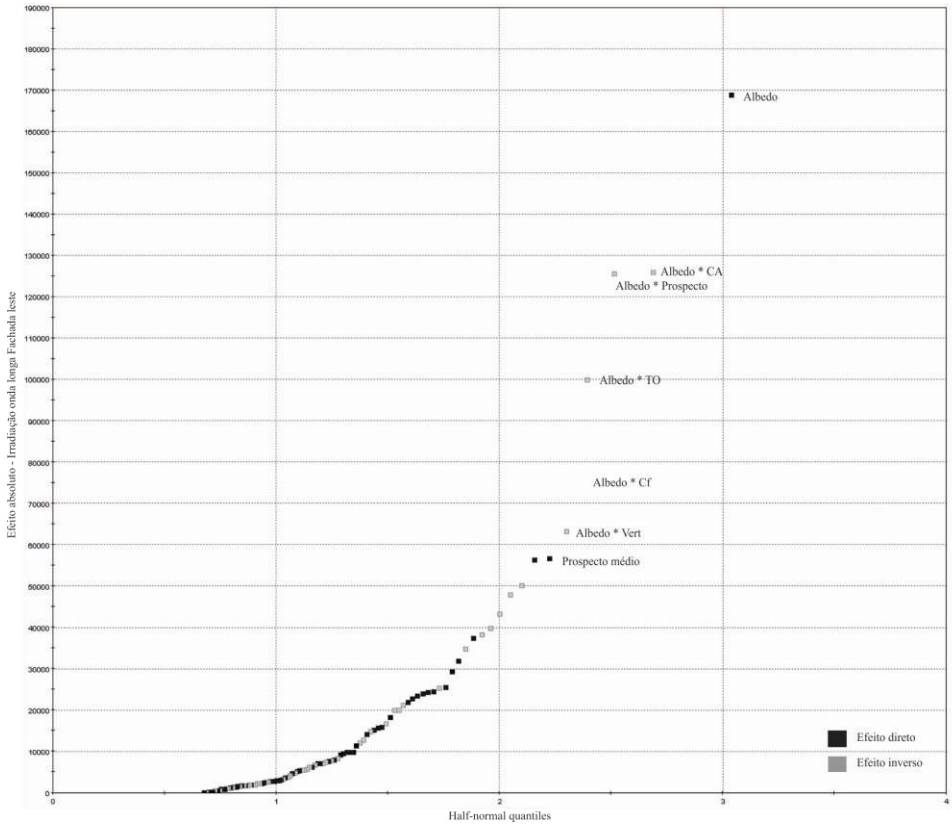


Figura 159: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda longa resultante na superfície da fachada leste.

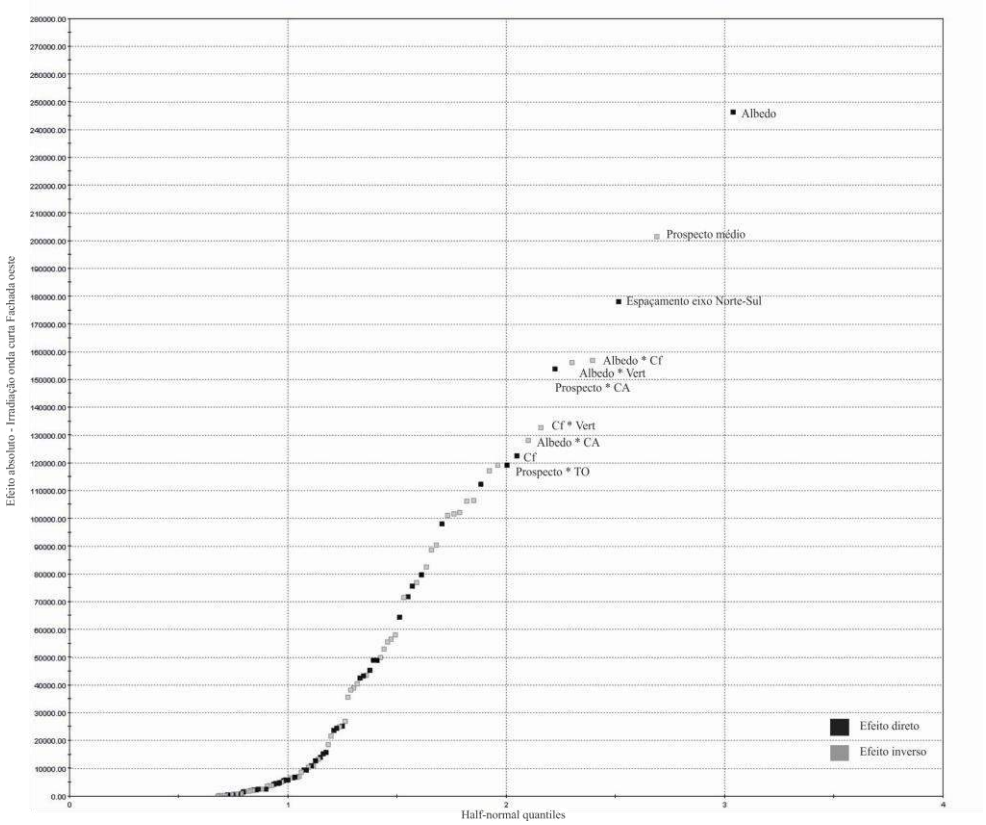


Figura 160: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta resultante na superfície da fachada oeste.

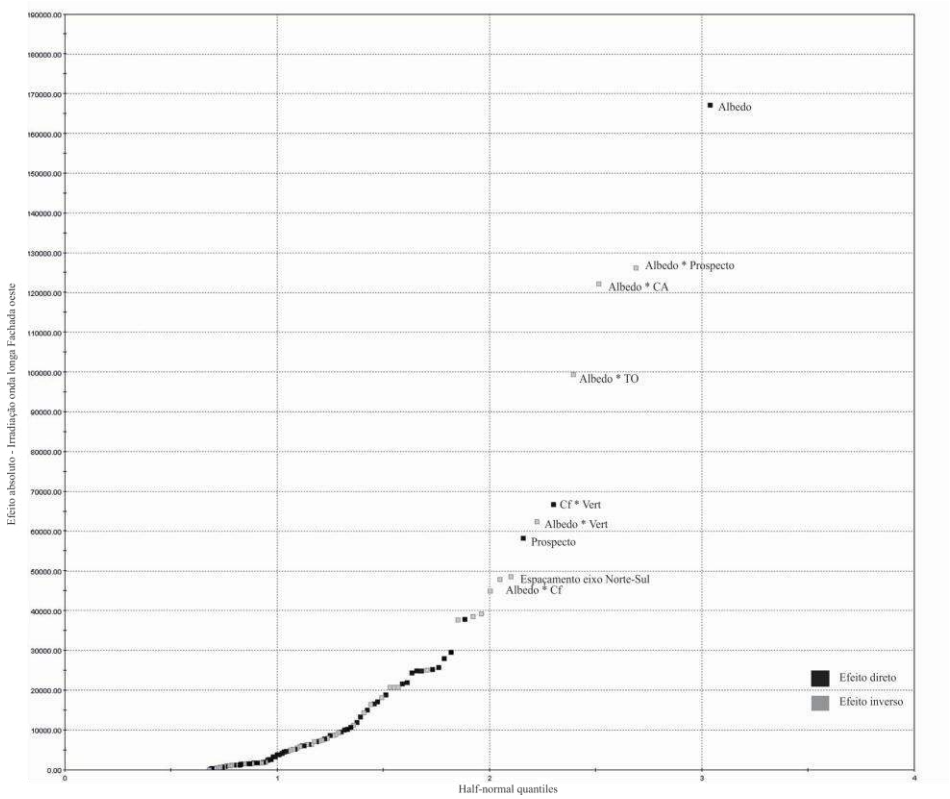


Figura 161: Gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda longa resultante na superfície da fachada Oeste.

Os gráficos da Figura 162 a Figura 164 representam os efeitos principais e efeitos de interação para a resposta do balanço radiativo de onda curta na superfície das fachadas norte e sul, respectivamente.

Assim como os resultados encontrados para as fachadas leste e oeste, verificou-se o efeito direto principal do *albedo,* do *prospecto médio* e também do *espaçamento no eixo leste-oeste*, conforme discutido nas análises precedentes.

Foi verificado ainda um relevante efeito de interação entre *albedo* + *verticalidade*, entre *albedo* + *coeficiente de forma (Cf)* e entre *albedo + CA*. Todos esses fatores já apresentavam isoladamente efeito significante, porém nas análises de interação, apresentou uma diferença significativa de grandeza nas respostas. A *verticalidade* isoladamente que havia apresentado uma magnitude de impacto inversa, representando uma redução na resposta de irradiação solar de cerca de 38 e 27 kWh/m².ano para as fachadas norte e sul, respectivamente, apresentou nessa análise estatística um efeito de interação com o *albedo* de cerca de 150 e 153 kWh/m².ano. Além disso, verificou-se também uma diferença no sentido da variação da resposta. Dado o antagonismo de variação entre os fatores, essa interação passa a ser negativa, conforme verifica-se na Figura 162. Da mesma forma, ocorre para a interação entre o *albedo* e o *Cf*. A magnitude do efeito apresentou também uma diferença importante de grandeza na resposta quando comparada com o resultado do fator *Cf* isoladamente. Este produzia uma contribuição da ordem de 73 e 40 kWh/m².ano (norte e sul respectivamente), e passou a representar uma contribuição na interação da ordem de 145 e 155 kWh/m².ano.

Para a resposta em termos de irradiação de onda longa, evidencia-se também o efeito de interação do *albedo* com o *CA* e com a *taxa de ocupação*(TO) (Figura 159 a Figura 161). Estes fatores já representavam um efeito significante quando analisados isoladamente, porém a interação com o

albedo promoveu uma diferença considerável na grandeza da resposta, da ordem de 100 kWh/m².ano para o CA e 75 kWh/m².ano para o TO, para ambas fachadas.

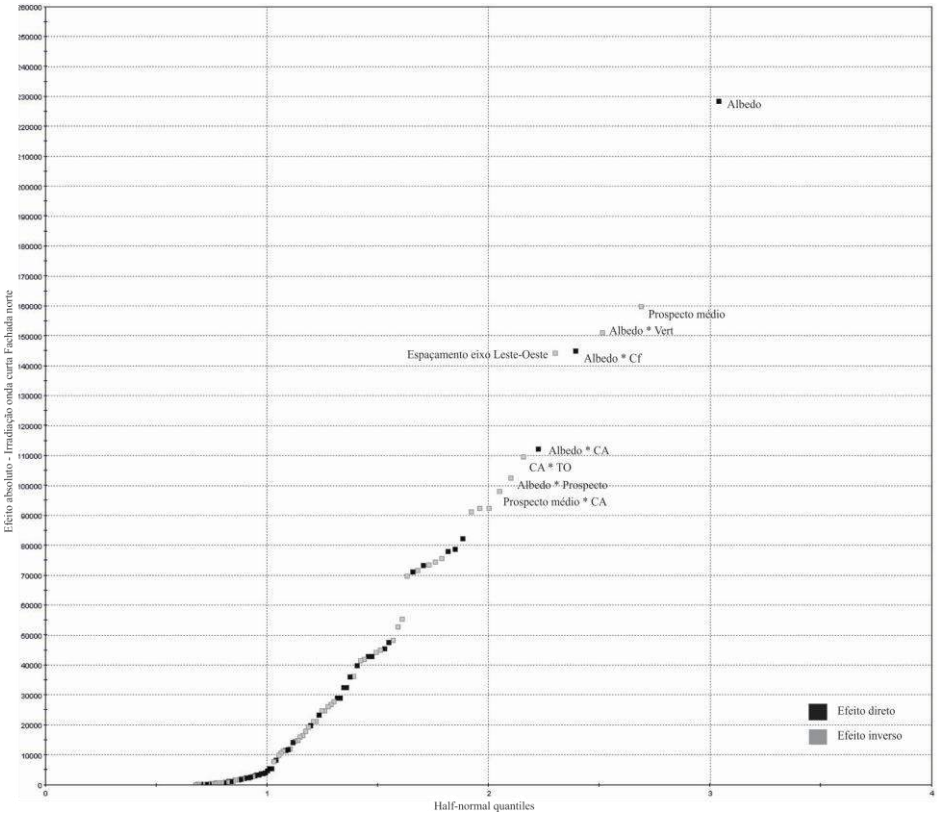


Figura 162: Gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta resultante na superfície da fachada norte.

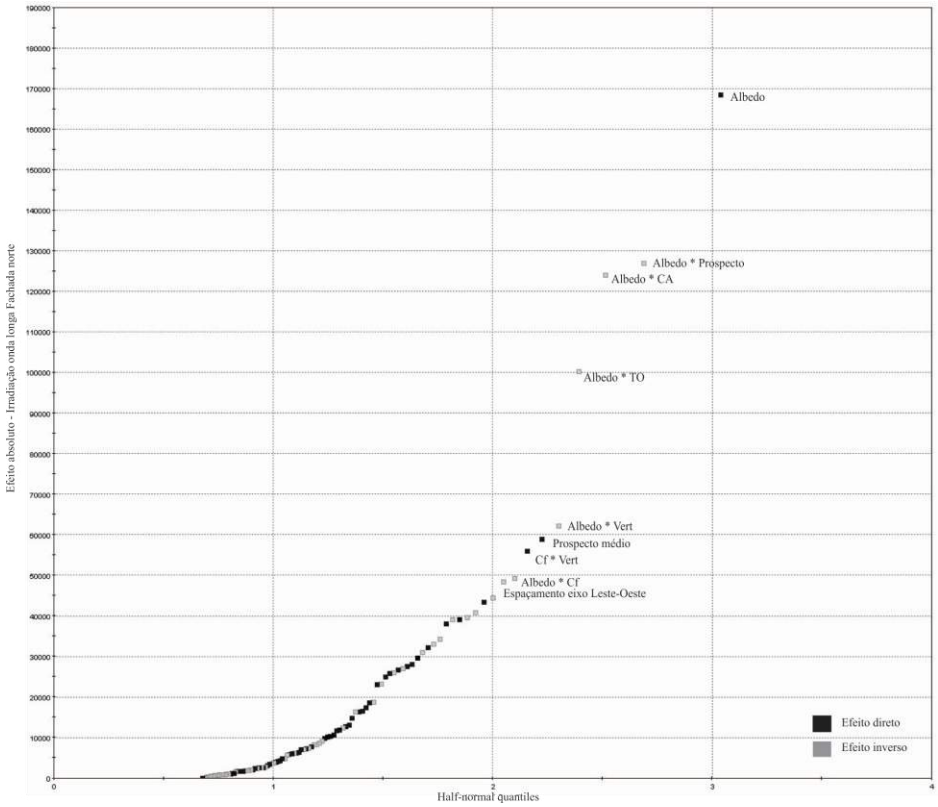


Figura 163: Gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda longa resultante na superfície da fachada norte.

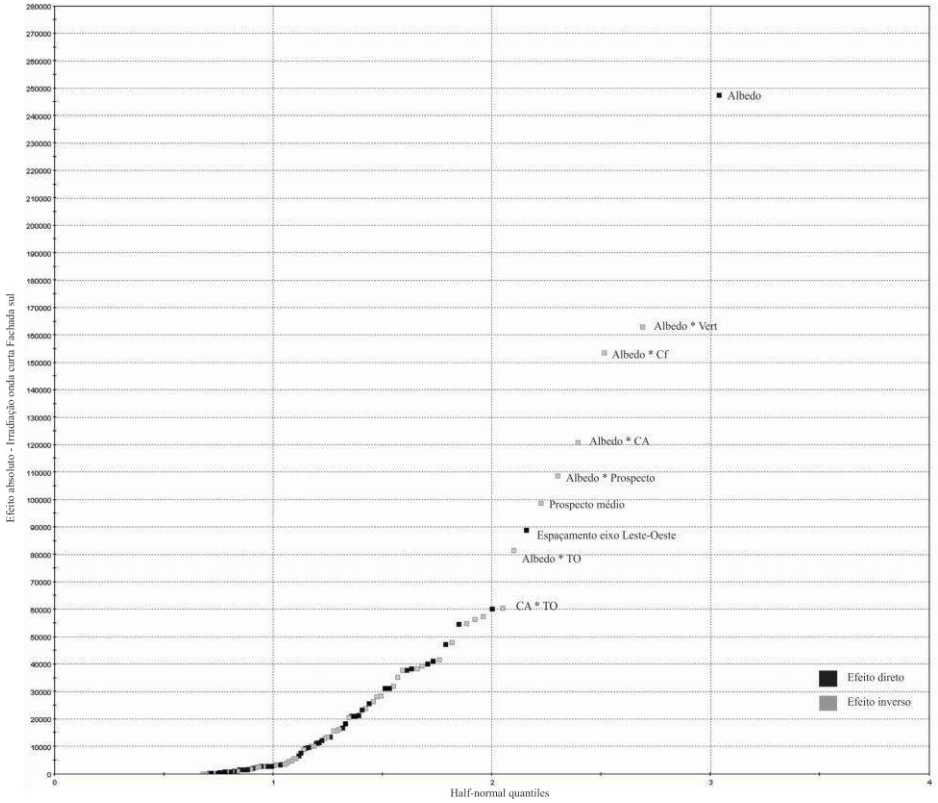


Figura 164: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta resultante na superfície da fachada sul.

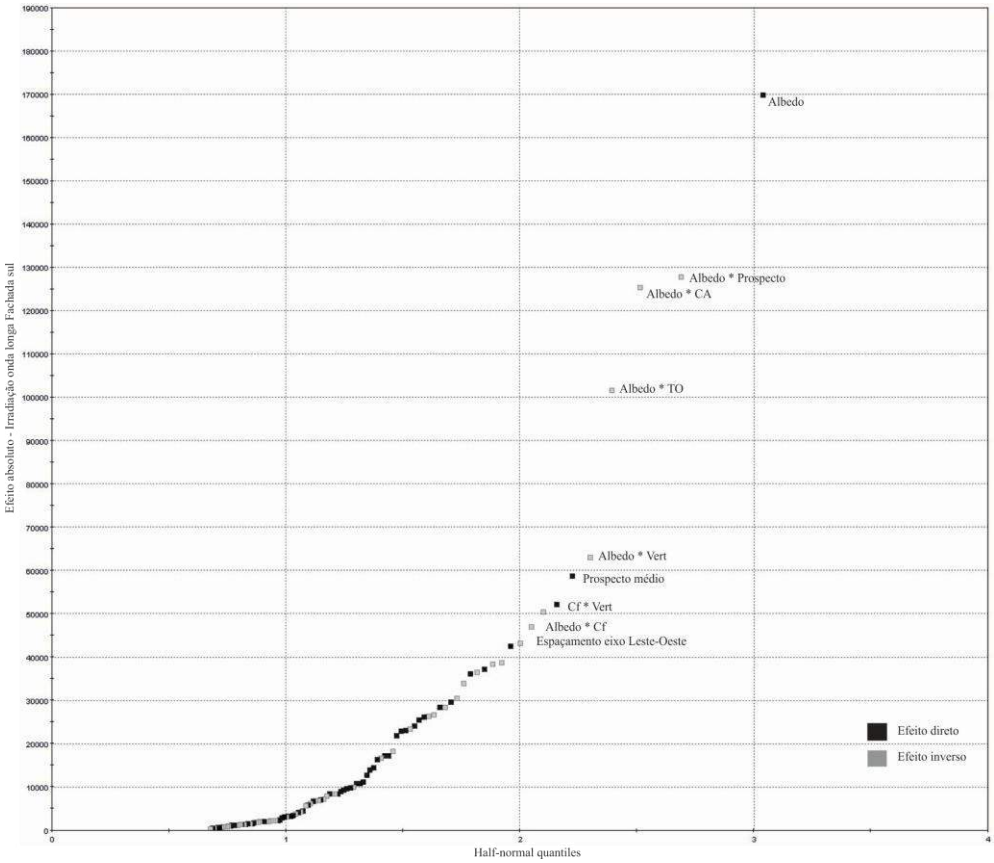


Figura 165: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda longa resultante na superfície da fachada sul.

Os resultados da análise estatística de sensibilidade indicam que os fatores: *transmitância térmica* dos elementos opacos e vidros, *fator solar* e *fração de abertura* não influenciam, nem demonstram um efeito de interação de primeira ordem significativa quanto aos parâmetros de resposta considerados. Ou seja, não existe evidência de que variações nesses fatores produzirão modificações relevantes na resposta.

Por essa razão, estes fatores poderão ser considerados constantes, reduzindo o universo de busca no processo de otimização e assim contribuir para um melhor desempenho desse tipo de investigação.

III.2.3. Estudo dos fatores tipo-morfológicos influentes no nível de iluminância nas fachadas

Neste último teste, foi analisado ainda a influência dos fatores tipo-morfológicos no nível de iluminância em cada superfície vertical da envoltória. O nível da iluminância nas fachadas será considerado no problema de otimização como restrição na busca por projetos que minimizem a irradiação solar para redução da carga térmica nos edifícios, porém garantindo que apresentem níveis satisfatórios mínimos de iluminância no interior dos espaços. A descrição do problema de otimização, dos parâmetros e hipóteses do modelo de investigação, serão discutidos na próxima seção.

III.2.3.1. Impacto global na resposta de iluminância das fachadas

Na primeira análise global de sensibilidade para o nível de iluminância na fachada dos edifícios, observou-se novamente um impacto mais importante da variável *albedo* em detrimento dos demais

fatores tipo-morfológicos. Esse fator isoladamente pode contribuir com até 50% no nível de iluminância encontrada nas fachadas. Foi identificado ainda uma influência significativa do *prospecto médio* (em média 13%) e do *espaçamento entre edifícios no eixo de orientação Leste-Oeste* e *Norte-Sul* (em média 12%) (Figura 166).

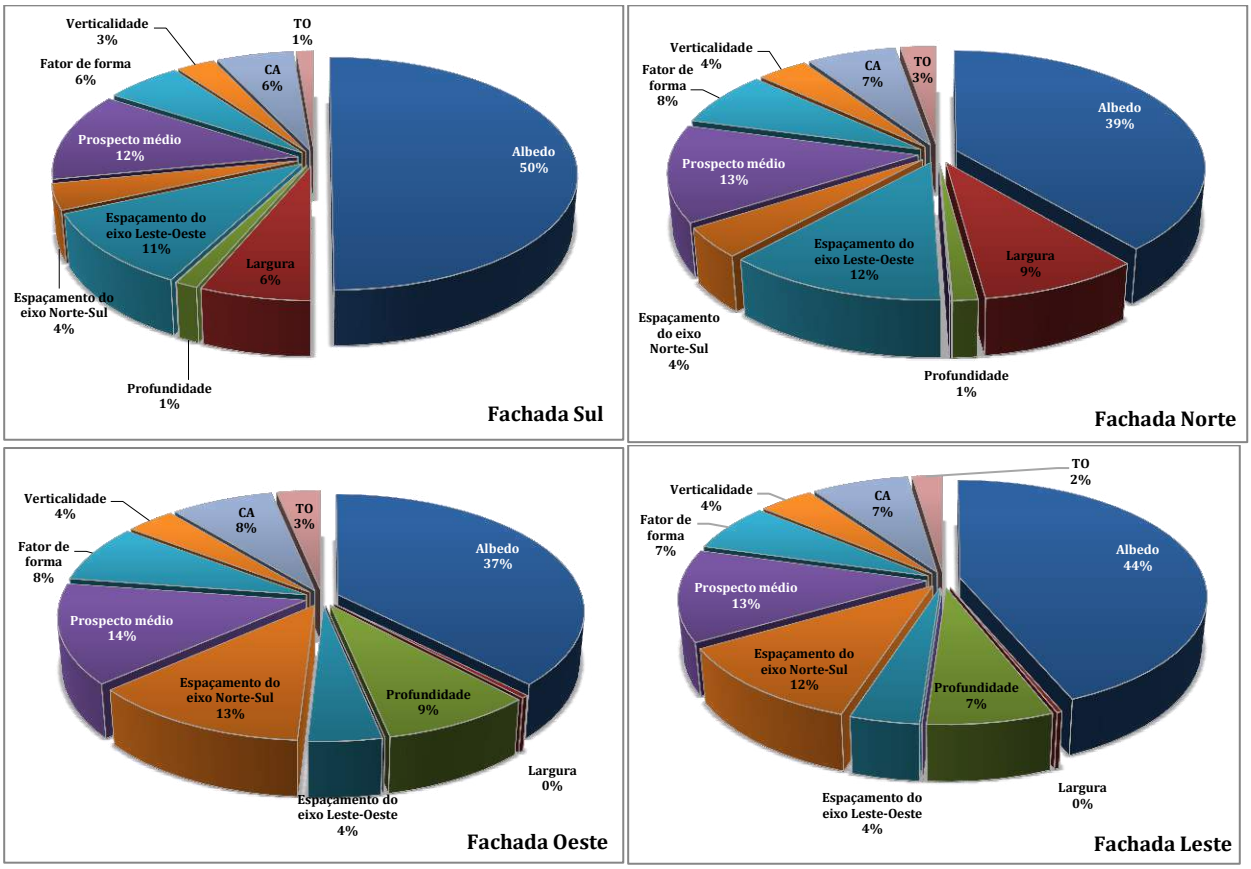


Figura 166: resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos na resposta de iluminância na fachada Sul, norte, oeste e leste, respectivamente (*overall student test*).

III.2.3.2. Magnitude do impacto dos fatores tipo-morfológicos na resposta de iluminância das fachadas

Quanto à magnitude desses efeitos, de forma análoga ao comportamento do balanço de energia solar, verifica-se um impacto direto da variável *albedo*. Ou seja, quanto maior o *albedo* das superfícies da cena urbana, maior será a capacidade de todas as superfícies em refletir a luz incidente e maiores serão os ganhos em termos de iluminância resultante nas fachadas dos edifícios. Isso pode ser verificado em todas as fachadas estudadas. Já o *prospecto médio* possui magnitude de efeito inversa, ou seja, o aumento da altura em detrimento do espaçamento entre os edifícios, poderá conduzir a produção de mais sombras nas superfícies estudadas, reduzindo efetivamente o nível de iluminação recebida pelas fachadas.

Já os *espaçamentos* entre edifícios no eixo leste-oeste e norte-sul, representam efeito direto na resposta da iluminância. Quanto mais espaçados estiverem os edifícios entre si, as fachadas receberão menos interferência das obstruções do entorno urbano, e por consequência, apresentarão maior disponibilidade de luz natural. Observa-se ainda que entre os demais fatores influentes encontrados no intervalo de confiança de 95%, o *coeficiente de forma* apresenta uma magnitude de efeito direta, visto que quanto maior a superfície das fachadas em relação aos volumes construídos,

que potencialmente produzem mais obstruções, maior o nível de iluminamento encontrado nas fachadas.

A partir dos gráficos apresentados na Figura 167 a Figura 170, é possível identificar a magnitude e a direção desses impactos (ou seja, se a variação do efeito é dada na mesma direção da resposta ou na direção inversa).

Por meio dos resultados obtidos, verifica-se que o *prospecto médio* e o *albedo* são os fatores que mais contribuem para as respostas de interesse, porém em sentidos opostos. Isto é, o aumento do *prospecto médio* produzirá um decréscimo na disponibilidade da iluminação nas fachadas, enquanto que o aumento no *albedo*, que caracteriza a capacidade das superfícies em refletir a luz incidente, produzirá acréscimo nessa mesma resposta. Da mesma forma para os espaçamentos entre os edifícios. O aumento dos recuos entre as construções ou o aumento nas larguras das ruas e avenidas produzirão um aumento nos níveis de iluminância nas superfícies. Esse resultado pode ser explicado, pois quanto menor o prospecto médio e maior as distâncias entre as construções, menos obstruções e menos sombras serão projetadas nessas superfícies, aumentando esta contribuição.

Dados da inferência estatística de todos esses resultados serão discutidos na sequência, de modo a complementar essas informações.

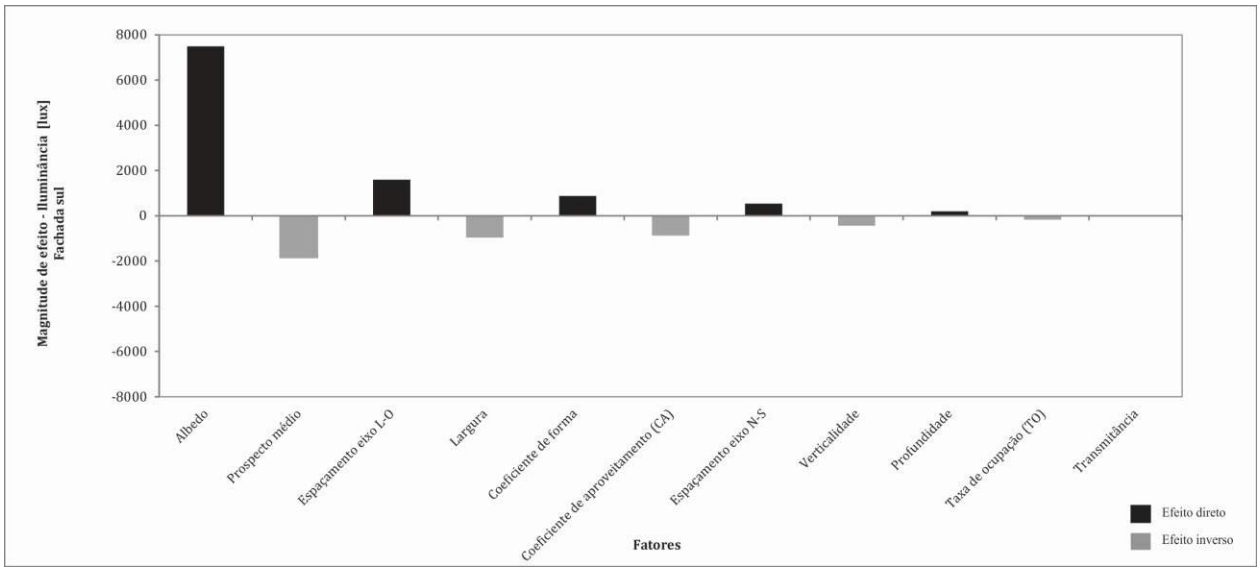


Figura 167: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a resposta de iluminância na superfície da fachada Sul.

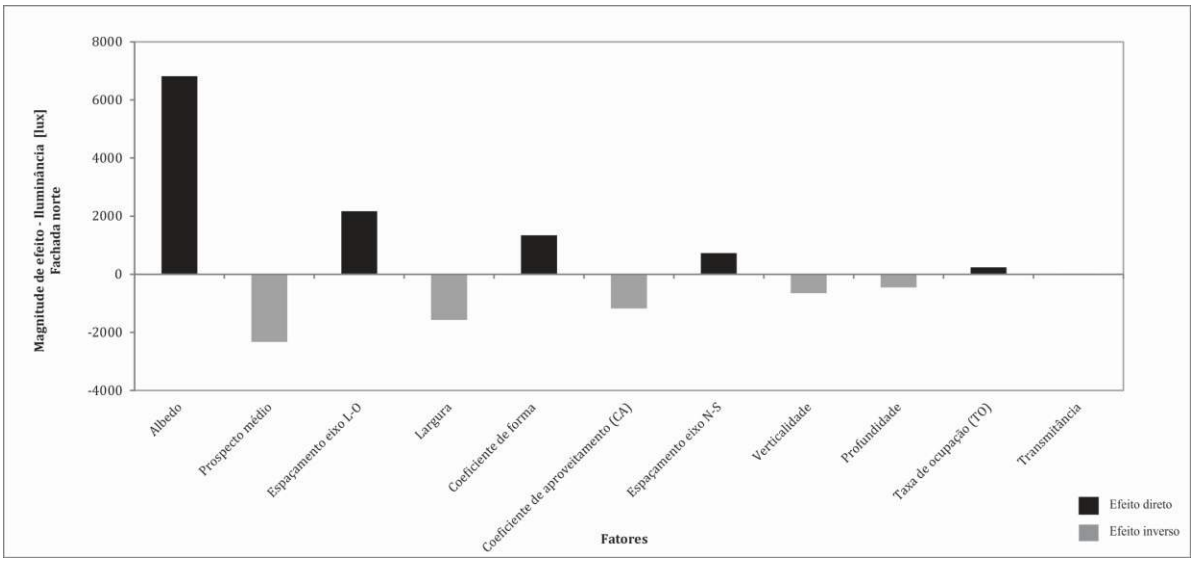


Figura 168: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a resposta de iluminância na superfície da fachada norte.

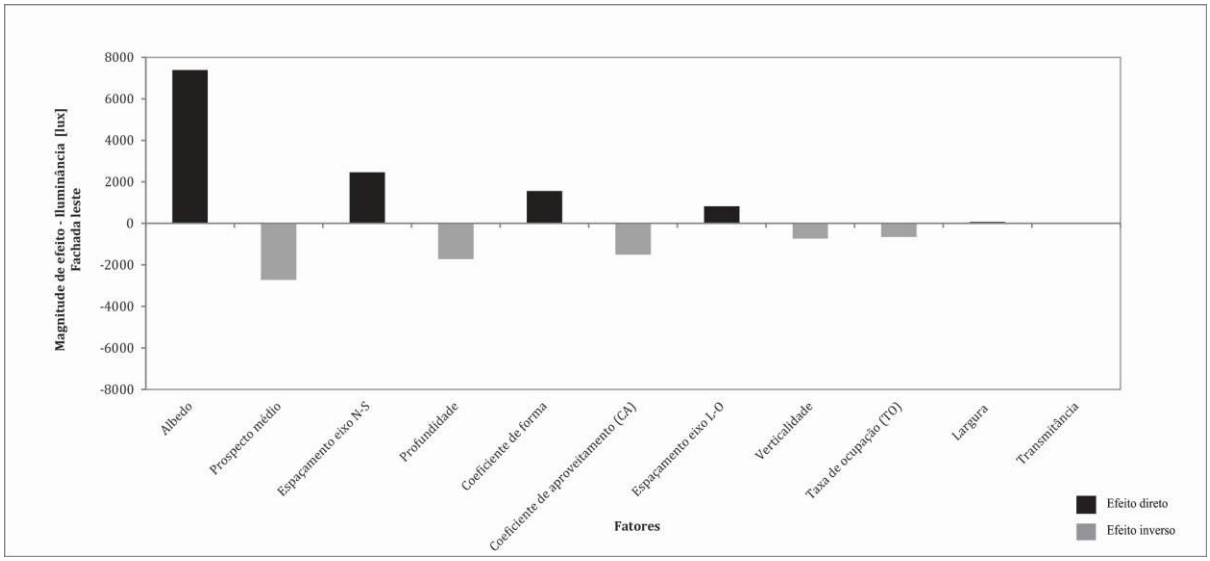


Figura 169: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a resposta de iluminância na superfície da fachada leste.

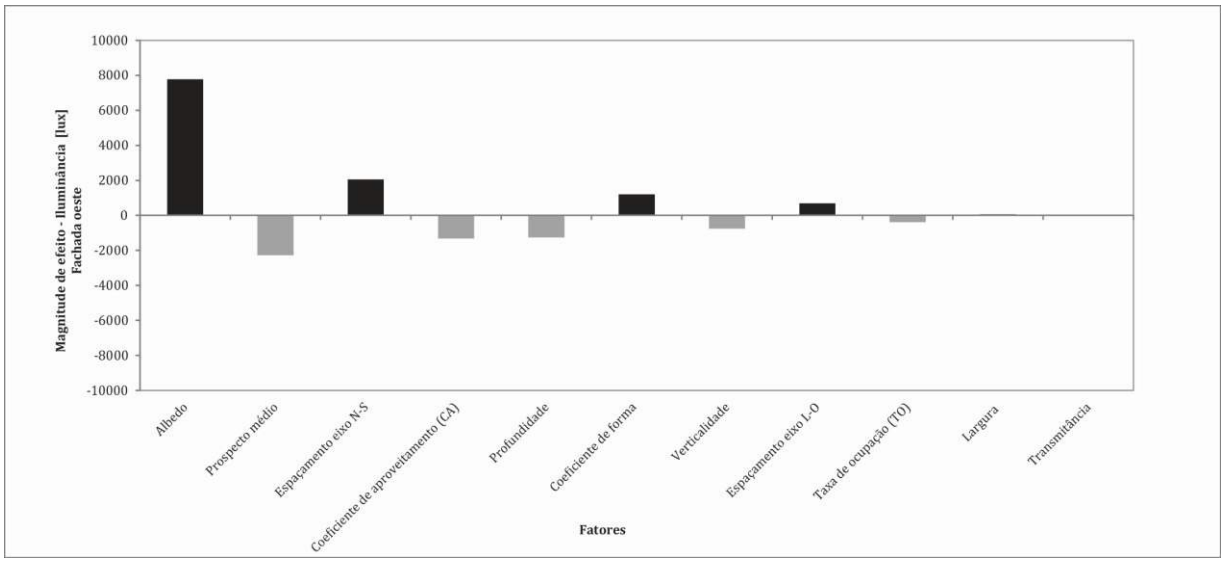


Figura 170: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a resposta de iluminância na superfície da fachada oeste.

III.2.3.3.Teste de hipótese estatística

A Tabela 51 a Tabela 54 apresentam informações sobre a magnitude do efeito, a significância e o teste estatístico *t* de *student.*

Observando os resultados obtidos, verifica-se que os fatores *TO e Verticalidade*, apresentaram menor contribuição à resposta de iluminância nas fachadas, quando analisado entre os demais fatores considerados. Fatores tais como, *largura*, *profundidade* e os *espaçamentos* nos dois eixos possuem significância em função da orientação de cada fachada.

Entre os fatores significativos, que estão destacados nas tabelas abaixo, não foi verificada diferenças expressivas para a magnitude de efeito nas diferentes fachadas.

A magnitude de impacto do fator *albedo* é direta e pode representar um aumento na iluminância da fachada sul de 7.496 lux, enquanto que a *o espaçamento entre edifícios*, por exemplo, representaria um aumento correspondente à apenas 1.596 lux nessa mesma fachada. Fatores que definem a densidade construída, tais como o fator *CA* e a *verticalidade* apresentam magnitude de efeito inversa na resposta. O aumento na variação de tais fatores implicam no aumento da área de sombras projetadas e, consequentemente, no decréscimo do nível de iluminância nas fachadas. Ao se examinar os resultados obtidos para a fachada norte, observa-se um impacto duas vezes superior do *prospecto médio* que contribui para redução da iluminância em 2.331 lux, enquanto que o *CA* contribuiria na redução dessa resposta, em 1.179 lux.

Destaca-se, portanto, o efeito preponderante dos fatores *albedo* e *prospecto,* na elevação e redução da iluminância em fachadas, respectivamente.

Tabela 51 : resultados do teste de significância para iluminância na fachada sul.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [lux]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	7496,8	0,00	32,20
Prospecto médio	-1846,9	0,00	2,44
Espaçamento eixo L-O	1596,7	0,00	3,09
Largura	-962,1	0,03	1,84
Coeficiente de forma	877,6	0,03	1,82
Coeficiente de aproveitamento (CA)	-873,0	0,15	1,02
Espaçamento eixo N-S	539,7	0,15	1,03
Verticalidade	-438,1	0,25	0,65
Profundidade	195,4	0,35	0,37
Taxa de ocupação (TO)	-170,1	0,40	0,23

Tabela 52 : resultados do teste de significância para iluminância na fachada norte.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [lux]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	6817,8	0,00	25,76
Prospecto médio	-2331,1	0,00	3,30
Espaçamento eixo L-O	2173,0	0,00	4,48
Largura	-1577,2	0,00	3,19
Coeficiente de forma	1337,9	0,00	2,96
Coeficiente de aproveitamento (CA)	-1179,3	0,07	1,49
Espaçamento eixo N-S	726,0	0,07	1,44
Verticalidade	-654,1	0,15	1,02
Profundidade	-454,7	0,24	0,68
Taxa de ocupação (TO)	-238,1	0,32	0,47

Tabela 53 : resultados do teste de significância para iluminância na fachada oeste.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [lux]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	7393,0	0,00	25,14
Prospecto médio	-2722,9	0,00	3,57
Espaçamento eixo N-S	2467,3	0,00	4,68
Profundidade	-1717,2	0,00	3,18
Coeficiente de forma	1565,6	0,00	3,12
Coeficiente de aproveitamento (CA)	-1504,9	0,04	1,76
Espaçamento eixo L-O	823,1	0,06	1,50
Verticalidade	-732,7	0,14	1,05
Taxa de ocupação (TO)	-658,5	0,18	0,90
Largura	70,8	0,44	0,13

Tabela 54 : resultados do teste de significância para iluminância na fachada leste.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	**Magnitude do efeito** [lux]	**Significância** [/]	***t-student*** [/]
Albedo	7776,7	0,00	29,37
Prospecto médio	-2274,4	0,00	2,92
Espaçamento eixo N-S	2055,4	0,00	3,80
Coeficiente de aproveitamento (CA)	-1321,4	0,07	1,48
Profundidade	-1262,1	0,01	2,29
Coeficiente de forma	1200,4	0,01	2,33
Verticalidade	-753,3	0,14	1,07
Espaçamento eixo L-O	690,5	0,10	1,24
Taxa de ocupação (TO)	-387,4	0,30	0,51
Largura	60,2	0,45	0,10

III.2.3.4. Análise de interação entre os fatores tipo-morfológicos

Examinando os mesmos resultados a partir de uma análise de probabilidade Normal (*Half-Normal Probability*), verifica-se o efeito principal do *albedo* já mostrado acima, mas há igualmente, o efeito de interação entre o *albedo* e fatores que isoladamente apresentavam uma influência mais desprezível, tais como, a *verticalidade* (ver Figura 171 a Figura 174). Se a verticalidade apresentava

um efeito principal de redução de 700 lux para a fachada sul, por exemplo, o efeito de interação desse fator associado ao albedo, pode elevar essa contribuição para 1.500 lux. Esses resultados são consistentes, visto que a *verticalidade* pode representar um efeito significativo e inverso no nível de disponibilidade de luz natural nas fachadas dos edifícios urbanos. Quanto maior a altura construída, maior o impacto das máscaras de sombra do entorno e menor poderá ser também a visibilidade do céu para as superfícies avaliadas.

De forma semelhante, os efeitos analisados acima são reproduzidos para as demais fachadas, com a diferença do efeito produzido pela orientação dos *espaçamentos entre edifícios* e das variáveis *largura* e *profundidade* (pois que implicam também uma dada orientação) que se alternam em magnitude de efeito conforme orientação da fachada.

Os resultados gráficos desse último teste podem ser vistos nas figuras abaixo.

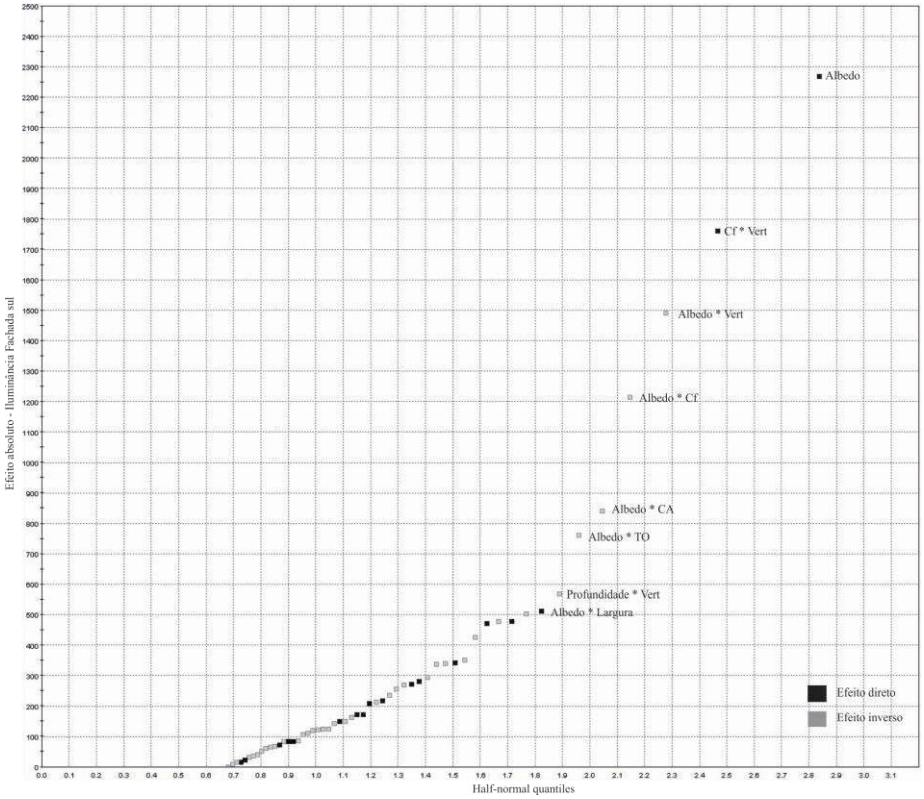


Figura 171*:* gráfico de probabilidade normal para o nível de iluminância na superfície da fachada Sul.

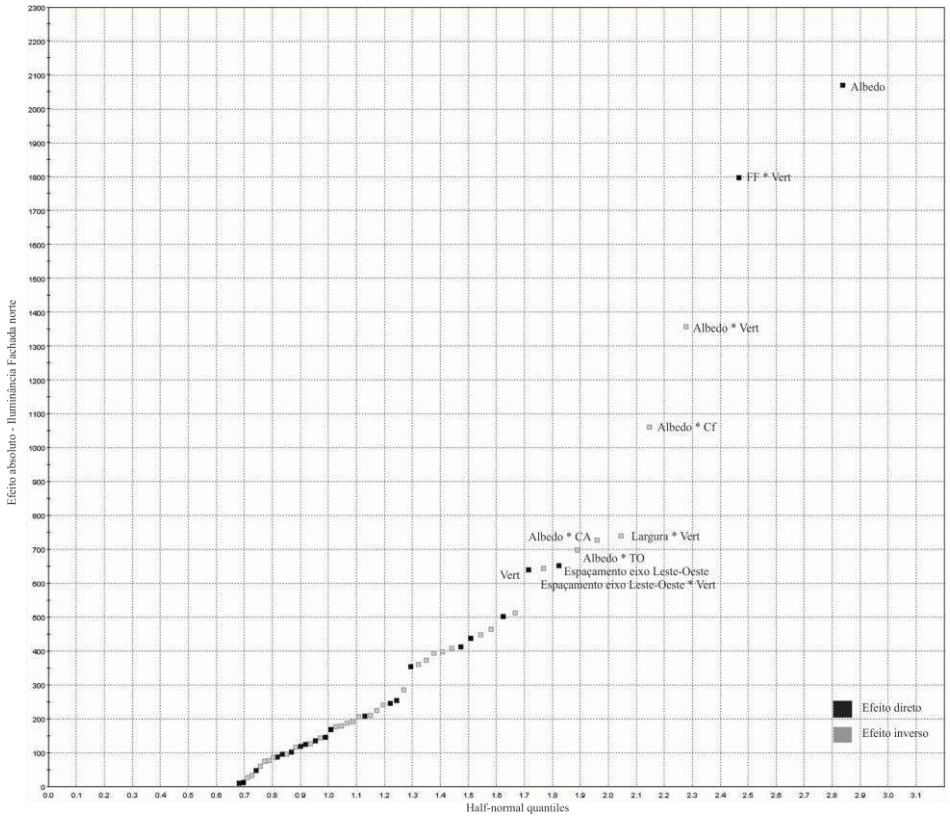


Figura 172: gráfico de probabilidade normal para o nível de iluminância na superfície da fachada Norte.

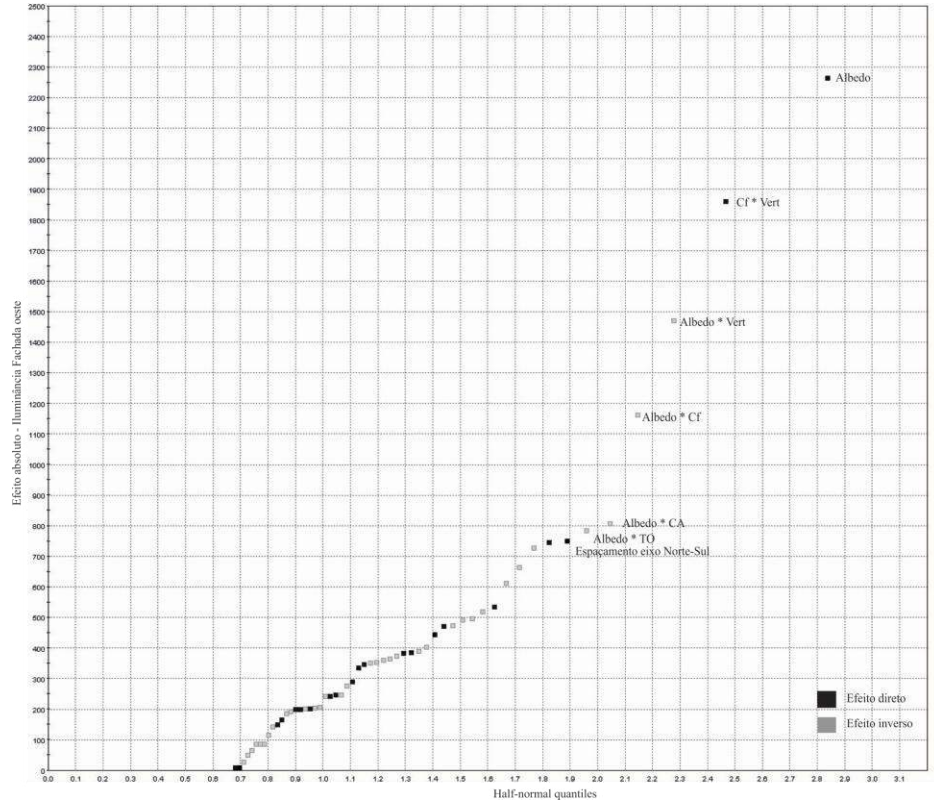


Figura 173: gráfico de probabilidade normal para o nível de iluminância na superfície da fachada Oeste.

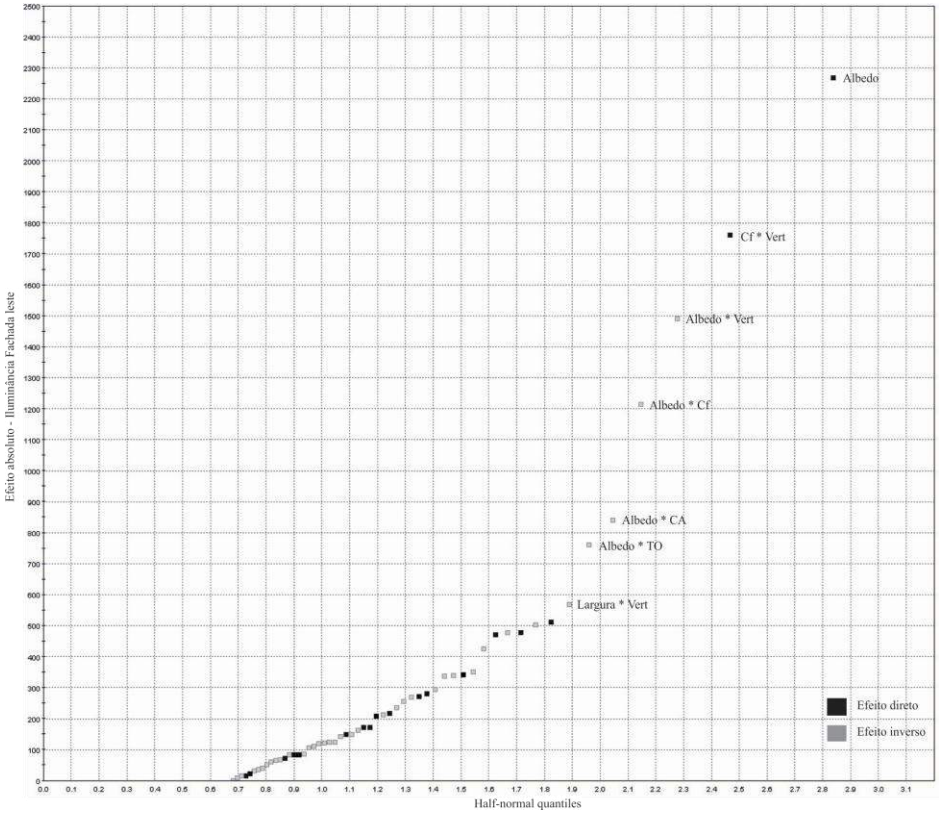


Figura 174: gráfico de probabilidade normal para o nível de iluminância na superfície da fachada Leste.

Conclusões do Capítulo III

Destacou-se nessa etapa o estudo sobre a sensibilidade dos diferentes fatores tipo-morfológicos que definem a forma urbana nas respostas de interesse: irradiação de onda curta e onda longa, bem como, a disponibilidade de iluminância nas fachadas construídas, neste estudo foram consideradas as variáveis climáticas para o contexto de Maceió.

O estudo estatístico dos resultados encontrados mostrou-se extremamente relevante na identificação da significância de cada fator na resposta desejada, possibilitando qualificar e quantificar as diferenças da magnitude de efeito existentes entre eles e entre as diferentes orientações de fachadas. Além disso, esse tipo de análise permitiu hierarquizar os fatores e desprezar aqueles cujas variações não produziam modificações significativas na resposta, o que auxilia na definição das variáveis de entrada para a modelagem de otimização, próxima etapa metodológica desse trabalho.

Ao longo dessas avaliações, foi possível constatar ainda a importância relativa menos significativa dos resultados obtidos para a irradiação de onda longa, quando comparado com o efeito da irradiação solar. O impacto na resposta da irradiação solar pode ser da ordem de até dez vezes maior que o impacto na resposta do infravermelho. Se um fator, como o espaçamento entre edifícios, produz uma contribuição aumentando a irradiação solar na coberta em 101 kWh/m^2.ano, esse mesmo fator isolado implicará uma emissão de apenas 11 kWh/m^2.ano em termos de irradiação infravermelha para essa mesma superfície.

Destacou-se, para todas as respostas investigadas, a importante magnitude do efeito do *albedo*, do *prospecto médio* e dos *espaçamentos* ou recuos entre os edifícios. A quantificação dessa magnitude por orientação pode permitir priorizar estratégias de forma mais precisa. As análises de interação de primeira ordem permitiram ressaltar a significância de fatores que isoladamente representavam um impacto mais desprezível entre os demais fatores, tais como a *verticalidade*, o *coeficiente de aproveitamento* e a *taxa de ocupação*.

Conforme os resultados obtidos nessa análise estatística de sensibilidade, tem-se que os seguintes fatores: *transmitância térmica* dos elementos opacos e vidros, o *fator solar* e *fração de abertura* não possuem nenhum efeito principal, nem efeito de interação de primeira ordem significativa quanto aos parâmetros de resposta considerados. Ou seja, não existe evidência de que variações nesses fatores produzirão modificações relevantes na resposta. Por essa razão, estes fatores poderão ser considerados constantes, reduzindo o universo de busca no processo de otimização e, por consequência, contribuindo para um melhor desempenho desse tipo de investigação.

CAPÍTULO IV
Otimização do potencial solar de tipologias urbanas

Objetivo geral do Capítulo IV

Diante dos fatores tipo-morfológicos mais influentes nos processos energéticos examinados, passamos agora ao processo de projeto paramétrico e prospectivo desses fatores para concepção e adaptação das tipologias examinadas.

Nesse capítulo, investiga-se sobre os principais métodos de auxílio à concepção multicritério na abordagem da morfologia urbana, com ênfase naqueles assistidos pelo uso de técnicas paramétricas e computacionais.

Introduz-se a metodologia de otimização como metodologia de projeto.

O objetivo final do presente capítulo da tese consiste em realizar um estudo prospectivo das classes tipo-morfológicas descritas e examinadas no capítulo II, integrando as principais características morfológicas e normativas próprias a cada vizinhança urbana. Consideram-se dois critérios de desempenho nessa abordagem: maximizar o potencial solar nas cobertas dos edifícios para possível produção energética e minimizar a incidência solar nas fachadas, a fim de promover o controle dos ganhos solares excessivos para os edifícios. Impõe-se, todavia, como restrição climática, níveis de iluminância em fachadas que assegurem condições minimamente satisfatórias de iluminação natural no interior dos edifícios.

Apresenta-se também um breve Glossário, ao final do texto principal, onde constam as principais definições e referências sobre otimização multicritério e tratamento estatístico de dados.

A Figura 130 apresenta esquematicamente a estrutura do Capítulo IV.

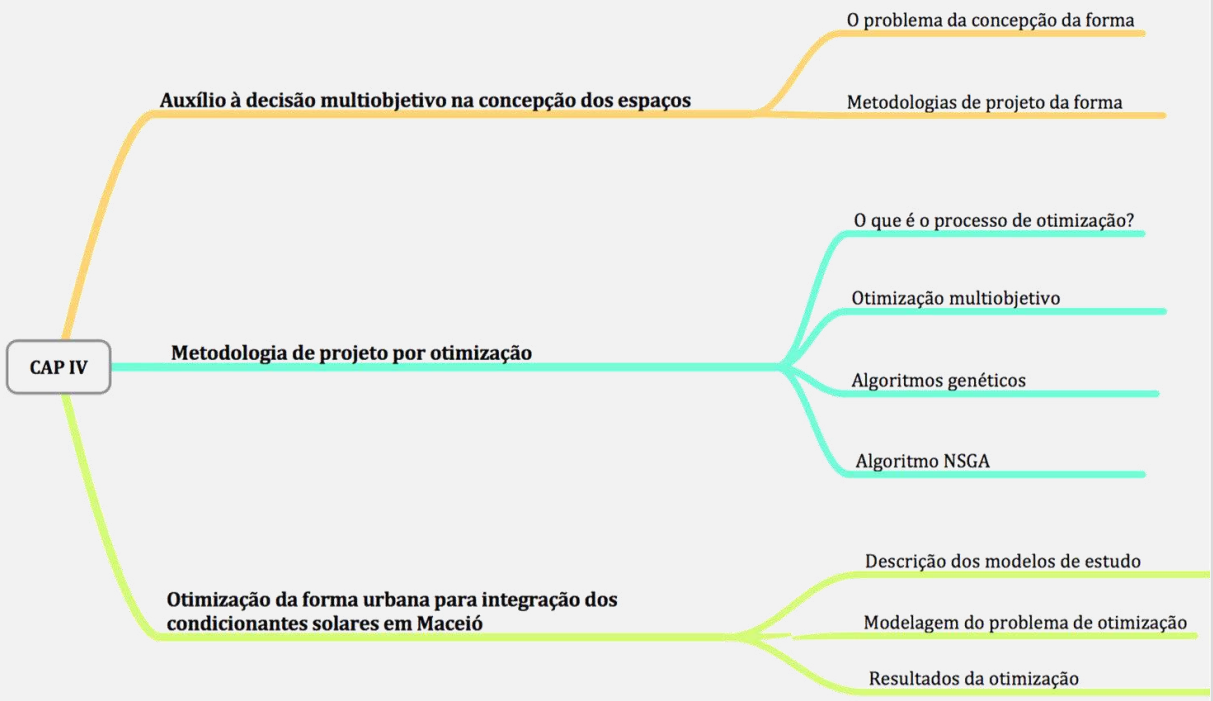


Figura 175: estrutura do capítulo IV.

Palavras-chaves: metodologias de projeto; auxílio à concepção multiobjetivo e multicritério; metodologia de otimização; cenários urbanos prospectivos.

IV.1. Auxílio à decisão multifatorial e multiobjetivo na concepção dos espaços construídos

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, diversos estudos já discutiram, aplicaram e mostraram a influência de determinados fatores que definem a forma e a textura urbana sobre sua influência nas condições climáticas nas cidades, nas várias escalas (OKE, 1987) (OKE, 2006) (ADOLPHE, CHÂTELET, *et al.*, 2002) (AIDA e GOTOH, 1982) (ELIASSON, 2000). O estudo em conjunto desses fatores pode indicar tendências de comportamento climático nos recintos urbanos, como também, auxiliar na concepção e adaptação dos espaços. Fatores tais como densidade construída, verticalidade, coeficiente de forma, refletividade, prospecto, etc., no entanto, podem apresentar entre si influências mais ou menos significativas, em função dos objetivos e requisitos de projeto e particularidades do contexto climático. A informação sobre a significância do impacto de cada variável em relação à objetivos específicos de projeto pode ser extremamente útil na hierarquização de estratégias, na concepção de novos espaços e no auxílio à decisão, tanto por parte dos arquitetos como dos planejadores urbanos.

No que se refere ao processo de concepção dos espaços urbanos, a combinação desses vários fatores influentes, frente aos diferentes requisitos de projeto (e.g. promoção de iluminação e ventilação natural, controle dos ganhos de calor, produção energética, etc.), pode compor um quadro extremamente amplo de soluções possíveis de projeto. Alternativas que podem ser mais ou menos adaptadas, coerentes e que apresentem razoáveis almejados desempenhos térmicos e ambientais .

A maneira mais usual para encontrar uma configuração da forma construída adequada aos objetivos de um dado problema de projeto, seria a parametrização de suas variáveis mais relevantes e a determinação de qual combinação desses parâmetros responderia satisfatoriamente aos objetivos desejados. Se um problema dispõe apenas de algumas variáveis discretas poder-se-ia testar exaustivamente todas as possibilidades até encontrar aquela que melhor irá satisfazer aos requisitos. Mas, quando o espaço paramétrico a ser explorado for demasiado amplo, e dotado de variáveis contínuas, a abordagem por tentativa e erro pode tornar o processo extremamente lento e de eficácia incerta. Comumente, os projetistas arquitetos não costumam avaliar múltiplas soluções até encontrar a mais adequada, estes utilizam sua experiência em projetos e passam a orientar suas escolhas e decisões em função do conhecimento que possuem, das informações disponíveis e que julgam mais rentáveis. No entanto, o caráter subjetivo desse processo pode encaminhar à execução de alternativas projetuais nem sempre adequadas ou ideais para um dado contexto.

Diante dessa problemática, apresenta-se nessa primeira seção do capítulo, uma breve discussão sobre o problema na fase de concepção no processo de projeto dos espaços construídos e os métodos de projeto e decisão, onde contrasta-se a metodologia de projeto convencional à metodologia de abordagem multicritério e ao projeto por metodologia de otimização. São discutidos o processo de concepção, os métodos e a decisão no processo de projeto em geral, direcionando a abordagem, na sequência, para o desenho da tipo-morfologia na escala urbana.

IV.1.1. O problema da concepção da forma

O processo de concepção de um objeto construído pode ser compreendido como a exploração simultânea de várias alternativas de projeto, por meio de saltos de níveis de abstração e descrição distintos, ao longo dos quais exigências diversas, endógenas e exógenas, podem ser impostas ao sistema (CASTRO, 2005). De modo global, tal processo exige a síntese e a transformação de um conjunto de informações iniciais (dados de entrada), em uma ou mais soluções possíveis de projeto (dados de saída) que devem ser validadas e, para ser, ao fim, executadas (Figura 176).

Na fase de concepção do processo, esses dados de entrada são compostos das variáveis e dos requisitos de projeto, que no caso das edificações urbanas, podem representar as características

principais da volumetria, orientação, área de envoltória exterior, área de aberturas, área de elementos opacos, materiais básicos, etc., e as restrições que definirão as condições de contorno dessas variáveis e das soluções, tais como os parâmetros restritivos do código de obras, os condicionantes climáticos, ambientais e os requisitos técnicos, estruturais, financeiros, dentre outros. Traduzir esse conjunto de informações em soluções projetuais viáveis é tarefa bastante complexa, pois o projetista deve lidar com a compatibilização preliminar de critérios multidisciplinares e, mesmo multiescalares, dada também a importante influência do entorno e do contexto local.

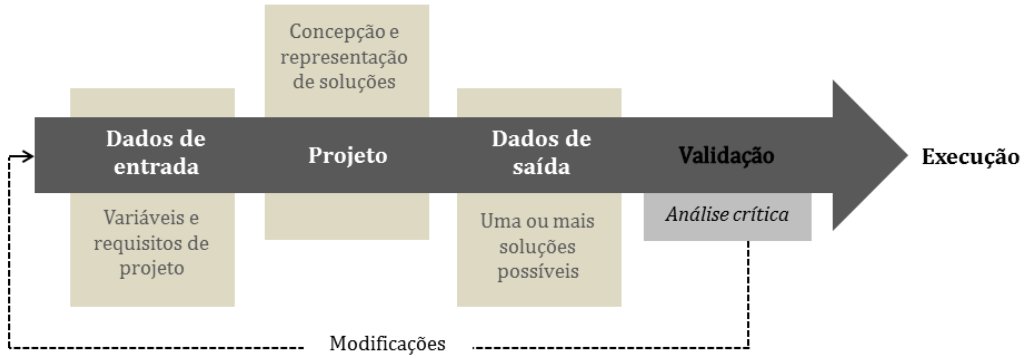


Figura 176: etapas do processo global de projeto. Fonte: adaptado de Melhado, 1994.

Nesta fase do processo são feitas escolhas que serão decisivas para o desempenho ambiental e energético de uma construção (e dificilmente modificáveis em fases posteriores) (MENDLER e ODELL, 2001) (MILES, SISK e MOORE, 2001). O projetista, nessa etapa preliminar, diante do vazio e de uma série de condicionantes à responder (e.g. ambientais, climáticos, topográficos, urbanísticos, etc.) lança mão das primeiras linhas, planos e volumes que darão origem à formas que poderão ser mais ou menos adaptadas aos seus critérios contextualizados e à qualidade formal/estética procurada.

No entanto, poucas informações sobre a construção estariam disponíveis nessa etapa, para que fosse possível utilizar ferramentas sofisticadas de simulação a fim de antecipar o desempenho da construção (e.g. desempenho ambiental, energético, etc.). Sobre essa questão, Adolphe (1995) fala, portanto, de um "paradoxo da concepção". A fase inicial possuiria um peso hegemônico nas escolhas morfológicas e técnicas fundamentais (e.g. esboço, implantação, programação, função, orientação, volume, etc.), enquanto, paradoxalmente, a informação disponível seria a menor possível (Figura 177). As consequências potenciais das metodologias de auxílio à concepção e à decisão são, no entanto, extremamente importantes nessa etapa. Instrumentos tradicionais que necessitam de entradas e conhecimentos mais detalhados sobre um projeto são, portanto, apenas aplicáveis nas fases finais do processo de projeto, quando o grau de liberdade dos projetistas é bem menor (ADOLPHE, 1995).

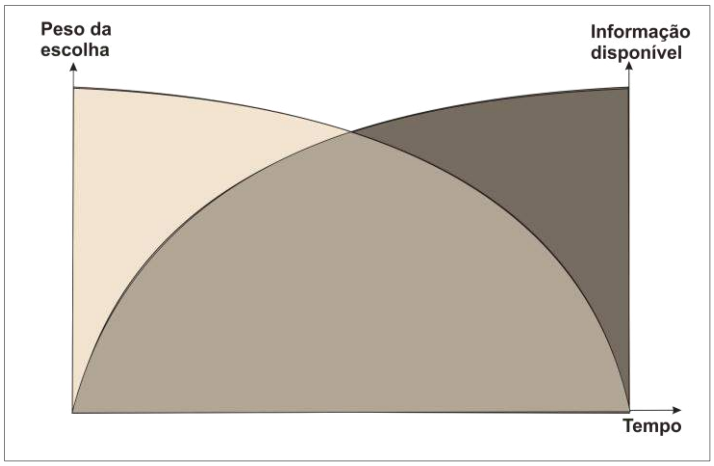


Figura 177: paradoxo da concepção arquitetônica e urbana (ADOLPHE, 1995).

Uma metodologia de auxílio à decisão para projetistas ou planejadores urbanos deve, portanto, para adaptar-se a esse contexto, sugerir medidas de análise que sejam simplificadas e de linguagem facilitada (e comum) à esses profissionais nas fases iniciais do processo, tais como indicadores morfológicos simplificados baseados e "calibrados" previamente por meio de estudos ambientais mais específicos (como o realizado por meio desde trabalho). No entanto, é evidente que nessa etapa preliminar, como poucas informações estão disponíveis, os resultados obtidos de qualquer análise realizada com um número relativamente reduzido de parâmetros, certamente não fornecerá como resultado um número significativo em termos de valor absoluto, mas deverá antes ser entendido como significativo em termos de uma tendência do comportamento estudado, ou ainda, como um índice desempenho relativo (CASTRO, 2005). Porém, extremamente útil para tomada de decisão nessa fase.

Assim, diante da impossibilidade de se proceder a cálculos mais precisos durante a etapa de concepção, deve-se questionar quais grandezas estão disponíveis durante esta etapa e que poderão ser utilizadas para algum cálculo preliminar de predição. Nesta pesquisa, deu-se prioridade a algumas grandezas pertinentes aos condicionantes solares para concepção da forma construída na escala urbana. São, então, examinadas a disponibilidade de irradiação solar e iluminação natural nas fachadas dos edifícios.

IV.1.2. A concepção de soluções: metodologia de projeto da forma construída

Ao longo dos séculos, a busca pela forma construída "ideal" ou que melhor traduzisse um dado conceito ou que melhor se adequasse a um contexto climático, social ou político, foi muitas vezes inspirada em diferentes métodos e processos de concepção, tais como a matemática, a geometria, o biomimetismo ou até mesmo a música (JORMAKKA, SCHÜRER e KUHLMANN, 2008).

A fim de responder ao problema de concepção exposto acima, tendo em vista o atendimento de múltiplos requisitos de projeto, nessa seção três métodos principais são discutidos: a metodologia tradicional de projeto, a abordagem multicritério e a otimização clássica (Figura 179, Figura 180 e Figura 181).

IV.1.2.1. Metodologia tradicional de projeto

Seguindo a metodologia tradicional de projeto, o projetista utiliza sua experiência prévia em projetos semelhantes e por meio de passos sequenciais, define partido, esboça os primeiros volumes e dimensiona globalmente seu objeto com base em um conjunto de requisitos a serem atendidos (e.g. características do terreno, código de obras, contexto climático, ambiental, etc.). Se

o projetista dispõe de um sistema de análise nessa etapa de projeto (e.g. desempenho estrutural, térmico, energético, etc.), ele pode testar, ajustar e refinar seu modelo em busca de uma solução considerada aceitável (Figura 179). Percebe-se, então, o aspecto intuitivo do processo, onde a tomada de decisões sobre a solução mais adequada para um problema de projeto se caracterizará sempre pela tentativa e erro. Nessa metodologia, portanto, o modelo pode ser melhorado gradativamente, em função de avaliações simplificadas e, principalmente, do bom senso, até se atingir um projeto mais elaborado e que atenda aos requisitos e critérios estabelecidos.

Entretanto, por se caracterizar em processo de tentativa e erro, possui grande dependência da experiência e intuição do projetista. Esse procedimento pode, entretanto, conduzir a uma infinidade de soluções possíveis e não garante que a solução obtida seja a melhor do ponto de vista de seu desempenho climático, energético ou mesmo técnico, físico e econômico. Nessa abordagem, é possível que o projetista também privilegie o atendimento a um requisito em detrimento de outro igualmente importante e dificulte a gestão dos conflitos entre as várias especialidades implicadas.

IV.1.2.2. Metodologia de projeto pela abordagem multicritério

Uma alternativa à metodologia tradicional de projeto consiste em basear a tomada de decisões do processo numa abordagem multicritério. Nessa abordagem, o projetista também utiliza de sua experiência prévia e intuição para elaborar um conjunto discreto de soluções potenciais iniciais de projeto, as quais examinará, ponderará e selecionará de forma mais sistematizada, onde múltiplos requisitos podem ser integrados e cruzados entre eles. Essa abordagem permite, portanto, lidar melhor com o conflito entre as distintas disciplinas envolvidas no projeto.

Nessa metodologia, busca-se a solução potencial de projeto em quatro etapas principais:

- definição das soluções possíveis ou visadas: trata-se de construir um inventário de ações potenciais, onde o conjunto destas deverá ser o mais completo possível;
- definição dos critérios a considerar: escolha de uma família coerente de critérios;
- avaliação de cada uma das soluções com base em cada um dos critérios previamente definidos;
- agregação e designação da(s) solução(s) que apresentam, globalmente, as melhores avaliações.

Na primeira etapa, o conjunto das ações potenciais, que serão consideradas no processo de decisão, é definido. Todas as possíveis ou desejadas soluções imaginadas pelo projetista devem ser consideradas. Considerando como exemplo, um dos fatores morfológicos investigados nesse trabalho, a área total disponível para construção. Teoricamente, um mesmo valor para este fator, pode representar um número praticamente infinito de soluções para as edificações, pois estas podem configurar desde um arranha-céu de muitos pavimentos e de reduzida superfície unitária, até um prédio ocupando uma grande área de terreno, porém com reduzido número de pavimentos. Por conseguinte, há um conjunto amplo de soluções que poderiam atender ao problema, mas que pode ser reduzido por exemplo, pela imposição de restrições dos códigos de obras; limitações econômicas; e fatores culturais.

A segunda etapa consiste em determinar quais critérios serão considerados ao longo do processo de decisão. Esses critérios são expressões qualitativas ou quantitativas de pontos de vista, objetivos ou restrições relativas ao contexto real, que permitem julgar objetos ou eventos. Para que tais expressões possam se tornar critérios, elas devem ser úteis para o problema considerado (CASTRO, 2005). Quanto ao número de critérios que pode ser considerado na abordagem, em princípio, uma lista exaustiva e não redundante de critérios deveria ser considerada. Contudo, foi descoberto pela prática que o método torna-se impraticável com mais de 12 critérios (ROULET, FLOURENTZOU, *et al.*, 2002). Os critérios são utilizados para definir os desempenhos individuais de cada solução de projeto definida na primeira etapa.

Nesses métodos, os elementos são dispostos numa matriz de avaliação e é realizado um jogo de coeficientes de importância relativa, correspondendo aos critérios que fazem parte da matriz de avaliação. A matriz de decisão (E) pode ser representada globalmente como segue:

$$E=\begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1m} \\ \vdots & e_{ij} & \vdots \\ e_{n1} & \cdots & e_{nm} \end{bmatrix}$$ ... para um número *n* de ações: *i*=1,...,*n* e critérios: *j*=1,...,*m*.

Nos métodos tradicionais de decisão, supõe-se que e_{ij} é medido numa escala cardinal. No caso de um problema de avaliação qualitativa, e_{ij} pode ser medido seguindo uma escala ordinal. O jogo de pesos fornece a informação sobre a importância relativa que o decisor concede às avaliações segundo cada um dos critérios; anotando-se sob forma de vetor: $p = (p_i, \dots, p_m)$.

Ou seja, para cada solução potencial do conjunto de alternativas definido em função das variáveis de projeto, o projetista define os seus critérios de julgamento e atribui pesos aos mesmos. Dispondo de instrumentos de análise, o projetista pode qualificar ou mesmo quantificar o desempenho de suas soluções atribuindo uma nota para cada projeto/solução.

Dadas essas regras gerais atribuídas à abordagem multicritério, diversos métodos e variações da abordagem podem ser empregados. Estes métodos permitem obter a matriz de avaliação e o vetor de ponderação ou ainda, mais especificamente, o que alguns chamam de métodos de avaliação de parâmetros de importância. Alguns métodos de abordagem multicritério podem ser citados: a teoria de utilidade multiatributos, os métodos de prevalência e o método *Analytic Hierarchy Process*. Para obtenção de mais detalhes, ver as referências: (NIJKAMP, RIETVELD e VOODG, 1990), (FISHBURN, 1967), (SAATY, 1977) (POMEROL e BARBA-ROMERO, 1993), (KEENY e RAIFFA, 1976).

Um exemplo de aplicação recente dessa metodologia é o estudo realizado por Fontenelle (2012). A autora emprega a abordagem multicritério no processo de concepção de aberturas laterais em um edifício comercial no centro do Rio de Janeiro, tendo em conta requisitos de iluminação natural em ambientes internos, nível de visualização desses espaços para o exterior e a eficiência energética global das soluções. A autora elabora seis alternativas de projeto contemplando soluções potenciais para atendimento desses requisitos, para as quais considera três variáveis principais, o percentual de abertura e de vidro por fachada e a presença de dispositivos de sombreamento. Atribuindo notas em função dos desempenhos apresentados a partir de cálculos, ora simplificados (planilha simplificada de predição do consumo energético em edificações), ora mais sofisticados (por meio do uso de modelos matemáticos mais precisos, como a técnica do Raio-traçado para predição da luz natural nos ambientes), a autora pôde cruzar os diferentes critérios e eleger a solução que melhor atendeu ao problema específico apresentado.

No entanto, em abordagens como essa, torna-se impossível variar e avaliar todos os fatores relevantes na resposta de interesse, o que poderia levar a uma quantidade de soluções bastante difícil ou mesmo inviável a examinar por meio dessa abordagem. Assim, o projetista deve selecionar apenas algumas poucas variáveis em um espaço de busca também bastante restrito para definir suas soluções potenciais. A seleção dos cenários potenciais termina por ser definida de modo relativamente parcial, podendo influenciar não positivamente na escolha para um projeto mais adequado.

Conforme Sharlig (1995), a abordagem multicritério é ainda caracterizada pela não-lineridade do processo. Entre a elaboração de soluções e as análises iniciais, pode-se verificar inadequações que imponham ao projetista a necessidade de retornar e reformular os projetos potenciais, caracterizando-o também como um processo de busca baseada no bom senso e na tentativa e erro.

A abordagem multicritério dependerá, portanto, essencialmente (VINCKE, 1989):

- da personalidade do decisor;

- do contexto em que se opera a decisão;
- da forma como o problema foi formulado;
- do método de auxílio à decisão empregado.

Na sequência da apresentação do método por otimização, será apresentada uma breve discussão sobre as vantagens e desvantagens de algumas formas de abordagens.

IV.1.2.3. Métodos paramétricos de projeto e uso de algoritmos de otimização de projeto

A fim de auxiliar o projetista na fase de concepção da forma, pesquisas recentes têm demonstrado a relevância de estudos paramétricos que permitem gerar variações e lógicas formais a partir de uma solução de projeto inicial ou de uma tipologia dada. A parametrização[50] de uma ou mais tipologias possibilita a geração de um catálogo preliminar ou uma "gramática" inicial de formas primárias ou de partes de uma forma que podem ser empregadas a partir de um conjunto de critérios pelo próprio projetista para gerar novas formas, que podem ser mais ou menos adaptadas ao contexto (KNIGHT, 1999). A integração de tal método aos instrumentos conhecidos de trabalho do arquiteto e urbanista, facilitada pelo uso do computador (e.g. CAD[51], BIM[52], SIG[53], etc.), tem revolucionado nas duas últimas décadas a maneira como muitos profissionais têm atuado na área.

Por meio de uma linguagem comum aos projetistas, não apenas as "regras" de concepção da forma podem ser automatizadas em CAD ou BIM, como também métricas que sejam de relevância ambiental, urbanística, climática, etc. A vantagem de parametrizar a forma ou uma tipologia construída está nas regras que são impostas ao modelo, que podem ser puramente formais, empregando regras de composição (e.g. rotação, reflexão, etc.), como mostra o estudo de Steino (2010)(Figura 178), ou ainda baseada em regras do código de urbanismo (CELANI et al.,2012)(STRAVIC e MARINA, 2011), regras formais históricas para recriação e estudos sobre o patrimônio construído (PAIO e TURKIENICZ, 2011)(DUARTE, COUTINHO, *et al.*, 2012) e, mais recentemente, regras formais baseadas em métricas para desempenho energético das construções (CANAN, 2011). A arquitetura produzida por métodos paramétricos busca ser a mais performativa[54] possível diante de certos critérios, parâmetros e leis de acoplamento definidas pelo projetista, resultando numa integração importante entre Arquitetura e técnica (ZELLNER, 1999).

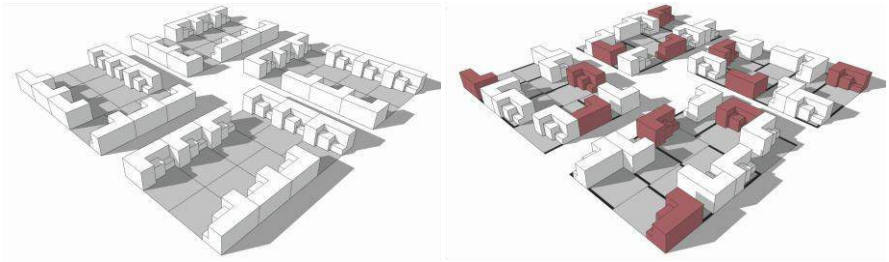


Figura 178: variações puramente formais parametrizando orientação e implantação no lote urbano, utilizando técnicas de rotação e reflexão em ambiente computacional do Google Sketchup (STEINø, 2010).

Atualmente, uma série de programas destinados à parametrizar projetos podem ser encontrados, tais como: *Digital project* (YU, 2009), *Grasshopper*® (módulo do Rhinocéros® 3D) *Generative Components*, *Revit* ou ainda *Solidworks*. E, para escala urbana, pode-se citar o

[50] Parametrização é o processo de decisão e definição dos parâmetros necessários para uma especificação completa ou relevante de um modelo ou objeto geométrico. Mais frequentemente, parameterização é um processo matemático envolvendo a identificação de um conjunto completo de coordenadas efetivas ou graus de liberdade do sistema, processo ou modelo (Wikipedia, 2013).
[51] *Computer Aid Design*.
[52] *Building Information Modelling*.
[53] Sistema de Informação Geográfica.
[54] A arquitetura paramétrica é também chamada de arquitetura « performativa » (YU, 2009).

CityEngine® (da ESRI[55]), ferramenta de modelagem procedural baseada em "gramáticas da forma" urbana.

Alguns estudos sobre o impacto no processo do projeto, comprovaram que essa abordagem formal paramétrica possui grande potencial pedagógico, em especial no desenvolvimento de projetos em equipe, pois neste, todos os participantes podem contribuir com a definição do vocabulário e das regras ou parâmetros da gramática formal de concepção (CELANI, 2002).

Para resolver um problema no computador é necessário que seja, primeiramente, encontrada uma maneira de descrever este problema de uma forma clara e precisa. É preciso encontrar uma sequência de passos que permita ser resolvido o problema de maneira automática e repetitiva. Esta sequência de passos, em linhas gerais, é chamada de algoritmo (CRUZ e KNOPMAN, 2001). Levando esse entendimento para o processo de criação dentro do projeto paramétrico, o projetista passaria a trabalhar na elaboração desses passos metodológicos dentro de uma proposição de projeto.

O processo paramétrico como metodologia de projeto trabalha a ideia de uma 'sequência de perguntas' que visa o surgimento de uma resposta coerente através da inter-relação entre as diversas partes de um todo. Essas respostas obtidas ou os parâmetros que a definem podem ainda retroalimentar a própria proposição inicial do problema, automaticamente, gerando soluções diversas e, talvez mesmo inovadoras. Assim, pode-se falar de um modelo com potencial generativo. Essa expressão vem de proposições relacionadas às ciências puras como matemática e biologia, que formulam uma sequência de perguntas retroalimentadas de geração a geração. Quando um sistema proporciona soluções diversas torna-se difícil chegar aos mesmos resultados de maneira linear, "apenas um sistema generativo seria capaz de avaliar, selecionar e otimizar requisitos projetuais" (CHATURVEDI, COLMENARES e MUNDIM, 2011).

Cada organização individual dentro desse processo gera uma solução para um problema específico. Cada problema apresenta uma infinidade de soluções adequadas e cada possível solução quando conjugada a outras possíveis soluções de outros problemas podem gerar uma infinidade de soluções 'finais' adequadas, porém diferentes entre si. Esse conceito de arranjo entre partes e possibilidades de alteração, mantendo a adequação do resultado final, pode ser equiparado à genética, por exemplo, "à ideia que em cada geração há organismos variados que são produzidos baseados em seu desempenho" (KIRSCHNER, 2009), entendendo esse desempenho como os resultados adequados para aquilo que o projetista programa dentro do sistema. Esses conceitos – sobre a analogia à biologia e à genética – serão retomados quando exposição do método paramétrico de otimização empregado no contexto desse trabalho.

Isso traz para a concepção dos espaços, questões como evolução e variabilidade, entendendo esse processo de criação baseado no desenvolvimento de sistemas complexos, em que o papel do projetista consiste em organizar e programar elementos através de representações proporcionadas pelos meios digitais do projeto paramétrico. A partir do surgimento de soluções variadas, a forma do objeto final deixa de ser uma escolha meramente plástica e subjetiva do projetista, e passa a ser um elemento emergente ao processo. A forma 'final' consiste em uma resposta à organização sistêmica proposta dentro de um conjunto de ações programadas (SOARES e TRAMONTANO, 2012).

Dentro dessa organização, é possível, portanto, adotar técnicas matemáticas diversas, a exemplo dos diferentes algoritmos de otimização, que são capazes de minimizar a dependência apenas da experiência e intuição de um projetista. A estratégia da otimização permite ao projetista avaliar diversas configurações de modelos, a partir de parâmetros, restrições e critérios programados, de forma direcionada, auxiliando-o na análise e no entendimento do desempenho

[55] *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) e inventor do conceito dos programas SIG (Sistema de Informação Geográfica).

multicritério do seu projeto, e permitindo ainda verificar a influência das diversas variáveis envolvidas.

Trazendo essa discussão para uma definição mais objetiva, os conceitos básicos na formulação de um problema de otimização multicritério são, portanto: as *variáveis* ou fatores de decisão, as *restrições* e os *critérios* ou *objetivos* de otimização. Os fatores de decisão são quantidades que descrevem estruturas sujeitas à variação ao longo do processo de otimização, e são expressas, geralmente, na forma de um vetor dentro de um espaço *n*-dimensional denominado espaço de decisão. Cada ponto desse espaço corresponde, no caso da concepção dos espaços construídos, a uma solução de projeto com "*n*" variáveis de decisão. As restrições impostas às variáveis determinam o contorno da região de soluções exequíveis do espaço de decisão, e tomam a forma de igualdades ou desigualdades que descrevem certas condições que devem ser satisfeitas pelas soluções de projeto. No espaço *n*-dimensional, as restrições formam uma hipersuperfície contendo os pontos (alternativas de projeto) que atendem os limites estabelecidos (MARKS, 1997).

A metodologia da otimização faz parte do campo da investigação operacional[56] e busca descrever uma propriedade do objeto de estudo (como uma edificação) por meio de expressões matemáticas. À essa expressão, dá-se o nome de função objetivo. O resultado calculado para a função objetivo é a base para a seleção da melhor alternativa para o problema proposto.

Observa-se que essa função pode não ser uma função linear. Neste trabalho, as funções objetivos são representadas pelas simulações de predição que descrevem o desempenho solar de uma cena urbana segundo os critérios escolhidos. Nesse caso de otimização multicritérios, o problema se transforma no cálculo de um vetor contendo as diversas funções objetivo, cada uma para um critério selecionado. A solução urbana que faz cada função objetivo atingir um valor extremo (um máximo ou um mínimo) independentemente das outras funções é chamada de solução ideal ou ótima. Na prática, as funções objetivo geralmente estão em conflito umas com as outras e a solução ideal não pode ser encontrada. A solução que pode ser obtida é então chamada de não-dominada ou solução eficiente, e pode não ser única. Por isso, é necessário selecionar, entre as soluções não-dominadas, a melhor solução, a qual se denomina solução preferida. Essa seleção é feita com base em um critério adicional pertinente ao projeto e estabelecido pelo projetista. A solução ótima definida é considerada como o ponto situado mais próximo da solução ideal, no espaço de soluções exequíveis (CASTRO, 2005).

O problema de otimização multicritério é, portanto, solucionado em duas etapas. A primeira é a determinação do conjunto das soluções eficientes. A segunda, a determinação da solução preferida.

Apesar da significativa eficiência agregada por meio do processo de otimização, cabe ressaltar que os resultados ótimos almejados só são obtidos quando há uma integração entre o processo de otimização, a análise estatística adequada dos resultados e o bom senso e conhecimento do projetista. A simples utilização de softwares comerciais de análise paramétrica e de otimização sem o prévio conhecimento da metodologia utilizada e sem a análise crítica dos resultados por um profissional capacitado pode conduzir a interpretações equivocadas e, consequentemente, gerar resultados incoerentes e não representativos.

IV.1.2.4. Síntese comparativa das metodologias

Como visto anteriormente, o processo tradicional de elaboração de um projeto, envolve a realização de um ciclo de tarefas que são repetidas até que se alcance uma configuração viável, contemplando

[56] A *Investigação Operacional* (IO) ou *Pesquisa Operacional* (PO), é um ramo interdisciplinar da *matemática aplicada* que faz uso de modelos matemáticos, estatísticos e de algoritmos na ajuda à tomada de decisões. É usada sobretudo para analisar sistemas complexos do mundo real, tipicamente com o objetivo de melhorar ou otimizar a performance.

o maior número possível dos critérios exigidos e restrições impostas. O número de vezes em que esse ciclo é repetido é extremamente dependente da experiência e da intuição do projetista/especialista.

Ao lidar com múltiplas variáveis distintas, na presença de um ou mais objetivos, a abordagem de auxílio à decisão multicritério, surge como alternativa na sistematização das soluções potenciais de projeto e busca da solução mais adequada. No entanto, tal abordagem pode ser interessante apenas quando o universo de soluções for reduzido, as variáveis envolvidas são discretas e os critérios são, sobretudo, qualitativos e dependentes de diferentes pontos de vista. Um exemplo disso é o uso de abordagem multicritério em decisões sobre planejamento regional ou na escala da cidade, onde um conjunto de aspectos econômicos, culturais e ambientais diversos devem ser considerados simultaneamente. Aspectos estes que dificilmente poderão ser quantificados com precisão ou parametrizados numa função matemática, mas ponderados e racionalizados. Além disso, apesar de orientar a escolha pela solução mais eficiente entre todos projetos potenciais elaborados inicialmente, essa abordagem, tal como a metodologia tradicional de projeto, está fortemente baseada no bom senso do projetista, que pode não garantir que seus projetos iniciais sejam os mais adequados para aquele contexto, dado o caráter subjetivo e restrito da escolha do repertório de soluções a ser analisado.

Como alternativa à metodologia convencional de projeto (tentativa e erro) e aos métodos discretos da abordagem multicritério (ponderação e *ranking*), é possível adotar técnicas de otimização capazes de minimizar a subjetividade do processo e a dependência da repetição de ciclos. Essa estratégia permite ao projetista avaliar diversas configurações de modelos de forma automática e direcionada, auxiliando-o na análise e no entendimento do comportamento dos projetos, no caso desse trabalho, em relação à disponibilidade de irradiação e iluminação nas fachadas, permitindo ainda verificar a grandeza da influência das diversas variáveis envolvidas.

O problema da otimização incorpora às restrições tradicionais, as restrições técnicas estabelecidas em normas na busca pela configuração ótima definida por uma ou mais funções objetivo. Tais considerações garantem que as respostas do problema estejam mais próximas à realidade do projeto, permitindo a aplicabilidade desse procedimento em projetos reais. Além disso, a possibilidade de acoplamento desses métodos a modelos de cálculo (e.g. desempenho energético, quantidade de luz e energia solar, etc.) e de desenho, podem permitir uma ampla exploração de possibilidades, tendo em conta critérios e restrições para solução de um problema específico. As respostas obtidas por meio desse tipo de abordagem podem ser posteriormente utilizadas como dados de entrada e orientar futuras análises envolvendo outros critérios complementares.

Enfim, a escolha da metodologia de concepção dependerá, portanto, fortemente do tipo e do contexto do problema. Por exemplo, se o problema tratar-se de concepção e decisão onde os critérios envolvidos sejam restritivos, conflituosos e tenham características qualitativas ou de difícil modelagem matemática (e.g. conforto térmico e acústico em um edifício ou aspectos econômicos no desenvolvimento da morfologia urbana numa cidade ou no planejamento regional), ou se o critério ou objetivo implique uma simplificação matemática considerável e inadequada, será mais adequado o uso do bom senso, da experiência na escolha das alternativas e no processo de julgamento multicriterial, assim como nas características apontadas na abordagem multicritério.

Mas, se o problema consistir no cruzamento de objetivos físicos mais definidos para os quais haja uma disponibilidade de modelos analíticos mais robustos (e.g. análise de insolação e iluminação em uma fachada) ou indicadores que estabeleçam uma relação clara com as respostas de interesse, a adoção da metodologia de projeto por otimização clássica oferece a oportunidade de empregar ampla e contínua variação de fatores de projeto. Assim é composto um espectro amplo e objetivo de soluções não-dominadas, que podem oferecer duas oportunidades: (i) obtenção de

soluções projetuais inovadoras (ou não pensadas/imaginadas pelo projetista) com desempenho que pode ser significativamente superior e, (ii) procura de soluções a partir de uma exploração bastante ampla e objetiva do espaço paramétrico de forma automatizada, sem a dependência da busca por tentativa e erro. Pois, na abordagem multicritério, os resultados podem apontar a melhor solução entre as seis ou dez soluções potenciais máximas concebidas, mas nenhuma delas pode atender satisfatoriamente os critérios e, o processo deve recomeçar tendo-se em conta um novo repertório de intuição do projetista.

A Tabela 55 permite comparar as duas abordagens alternativas à metodologia tradicional de projeto, segundo alguns aspectos principais.

A Figura 179, Figura 180 e Figura 181, que se seguem, apresentam, por meio de fluxogramas, o esquema geral de projeto por meio da metodologia tradicional de projeto, pelo método de auxílio à decisão multicritério (métodos discretos) e pela metodologia de otimização.

Uma descrição mais detalhada sobre a metodologia de otimização (aplicada nesse trabalho) será apresentada mais adiante nesse capítulo.

Tabela 55: comparação entre métodos de projeto e decisão .

	AUXÍLIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO	**OTIMIZAÇÃO CLÁSSICA**
Princípio	Racionalização do bom senso	Pesquisa operacional
Cálculos	Simples	Complexos
Variáveis	Intervalo estreito de variáveis discretas	Intervalo amplo de variáveis contínuas
Hipóteses	Complexas	Simples
Atores	Diferentes pontos de vista, vários decisores	Único decisor, caráter objetivo
Critérios	Objetivos e subjetivos	Objetivos
Solução	Várias soluções aceitáveis Respostas menos precisas Relações de equivalência, ordem e preferência	Conjunto de soluções não dominadas ou Fronteira de Pareto ou fronteria de eficiência
Principais métodos	ELECTRE, CONDORCET, Borda, Copeland, AHP...	Algoritmos genéticos, Programação genética; estratégia evolutiva...

No presente trabalho, é realizada a busca por soluções de tipologia urbana que atendam critérios/objetivos físicos conhecidos, como a insolação e iluminação em superfícies das fachadas construídas, apoiados em modelos matemáticos robustos, como o algoritmo de radiosidade. A pesquisa possui foco, portanto, em problema físico específico e contextualizado, para uma aplicação pontual, mas que pode ser extrapolada para outras realidades assemelhadas.

Diante disso, pelas razões já apresentadas nessa discussão inicial, acredita-se ser mais apropriado a utilização de métodos paramétricos de otimização aplicado ao problema de concepção e o estudo prospectivo desse trabalho. Metodologia esta que proporcionará uma exploração objetiva e robusta do espaço de busca.



Figura 179 : metodologia tradicional de projeto.

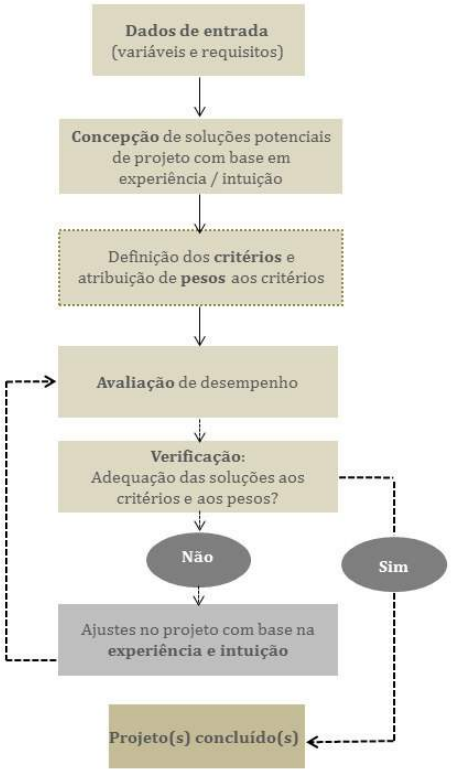


Figura 180 : abordagem multicritério.

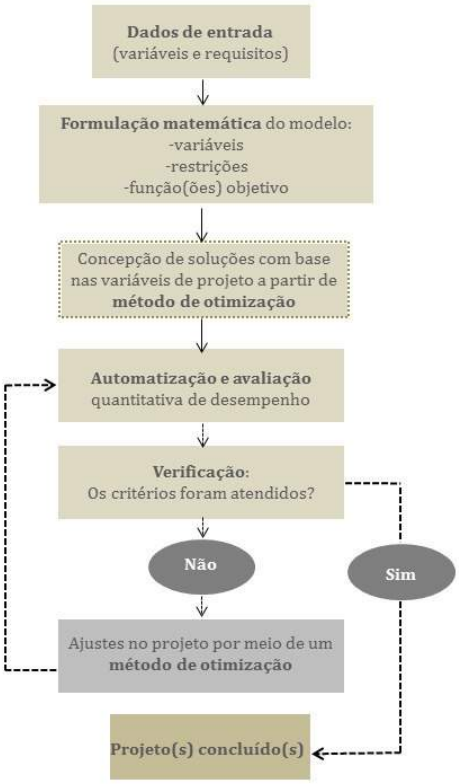


Figura 181 : metodologia de projeto por otimização.

IV.2. Metodologia de projeto por otimização

A fim de propor reflexões sobre tendências prospectivas da forma urbana para o caso de Maceió, tendo em vista a melhor adaptação desta para redução dos ganhos solares nos edifícios, bem como a integração da insolação para produção de energia solar (térmica e fotovoltaica) em cobertas, empregamos uma metodologia de otimização sobre os parâmetros mais influentes da forma. Essa metodologia permitirá também considerar restrições de projeto que conduzirão a distintos cenários possíveis.

Porém, antes de passarmos à aplicação dessa metodologia de projeto para proposição no âmbito desse estudo, faz-se necessário descrever como esta é definida, quais as possibilidades de aplicação e quais principais métodos foram desenvolvidos em torno dessa abordagem.

IV.2.1. O que é o processo de otimização?

O processo de otimização refere-se ao ato de se obter o melhor resultado sob determinadas condições, dado pela seleção do melhor elemento de um conjunto de alternativas disponíveis. Existem diversas definições de otimização e a literatura a respeito do assunto é vasta. De maneira geral, o problema de otimização consiste em encontrar os argumentos (ou variáveis de projeto) que resultam no valor extremo de uma ou mais funções que representem o problema em questão.

Uma possível aplicação da otimização no projeto urbano e de Arquitetura consiste basicamente em escolher uma melhor configuração espacial (e.g. em termos de implantação, forma, planta, etc.), ou seja, aquela que melhor se adequa aos objetivos desejados, entre as diversas opções possíveis. Esta escolha é determinada pela funcionalidade que se pretende otimizar, descrita por uma função objetivo, pelas variáveis de projeto envolvidas e pelas possíveis restrições que se deseja impor ao sistema.

Em geral, algoritmos de otimização buscam o mínimo de uma dada função *f* que depende de *n* variáveis de decisão independentes. Uma maneira usual de representar um problema de otimização é escrevê-lo da seguinte forma:

$achar$ argmin $f_{obj}(x)$

tal que
$g_i(x) \geq 0$ para $i = 1, \dots, n_g$
$h_i(x) = 0$ para $j = 1, \dots, n_h$
$lb_k \leq x_k \leq ub_k$ para $k = 1, \dots, n_x$

Onde f_{obj} é a função objetivo a ser minimizada, $g_i(x)$ é a *i*-ésima restrição de desigualdade, n_g é o número de restrições de desigualdade, $h_j(x)$ é a *j*-iésima restrição de igualdade, n_h é o número de restrições de igualdade, x é o vetor de variáveis de projeto, n_x é o número de variáveis de projeto, e lb_k *e* ub_k são os limites inferior e superior da variável de projeto k, respectivamente. Vale ressaltar que tanto as restrições de igualdade como as de desigualdade são opcionais e podem não existir em determinados momentos.

Para proporcionar uma melhor compreensão dos termos principais empregados nesse manuscrito, oriundos da literatura sobre otimização, no Glossário da tese são apresentadas algumas definições mais importantes.

IV.2.2. Otimização multiobjetivo

Problemas de otimização, nas mais diversas áreas do conhecimento, têm como principal objetivo melhorar o desempenho de um sistema ou processo em relação a determinado parâmetro de interesse. A partir da identificação de tal parâmetro e com base nas características do sistema

analisado, é possível formular a medida objetiva de eficiência desejada em função das variáveis de projeto envolvidas. Em projetos de Arquitetura, os objetivos podem ser, por exemplo, a obtenção do menor consumo energético, do menor custo de construção, do menor prazo, da maior durabilidade, entre outros.

Em alguns casos, o problema de otimização pode ser representado por uma única função objetivo, SOOP (do inglês *Single-Objective Optimization Problem*). Nestas situações, o objetivo do processo de otimização é encontrar a solução viável que represente o mínimo ou máximo global da função objetivo dentro do domínio definido pelas restrições impostas ao problema. Contudo, são frequentes os casos em que se deseja obter a máxima eficiência em mais de um aspecto do sistema, aspectos esses geralmente conflitantes. Esses problemas, denominados problemas de otimização multiobjetivo, MOOP (do inglês *Multi-Objective Optimization Problem*), requerem a utilização de algoritmos computacionais e métodos matemáticos diferentes daqueles utilizados para solucionar problemas do tipo SOOP. Coello (2006) destaca que a noção de ótimo é diferente em problemas multiobjetivo porque, nesses casos, é desejável encontrar um equilíbrio entre todos os objetivos ao invés de somente um objetivo atingir o ponto ótimo.

As variáveis de projeto consistem em parâmetros cujos valores podem variar livremente pelo projetista para definir a estrutura a ser projetada, que no caso desse trabalho corresponde aos parâmetros que definem a tipologia urbana construída (geometria dos edifícios, implantação, arruamentos e albedo). Restrições de projeto representam os valores limites que devem ser cumpridos para produzir um projeto aceitável/adequado (e.g. conforme legislação, valores mínimos de adequabilidade ambiental etc). Em geral, haverá mais de um projeto aceitável, e a otimização destina-se a escolher o melhor entre aqueles com base nas funções definidas. A definição da função objetivo é conduzida pela natureza de cada problema.

Para otimização das tipologias urbanas (de referência para Maceió), as variáveis de projeto compreendem parâmetros de forma (e.g. largura, profundidade, altura, taxa de ocupação do solo, coeficiente de aproveitamento, coeficiente de forma), implantação, arruamento (e.g. largura e orientação das vias) e o parâmetro radiativo, albedo. Critérios de adequabilidade ambiental e normativa (e.g. nível de iluminância nas fachadas para garantia de níveis minimamente satisfatórios para iluminação natural interior; gabarito etc.) serão considerados como restrições de projeto. Para estas restrições serão considerados os valores encontrados na literatura (já apresentados anteriormente) e o código de urbanismo e edificações estabelecido para a cidade de Maceió.

Quanto à função objetivo, em algumas situações, como nesse trabalho, pode haver a necessidade de considerar mais de um critério a ser satisfeito, simultaneamente. Tais problemas, envolvendo múltiplas funções objetivos, são geralmente chamados de problemas multiobjetivo (DEB, 2001)(COELLO, LAMONT e VELDHUIZEN, 2007) Também conhecido como problemas multicritério, estes podem ser encontrados em vários domínios onde decisões "ótimas" devem ser tomadas na presença de compromissos entre dois ou mais objetivos que podem ser conflitantes.

Um problema multiobjetivo compreendendo *n* objetivos pode ser escrito da seguinte forma:

encontrar $\arg\min f(x) = [f1(x), f2(x), \cdots, fn(x)]$,

onde $f(x)$ é o vetor objetivo e $fi(x)$ é a *n*-ésima função objetivo.

Na solução de problemas do tipo MOOP, uma solução possível encontrada pode ser a melhor quanto a um determinado objetivo, mas irá piorar o desempenho em relação aos demais critérios. Nessas situações, faz-se necessária uma avaliação de dominância dessas soluções na busca pelos projetos que gerem a solução ótima em todos os aspectos desejados. A partir dessa abordagem, observa-se que problemas do tipo MOOP não geram apenas uma única solução, mas um conjunto de soluções viáveis ótimas.

Avaliando as características de problemas do tipo SOOP e MOOP, Deb (2001) ressalta que além da quantidade de objetivos considerados, existem outras diferenças fundamentais entre as abordagens multiobjetivo e mono-objetivo. Algumas dessas diferenças são destacadas pelo autor:

- *Metas diferentes:*

Na otimização mono-objetivo existe somente uma meta: encontrar a solução ótima. Mesmo que no espaço de soluções existam soluções ótimas locais, no caso de funções multimodais, a meta é sempre encontrar a solução ótima global. Por outro lado, na otimização multiobjetivo existem duas metas claramente definidas: encontrar um conjunto de soluções ótimas, em equilíbrio de compromisso com todos os objetivos envolvidos, e ainda manter a diversidade entre as soluções ótimas encontradas, de forma que as soluções estejam bem distribuídas no espaço de solução, favorecendo o aparecimento de soluções variadas em termos de compromissos entre os valores das funções objetivo e proporcionando mais opções ao projetista.

Na Figura 182 são ilustrados os dois casos de distribuição das soluções ótimas globais encontradas, (a) com diversidade e boa distribuição das soluções e (b) soluções mal distribuídas, concentradas em determinadas regiões do espaço de busca.

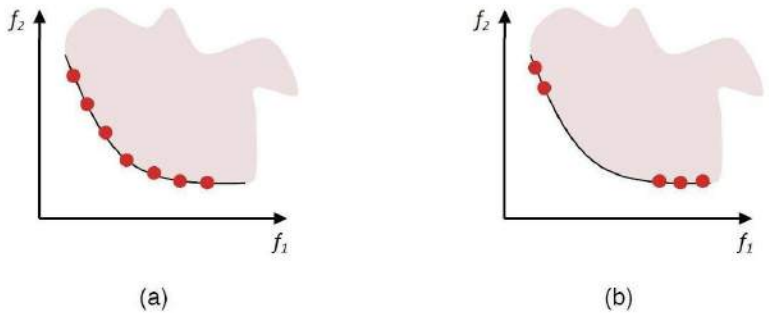


Figura 182 : Distribuição das soluções ótimas encontradas.

- *Quantidade de espaços envolvidos*:

Outra característica dos problemas multiobjetivos é que, devido à presença de mais de uma função objetivo, surge um novo espaço além do espaço definido pelas variáveis de projeto, denominado espaço objetivo. Dessa forma, é possível mapear o espaço das variáveis de decisão com o seu correspondente espaço objetivo. Ressalta-se que esse mapeamento pode não ser unívoco, podendo haver a ocorrência de diferentes configurações com o mesmo valor de resposta. A Figura 183 ilustra essa relação para o caso de duas variáveis de projeto e três funções objetivo.

Embora o espaço das variáveis de decisão e o espaço objetivo estejam relacionados, o mapeamento entre eles raramente é linear e as propriedades desses espaços nem sempre são similares. Deb (2001) destaca que esse é mais um complicador dos problemas multiobjetivos. Geralmente, a proximidade de duas soluções em um espaço não resulta na mesma proximidade no outro espaço. Assim, existe a necessidade de mapear o espaço das variáveis no espaço dos objetivos de forma a encontrar as diversas soluções ótimas possíveis, sem, no entanto, perder a característica de diversidade entre as soluções.

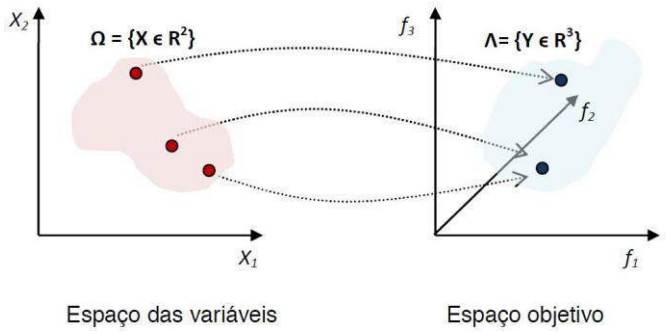


Figura 183 : Mapeamento do espaço de variáveis de decisão no espaço objetivo.

Iranzo, Herrero et al. (2009) comentam que as técnicas de otimização multiobjetivo oferecem vantagens sobre as técnicas de otimização mono-objetivo, uma vez que são capazes de fornecer inúmeras soluções diferentes para os objetivos de interesse, facilitando ao projetista escolher a melhor solução de acordo com os interesses de projeto.

Conforme comentado nas seções anteriores, em um problema de otimização multiobjetivo, normalmente os objetivos são conflitantes e não existe apenas uma única solução que seja ótima simultaneamente para todos os objetivos. Logo, a solução nesses casos envolve a identificação de soluções que tentam equilibrar os vários objetivos. Na literatura essas soluções também são denominadas soluções de compromisso ou ainda **soluções não-dominadas**.

Normalmente essas soluções formam uma fronteira no espaço de busca, denominada **fronteira de Pareto**[57], na qual todas as soluções encontradas são atrativas para o problema multiobjetivo sob análise. A obtenção dessa fronteira é dada pela aplicação do conceito de dominância entre as soluções avaliadas ao longo do processo de otimização. Segundo esse conceito, todas as soluções são comparadas duas a duas sendo verificada a dominância ou não de uma sobre a outra (DEB, 2001).

Deb (2001) destaca que existe uma sutil diferença entre um conjunto de soluções não dominadas e a fronteira de Pareto. De acordo com as definições apresentadas, um conjunto de soluções não dominadas é definido no contexto apenas de uma amostra do espaço de busca, enquanto a fronteira de Pareto é definida em relação a todo o espaço de busca. Logo, pode-se afirmar que o objetivo do processo de otimização multiobjetivo é identificar a fronteira de Pareto. Entre as soluções ótimas contidas na fronteira de Pareto não há como identificar qual é a melhor, sendo necessário acrescentar novos critérios e informações que levem o projetista a optar por determinada solução. Ou mesmo utilizar de uma abordagem multicritério, atribuindo pesos e ponderando as preferências, para escolher a solução mais apropriada entre as soluções ótimas do Pareto.

IV.2.2.1. Abordagens da otimização multiobjetivo

O campo da otimização multiobjetivo engloba uma série de métodos, cada um com diferentes características e estratégias de busca pelo ótimo. Em função de suas particularidades, cada método é capaz de resolver melhor problemas com determinadas características. Em outras palavras, determinados métodos podem gerar excelentes resultados para certos tipos de problemas, e ao mesmo tempo ser ineficientes quando aplicados a problemas com diferentes características. Em alguns problemas, por exemplo, é necessário encontrar as soluções ótimas de Pareto com exatidão, em outros casos, uma aproximação da fronteira de Pareto já é suficiente.

[57] Ver Glossário.

Dessa forma, não se pode afirmar que um método é melhor que outro, mas se pode chegar à conclusão que certo método é mais adequado a determinada aplicação. De acordo com as definições já apresentadas, os problemas de otimização multiobjetivo envolvem a busca de valores para as variáveis de projeto que levem ao extremo de mais de uma função objetivo. Foi visto ainda que, uma vez que mais de uma função de mérito está envolvida no problema, geralmente não há apenas uma solução ótima, mas um conjunto de soluções de compromisso que buscam um equilíbrio entre os objetivos definidos. No entanto, na prática, deseja-se obter somente uma solução como resposta ao problema analisado, independentemente do tipo de otimização utilizado.

Métodos de otimização clássica sugerem a "escalarização" do conjunto de objetivos em um único objetivo, multiplicando-se cada objetivo por um peso atribuído pelo usuário (MARLER e ARORA, 2010)(SCHAFFLER, SCHULTZ e WEINZIERL, 2002). Esses pesos dependem da importância relativa de cada função objetivo. Uma lista de métodos comumente usados otimização multiobjetivo clássica pode ser encontrada em Deb (2001). Por outro lado, algoritmos evolucionários são baseados em princípios evolutivos naturais, tais como reprodução, mutação e seleção, para definir o processo de otimização. Soluções de candidatos para o problema de otimização desempenham o papel de indivíduos em uma população, e a função de aptidão determina o ambiente no qual as soluções sobrevivem ou não. A evolução da população ocorre, então, após a aplicação repetida dos operadores biológicos citados.

- Métodos clássicos multiobjetivo

A literatura dispõe de vários métodos clássicos para tratar um problema de otimização multiobjetivo (ver (COHON, 2004)(DEB, 2001) (DEB, 2005) (RAO, 2009) (SAMPAIO, 2011). De modo geral, os métodos clássicos transformam o problema de otimização multiobjetivo em um problema mono-objetivo, incorporando informações subjetivas adicionais, de modo a identificar prioridades em relação aos objetivos do problema. Dessa forma, incorporando as prioridades definidas, alguns métodos clássicos, por exemplo, transformam o vetor função objetivo em uma função escalar, reduzindo o processo a apenas um objetivo (OLIVEIRA, 2005). Entre os métodos clássicos, é possível destacar: os métodos baseados no escalonamento das funções (e.g. ponderação dos objetivos e método do critério global) e os métodos baseados em restrições (e.g. método hierárquico, da negociação e da programação de metas) (OLIVEIRA, 2005).

Essa última simplifca o processo de otimização, uma vez que reduz a otimização vetorial a um problema de otimização escalar. Por outro, as prioridades inicialmente definidas podem influenciar a solução dando mais importância a um dos objetivos, enquanto pode haver outro objetivo mais relevante ao processo.

- Algoritmos evolutivos multiobjetivo

Face às dificuldades encontradas nos métodos clássicos de otimização, técnicas heurísticas foram desenvolvidas e vêm sendo aprimoradas ao longo dos anos. Os algoritmos heurísticos de otimização são métodos que obtêm soluções aproximadas para problemas de otimização. Segundo Arroyo (2002), um método é considerado heurístico quando não há conhecimentos matemáticos completos sobre seu comportamento, assim as soluções são avaliadas empiricamente por meio de simulações na busca pela solução ótima. Bueno (2009) define heurística como uma busca contínua e empírica, com vários ótimos locais, cujo resultado é o melhor que se pode encontrar sob determinadas condições. Tais técnicas proporcionam boas soluções, contudo não garantem que as soluções encontradas sejam ótimas. Entre essas técnicas, as estratégias bioinspiradas surgem como metodologias eficientes nos processos de otimização multiobjetivo.

Os sistemas bioinspirados baseiam-se nas características de fenômenos e processos biológicos, com o intuito de desenvolver algoritmos capazes de resolver problemas complexos

(CASTRO e VON ZUBEN, 2004). Entre os diversos métodos bioinspirados destacam-se as redes neurais artificiais (WASSERMAN, 1989), os sistemas imunológicos artificiais (TIMMIS, 2000), colônia de formigas (DORIGO, 1992) (DORIGO, MANIEZZO e COLORNI, 1996), enxame de partículas (KENNEDY e EBERHART, 1995), algoritmos evolucionários (DEB, 2001) (COELLO, LAMONT e VELDHUIZEN, 2007), entre outros. Esses métodos têm apresentado um grande desenvolvimento e mostrado uma eficiência cada vez maior na solução de problemas complexos, a exemplo do projeto de edifícios que otimizam o desempenho energético dos mesmos (CALDAS e NORFORD, 2002) (WRIGHT, LOOSEMORE e FARMANI, 2002) (WETTER e WRIGHT, 2004) e da renovação de quadras urbanas para redução do consumo de energia nas cidades (KAMPF, 2009).Entre esses métodos, o presente trabalho aborda apenas os algoritmos evolucionários. Informações completas sobre os métodos citados podem ser obtidas nas respectivas referências informadas.

De modo geral, os métodos evolutivos são baseados na evolução de indivíduos de uma população, representativa das variáveis de projeto, em busca do ponto ótimo desejado. Esse processo de busca aplica os fundamentos da teoria de Darwin, com base na ocorrência de seleção de indivíduos, processo no qual somente os mais aptos e melhor adaptados possuem chances de sobreviver e, consequentemente, de reproduzir. No desenvolvimento dessa classe de métodos, diferentes estratégias de evolução foram desenvolvidas, diferenciando os algoritmos existentes. Entre os métodos evolutivos de otimização multiobjetivo destacam-se: VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*) (SCHAFFER, 1984); MOGA (*Multi-Objective Genetic Algorithm*) (FONSECA e FLEMING, 1993); NPGA (*Niched Pareto Genetic Algorithm*) (HORN e NAFPLIOTIS, 1993); NSGA (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) (SRINIVAS e DEB, 1994); NSGA-II (*Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) (DEB, PRATAP, *et al.*, 2002); SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) (ZITZLER e THIELE, 1999), entre outros.

Na literatura diversos autores utilizaram métodos evolutivos na otimização de problemas específicos obtendo bons resultados. Caldas e Norford (2002) utilizaram otimização por meio de um algoritmo genético acoplado a um programa de análise das condições térmicas e lumínicas em edificações, para simulação dinâmica de um edifício de escritórios. Os autores buscaram encontrar as melhores configurações possíveis, em função dos intervalos adotados, para o percentual de abertura nas fachadas e orientação das mesmas, a fim de reduzir o consumo energético resultante. Panao, Gonçalves e Ferrão (2008) utilizam o mesmo método para identificar, entre formas urbanas genéricas, quais permitiriam absorver mais radiação solar no inverno e menos no verão, em clima temperado, a fim de reduzir o consumo de energia nos edifícios. Os autores empregaram apenas as variáveis: número de pavimentos, prospecto médio, orientação e a razão da largura pela profundidade, para uma cena urbana com nove edifícios. Lobaccaro et al. (2012) otimizaram a forma de um edifício situada em uma quadra urbana, considerando três diferentes formas gerais (edifício retangular, trapezoidal e triangular) e diferentes materiais de fachadas, a fim de encontrar a configuração que proporcionasse a melhor exposição solar. Outras aplicações podem ser encontradas em: Banos, Manzano-Agugliaro, *et al*. (2011), Kampf (2009) e Arantes (2012).

IV.2.3. Algoritmos genéticos

O método dos algoritmos genéticos (AG) foi originado nos anos 1970 por John Holland (HOLLAND, 1992) e, popularizado em 1989, por David E. Golberg (GOLDBERG, 1989). Tal método foi idealizado a partir do processo de seleção natural de Darwin, aliado às leis da herança genética de Mendel. De acordo com essa ideia, cada configuração analisada é vista como um indivíduo e, o problema consiste em maximizar ou minimizar o desempenho dos indivíduos em relação à determinada medida de eficiência, ou função objetivo desejada. O algoritmo funciona fazendo com que os melhores indivíduos passem adiante (para as futuras gerações) o seu material genético, enquanto os indivíduos menos adaptados não sobrevivem.

Apoiando-se em três técnicas derivadas da genética e dos mecanismos de evolução natural (seleção, cruzamento e mutação), esse método permite chegar à (ou convergir à) uma solução por etapas sucessivas, construindo sucessivamente várias populações de soluções, a partir das quais são retidos os melhores indivíduos. O processo de otimização pode ser resumido conforme as seguintes etapas:

[1] Algoritmo gera uma grande «população» de indivíduos.

[2] Cada indivíduo é avaliado quanto à uma função objetivo à ser atendida.

[3] Os melhores indivíduos são selecionados e, em seguida, «cruzados» para formar uma segunda geração de indivíduos.

[4] A segunda geração é avaliada.

[5] As etapas [3] e [4] são repetidas até que os critérios de convergência ou de finalização da otimização sejam atendidos.

[6] Por meio de «evolução» natural, obtém-se uma solução ótima.

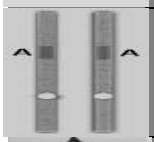
AGs são muito eficientes para busca de soluções ótimas em uma grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais. Adicionalmente, por serem baseados em processo da evolução biológica, são capazes de identificar e explorar todo o espaço de busca do problema e convergir para soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas em níveis globais. Dessa forma, esses algoritmos são indicados para se obter soluções de problemas que possuem um espaço de busca grande, sendo capazes de identificar rapidamente sub-regiões de interesse para o processo de otimização. Outra vantagem dessa classe de métodos é que requer pouco conhecimento sobre a função a ser otimizada. Logo, para funções desconhecidas, descontínuas e não diferenciáveis, os algoritmos genéticos estão entre os métodos mais indicados. Embora possam parecer simplistas do ponto de vista biológico, esses algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos de busca adaptativa poderosos e robustos (LECHETA, 2004).

IV.2.3.1. Analogia aos elementos e operações da genética

Como os algoritmos genéticos utilizam conceitos da genética para simular a evolução das populações, cabe inicialmente fazer uma analogia entre os termos usados na biologia e o método dos algoritmos genéticos aplicados ao problema de otimização.

A genética populacional é a área da Biologia na qual se baseia a metodologia dos algoritmos genéticos. De acordo com essa ciência, o surgimento de novas gerações é realizado através da reprodução, que pode ocorrer de forma assexuada (sem troca de material genético entre indivíduos) ou sexuada (que exige a presença de dois organismos que fazem a troca entre si do material genético). A metodologia aplicada pelos algoritmos genéticos é baseada na reprodução sexuada, a qual envolve os conceitos dos seguintes parâmetros: cromossomos, genes, alelos, fenótipo e genótipo. Nesse contexto, é possível criar a seguinte analogia (Tabela 56):

Tabela 56 : Analogia dos algoritmos genéticos com os elementos da biologia genética.

Elemento da Genética		Algoritmo genético	Aplicação ao estudo
	**Genética**	**Problema de otimização**	
	**Cromossomo**	**Indivíduo**	Uma configuração ou forma urbana
	**Genes**	**Variáveis**	Variáveis de projeto
	**Alelos**	**Valor das variáveis**	Valores das variáveis de projeto
	**Fenótipo**	**Características**	Compacto / denso / disperso
AA Aa	**Genótipo**	**Código**	00 01 11

Os cromossomos correspondem aos indivíduos analisados ao longo do processo de otimização. No caso particular do presente trabalho, o cromossomo corresponde a uma determinada configuração geométrica urbana. O cromossomo consiste em uma estrutura formada por uma sequência de genes ou variáveis tipo-morfológicas. Uma forma bastante utilizada para representação dos cromossomos no algoritmo genético é a representação binária. Nessa representação, um cromossomo pode ser montado utilizando a representação binária das variáveis. Um exemplo da representação de um indivíduo (cromossomo) caracterizado pela definição de três variáveis de projeto (x_1, x_2, x_3), cujos valores para uma possível solução sejam $x_1 = 10, x_2 = 3, x_3 = 9$, é dado como segue:

x_1, x_2, x_3 = 10,3,9 = 1010,0011,1001, formando o cromossomo: 101000111001.

Tanaka (2009) destaca que este método é excelente para variáveis discretas e inteiras, mas também pode lidar com variáveis contínuas, desde que estas sejam discretizadas com um número de *bits* adequado para representar a precisão desejada. Outras opções para essa representação são a codificação por permutação e a codificação por valor.

Os *genes* representam as variáveis de projeto. Correspondem ao elemento constituinte de um cromossomo, geralmente responsável pela codificação de um único parâmetro, ou seja, consiste em um elemento do vetor que representa um cromossomo. Cada indivíduo, ou cromossomo, tem um determinado número de genes, cada um descrevendo uma variável específica do problema. Os *alelos* representam os valores atribuídos aos genes. O *genótipo* corresponde a informação contida no cromossomo. Consistem em uma estrutura de dados que representa uma solução candidata a um determinado problema. O *fenótipo* corresponde a decodificação de um ou mais cromossomos que

leva a uma determinada resposta de interesse do sistema em estudo. A *população* representa um conjunto de indivíduos ou configurações a serem analisadas. A *geração* equivale ao número de iterações que o algoritmo genético executa.

A partir da definição desses elementos, os AG atuam na busca pelos projetos mais eficientes utilizando *operações genéticas*. As operações genéticas consistem nas operações que o algoritmo realiza sobre cada um dos indivíduos (e.g. cruzamento/recombinação e mutação).

De modo geral, este processo pode ser descrito da seguinte forma: o AG gera uma população de possíveis respostas para o problema a ser tratado (População inicial ou parâmetros típicos de entrada de um projeto) para depois submetê-la ao processo de evolução, constituído pelas seguintes etapas (Figura 184):

[1] *avaliação*: avalia-se a aptidão das soluções de projeto (ou indivíduos da população), é feita uma análise para identificar o quão bem estas soluções respondem ao problema proposto;

[2] *seleção:* os indivíduos são selecionados para reprodução. A probabilidade de uma dada solução ser selecionada é proporcional à sua aptidão (ou adaptabilidade). Por meio desse processo, os algoritmos genéticos são capazes de identificar os indivíduos mais aptos, para que permaneçam na população durante o processo de evolução, e os menos adaptados, para que sejam excluídos do processo. Diversos métodos de seleção já foram desenvolvidos, entre eles: a seleção proporcional, a seleção por *ranking* e a seleção por torneio;

[3] *cruzamento*: características das soluções escolhidas são recombinadas, gerando novos indivíduos. Esse operador permite a troca de material genético (características) de dois indivíduos selecionados da população corrente, gerando novos indivíduos, geneticamente melhorados, para a nova população. O cruzamento é considerado o operador genético predominante, sendo, desta forma, aplicado com probabilidade maior que a probabilidade de mutação. Pode ocorrer de três formas diferentes: cruzamento em um único ponto, em múltiplos pontos ou de modo uniforme (Ver Glossário).

[4] *mutação*: características dos indivíduos resultantes do processo de reprodução são alteradas, acrescentando, assim, variedade à população. A mutação é efetuada alterando-se o valor (alelo) de um determinado gene de um indivíduo sorteado com uma determinada probabilidade, denominada probabilidade de mutação. Desta forma, alguns indivíduos da nova população podem ter um de seus genes alterados aleatoriamente. A mutação é utilizada para garantir que diversas alternativas sejam avaliadas na busca pelo ótimo, possibilitando uma maior varredura do espaço de busca e evitando que o algoritmo genético convirja prematuramente para mínimos locais;

[5] *atualização*: os indivíduos criados nesta geração são inseridos na população;

[6] *finalização*: verifica-se se as condições de encerramento da evolução foram atingidas, retornando para a etapa de avaliação, em caso negativo e encerrando a execução, em caso positivo (LUCAS, 2002).

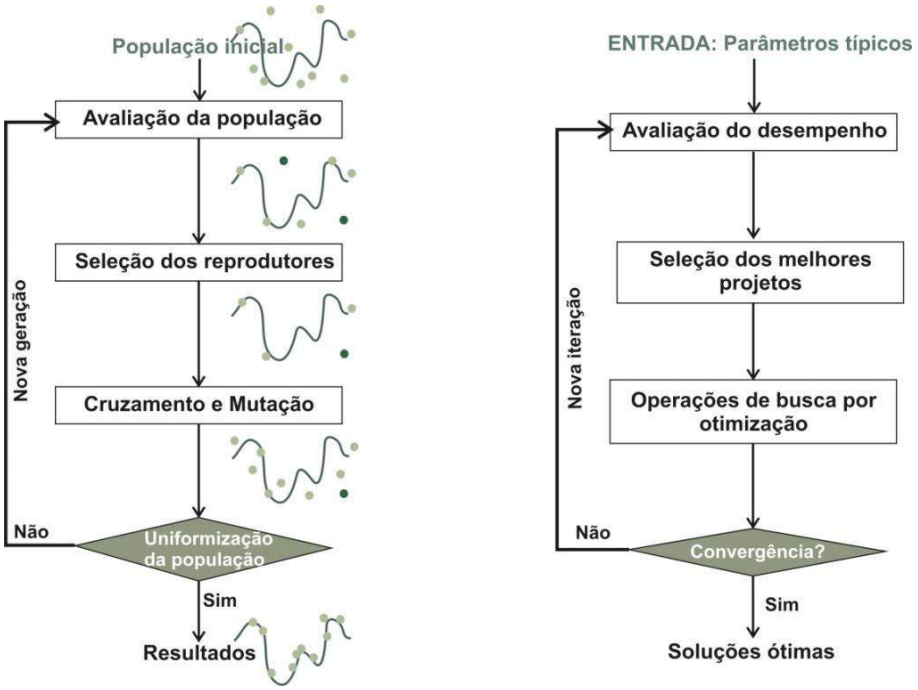


Figura 184: fluxograma do funcionamento geral de um algoritmo genético tradicional – analogia à biologia. Fonte: ilustração do autor.

Quando se fala de aptidão ou *fitness,* referente a cada indivíduo, fala-se do valor da função a ser otimizada. Consiste na composição da função objetivo, com funções de penalidade estabelecidas a partir das restrições do problema. De modo geral, representa uma medida da capacidade de sobrevivência de um cromossomo no processo de evolução e, consequentemente, a probabilidade dele se reproduzir com mais frequência. No caso de um problema de minimização, por exemplo, quanto menor o valor da função objetivo, maior a aptidão de um determinado indivíduo. Isso representa que a solução deste indivíduo é uma melhor solução para o problema quanto maior for a aptidão. A aptidão pode ser calculada de diversas maneiras, mas sempre em função do valor de função objetivo.

IV.2.3.2. Parâmetros do algoritmo genético

A aplicação dos algoritmos genéticos depende da definição de alguns parâmetros, que possuem grande influência no desempenho do processo de otimização. Os parâmetros mais importantes dessa classe de métodos são: o *tamanho da população*, o *número de gerações*, a *probabilidade de cruzamento* e a *probabilidade de mutação*. A adequada definição desses parâmetros depende das características particulares de cada problema e dos recursos disponíveis, principalmente em termos computacionais.

O *tamanho da população* equivale ao número de cromossomos existentes na população de cada geração. Esse tamanho, normalmente considerado constante durante a evolução, possui grande influência no método, podendo afetar o desempenho global e a eficiência do processo de otimização. A definição de uma população pequena acarreta um fraco desempenho, uma vez que, deste modo, a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca, podendo conduzir o algoritmo na direção de um mínimo local. Por outro lado, a adoção de uma população grande fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais. Entretanto, quanto maior o tamanho da população, maior é o tempo de análise e maiores são os recursos computacionais necessários.

Outro parâmetro importante dos algoritmos genéticos é o *número máximo de gerações*, que define o número de iterações do método na busca pelo ponto ótimo. Um número baixo de gerações pode ser insuficiente para que as operações genéticas aplicadas conduzam à solução ótima desejada. No entanto, uma grande quantidade de gerações pode elevar significativamente o custo computacional associado, uma vez que conduz a um grande número de avaliações da função objetivo. A quantidade de gerações necessárias para gerar soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas, depende das características do problema, bem como da população inicial definida. Em geral, é vantajoso que na população inicial existam indivíduos que gerem soluções viáveis e com bom valor de aptidão. Para tanto, a experiência do projetista na definição dessa população tem grande influência. Além disso, a realização de análises prévias pode contribuir na seleção de indivíduos da população inicial. Nessa definição também é importante garantir a diversidade dos indivíduos, isto é, garantir que os indivíduos estejam uniformemente distribuídos por todo o espaço de busca (MONTGOMERY, 2001).

Dada à importância já apresentada do operador de cruzamento, deve-se definir adequadamente a probabilidade com que a mesma ocorre. Esse parâmetro, denominado *probabilidade de cruzamento* ou de recombinação é uma grandeza percentual do número de indivíduos que sofrem o processo de cruzamento em relação ao número total de indivíduos de uma população. Essa probabilidade tem grande influência no que diz respeito à convergência do processo de busca, uma vez que a definição de uma alta probabilidade de cruzamento pode conduzir a eliminação de indivíduos com alto desempenho. Por outro lado, uma baixa probabilidade de cruzamento pode conduzir a uma convergência muito lenta devido à baixa taxa de exploração das características genéticas favoráveis ao bom desempenho dos indivíduos. Geralmente, a probabilidade de cruzamento varia entre 0,5 e 0,95, mas esses números indicam apenas uma ordem de grandeza, já que existem diferentes procedimentos para esse tipo de operação e o comportamento do processo é bastante dependente das características de cada problema.

A *probabilidade de mutação* corresponde à taxa de ocorrência de mutação dos cromossomos nas populações ao longo da evolução do processo de otimização. Esse parâmetro também afeta significativamente o desempenho do método, pois se a taxa escolhida for muito alta, o processo de busca pode se tornar essencialmente aleatório. Assim como os demais parâmetros, a adequada probabilidade de mutação depende das características do problema a ser resolvido. Geralmente, as taxas utilizadas variam entre 0,001 e 0,1. De Jong (2006) sugere que a taxa de mutação seja inversamente proporcional ao tamanho da população. Barbosa, Ribeiro e Arantes (2010) sugerem a adoção de uma probabilidade de mutação adaptativa com o intuito de no início do processo evolucionário ser adotada uma baixa taxa de mutação, ou seja, pouca alteração das partes cromossômicas. Nessa abordagem, a taxa de mutação adapta-se ao sistema conforme o passar das gerações, se adequando às características do problema avaliado.

Alguns estudos já foram desenvolvidos no sentido de avaliar a definição adequada dos parâmetros dos algoritmos genéticos para diferentes tipos de problemas. Alguns resultados acerca desse tipo de avaliação podem ser encontrados em Pinho, Montevechi e Marins (2007). Existem também estudos que utilizam algoritmos genéticos como método de otimização para a escolha dos parâmetros de outro algoritmo genético, devido à importância da escolha correta destes parâmetros (COELHO, AFONSO e HOROWITZ, 2011) (LEIRAS, 2010).

IV.2.4. O método NSGA

O método NSGA, proposto por Srinivas e Deb (1994), envolve critérios de avaliação de dominância e manutenção da diversidade da população simultaneamente. A estratégia aplicada por esse método, assim como outros métodos bastante aplicados, como o MOGA (ver **ANEXO D**), utiliza um esquema de seleção baseada em um ordenamento para privilegiar as soluções não dominadas correntes,

juntamente com um método voltado para a criação de nichos para manter a diversidade da população. O NSGA difere de outros algoritmos como o MOGA, na maneira como classifica as soluções não dominadas e na forma como o compartilhamento é considerado para garantir a diversidade da população. Dessa forma, a diferença reside apenas na maneira como o método de seleção trabalha, uma vez que os operadores de cruzamento e mutação permanecem idênticos.

Assim, antes do procedimento de seleção ser aplicado, os indivíduos (configurações possíveis iniciais) são classificados com base na avaliação do desempenho dos mesmos em termos da função objetivo. Os indivíduos eficientes, com bom desempenho, presentes na população corrente são, então, ordenados, considerando o nível de não dominância dos indivíduos, formando frentes, ou fronteiras (Figura 185). Dessa forma, todas as soluções não dominadas da população corrente recebem valores altos de aptidão, sendo esse valor o mesmo para todos os indivíduos não dominados, de modo que tais indivíduos possuam um mesmo potencial reprodutivo.

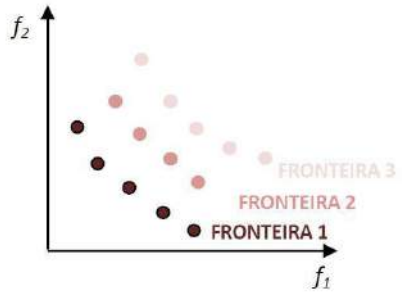


Figura 185 : representação da classificação dos indivíduos no NSGA (fronteiras).

Como os indivíduos da primeira fronteira têm os maiores valores de *fitness*, eles serão selecionados mais vezes que o resto da população, o que privilegia a busca por indivíduos não dominados, de interesse do processo de otimização. Para manter a diversidade da população, o valor de *fitness* de cada indivíduo é ajustado utilizando os conceitos da técnica de compartilhamento (*fitness sharing*) nos nichos formados pelas fronteiras não dominadas já identificadas.

Com base nessa ordenação, os indivíduos melhor classificados são selecionados e passam pelo processo de cruzamento e mutação, formando a população da geração seguinte, que será então avaliada com os mesmos critérios de classificação acima apresentados. A Figura 186 mostra o fluxograma geral do método NSGA.

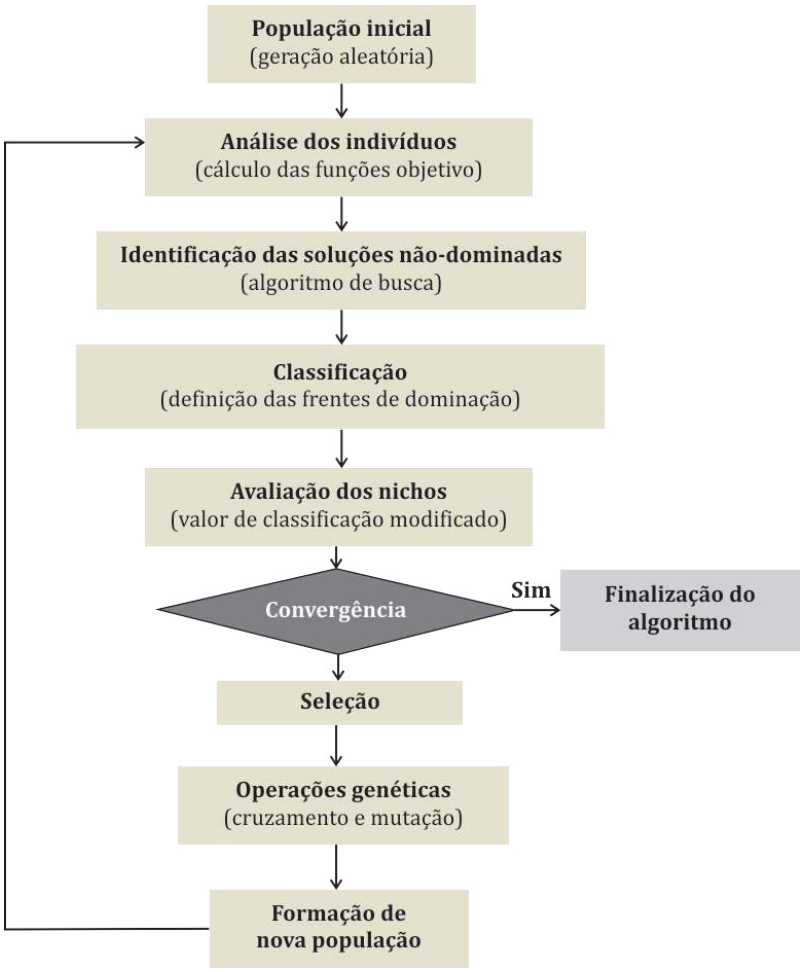


Figura 186 : fluxograma do método NSGA.

IV.2.5. O algoritmo NSGA-II

Com o objetivo de proporcionar mais eficiência ao método, Deb, Pratap *et al*. (2002) propuseram a chamada segunda geração do método NSGA, denominado NSGA-II (*Elitist non-dominated Sorting Genetic Algorithm*), incorporando o conceito de elitismo. A função desse operador consiste em preservar as melhores soluções da população corrente e incorporá-las, sem modificações, na população posterior. Dessa forma, evita-se que essas soluções de bom desempenho sejam perdidas durante o processo de evolução.

Na formulação dessa nova estratégia, os referidos autores consideraram ainda a necessidade de diminuir a complexidade computacional na classificação dos indivíduos. Dessa forma, passou-se a utilizar somente o conceito de soluções dominadas e não dominadas.

Para evitar a existência de nichos localizados e garantir a diversidade das soluções, foi também incorporada ao método a técnica de comparação de aglomeração (*crowding*). Essa consiste em um operador de comparação de aglomeração que prioriza os indivíduos menos aglomerados. Uma vez que os algoritmos multiobjetivos buscam encontrar o maior número possível de soluções que pertençam à frente de Pareto, é importante que a população se mantenha diversificada. Nesse sentido, a distância de aglomeração quantifica o espaço ao redor de uma determinada solução, sendo mais diversificadas as soluções que resultam na maior distância de aglomeração.

Para melhor entendimento do método, a seguir apresenta-se uma síntese dos

procedimentos do método NSGA-II.

[1] Gera-se uma população inicial de tamanho n;

[2] Identificam-se as frentes de dominância e avalia-se as distâncias de aglomeração em cada frente;

[3] Aplicam-se os operadores genéticos de cruzamento e mutação para geração de uma população de descendentes com o mesmo tamanho da população anterior;

[4] Os indivíduos da população corrente (pais) e da população gerada (filhos) são reunidos em um conjunto de tamanho 2 n; e mais uma vez, são classificados em frentes de dominância;

[5] A nova população é então formada selecionando as frentes com melhor grau de dominância. Caso o limite tamanho da população (n) seja ultrapassado, as soluções com menor distância de aglomeração na última frente selecionada são eliminadas;

[6] Avalia-se o critério de convergência e caso o mesmo seja atingido, o processo é finalizado. Caso contrário, retorna-se à etapa 3 da sequência aqui descrita.

Dada a eficiência proporcionada pelo método NSGA-II e com base em aplicações bem sucedidas desse método na literatura (MAGNIER e HAGHIGHAT, 2010) (ZITZLER, DEB e THIELER, 2000) (TAN, LEE e KHOR, 2002), o mesmo é utilizado neste trabalho para otimização da concepção da forma urbana, aplicação apresentada na sequência dessa seção.

IV.3. Otimização da forma urbana para integração dos condicionantes solares em Maceió

IV.3.1. Descrição do modelo de estudo

Nesta etapa, a otimização será aplicada como metodologia de projeto para concepção e adaptação solar das formas urbanas de Maceió. Para isto, duas tipologias representativas mais recorrentes da cidade servirão de modelo para análises prospectivas em distrito urbano que passa por rápidas e profundas modificações.

IV.3.1.1. Simplificação e definição dos modelos de referência para estudo prospectivo

As tipologias urbanas que serão submetidas ao processo de otimização são representativas e extraídas das classes de referência indicadas como 3 e 4 para cidade de Maceió (ver Capítulo II).

Essa escolha foi realizada com base em algumas razões. A classe 4 (vertical moderno) corresponde à tipologia que cresce mais rapidamente em vários distritos da cidade. Conforme já discutido no Capítulo II, as torres de múltiplos pavimentos têm progressivamente substituído as edificações térreas ou de até dois pavimentos. Processo que se deu mais expressivamente a partir da década de 90, nos bairros da orla marítima de Maceió, por importantes questões econômicas, pelo forte apelo turístico e especulação imobiliária local. Dada a força dessas modificações em curso que se associam à frágil infra-estrutura, resulta que a implantação dessa elevada densidade mal planejada tem acarretado problemas importantes para os distritos locais, como a dificuldade de suprimento de recursos básicos como água e energia. Se partirmos da hipótese de que essa tipologia possivelmente e progressivamente ocupará toda a baixada litorânea da cidade, torna-se imprescindível antecipar seu desempenho e buscar diretrizes que possibilitem adaptá-la para integrar preocupações primordiais, tais como consumo e provimento de energia elétrica, de preferência de fonte renovável.

A classe 3, por sua vez, corresponde à uma das tipologias mais encontradas ainda hoje no tecido urbano da cidade. Originalmente de herança colonial, essa tipologia continua a se reproduzir pela facilidade associada às técnicas construtivas locais. Caracterizada predominantemente pelas edificações baixas, geminadas e, muitas vezes de reduzida testada e grande profundidade, essa tipologia, apesar de ocupar grande parte do tecido da cidade, trata-se de uma das tipologias que, em alguns distritos, como na baixada litorânea, tem sido substituída pelas torres verticais (Figura 187).



Figura 187 : Processo de verticalização e adensamento da baixa marítima de Maceió. Fonte: Foto do autor, 2013.

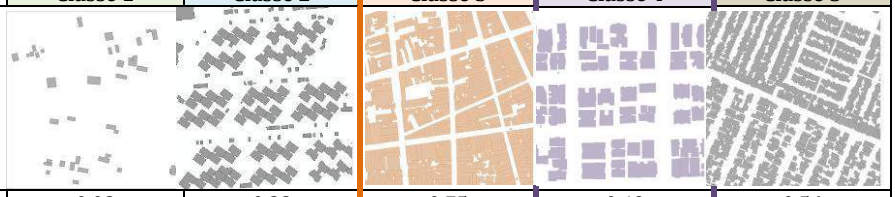
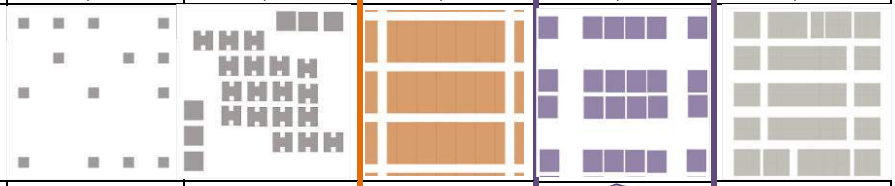
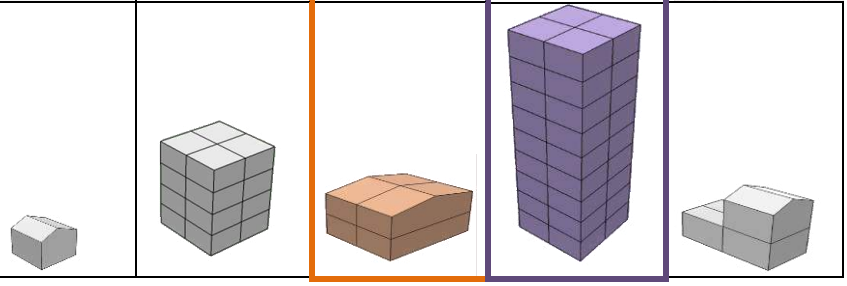
A fim de contrastar e comparar essas duas tendências que avançam em direções opostas para alguns bairros, optou-se por avaliar cenários prospectivos tendo em vista as principais características de cada uma.

Vale lembrar que se busca otimizar aqui a tipologia e, não uma forma específica dotada de detalhes extremamente variáveis e aleatórios. Busca-se estudar os traços fortes que definem o tipo que se repete e os fatores, portanto, mais influentes no fenômeno. Conforme foi discutido no início desse capítulo, sabe-se que no processo de projeto, as decisões principais e de maior peso na determinação do desempenho ambiental das construções estão na fase de concepção, quando o projetista precisa definir o tipo, o volume, a proporção, a compacidade de sua forma, a implantação e a orientação, amparando-se igualmente em parâmetros urbanísticos da legislação local (e.g. taxa de ocupação, gabarito, coeficiente de aproveitamento). São, portanto, esses parâmetros que procuramos otimizar.

Outrossim, ao simplificar a geometria dos edifícios urbanos, reduz-se o impacto dos resultados advindos da complexidade (dos detalhes, menos relevantes na etapa de concepção e que poderão ser definidos e modificados nas fases seguintes) e, portanto, pode-se aprofundar a compreensão em termos da relação existente entre as tipologias construídas e o potencial radiativo de suas formas (STEEMERS, BAKER, *et al.*, 1997) (COMPAGNON, 2000) (COMPAGNON e RAYDAN, 2000) (COMPAGNON, 2004).

Para cada classe tipo-morfológica de referência para Maceió foi elaborado um modelo de base simplificado, para o qual serão impostas os intervalos de variação, as restrições de projeto e os critérios de otimização. A Tabela 57 destaca os modelos simplificados referentes às classes tipo-morfológicas estudadas. Para cada uma das duas classes avaliadas, a otimização foi empregada considerando-se distintas condições de contorno, que serão descritas com mais detalhes na sequência.

Tabela 57: principais fatores tipo-morfológicas que caracterizam as cinco tipologias urbanas utilizadas na definição dos modelos simplificados para otimização.

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Real					
Taxa de ocupação (TO)	0,08	0,22	0,75	0,49	0,56
Coeficiente de aproveitamento (CA)	0,08	0,88	2,38	4,15	0,75
Coeficiente de forma (Cf)	4,75	5,18	3,87	4,94	3,66
Número de Pavimentos (NP)	4,22	9,11	6,30	2 - 15	5,15
Distância entre edifícios	6 - 50	2 - 20	0	5 - 15	0 - 12
Albedo	0,12	0,18	0,15	0,20	0,15
Teórica / Modelo referencial de base					
					

IV.3.2. Modelagem do problema de otimização

O programa utilizado para modelagem de projetos por otimização nesse estudo, é a plataforma multidisciplinar modeFRONTIER®. No modeFRONTIER®, o modelo de cálculo da radiosidade em meio urbano (SRA-Citysim) é acoplado. A modelagem de projetos por otimização ocorre no ambiente do modeFRONTIER®, definindo o conjunto de dados e os processos de análise.

O modelo de otimização definido possui, portanto, dois fluxos principais, o fluxo de dados e o fluxo de processos. O fluxo de dados ocorre da esquerda para direita, tendo início na definição das variáveis de projeto, seguindo com o cálculo de variáveis necessárias para montagem do modelo de cada configuração a ser simulada. Após a simulação da configuração montada, o fluxo de dados segue com a obtenção dos valores das respostas de interesse, verificação das restrições e, finalmente, a avaliação da função objetivo.

O fluxo de processo ocorre de baixo para cima, tendo início com a definição dos parâmetros de análise (variáveis tipo-morfológicas). Na sequência desse fluxo, tem-se de início a análise dos arranjos urbanos propriamente dita. Em uma primeira etapa, é realizada a análise de arranjos urbanos, a partir da qual se simula hipoteticamente a implantação e geometria dos edifícios, obedecendo às regras do código de obras impostas como restrições de viabilidade dos projetos. A partir dessas configurações, segue-se com a simulação dinâmica da irradiação e iluminância nas superfícies desses edifícios urbanos, onde são aplicadas restrições quanto aos valores mínimos de iluminamento exterior (para garantia de níveis médios satisfatórios nos espaços interiores). Após a finalização do último processo, as respostas de interesse são extraídas dos arquivos de saída gerados e tais informações são atribuídas às variáveis de saída que serão avaliadas quanto às restrições impostas e à função objetivo. A Figura 188 apresenta o esquema geral do fluxo de otimização modelado no programa modeFRONTIER® para este trabalho. Na sequência será apresentado em detalhes, cada conjunto de dados e processos do modelo.

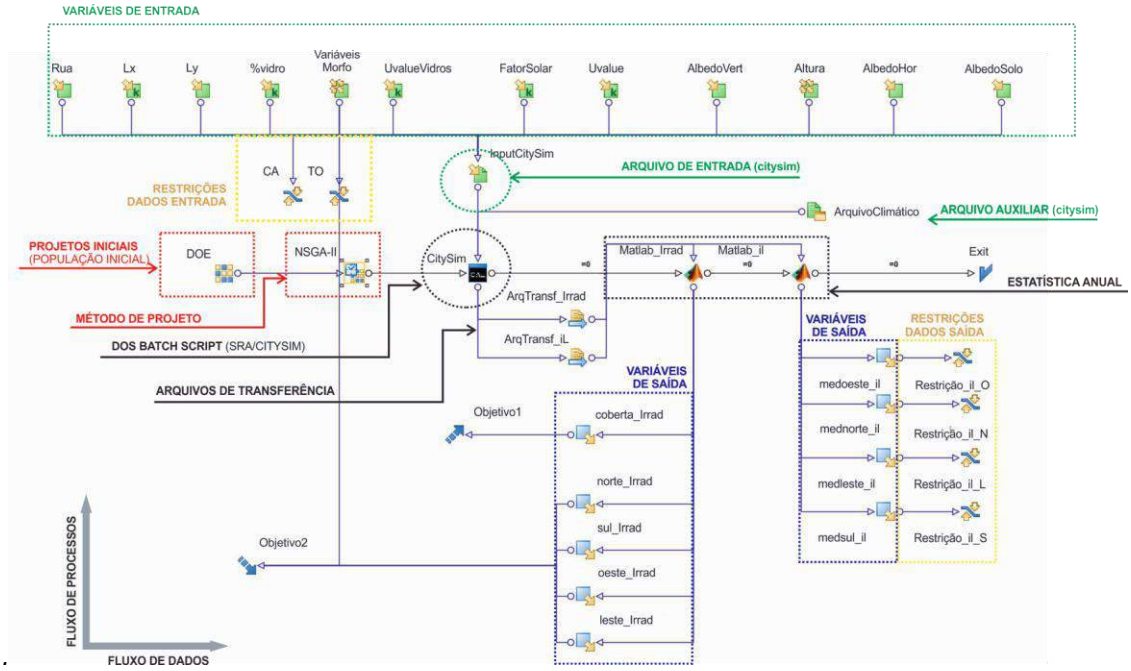


Figura 188: fluxo de otimização - organograma dos processos, acoplamentos e dados de entrada e saída no programa modeFRONTIER®. Fonte: ilustração do autor, 2013.

IV.3.2.1. Fatores de projeto (variáveis de entrada do modelo)

A partir do estudo estatístico de sensibilidade realizado precedentemente, foi possível definir os principais fatores tipo-morfológicos influentes nos fenômenos físicos de interesse – balanço de energia radiante e iluminância nas fachadas. As variáveis de entrada do modelo de otimização correspondem aos fatores identificados nesse estudo como significativos Essas variáveis são: *altura construída, largura, profundidade, distância entre edifícios, o coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação do solo, coeficiente de forma, verticalidade, prospecto médio* e o *albedo*. Os fatores identificados como pouco representativos do problema estudado foram considerados com valores constantes (conforme valores indicados na Tabela 20 - Capítulo II). Para cada variável representativa foram considerados intervalos em função dos valores recorrentes identificados em cada classe morfológica de referência, conforme indicam a Tabela 58 eTabela 59.

O modelo simplificado utilizado como base para análises de otimização para a classe 3, é composto de 35 edificações, das quais 14 compõem a quadra urbana avaliada (Figura 189). Os intervalos das variáveis para esse modelo estão indicados na Tabela 58.

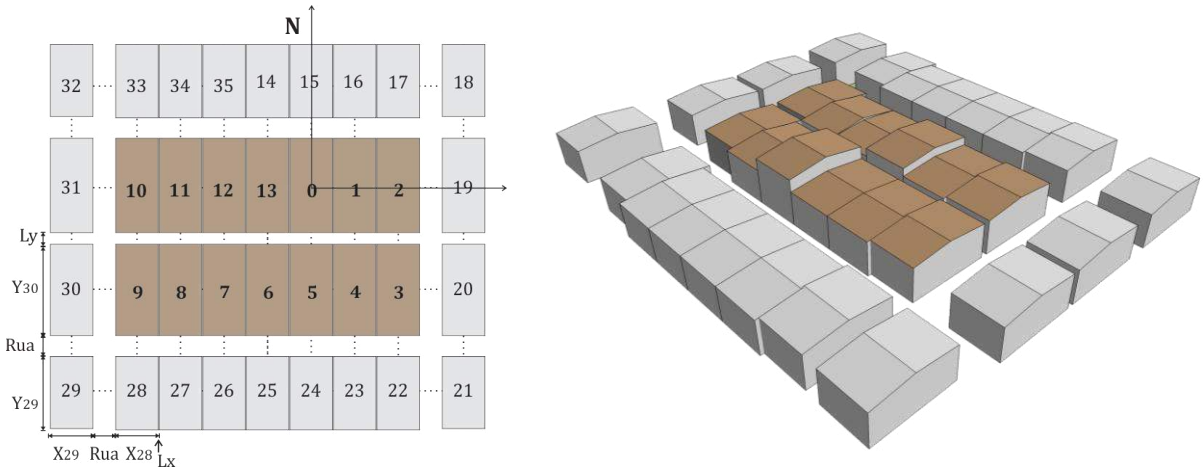


Figura 189: modelo geométrico simplificado utilizado de base para o estudo de otimização da classe 3.

Tabela 58: intervalos para o conjunto de fatores tipo-morfológicos considerados no estudo para a classe 3.

Número de pavimentos (NP)	Largura (X)	Profundidade (Y)	Afastamentos iniciais (Lx)	Afastamentos iniciais (Lx)	Largura da rua	Coeficiente de aproveitamento (CA)	Taxa de ocupação (TO)	Coeficiente de Forma (Cf)	Verticalidade	Prospecto médio (Pm)	Albedo
1	4	16		0	3	1,5	0,70	1,5	0,01	0,3	0,05
↓	↓	↓	0	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
5	8	30		4	8	4.0	0,95	3,5	0,15	5,0	0,5

O modelo simplificado utilizado como base para análises de otimização para a classe 4, é composto de 24 edificações, das quais 8 compõem a quadra urbana avaliada (Figura 190). Os intervalos das variáveis para esse modelo estão indicados na Tabela 59.

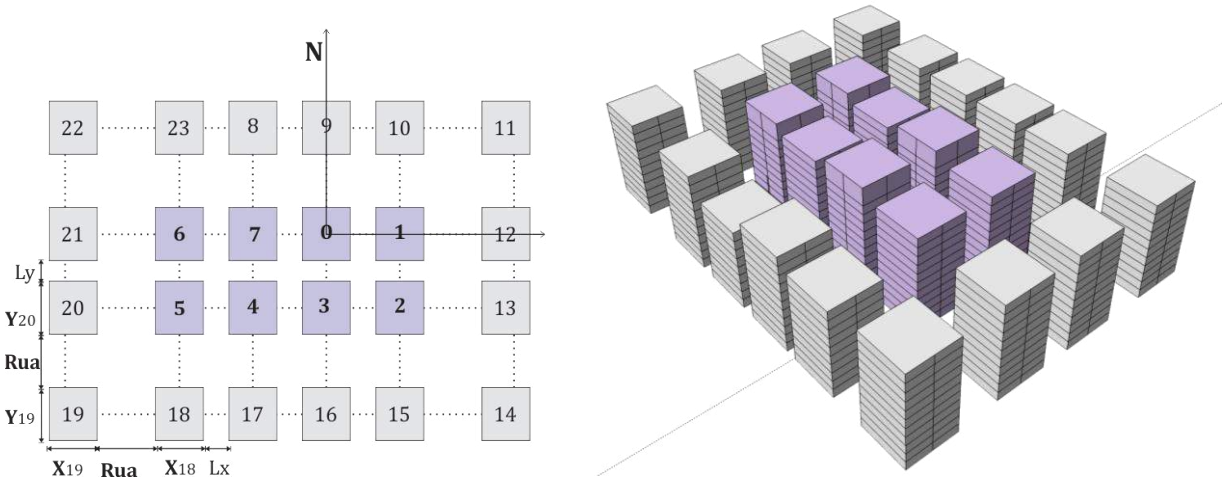


Figura 190: modelo geométrico simplificado utilizado de base para o estudo de otimização da classe 4.

Tabela 59: intervalos para o conjunto de fatores tipo-morfológicos considerados no estudo para a classe 4.

Número de pavimentos (NP)	Largura (X)	Profundidade (Y)	Afastamentos iniciais (Lx e Ly)	Largura da rua	Coeficiente de aproveitamento (CA)	Taxa de ocupação (TO)	Coeficiente de Forma (Cf)	Verticalidade	Prospecto médio (Pm)	Albedo
2	8	8	1,5	6	2,0	0,35	0,5	0,01	0,5	0,05
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
15	40	40	3	15	6,0	0,70	5,0	0,8	10	0,5

Esses fatores e respectivos intervalos de variação correspondem aos dados de entrada do modelo de otimização. No modeFRONTIER®, para cada dado de entrada, é possível definir se este consiste em uma simples variável, uma constante ou uma expressão (função de outras variáveis).

Após todas os dados de entrada serem definidos, estes devem ser escritos no arquivo de entrada do programa Citysim que é carregado dentro do modeFRONTIER®. Para completar os dados de entrada, é necessário carregar também o arquivo climático (.cli) como auxiliar ao arquivo de entrada principal (.xml). Essas informações estão ilustradas esquematicamente no fluxo de trabalho do modeFRONTIER®, na Figura 191.

Todavia, antes de passar à elaboração das soluções iniciais possíveis, faz-se necessário definir as condições de contorno desses cenários, estabelecendo-se, assim, as principais restrições que se pretende impor aos projetos.

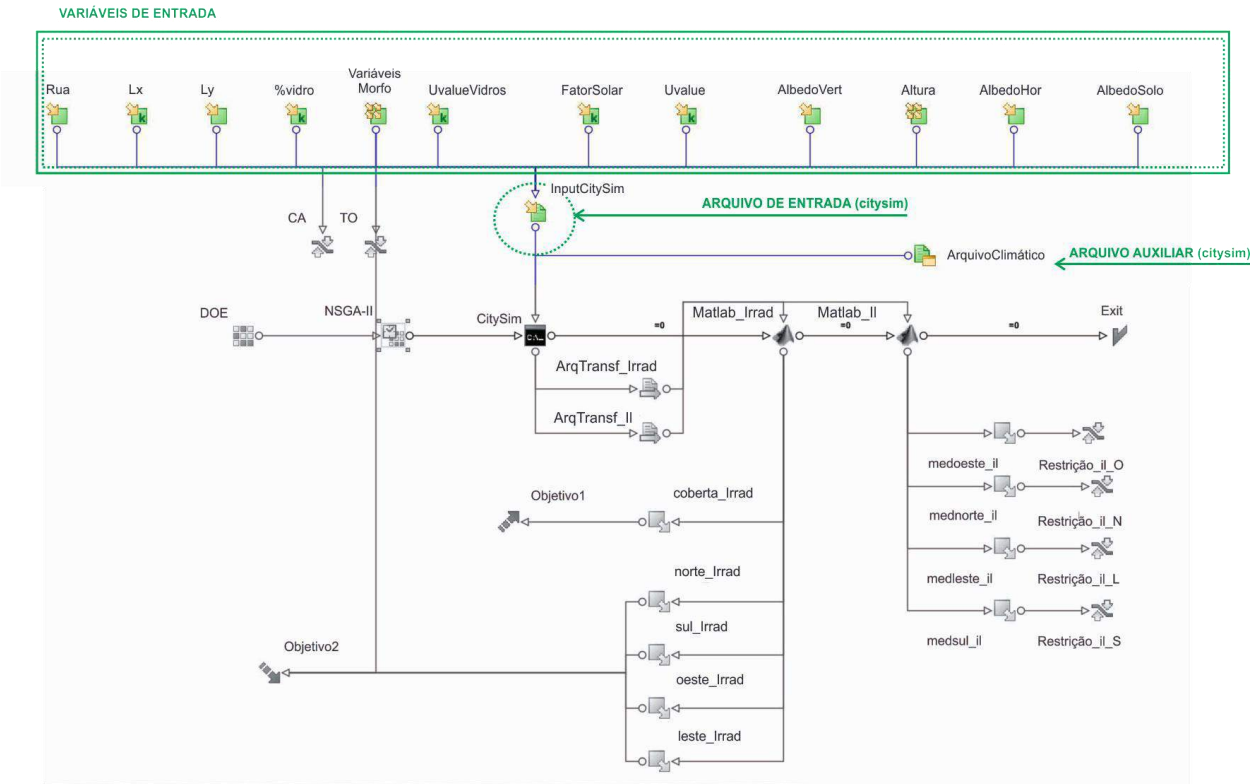


Figura 191 : definição das variáveis e arquivos de entrada do modelo no processo de otimização. Fonte: ilustração do autor, 2013.

IV.3.2.2. Restrições de projeto

As restrições consideradas nesse estudo estão baseadas nos critérios que definem, de um lado, a disponibilidade de iluminância no interior dos espaços na pior condição sazonal de céu (céu encoberto) e, do outro, as principais restrições morfológicas dadas pelo código de urbanismo e edificações para Maceió, para cada classe de referência (conforme descrito no Capítulo II).

A restrição que impõe níveis mínimos de iluminamento para as fachadas, permitirá pesquisar o melhor projeto em termos de minimização da irradiação nas fachadas (minimizando os ganhos solares), sem comprometer o atendimento de valores mínimos de iluminação natural.

Para estabelecer esses níveis de iluminamento, considerou-se a metodologia indicada por scarazzato (1995). No estudo do autor, para **Maceió,** indica-se que o dia e mês de projeto é **11 de agosto**, para o qual são apresentados valores mínimos de Coeficiente de Luz do Dia[58] - CLD (%).Para as condições de céu deste dia, os valores são apresentados para as diferentes orientações de fachada. Para condição de céu parcialmente coberto, tem-se os seguintes valores de CLD: Norte (CLD=1,3%); Leste (CLD=1,5%); Sul(CLD = 1,6%); Oeste (CLD = 1,4%).

O CLD é definido considerando-se pontos interiores situados a 1m da parede de fundo do local, oposta às aberturas, com níveis de iluminâncias de 150 lux como valores mínimos para 70% do tempo de todos os períodos do ano, sem necessidade da iluminação artificial.

[58] A abordagem do Coeficiente de Luz do Dia (CLD), criada por Tregenza and Waters (1983) relaciona a iluminância numa dada superfície proveniente de uma dada parcela do céu (portanto, considerando-se um céu discretizado conforme visto no Capítulo I da tese) e da iluminância normal dessa parcela do céu num plano não obstruído (ver definição em CABUS, 2002).

Ou seja, para identificar a intensidade de luz natural incidente na janela e que proporcionaria as condições acima desejadas tem-se:

Iluminância para fachada Sul =150 (lux) /0,016 = 9.375 lux;
Iluminância para fachada Norte =150 (lux) /0,013 = 11.538 lux;
Iluminância para fachada Leste =150 (lux) /0,015 = 10.000 lux;
Iluminância para fachada oeste =150 (lux) /0,014 = 10.714 lux;

Dessa forma, esses valores foram considerados como valores mínimos para modelagem de otimização realizada. Tal como os valores obtidos para irradiação nas fachadas, os níveis de iluminamento foram estabelecidos numa base anual (média por fachada), estatística realizada também por meio do programa Matlab. Ou seja, os dados de saída de iluminação do Citysim, que são dados horários, são encaminhados por um arquivo de transferência no ambiente computacional do modeFRONTIER® para serem tratados no Matlab. Este último encaminha os valores médios de iluminância de volta ao modeFRONTIER® para verificação em relação às restrições impostas.

No fluxo de trabalho, as restrições do código de edificações são impostas ao conjunto de dados de entrada do modelo e as restrições de iluminação, são impostas aos dados de saída, ao encontro das funções objetivo, conforme mostra a Figura 192.

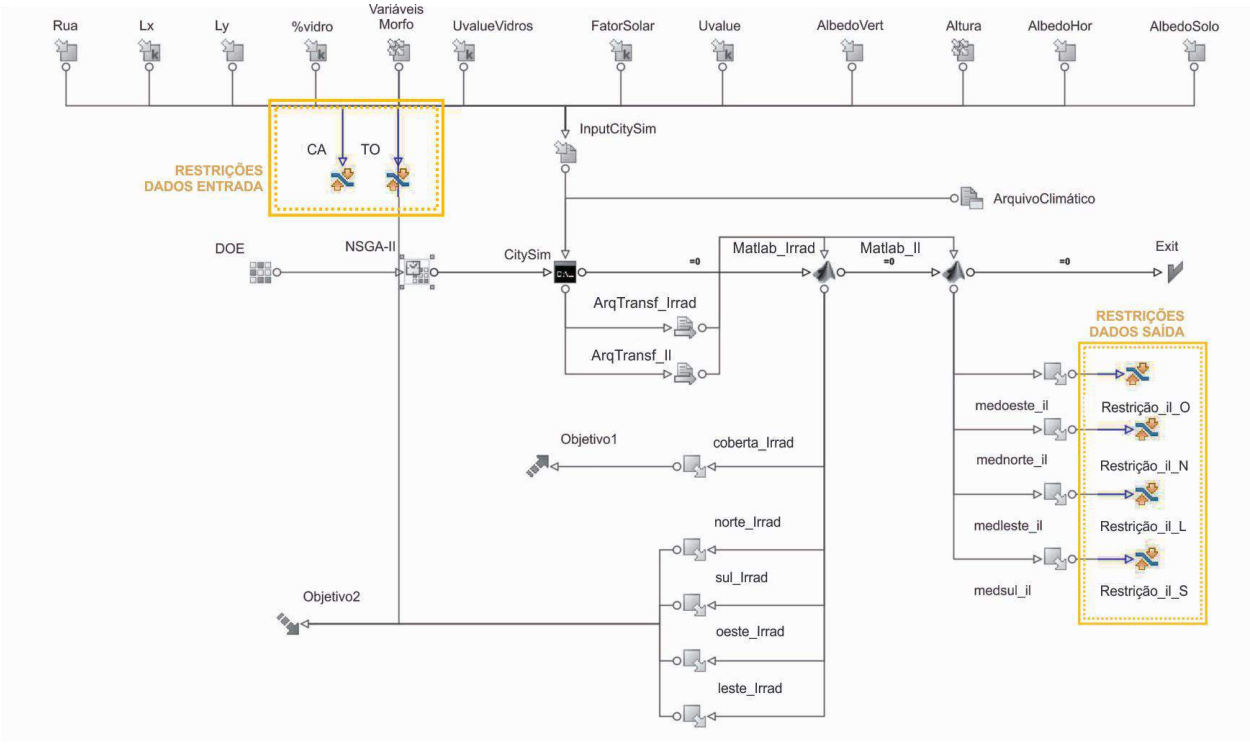


Figura 192 : definição das restrições de projeto no processo de otimização. Fonte: ilustração do autor, 2013.

IV.3.2.3. Definição do método de projeto/otimização

Com as variáveis de entrada e as condições de contorno definidas, passa-se à escolha do método de planejamento de experimentos (DOE) e o método de otimização de projetos. Para iniciar o processo de projeto por otimização, faz-se necessário definir os projetos ou soluções iniciais (população inicial). Para isso, utiliza-se o método de *Sobol*, que tem uma característica pseudo-aleatória de geração de projetos (método aleatório, mas que permite um bom espalhamento inicial dos projetos no espaço paramétrico de busca). Para tanto, foi estabelecida uma população inicial de 50 indivíduos (projetos).

Conforme já esclarecido, será aplicado o método NSGA-II como metodologia de projeto por otimização. Quanto às configurações desse método de otimização, adotou-se 200 gerações, probabilidade de cruzamento de 0,9 e probabilidade de mutação de 0,1. Os valores destes parâmetros são definidos com base em valores utilizados na literatura (MAGNIER e HAGHIGHAT, 2010) (DEB, PRATAP, *et al.*, 2002) (TAN, LEE e KHOR, 2002).

Os projetos gerados inicialmente são, então, encaminhados para simulação no modelo de cálculo Citysim. Este último gera um arquivo de saída com dados horários que são transferidos diretamente para uma rotina de cálculo no programa Matlab que é também acoplado ao programa modeFRONTIER®. A rotina de cálculo consiste em um tratamento de dados, transformando dados horários em estatísticas anuais para análises. A Figura 193 ilustra esquematicamente o fluxo desses processos.

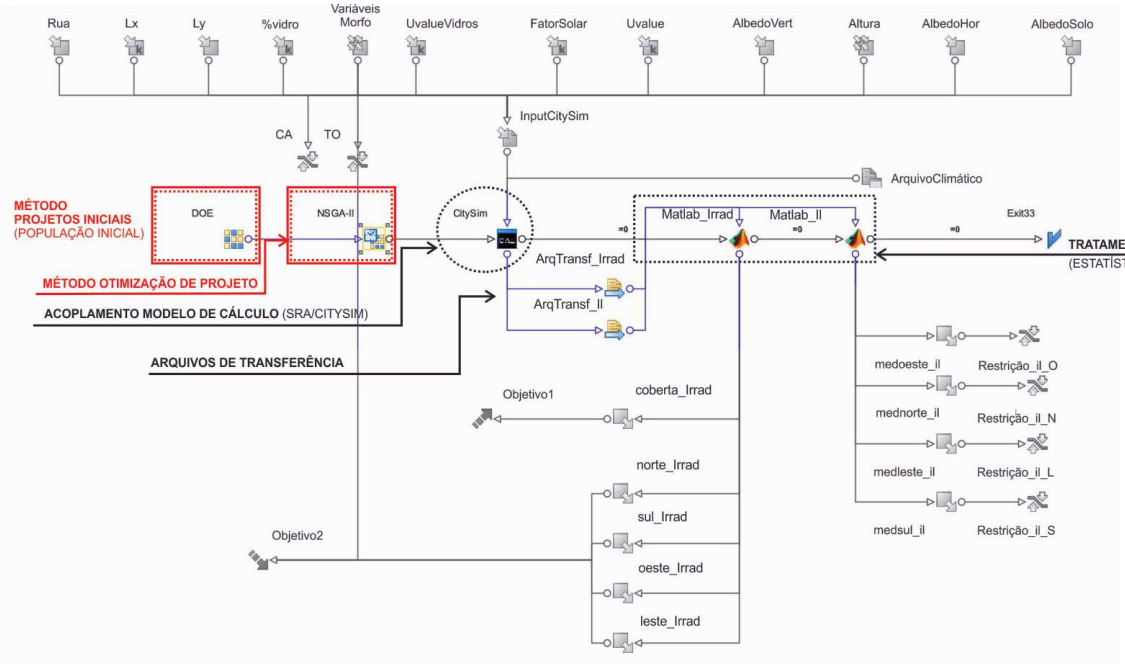


Figura 193 : definição do método de projeto/otimização, acoplamento e tratamento de dados de saída. Fonte: ilustração do autor, 2013.

IV.3.2.4. Variáveis de saída e Funções objetivo

As variáveis de saída de interesse nesse trabalho consistem na iluminância (lux) e a irradiação solar (kWh/m².ano), por orientação de fachada.

Para completar o modelo de otimização, faz-se necessário definir os objetivos para o projeto. A otimização de cada configuração é avaliada por meio de uma medida de eficiência de interesse que caracteriza a função objetivo. A definição adequada da função objetivo é decisiva sobre os resultados de otimização, conforme visto. As variáveis de saída e funções objetivo estão indicadas no fluxo de trabalho do modeFRONTIER®, na Figura 194.

Conforme já indicado anteriormente, uma estratégia principal de otimização é considerada:

- minimizar o saldo de radiação nas fachadas e maximizar o saldo de radiação nas cobertas, a fim de reduzir os ganhos solares térmicos nas fachadas e simultaneamente aumentar o potencial de produção de energia de fonte solar. Impõe-se como restrições de projeto, o atendimento a exigências quanto ao nível de luz natural nessas superfícies verticais.

Achar arg min $f_{obj1} = [\max(I_{bc}), \min(I_{bf})]$

submetido às seguintes restrições:

$E_S \geq 9375\ lux$
$E_N \geq 11538\ lux$
$E_O \geq 10714\ lux$
$E_L \geq 10000\ lux$
$TO \leq 0.70$
$CA \leq 4.0$
I_{bc} = Irradiação de onda curta em cobertas;
I_{bf} = Irradiação de onda curta em fachadas;
$E_{S, N, O, L}$=Iluminância nas quatro fachadas: Sul, Norte, Oeste e Leste.
TO=Taxa de Ocupação.
CA=Coeficiente de aproveitamento.

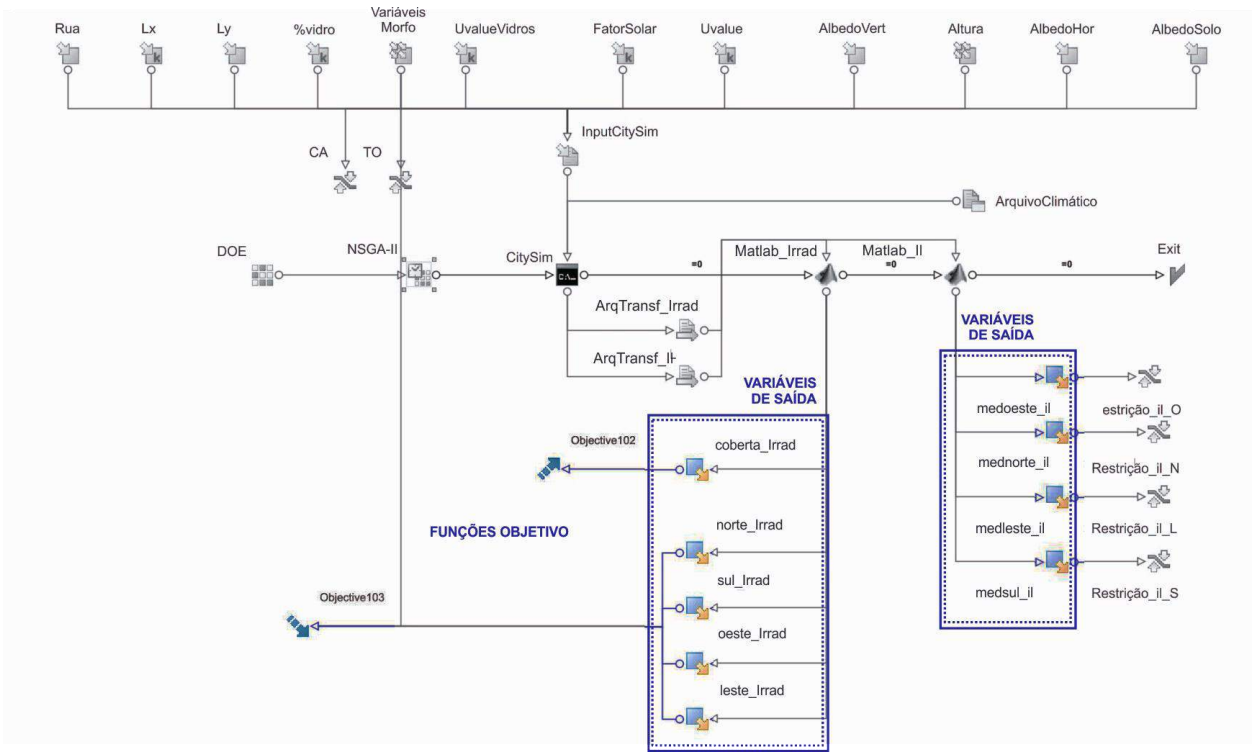


Figura 194 : definição das variáveis de saída e funções objetivos no processo de otimização. Fonte: ilustração do autor, 2013.

Ao fim do processo, uma tabela com todos os projetos resultantes é gerada. Essas informações permitiram realizar as análises e o tratamento dos resultados para elaboração de diretrizes prospectivas para o estudo de caso. Esses resultados são discutidos a seguir.

IV.3.3 Resultados da otimização

Apresenta-se nessa seção uma discussão dos principais resultados obtidos a partir das simulações realizadas para diferentes cenários de otimização. Para cada classe tipo-morfológica, são obtidos dois conjuntos de simulações, considerando ou não as restrições morfológicas do código local de edificações (Tabela 60).

Buscam-se, inicialmente, as melhores configurações dentro do intervalo de densidade imposto pelo código de edificações. Assim, isto permitirá: (i) avaliar configurações ótimas, conservando de certa maneira as principais características tipológicas relacionadas à densidade de cada classe; (ii) identificar o percentual de influência desses parâmetros restritivos na elaboração dos projetos. Além disso, também são requeridos projetos baseados num maior grau de liberdade, a fim de verificar e comparar o desempenho destes com os casos existentes e restritos.

Tabela 60: cenários de otimização avaliados.

Restrições do código de obras	**Otimização** **CLASSE 3 –** CIDADE COMPACTA	**Otimização** **CLASSE 4 –** CIDADE VERTICAL
	Multiobjetivo	**Multiobjetivo**
Restrito	*C3(1)*	*C4(1)*
Irrestrito	*C3(2)*	*C4(2)*

Nessa primeira etapa da apresentação dos resultados, a discussão centra-se nos valores, percentuais e comparativos entre as soluções ótimas encontradas por conjunto de simulações e por classe isoladamente, numa análise mais vertical. Num segundo momento, no Capítulo V desse manuscrito esses resultados serão extrapolados, buscando-se relações e proposições aplicáveis, numa análise mais horizontal.

IV.3.3.1. Otimização para a classe tipológica 4: a cidade vertical

(a) Otimização multiobjetivo restrita pelos parâmetros do código de edificações

A Figura 195 apresenta o resumo das simulações realizadas, indicando proporcionalmente a ocorrência de configurações viáveis e inviáveis. Para as configurações inviáveis, a Figura 196 quantifica proporcionalmente as restrições violadas. É possível observar que as restrições mais críticas correspondem aos fatores de densidade impostos pelo código de edificações: o *coeficiente aproveitamento* e a *taxa de ocupação*, seguidos das restrições de iluminação em fachadas.

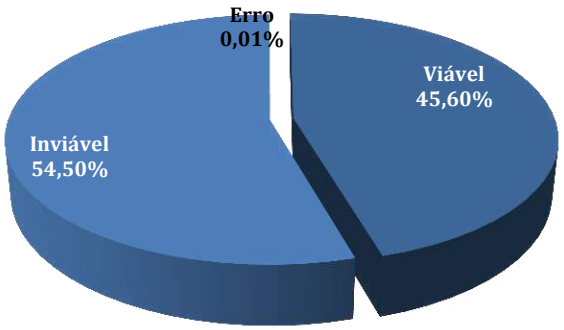


Figura 195: resumo das simulações da primeira otimização.

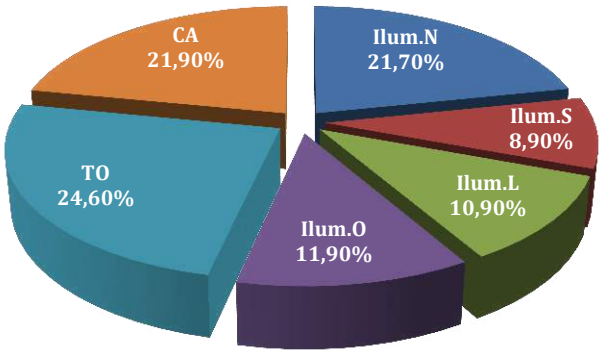


Figura 196: restrições violadas da primeira otimização.

Os resultados dessa primeira otimização estão apresentados na Figura 197 a seguir. Verifica-se que o processo se iniciou em áreas do espaço de busca que apresentam menores valores de irradiação na coberta e maiores na fachada, de forma aleatória. E, que ao longo do processo foram identificados projetos com níveis superiores de irradiação na coberta e menores nas fachadas, respostas de interesse no estudo. Um bom espalhamento das soluções no espaço de busca foi encontrado entre os dois extremos, o que proporciona boa diversidade de projetos.

O conjunto de projetos otimizados viáveis estão destacados com contorno quadrado cinza e as configurações inviáveis em losangos na cor laranja. As configurações inviáveis são os projetos que violam uma ou mais restrições (morfológicas ou de iluminação) impostas. As configurações destacadas na cor verde são as pertencentes à fronteira de Pareto – isto é, as soluções não-dominadas (

Figura 197). Estas configurações são os projetos viáveis que apresentam o melhor desempenho entre as soluções viáveis encontradas ao longo do processo. São os projetos dessa fronteira que são de interesse para as análises desse estudo. Devido a isto e para facilitar a leitura, nas demais apresentações das simulações somente constarão indicadas as fronteiras de Pareto.

Os resultados da presente simulação mostram que para a resposta de irradiação nas cobertas, um ganho de aproximadamente 12% foi alcançado ao longo do processo de otimização; enquanto que para a irradiação em fachadas, a redução alcançada foi de 44%.

Soluções de compromisso variaram entre um extremo do Pareto (*C4(1)1Min*) com 1993 kWh/m².ano de irradiação em cobertas e 338kWh/m².ano em fachadas, e o outro extremo (*C4(1)3Max*) com 2064 kWh/m².ano em cobertas para 538kWh/m².ano em fachadas. Os extremos da frente de Pareto são as configurações não-dominadas que apresentam um compromisso tendo em conta, por exemplo, o maior valor viável de irradiação em cobertas para o menor valor possível nessas condições para as fachadas. Como os projetos dos extremos do Pareto apresentam-se mais distantes de condições mais compromissadas entre os critérios, a Figura 198 passa a ilustrar uma solução ótima intermediária (*C4(1)**2***). Destaca-se, portanto, uma das principais vantagens do algoritmo empregado no processo, que assegura diversidade, eliminando a concentração de projetos numa determinada área do espaço de busca ou nos extremos do Pareto.

Várias soluções intermediárias possuem desempenhos ótimos com valores próximos. De modo que, muitas vezes faz-se necessário a adoção de um ou mais critérios adicionais que permitam a escolha do projeto mais adequado para um determinado contexto. Além disso, existem diversos métodos de análise multicritério que podem ser empregados na ponderação dos resultados obtidos, como os métodos citados no início desse Capítulo: teoria de utilidade multiatributos, os métodos de

prevalência e o método *Analytic Hierarchy Process*. Para obtenção de mais detalhes, ver as referências: (NIJKAMP, RIETVELD e VOODG, 1990), (FISHBURN, 1967), (SAATY, 1977) (POMEROL e BARBA-ROMERO, 1993), (KEENY e RAIFFA, 1976).

Além de um conjunto de soluções específicas que se apresentam como bons projetos e que atendem aos critérios e objetivos impostos, desse processo foi possível também retirar um conjunto de importantes parâmetros que demonstram tendências que podem auxiliar no crescimento urbano da região em estudo.

Um exemplo disso, diz respeito aos valores próximos do limite superior para o albedo de superfícies verticais. O aumento no valor do albedo, conforme visto no estudo de sensibilidade, produz uma contribuição direta bastante significativa na resposta de iluminância nas fachadas. O valor do albedo proposto para as soluções ótimas supera muito os valores encontrados em média para o caso da classe existente. Modificações nesse fator integrado a modificações em outros fatores igualmente significativos, como o prospecto médio, promoveram desempenhos significativamente melhores. Outrossim, impor um gabarito (com limite superior de 7 pavimentos), evitando um desvio padrão muito elevado de altura entre os edifícios, pode induzir a um maior potencial de produção de energia pelas cobertas, com uma demanda (de energia?) associada mais moderada.

A fim de entender o ganho relativo de desempenho obtido com a metodologia de projeto adotada (algoritmo evolutivo), em relação à metodologia tradicional de projeto, comparamos o desempenho das soluções de Pareto, com o desempenho da quadra existente da classe 4, a qual chamaremos de caso de base.

Na Figura 198 é possível visualizar apenas as configurações da fronteira de Pareto junto a tipologia existente, caso de base (em losango laranja). O caso de base original foi encontrado como um projeto inviável devido ao baixíssimo nível médio de luminosidade nas fachadas, o que justificam um nível mais reduzido de irradiação nas fachadas em comparação aos projetos otimizados. Comparando o caso base com os resultados dessa otimização multiobjetivo, encontramos para esta última um ganho de 7% para irradiação em cobertas, com uma perda de apenas 6% na irradiação nas fachadas, porém garantindo níveis bastante superiores de iluminância média, dentro dos valores mínimos impostos. O ganho em média, em relação a esse fator foi de cerca de 80%.

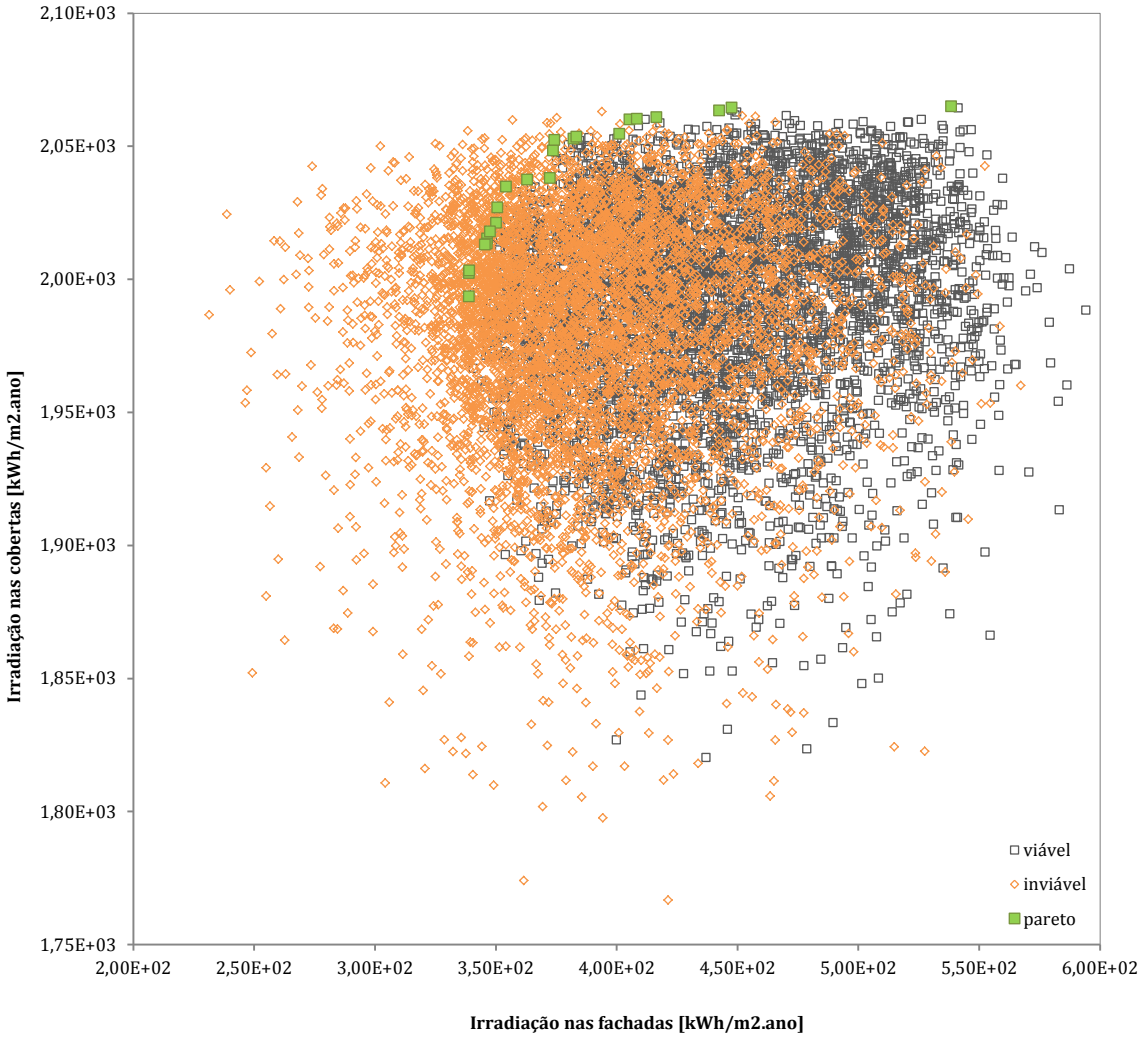
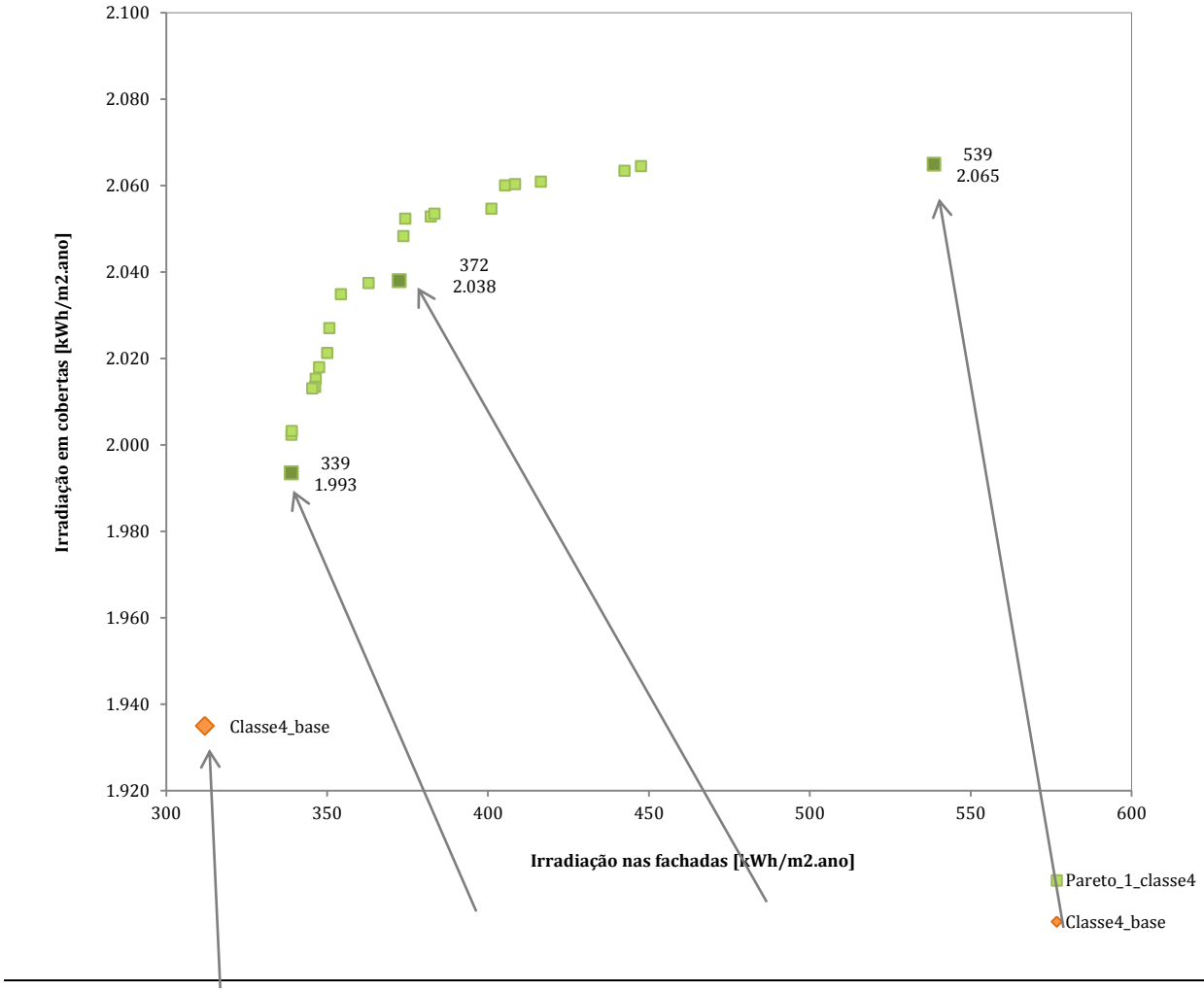
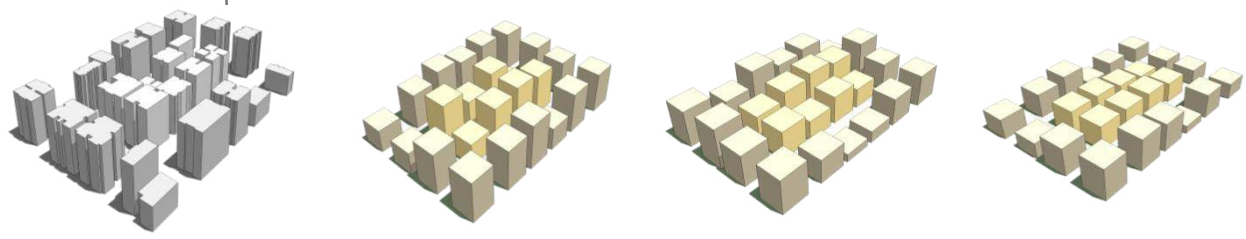


Figura 197*:* resultados da otimização multiobjetivo restrita pelo código de edificações.





Classe4_base	C4(1)1 Min	C4(1)2	C4(1)3 Max
CA=4,2	CA=4,4	CA=4,2	CA=2,7
TO=0,49	TO=0,63	TO=0,59	TO=0,51
NP=8	NP=7	NP=7	NP=5
DP_altura=9	DP_altura=7,3	DP_altura=7,8	DP_altura=5
Prospecto=3,3	Prospecto=2,5	Prospecto=2,4	Prospecto=1,3
Albedo coberta=0,20	Albedo coberta=0,26	Albedo coberta=0,36	Albedo coberta=0,26
Albedo vertical=0,20	Albedo vertical=0,49	Albedo vertical=0,49	Albedo vertical=0,49

Figura 198*:* resultados da otimização multiobjetivo restrita pelos parâmetros do código de edificações.

A solução de maior potencial solar para produção de energia em cobertas, apresenta uma menor densidade total construída (CA=2,7) para uma taxa de ocupação do solo de cerca 50%. Os edifícios têm em média 5 pavimentos ou 15 metros de altura e um desvio padrão de altura (*DP_altura*) mais reduzido, igual a 5m. Essa certa homogeneidade da altura construída, associada ao

menor prospecto encontrado, reduz a quantidade de sombras projetadas na superfície das cobertas, aumentando o potencial solar nas mesmas (Figura 199). O prospecto mais reduzido e um aumento nos afastamentos entre os edifícios, se de um lado, melhora o desempenho nas cobertas, mas piora o desempenho das fachadas, que receberão também maior incidência solar, aumentando a carga térmica de seus espaços.

O projeto que minimiza a incidência nas fachadas, melhora esse desempenho em relação ao projeto anterior em 48% e, representa um piora em termos de desempenho das cobertas em apenas 4%. Esse projeto, em contrapartida, oferece um coeficiente de aproveitamento médio um pouco maior (CA=4,4) para um taxa de ocupação menor (TO=63%). A média do número de pavimento é sete, porém o desvio padrão da altura é bem mais importante, de 7,3m.

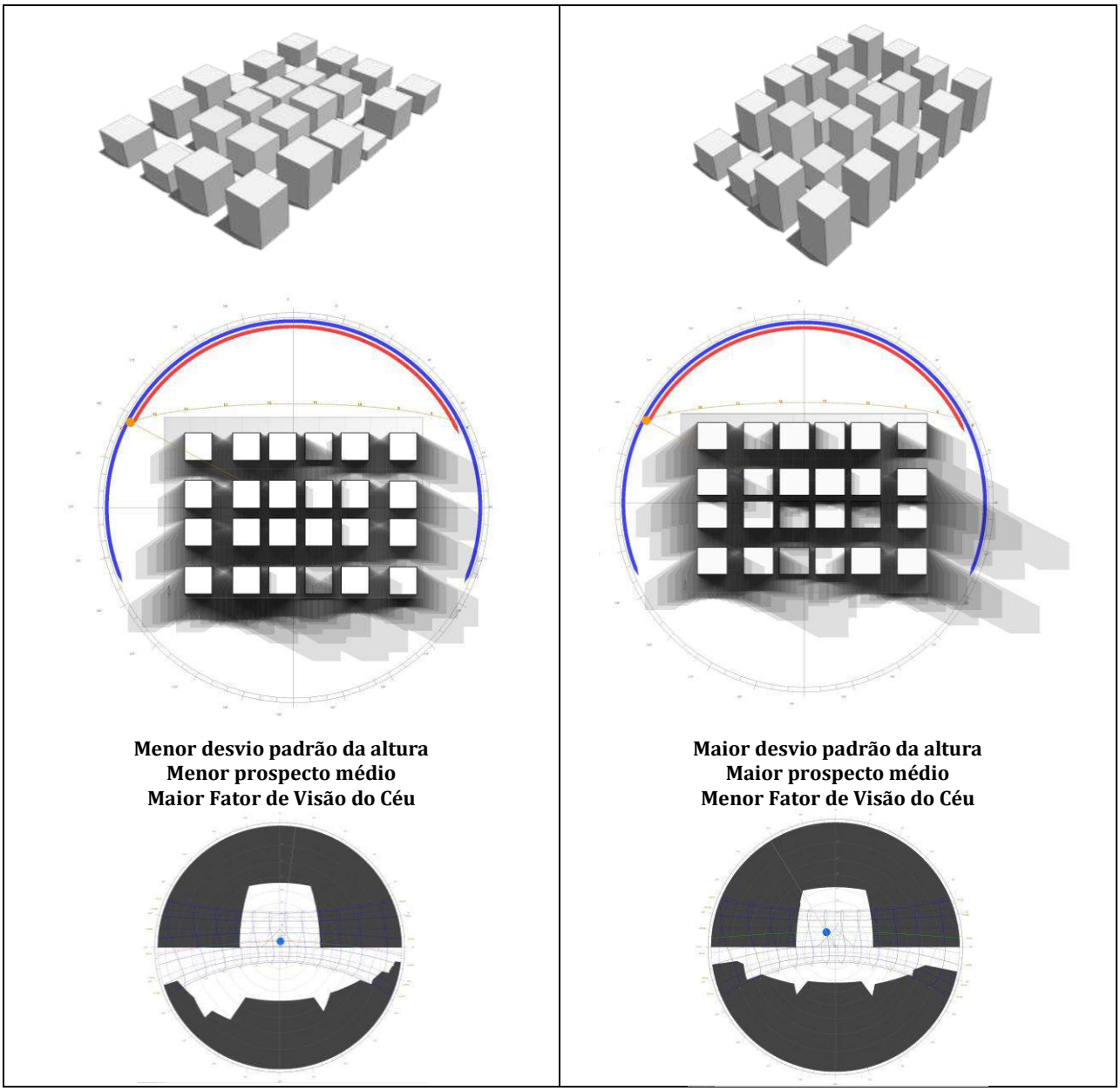


Figura 199 : projeção de sombras sobrepostas do horário das 8h as 17h, para o solstício de inverno .e máscara de obstrução para fachadas dos projetos de maior e menor potencial solar do primeiro Pareto de soluções da classe 4, respectivamente.

Se levarmos em conta os valores mínimos requeridos para a produção via solar das energias térmica ou elétrica fotovoltaica nas cobertas (ver valores requeridos na seção II.5.2 do Capítulo II), qualquer um dos projetos da fronteira de Pareto atenderiam satisfatoriamente. No entanto, quanto mais densamente for habitada a tipologia, maior será também a sua demanda de energia e menor a possibilidade de seu atendimento com o potencial solar previsto.

Um projeto intermediário demonstrou um bom compromisso entre as demais soluções não-dominadas, em relação a esses aspectos. Para um potencial solar apenas 1% menor que a melhor solução encontrada para esse critério e, para uma incidência solar em fachadas de 10% maior, tal configuração apresenta um coeficiente de aproveitamento igual a 4,2 para uma taxa de ocupação do solo de cerca de 60%. Sendo o número médio de pavimentos igual a 7 e o desvio padrão de altura é o maior entre as soluções dos extremos do pareto (DP_altura= 7,8m.). Para responder aos dois critérios simultaneamente, o projeto intermediário apresenta uma diversidade média em termos de altura construída. Essa característica pode emergir como indicador extremamente relevante para prospecção de unidades de vizinhanças com diversidade de uso e ocupação e energeticamente eficientes, tendo em vista os objetivos estudados nesse trabalho. Discussões mais aprofundadas a esse respeito serão apresentadas na segunda parte das discussões dos resultados.

(b) Otimização multiobjetivo sem restrições dos parâmetros do código de edificações

Garantindo os mesmos níveis mínimos de iluminância média em fachadas, procurou-se também estender o espectro de possibilidades de configurações urbanas, desconsiderando, dessa vez, as restrições morfológicas do código local de edificações.

A Figura 200 apresenta o resumo das simulações realizadas para otimização que não considera as restrições do código de edificações. O gráfico abaixo indica em termos proporcionais a ocorrência de configurações viáveis e inviáveis. Para as configurações inviáveis, a Figura 201 quantifica proporcionalmente as restrições violadas. É possível observar que as restrições que apresentaram maior impacto entre as restrições violadas correspondem à iluminância para a fachada leste e oeste.

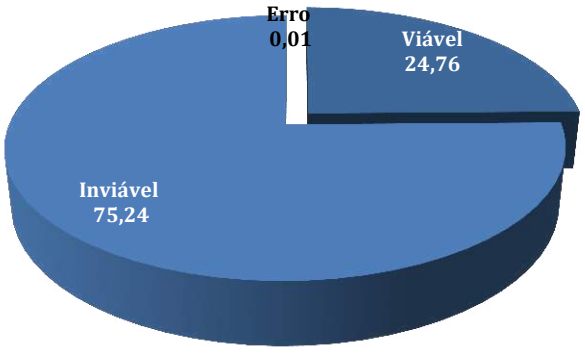


Figura 200: resumo das simulações: otimização multiobjetivo sem restrição do código de edificações.

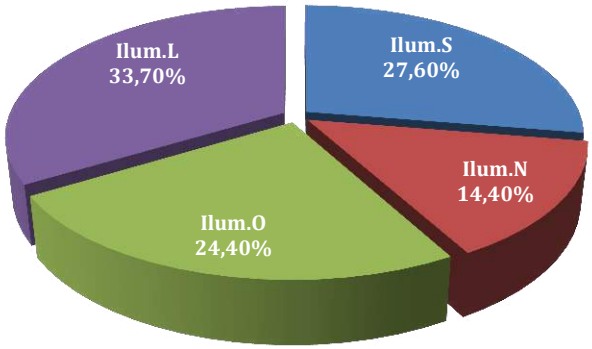
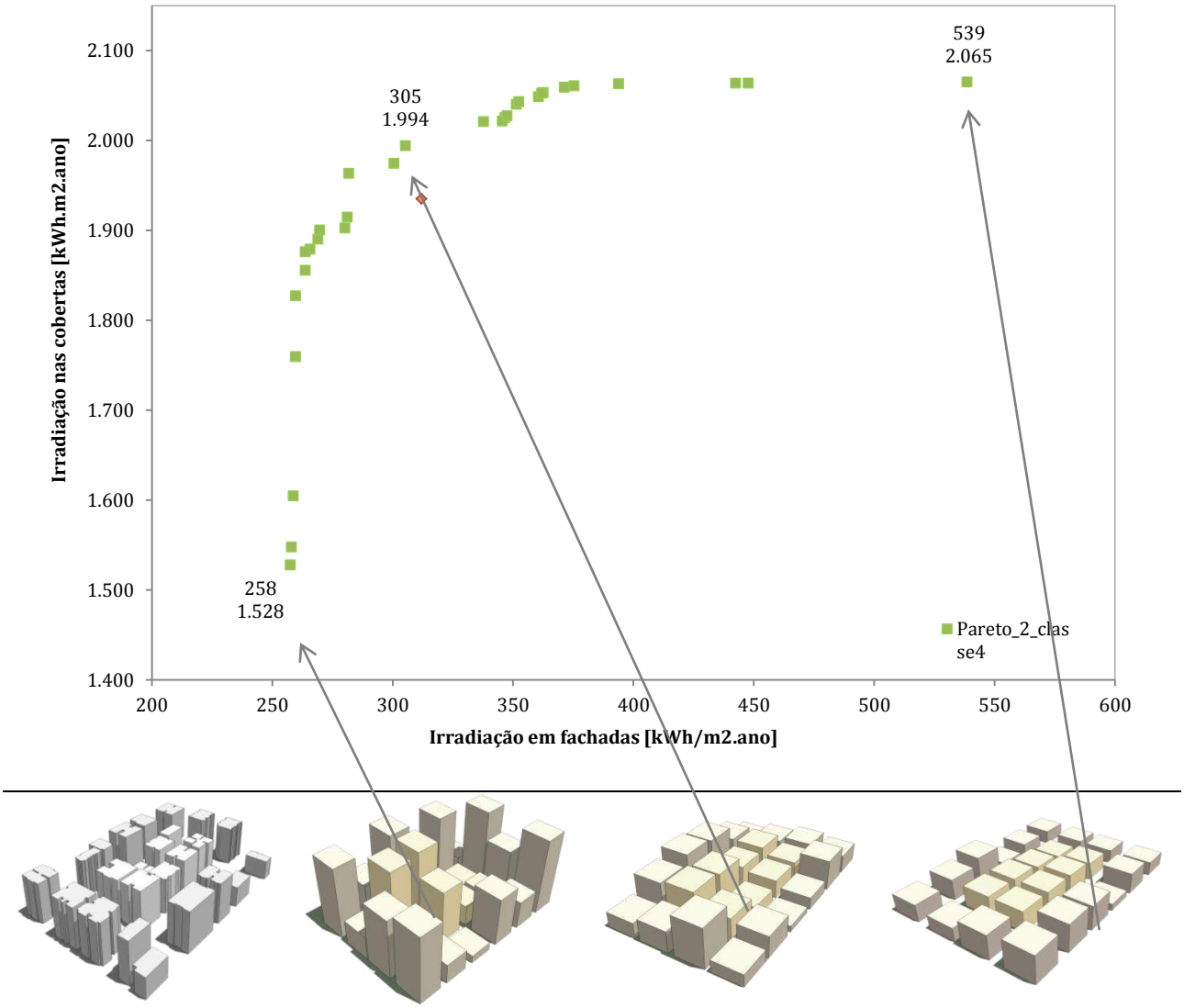


Figura 201: restrições violadas: otimização multiobjetivo sem restrição do código de edificações.

As novas configurações representaram uma redução de 24% na radiação solar nas fachadas, para a mesma irradiação máxima encontrada em cobertas (ver projeto *C4(1)Min* e *C4(2)*). Estes resultados indicam o papel crucial desses atributos de densidade que podem ser trabalhados pelo planejador urbano local, favorecendo tanto as potencialidades ambientais quanto os benefícios econômicos (com o aumento da área total possível de construir, por exemplo).

Soluções de compromisso variaram entre um extremo do Pareto (Min) com 1528 kWh/m².ano de irradiação em cobertas e 258 kWh/m².ano em fachadas, e o outro extremo (Max) com 2065 kWh/m².ano em cobertas para 539 kWh/m².ano em fachadas.

Na Figura 202 é possível visualizar as configurações da fronteira de Pareto junto à tipologia existente. Comparando o caso base com os resultados dessa otimização multiobjetivo, encontramos um ganho de 7% para irradiação em cobertas, e um ganho de apenas 2% no que diz respeito à redução da irradiação solar nas fachadas, garantindo níveis bastante superiores de iluminância, dentro dos valores mínimos impostos.



Classe4_base	C4(2)1 Min	C4(2)2	C4(2)3 Max
CA=4,2	CA=8,1	CA=5,8	CA=3,06
TO=0,49	TO=0,73	TO=0,76	TO=0,58
NP=8	NP=11	NP=8	NP=5
DP_altura=9	DP_altura=19	DP_altura=10	DP_altura=5
Prospecto=3,3	Prospecto=6,6	Prospecto=4,5	Prospecto=1,32
Albedo coberta=0,20	Albedo coberta=0,47	Albedo coberta=0,48	Albedo coberta=0,26
Albedo vertical=0,20	Albedo vertical=0,50	Albedo vertical=0,50	Albedo vertical=0,49

Figura 202: resultados da otimização multiobjetivo sem restrição do código de edificações.

Entre os projetos ótimos gerados, podem ser notadas soluções que se assemelham aos resultados encontrados na primeira simulação multiobjetivo dessa mesma classe. Porém, com soluções bem mais contrastadas, principalmente, quando analisamos o projeto ótimo mínimo. Uma maior verticalidade foi proposta, associada à um maior desvio padrão na altura e um prospecto

médio bastante generoso (Pm=6,6). Dadas essas características, grande parte das superfícies de fachadas e cobertas ficam obstruídas, levando à redução significativa dos níveis de irradiação para os dois critérios (Figura 203). Tal cenário permitiria reduzir ao máximo os ganhos solares pelas fachadas, garantindo um nível mínimo de iluminação e, também possibilitar um aproveitamento em termos de densidade construída total bastante elevado (CA=8,2).

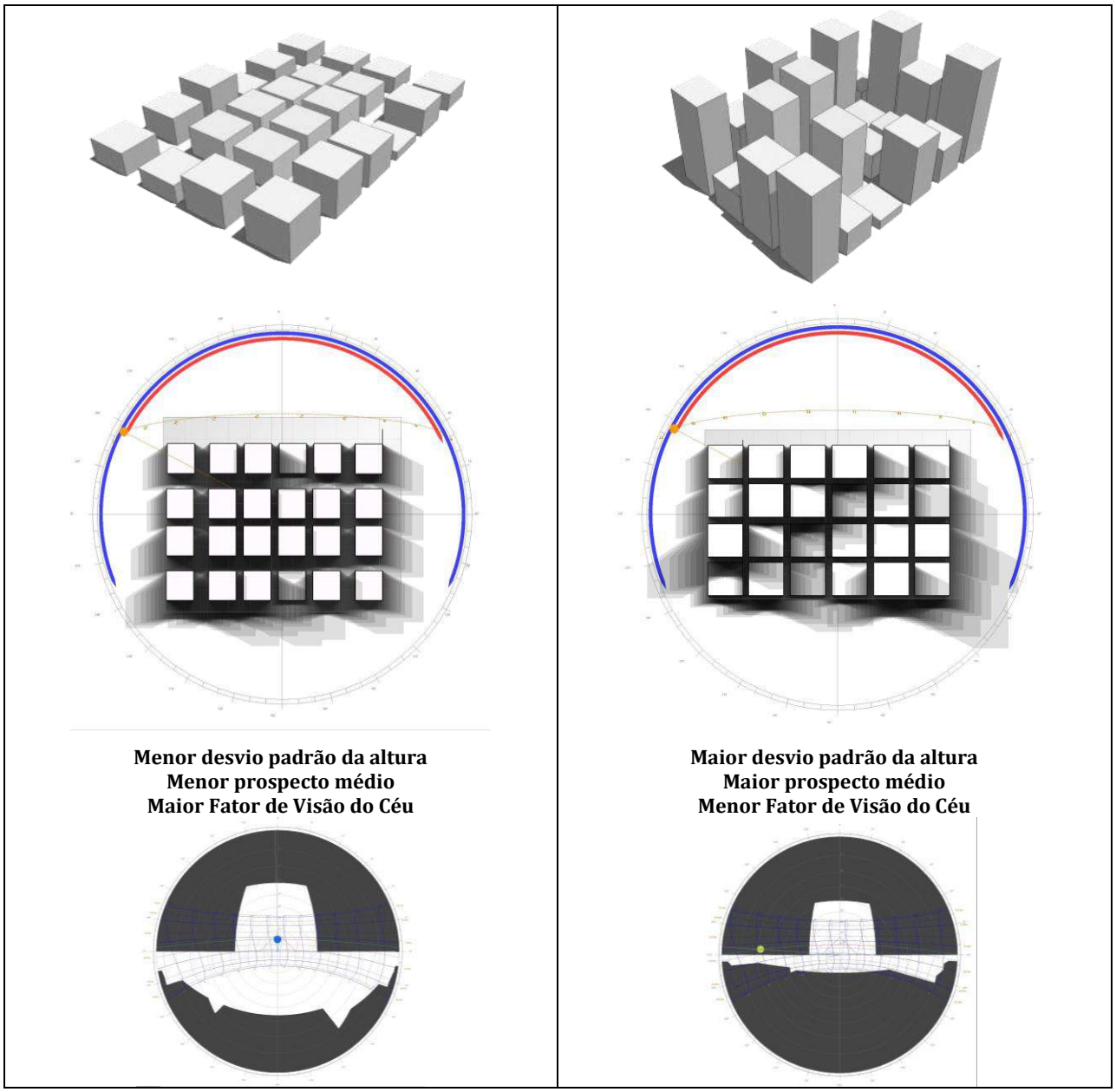


Figura 203 : projeção de sombras sobrepostas do horário das 8h as 17h, para o solstício de inverno .e máscara de obstrução para fachadas dos projetos de maior e menor potencial solar do segundo Pareto de soluções da classe 4, respectivamente.

A solução de maior potencial solar para produção de energia em cobertas, apresenta uma menor densidade total construída (CA=3) para uma taxa de ocupação do solo de cerca 60%. Os edifícios têm em média 5 pavimentos ou 15 m de altura e um desvio padrão de altura bem reduzido,

de 5 m. Essa certa homogeneidade da altura construída, associado ao menor prospecto encontrado nessa simulação, reduz as obstruções em relação à superfície das cobertas, aumentando o potencial solar. O prospecto mais reduzido e um aumento nos afastamentos entre os edifícios, se de um lado, melhora o desempenho nas cobertas, piora o desempenho das fachadas, que receberão também maior incidência solar, aumentando a carga térmica de seus espaços. Ambas soluções de quadras urbanas (correspondentes aos dois extremos do Pareto) poderiam, por exemplo, ser pensadas para o mesmo distrito urbano, de modo integrado. Essas discussões serão retomadas mais adiante.

O gráfico da Figura 204 apresenta as duas frentes de Pareto para a otimização multiobjetivo para as duas situações relacionadas com a consideração ou não da imposição dos parâmetros restritivos do código de edificações local. Verifica-se, uma pequena melhora global no desempenho dos projetos ótimos encontrados na otimização sem as restrições do código e, também uma melhor distribuição das soluções de um extremo a outro da fronteira. Com a possibilidade de aumentar livremente a densidade construída e a verticalidade (sem a restrição do código), torna-se possível buscar soluções de maior prospecto, maior diversidade de altura e, consequentemente menor incidência solar direta nas superfícies. Portanto, o impacto preponderante do prospecto médio no desempenho radiativo das superfícies (horizontais e verticais) destaca-se mais uma vez.

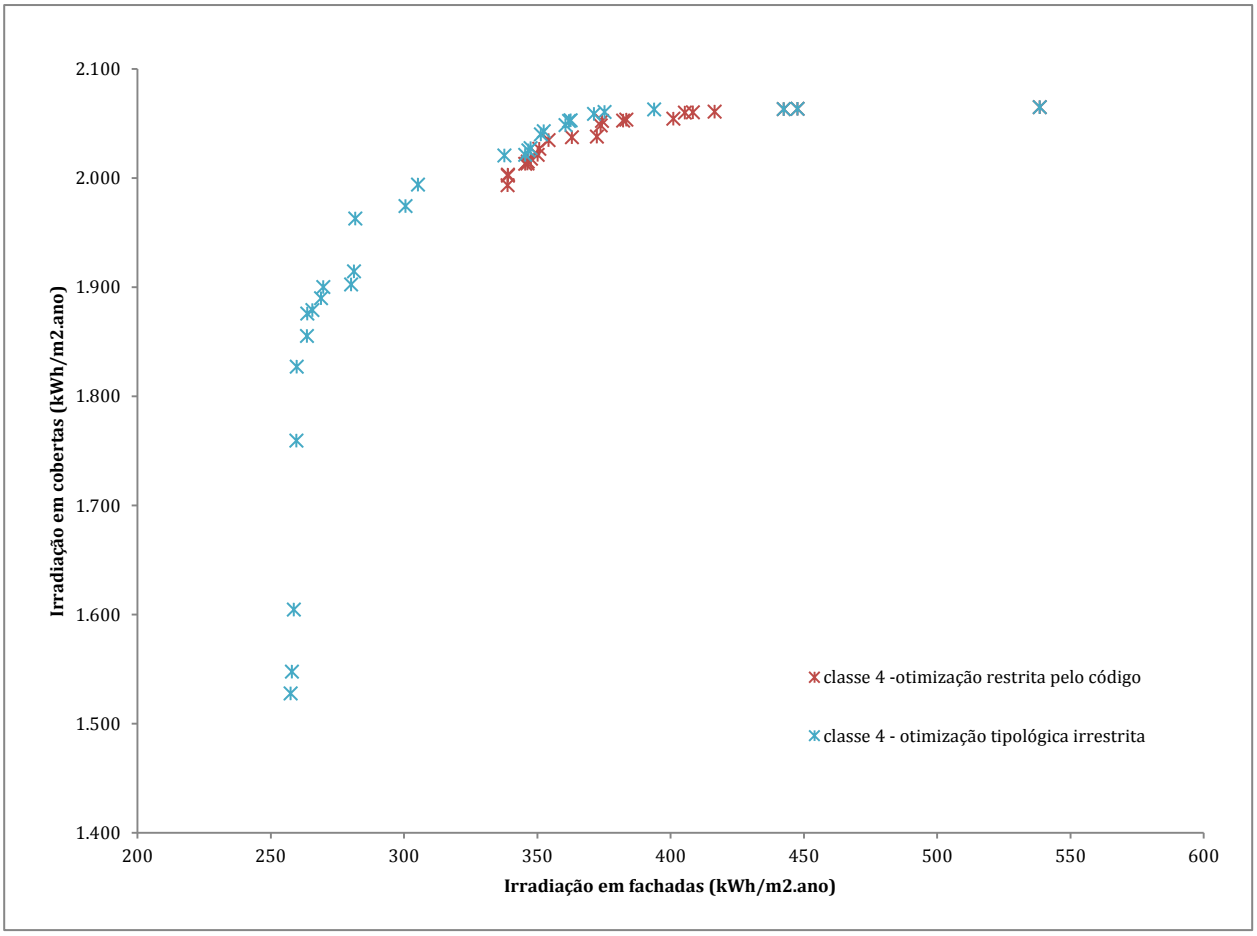


Figura 204 : Projetos da frente de Pareto para os dois cenários de otimização multiobjetivo da classe 4.

Comparando ainda os três exemplares de tipologia (caso base e duas configurações do extremo do Pareto dadas pelo primeiro processo de otimização multiobjetivo), observa-se que quanto maior a área e menor obstrução no plano de captação (a coberta), maior será a irradiação recebida nas cobertas. As três tipologias urbanas indicadas na Figura 205 consistem em três formas

possíveis de aproveitamento do mesmo intervalo de densidade construída regulamentar (impostos pelo atual código de edificações). Ou seja, é possível pensar a evolução das várias áreas dos bairros da planície litorânea (em processo de crescimento e verticalização) com maior ou menor potencial de produção de energia solar local, apenas modificando a estratégia de uso dos parâmetros de densidade. Para um mesmo Coeficiente de Aproveitamento e mesma Taxa de Ocupação, por exemplo, várias configurações que extremizam as funções objetivos podem ser pensadas.

No entanto, outros parâmetros cruciais no potencial radiativo das superfícies, mas que não são contemplados ou não o são de forma integrada nas normas locais hoje, dizem respeito ao albedo e à relação entre a distância total que separam os edifícios e altura dos mesmos (prospecto), respectivamente.

Combinando estratégias tais como: grandes áreas de captação, reduzida obstrução do céu e do sol para as cobertas (adotando prospectos reduzidos)– é possível gerar um desempenho que venha atender a um potencial de captação/produção de energia via solar em melhor compromisso possível com a minimização da irradiação recebida nas fachadas.

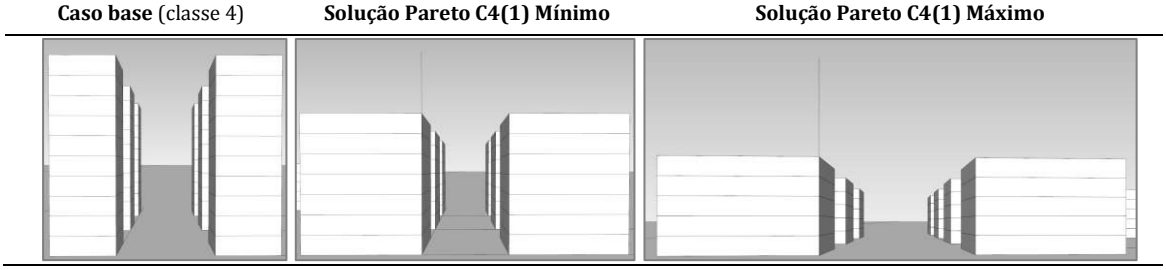


Figura 205 : esquema das três tipologias evidenciando diferentes prospectos para possíveis diferentes estratégias.

A Tabela 61 abaixo resume o intervalo de valores das variáveis para as soluções encontradas nos dois processos, comparando-os com o caso base, os intervalos iniciais e as restrições morfológicas do código.

Tabela 61: resumo dos intervalos, restrições e valores encontrados para as configurações, original e otimizadas.

Fatores	Limites	Caso Base	Restrições do código		Soluções ótimas C4(1)		Soluções ótimas C4(2)	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
Albedo cobertas	0,05;0,5	0,2	-	-	0,26	0,26	0,47	0,26
Albedo fachadas	0,05;0,5	0,2	-	-	0,49	0,49	0,50	0,49
Profundidade (m)	8;40	15	-	-	22,0	18,0	20,0	24,0
Largura (m)	8;40	15	-	-	16,0	18,0	16,0	22,0
Altura (m)	6;45	30	-	-	22,0	16,0	33,0	16,0
Afastamentos eixo X e Y (m)	1,5;3,0	3,0	1,5	3,0	6,0;2,0	6,0;6,0	6,0;1,0	6,0;6,0
Rua (m)	9;15	9,0	9,0	-	9,0	12,0	5,0	12,0
NP	2;15	8	10	15	7	5	11	5
CA	2,0;4,0	4.2	-	4,0 (4,5)	4,4	2,7	8,1	3,06
TO	0,35;0,7	0,49	0,50	0,70	0,63	0,51	0,73	0,58
Cf	0,05;5,0	0,30	-	-	0,26	0,29	0,26	0,24
Pm	0,5;10	3,3	-	-	2,5	1,3	6,6	1,32
Área construída (coberta) média	-	225	-	-	352	324	320	528
Área de envoltória média	-	1800	-	-	2043	1467	2696	1988
Irrad. solar cobertas (kWh/m².ano)	-	1935			1993	2065	1528	2065
Irrad. solar fachadas (kWh/m².ano)		312			339	538	258	539
Irrad. IV fachadas (kWh/m².ano)		5,0			12,4	-1,0	69,9	-2,0
Irrad. IV cobertas (kWh/m².ano)		-54,7			-41,3	-80,3	-38,3	-86,1
Iluminância fachada oeste (Lux)		1.925			11.078	16.197	12.354	16.197
Iluminância fachada norte (Lux)		2.002			12.491	14.942	10.519	14.943
Iluminância fachada leste (Lux)		1.955			11.444	13.498	12.247	13.498
Iluminância fachada sul (Lux)		1.855			10.006	15.679	10.035	15.680

IV.3.3.2. Otimização para a classe tipológica 3: cidade compacta

(a) Otimização multiobjetivo restrita pelos parâmetros do código de obras

A Figura 206 apresenta o resumo das simulações realizadas para a otimização multiobjetivo referente à classe 3. Nesse primeiro conjunto de simulações, foram considerados os parâmetros restritivos do código de edificações. O gráfico abaixo indica em termos percentuais a ocorrência de configurações viáveis e inviáveis. As configurações inviáveis e seus percentuais de restrições violadas são objeto da Figura 207. Observa-se que, contrariamente do que ocorreu para as simulações da classe 4, neste caso as restrições em termos de densidade (advindas das restrições do código) não foram as que mais produziram impacto na inviabilidade dos projetos. As restrições mais violadas corresponderam aos níveis mínimos de iluminância nas fachadas. Esse resultado pode ser explicado pelas próprias características que definem a tipologia geminada em estudo (classe 3). A inexistência de recuos laterais neste tipo construído, tornam a viabilidade dos projetos mais restrita na busca por soluções voltadas para atender aos níveis mínimos de iluminamento requeridos.

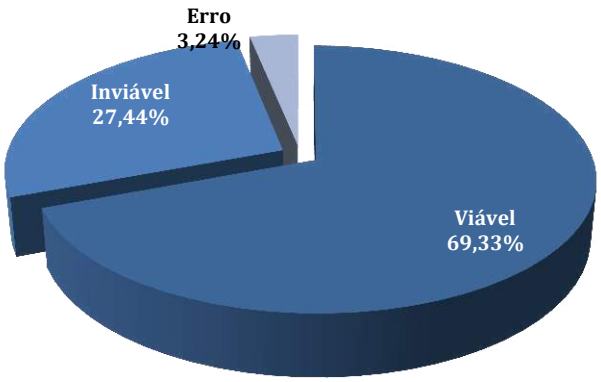


Figura 206: resumo das simulações: otimização multiobjetivo para a classe 3, restrita pelo código de edificações.

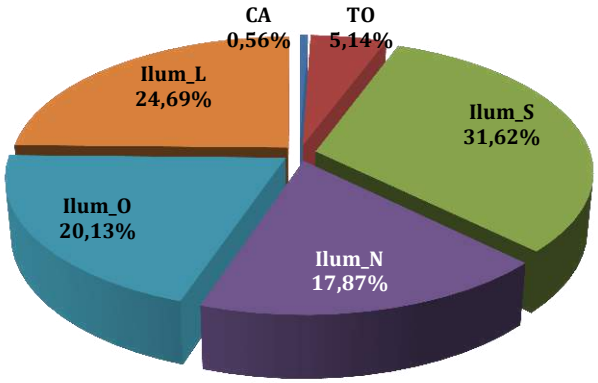
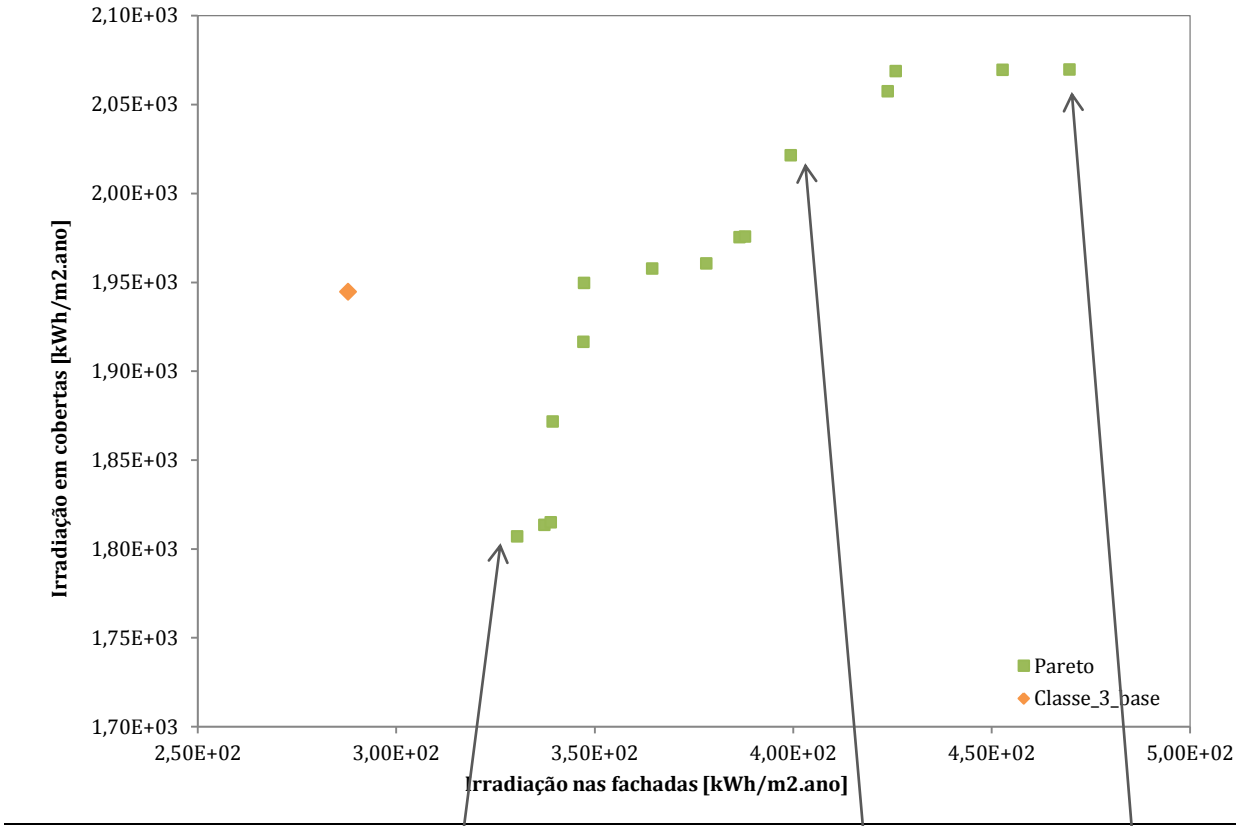


Figura 207: restrições violadas: otimização multiobjetivo para a classe 3, restrita pelo código de edificações.

As soluções de compromisso variaram entre um extremo do Pareto (Min) com 1810 kWh/m².ano de irradiação em cobertas e 331 kWh/m².ano em fachadas, e o outro extremo (Max) com 2070 kWh/m².ano em cobertas para 470 kWh/m².ano em fachadas.

Na Figura 208 é possível visualizar apenas as configurações da fronteira de Pareto junto à tipologia existente. Comparando o caso base com os resultados dessa otimização multiobjetivo, encontramos um ganho de 6% para irradiação em cobertas, e uma perda de apenas 13% na redução da irradiação solar nas fachadas, porém garantindo níveis bastante superiores de iluminância, dentro dos valores mínimos impostos.

Entre os projetos encontrados nos extremos da fronteira, destaca-se uma importante variabilidade no desvio da média da altura construída. Essa variabilidade permitiu a geração de formas que podem representar tipologias bastante diversificadas, em função dos objetivos e dos pesos que podem ser atribuídos aos mesmos. Quanto menor o desvio padrão da altura, maior a irradiação solar nas cobertas, maior o potencial de aproveitamento da energia solar. Projetos intermediários mostraram-se bastante heterogêneos, em termos de altura construída (Figura 210), apresentando em média um excelente potencial solar (apenas 4% que a solução do extremo do Pareto que maximiza esse critério) para um ganho em termos de redução da irradiação em fachadas, de 17%. Essa solução intermediária está indicada na Figura 208.



Classe3_base	C3(1)1 Min	C3(1)2	C3(1)3 Max
CA=2,4	CA=2,3	CA=2,1	CA=1,0
TO=0,75	TO=0,74	TO=0,76	TO=0,80
NP=3	NP=3	NP=2	NP=1
DP_altura=1,0	DP_altura=3,1	DP_altura=3,1	DP_altura=1,0
Prospecto=1,2	Prospecto=2,9	Prospecto=1,6	Prospecto=1,3
Albedo coberta=0,15	Albedo coberta=0,20	Albedo coberta=0,21	Albedo coberta=0,2
Albedo vertical=0,15	Albedo vertical=0,45	Albedo vertical=0,24	Albedo vertical=0,2

Figura 208: resultados da otimização multiobjetivo restrita pelos parâmetros do código de edificações. Fonte: ilustração do autor.

Se compararmos essa solução de compromisso com o caso base, identificaremos uma perda de 26% em termos de redução da irradiação nas fachadas. A classe 3 originalmente seria mais eficiente na minimização dos ganhos solares indesejáveis nesse contexto climático e representaria um potencial solar menor em apenas 2%, quando comparado ao projeto ótimo intermediário. No entanto, sabe-se que o caso base examinado apresenta um nível médio de iluminação insuficiente, conforme os valores mínimos estabelecidos na literatura, o que o torna um projeto inviável, como mostra o gráfico da Figura 208.

A dificuldade maior encontrada no projeto dessa classe tipológica diz respeito à sua elevada contiguidade, ou seja, sua forma urbana contínua, geminada, já que essa condição pode impor (como

é possível verificar no desempenho obtido para o caso base) concomitantemente à uma grande redução da incidência solar média nas fachadas, uma redução drástica em termos de iluminação nas mesmas. A fim de não violar as restrições de iluminamento impostas para as fachadas, a solução encontrada para os projetos ótimos da fronteira foi de garantir uma variação estratégia na altura das construções e um prospecto menor. Essa diferença na altura construída possibilita que os edifícios da quadra urbana examinada tenham uma fração de todas as suas fachadas expostas ao exterior.

Com edificações mais baixas e um prospecto igual à 1,3, a quadra urbana do projeto que maximiza o potencial solar (*C3(1)Max*), por exemplo, recebe menor influência da máscara de sombra do entorno e, suas fachadas, recebem consequentemente maior incidência solar. O desvio padrão na altura de 1m (Figura 209), permite que a média da iluminância na quadra seja garantida. Dado esse conjunto de características morfológicas que produzem uma tipologia de maior coeficiente de forma, ou seja, maior superfície exposta ao exterior em relação ao volume construída (Cf=0,9), um albedo elevado poderia produzir um excesso de reflexão nas superfícies verticais, aumentando a irradiação nas fachadas. Por essa razão, nessa solução, o albedo ótimo encontrado foi o menor entre os projetos ótimos da fronteira.

Já para o cenário onde foi possível alcançar um melhor desempenho para as fachadas (*C3(1)Min*), a média de altura alcança o limite superior do intervalo estabelecido para essa tipologia. Com isso, o aumento do prospecto médio permitiu aumentar a obstrução à incidência direta nas superfícies verticais, reduzindo a irradiação solar nas mesmas. Com um desvio padrão da altura média maior e um albedo máximo para as superfícies verticais, a iluminância média da quadra é garantida nos níveis mínimos impostos. No entanto, em consequência, principalmente, do aumento significativo no desvio da altura (*DP_altura)*, verifica-se uma redução na média da insolação nas cobertas, pois estas acabam por receber em média mais tempo de sombra em suas superfícies. Ainda assim, o nível de irradiação nas cobertas para esse compromisso (1890 kWh/m².ano) pode ser bastante satisfatório, tendo em conta os valores mínimos recomendados na literatura.

Lembra-se que essas soluções foram encontradas após a convergência do algoritmo para um certo número de iterações delimitado. Os projetos ditos ótimos encontrados, são, portanto, ótimos no contexto de avaliação determinado nesse estudo. Com um aumento na probabilidade de mutação ou no número de gerações ou mesmo da população incial, poderíamos, talvez, encontrar outro conjunto de soluções não-dominadas com desempenho melhor ou não.

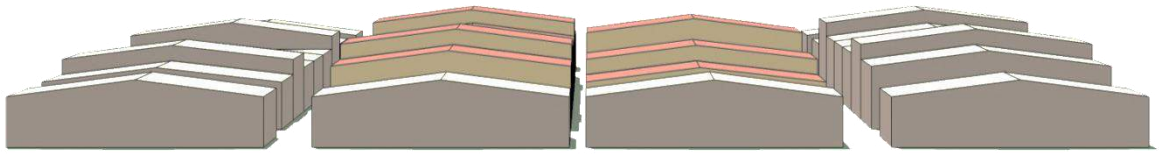


Figura 209 : vista da tipologia *C3(1)Max* gerada pelo processo de otimização, mostrando a variação obtida na altura média.

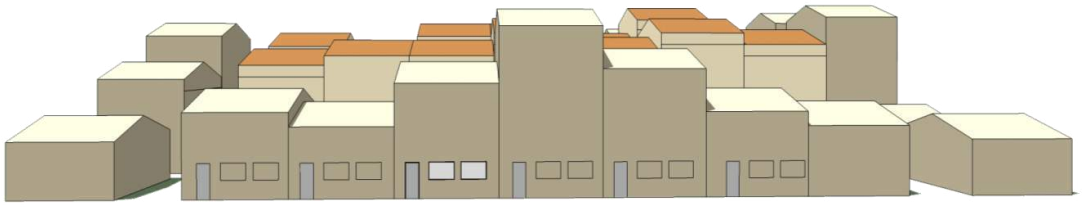


Figura 210 : vista da tipologia *C3(1)* gerada pelo processo de otimização, mostrando a variação obtida na altura média das construções. Fonte: ilustração do autor.

(b) Otimização multiobjetivo sem restrição dos parâmetros do código de obras

A Figura 211 apresenta o resumo das simulações realizadas para otimização multiobjetivo para cenários cuja densidade não possui restrições impostas pelo código local. O gráfico abaixo indica percentualmente a ocorrência de configurações viáveis e inviáveis obtidas. Para as configurações inviáveis, a Figura 212 quantifica também proporcionalmente as restrições violadas. Observa-se um certo equilíbrio na participação dos parâmetros restritivos de iluminância, com uma fração um pouco maior para a iluminância na fachada sul. Isso pode ser explicado pelo tempo de insolação nas fachadas que é menor para a fachada sul em relação às demais ao longo de um ano. Portanto, a obtenção de projetos viáveis em relação a esse critério, ou seja, que atendam o nível requerido de iluminação para uma fachada que já tem menor incidência no ano, será um pouco mais limitado.

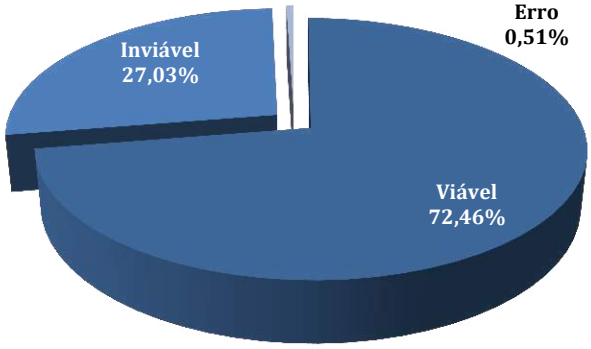


Figura 211: resumo das simulações: otimização multiobjetivo restrita pelo código de edificações.

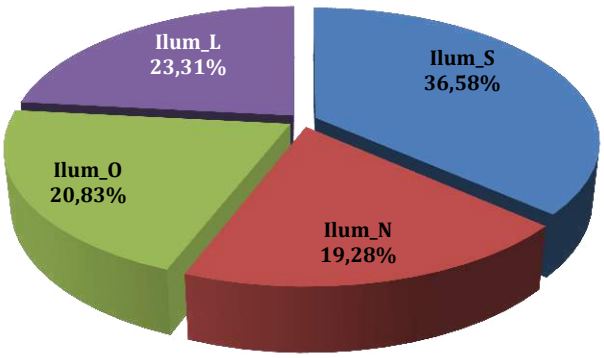


Figura 212: restrições violadas: otimização multiobjetivo restrita pelo código de edificações.

Soluções de compromisso variaram entre um extremo do Pareto (Min) com 1580 kWh/m².ano de irradiação em cobertas e 336 kWh/m².ano em fachadas, e o outro extremo (Max) com 2070 kWh/m².ano em cobertas para 470 kWh/m².ano em fachadas.

Na Figura 213 é possível visualizar apenas as configurações da fronteira de Pareto junto à tipologia existente. Comparando o caso base com os resultados dessa otimização multiobjetivo, encontramos um ganho de 6% para irradiação em cobertas, e uma perda de apenas 13% de redução da irradiação solar nas fachadas, porém garantindo níveis bastante superiores de iluminância, dentro dos valores mínimos impostos.

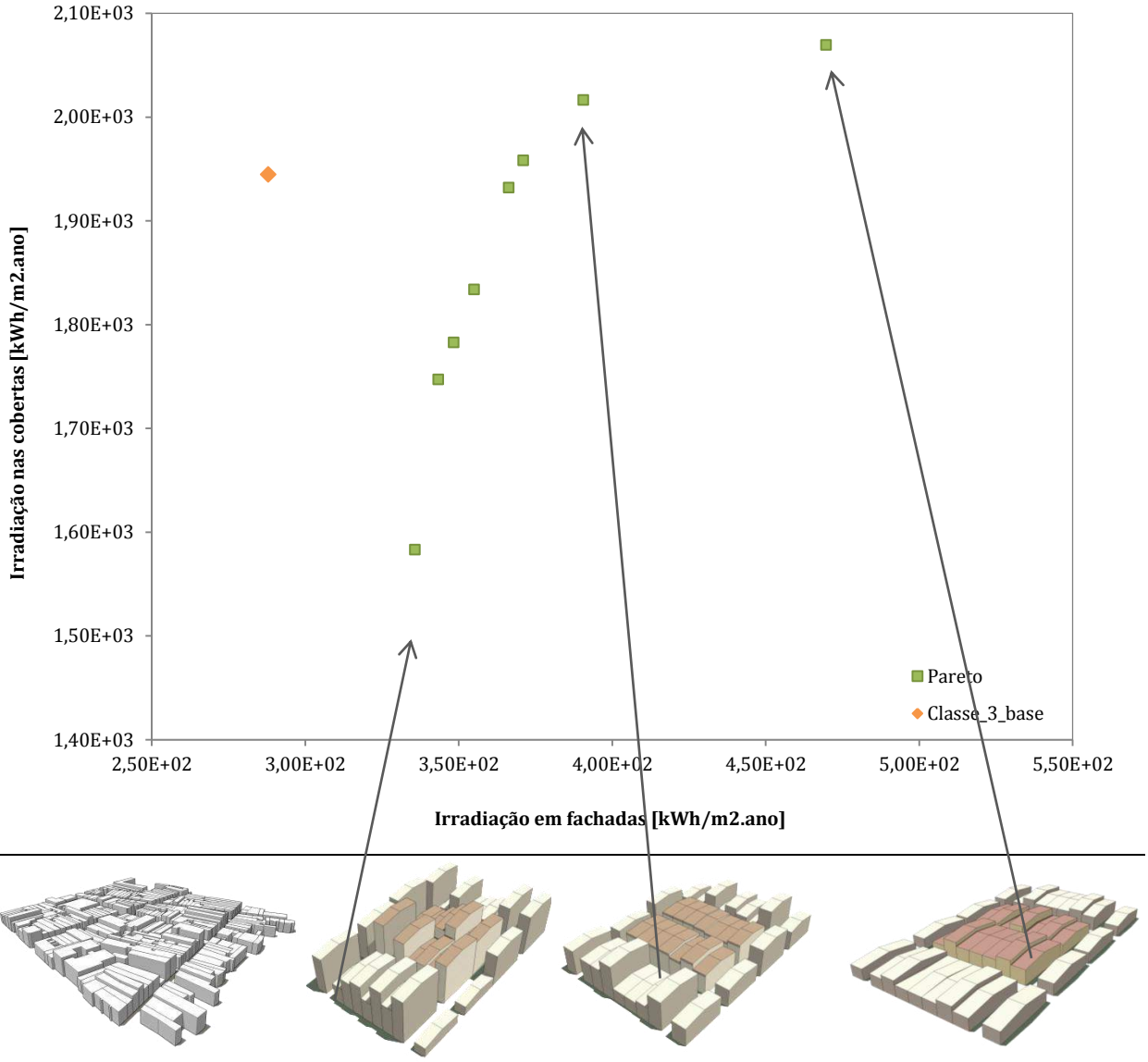
Nessa segunda rodada de simulações para os mesmos objetivos, o mesmo projeto do extremo que maximiza o potencial solar foi encontrado. E, o projeto do outro extremo, apresentou desempenho inferior.

Para os projetos encontrados nos extremos da fronteira, as mesmas observações da simulação anterior podem ser feitas. Destaca-se uma importante variabilidade no desvio da média da altura construída que permitiu a geração de formas que podem representar tipologias bastante diversificadas, em função dos objetivos e dos pesos que podem ser atribuídos aos mesmos. Quanto menor o desvio padrão da altura, maior a irradiação solar nas cobertas, maior o potencial de aproveitamento da energia solar.

Projetos intermediários mostraram-se, todavia, mais eficientes que os encontrados na primeira simulação multiobjetivo da classe 3. Também bastante heterogêneos, em termos de altura construída (Figura 213), estes podem apresentar, em média, um excelente potencial solar (apenas 2% que a solução do extremo do Pareto que maximiza esse critério) para um ganho, em termos de redução da irradiação em fachadas, de 17%.

Se compararmos essa solução de compromisso com o caso base, identificaremos um valor de 26% em termos de redução da irradiação nas fachadas. A classe 3 originalmente seria mais eficiente

na minimização dos ganhos solares indesejáveis nesse contexto climático e representaria um potencial solar menor em apenas 2%, quando comparado ao projeto ótimo intermediário. No entanto, sabe-se que o caso base examinado apresenta um nível médio de iluminação insuficiente, conforme os valores mínimos estabelecidos na literatura, o que o torna um projeto inviável, como mostra o gráfico da Figura 213.



Classe3_base	C3(2)1 Min	C3(2)2	C3(2)3 Max
CA=2,4	CA=2,5	CA=2,8	CA=1,0
TO=0,75	TO=0,74	TO=0,75	TO=0,80
NP=3	NP=3	NP=4	NP=1
DP_altura=1,0	DP_altura=4,5	DP_altura=3,2	DP_altura=1,0
Prospecto=1,2	Prospecto=2,9	Prospecto=1,9	Prospecto=1,3
Albedo coberta=0,15	Albedo coberta=0,2	Albedo coberta=0,40	Albedo coberta=0,2
Albedo vertical=0,15	Albedo vertical=0,46	Albedo vertical=0,31	Albedo vertical=0,2

Figura 213: resultados da otimização multiobjetivo sem restrição do código de obras. Fonte: ilustração do autor.

O gráfico da Figura 214 sobrepõe as duas frentes de Pareto para a otimização multiobjetivo com e sem a imposição dos parâmetros restritivos do código de edificações local, para a classe 3.

Verifica-se que as duas fronteiras interceptam-se e destaca-se um melhor desempenho no extremo próximo aos níveis mínimos de irradiação da primeira fronteira de projetos analisada (com restrição do código local). Ainda, observam-se soluções de compromisso mais eficientes da segunda simulação no outro extremo do Pareto. A desconsideração das restrições impostas pelo código para essa classe teve portanto, menor influência nos resultados que para a classe 4. Esse resultado pode ser cruzado com os resultados apresentados no gráfico da Figura 212, onde se verifica uma menor influência na limitação dos projetos pelos parâmetros restritivos do código.

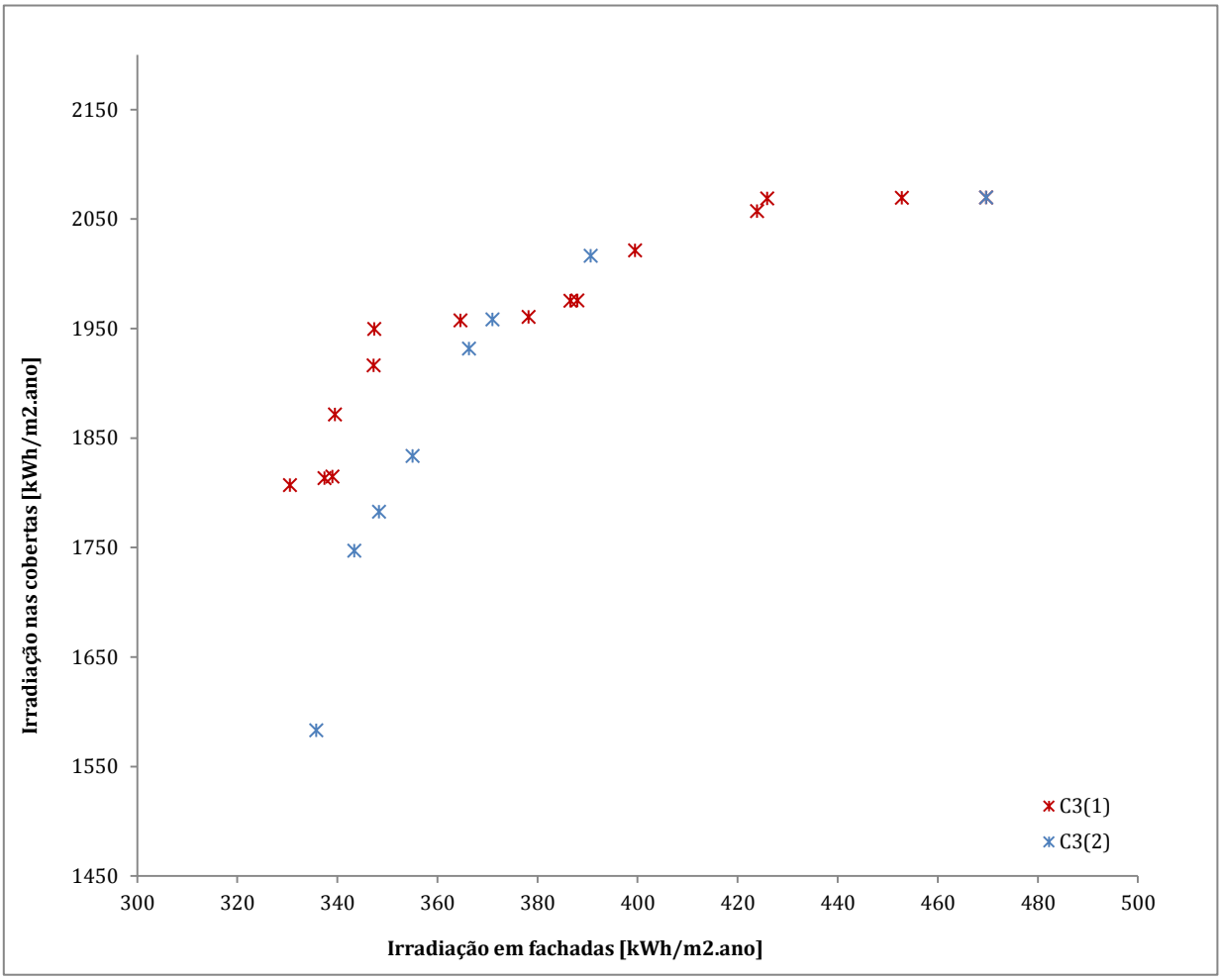


Figura 214 : projetos da frente de Pareto para os dois cenários de otimização multiobjetivo da classe 3.

A Tabela 62 abaixo resume o intervalo de valores das variáveis para as soluções encontradas nos dois processos para a classe 3, comparando-os com o caso base, os intervalos iniciais e as restrições morfológicas do código.

Observa-se ainda que os valores apresentados para os fatores tipo-morfológicos podem ser bastante próximos, como é o caso dos dois projetos do extremo mínimo (*C3(1)Min* e *C3(2)Min*), porém com desempenhos diferentes. Nesse caso, destaca-se o desempenho para o potencial solar nas cobertas. Essa diferença pode ser atribuída à variabilidade no posicionamento dos edifícios e de suas respectivas alturas. Ou seja, as quadras examinadas podem ter a mesma média de altura, mas com edifícios arranjados de formas diferentes, repercutindo resultados distintos.

De modo que é possível afirmar que a magnitude de impacto na variabilidade da altura dos edifícios (*DP_altura*) anunciada anteriormente nestas discussões, está também associada à variabilidade da implantação dos edifícios na quadra e na malha urbana.

Essa constatação pode encaminhar a diretrizes de desenho urbano muito mais específicas e em escala menor do que as encontradas no código atual que parte de um zoneamento urbano clássico baseado na separação de funções e de tipologias. Essas discussões serão retomadas na sequência das discussões dos resultados.

Tabela 62: resumo dos intervalos, restrições e valores encontrados para as configurações, original e otimizadas, para a classe 3.

Fatores	Limites	Caso Base	Restrições do código		Soluções ótimas C3(1)		Soluções ótimas C3(2)	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
Albedo cobertas			-	-	0,2	0,2	0,2	0,2
Albedo fachadas			-	-	0,45	0,2	0,46	0,2
Profundidade (m)			-	-	16	16	16	16
Largura (m)			-	-	4	4	4	4
Altura (m)			-	-	11	4	11	4
Afastamentos eixo X e Y (m)					0;1	0;1	0;1	0;1
Rua (m)			-	-	4	3	3,7	3
NP					4	1	4	1
CA					2,7	1	2,5	1
TO					0,74	0,8	0,74	0,8
Cf			-	-	0,7	0,9	0,73	0,96
Pm			-	-	2,9	1,3	2,9	1,3
Área construída (coberta) média			-	-	64	64	64	64
Área de envoltória média			-	-	496	216	462	184
Irrad. solar cobertas (kWh/m².ano)	-	1940,7	-	-	1806	2070	1583	2070
Irrad. solar fachadas (kWh/m².ano)	-	287,9	-	-	331	470	336	470
Irrad. IV fachadas (kWh/m².ano)	-	-54,7	-	-	-37,2	-92,4	-40,5	-92,4
Irrad. IV cobertas (kWh/m².ano)	-	5,0	-	-	22,4	-2,9	60	-2,9
Iluminância fachada oeste (Lux)		7.609	-	-	10.131	17.356	10.208	17.356
Iluminância fachada norte (Lux)		7.602	-	-	10.119	14.124	12.096	14.124
Iluminância fachada leste (Lux)		7.812	-	-	10.359	15.956	10.006	15.956
Iluminância fachada sul (Lux)		7.805	-	-	10.319	12.458	10.288	12.458

Conclusões do capítulo IV

O Capítulo IV permitiu trabalhar dados e conhecimentos gerados nos capítulos anteriores a fim de produzir conhecimentos exploráveis no contexto das primeiras fases de concepção arquitetônica e transformação urbana. Isso foi possível a partir do uso de técnicas inovadoras de otimização multiobjectivo e multicritério aplicada ao processo de projeto das construções. Duas das cinco classes tipológicas de referência de Maceió foram consideradas, a fim de ilustrar o processo para intervenção pontual em distritos que passam por transformações mais rápidas e significativas na cidade.

O uso de métodos paramétricos de projeto integrado ao uso de algoritmos evolutivos para concepção da forma das quadras urbanas permitiu gerar variadas soluções de compromisso para os dois objetivos conflitantes assumidos. A partir da rotina de cálculos de analogia ao processo de evolução das espécies, projetos mais evoluídos e adaptados aos critérios de interesse foram encontrados. Mais de 80.000 simulações foram realizadas para obtenção das soluções não-dominadas propostas. Um conjunto de famílias de formas "ótimas" foi produzido (no âmbito das fronteiras de Pareto) e comparado às classes tipológicas de referência estudadas no Capítulo II.

Não muito distante do que se poderia esperar, os projetos encontrados nos extremos da fronteira de Pareto apresentaram soluções com morfologias mais uniformes. Ou seja, uma cidade pouco densa, horizontal e com desvio mínimo ou inexistente da média da altura construída seria a

solução ótima para um maior potencial solar e, uma cidade bastante adensada, com bastante desnível da altura construída seria uma solução ótima para um menor ganho solar em fachadas, potencialmente reduzindo a demanda energética.

No entanto, nenhuma dessas soluções previsíveis, isoladamente seriam desejáveis. A cidade de baixa densidade, conforme mostrado, produz potencialmente mais energia, porém consome mais, não só mais energia, como consome mais espaço no solo e mais dinheiro (para extensão necessária de redes de infra-estrutura: água, energia, saneamento, transporte, etc.). A cidade muito verticalizada e adensada reduz esses consumos, mas por outro lado, reduz o potencial de produção de energia localmente e pode produzir congestionamento na infra-estrutura existente, além de possíveis efeitos intensificadores das mudanças ambientais localmente, como o efeito da ilha de calor, aumento local da poluição do ar e danos sonoros amplificados.

Para além das respostas evidentes encontradas, a diversidade de soluções da fronteira de projetos entre os dois extremos, mostrou que para uma perda muito pequena (2 a 5%) em termos de potencial solar nas cobertas, seria ainda possível ter projetos com elevado potencial de oferta, para uma redução bastante significativa de demanda potencial (em relação aos extremos). Para isso, um espectro bastante variado de soluções mais heterogêneas puderam ser propostas.

CAPÍTULO V
Análise prospectiva dos resultados para Maceió

Objetivo geral do Capítulo V

Neste capítulo propõe-se esboçar um quadro prospectivo de evolução da morfologia urbana de Maceió, a partir da interpretação dos resultados obtidos no processo de projeto por otimização (apresentados no Capítulo IV).

Para isso, visa-se estabelecer relações entre os resultados encontrados nos capítulos anteriores e outros conceitos relevantes ao desenvolvimento urbano mais sustentável, tais como mistura urbana, adaptabilidade e acessibilidade, destacando algumas diretrizes de adaptação para o contexto de estudo.

A partir das características morfológicas resultantes do processo de otimização, algumas proposições foram, então, vislumbradas para o contexto urbano de Maceió e para continuação da pesquisa. Essas proposições são estruturadas em torno de três eixos de discussão (Figura 215):

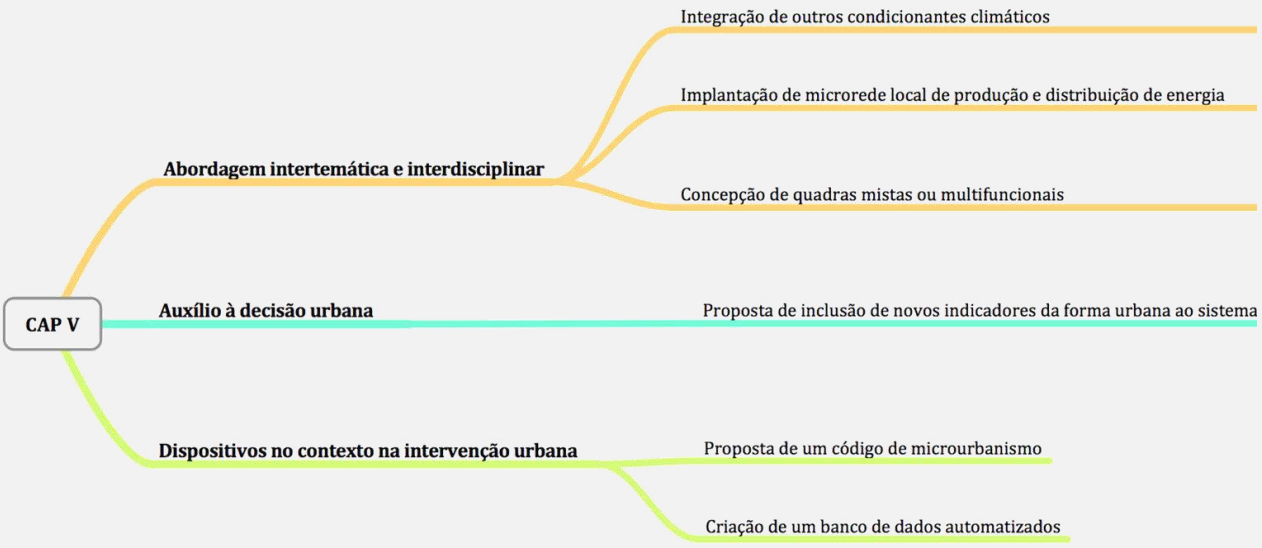


Figura 215: estrutura do capítulo V.

Palavras-chaves: prospecção forma urbana; microrede de geração elétrica; mistura urbana; microurbanismo solar.

A metodologia do projeto paramétrico via técnicas de otimização multiobjetivo foi empregada para tentar responder aos objetivos conflitantes de projeto urbano para o clima tropical de Maceió, em se tratando de reduzir a demanda e aumentar o potencial de produção de energia de fonte solar.

Os resultados encontrados mostraram, em geral, ganhos relativamente significativos para os dois extremos da fronteira de soluções ótimas em relação aos casos bases, principalmente em termos de irradiação nas cobertas. Se o objetivo for reduzir ao máximo os ganhos solares em todas as faces da envoltória, inclusive cobertas, o ganho mencionado pode ser de até 25%, enquanto que, se o objetivo for maximizar o potencial solar nas cobertas, esse ganho pode ser de até 7%.

Alguns dos projetos encontrados, como é o caso das soluções da primeira simulação (ver Figura 198), apresentaram desempenhos muito próximos do desempenho do caso existente. Mesmo que os ganhos mencionados não sejam tão expressivos, um dos ganhos mais importantes, em relação aos casos bases, diz respeito à garantia de níveis mínimos de iluminância média para condições (mesmo se próximas) ainda superiores em termos de irradiação nas cobertas e fachadas. Enfim, esse tipo de metodologia permitiu estabelecer projetos de objetivos conflitantes, assegurando condições mínimas a partir de restrições importantes impostas ao sistema.

Nessa etapa de discussões, procura-se passar dos condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano associando outras temáticas importantes ao problema. Por exemplo, para ter em conta o compromisso entre os critérios energéticos impostos ao processo de projeto, os resultados alcançados expressaram certa variabilidade formal de um extremo a outro da fronteira de soluções, principalmente em termos de densidade construída. Essa variabilidade morfológica pode ser levada, por exemplo, ao encontro dos conceitos como diversidade (ou mistura urbana), acessibilidade e adaptabilidade. Ou seja, pensa-se ser possível com base nos argumentos morfosolar ou morfo-energéticos explicitados, justificar, por exemplo, a implantação de uma diversidade tipológica e de usos no interior das unidades de vizinhança ou mesmo de uma maior compatibilidade ou adaptabilidade das variadas formas encontradas às formas já existentes.

A partir das características morfológicas resultantes do processo de otimização, algumas proposições foram, então, vislumbradas para o contexto urbano de Maceió e para continuação da pesquisa. Essas proposições são discutidas em torno de três eixos: contribuição à abordagem intertemática e interdisciplinar; auxílio à decisão urbana; e, dispositivos no contexto da intervenção urbana.

V.1. Contribuição à abordagem intertemática e interdisciplinar para energia urbana

Nesse eixo de proposições e discussões aborda-se algumas considerações qualitativas sobre a integração de um outro condicionante climático importante na abordagem da problemática energética (abordagem *intertemática*): a circulação do ar em meio urbano. Num segundo momento, trata-se de proposições relacionadas à adequação e organização das formas urbanas obtidas no sentido da implantação de possíveis microredes energéticas de fonte renovável (abordagem *intertemática*). Por último, discute-se desdobramentos dos resultados em proposições *interdisciplinares*, com a integração de usos e ocupação para as formas.

V.1.1. Integração de outros condicionantes climáticos e energéticos

A pesquisa apresentou resultados de um estudo prospectivo de otimização energética para o projeto urbano – na escala da quadra e da vizinhança urbana. Todavia, esse estudo teve em conta apenas os condicionantes solares no sentido de projetos de forma urbana eficientes e mais adaptados para coleta solar em coberturas construídas (no sentido da produção energética) e redução dos ganhos solares excessivos em fachadas.

No entanto, sabe-se que eficiência energética da Arquitetura urbana dependerá também de outros critérios climáticos, mais ou menos influentes. Em clima tropical úmido, como em Maceió, as duas principais estratégias climáticas para concepção de espaços construídos mais eficazes energeticamente são: o controle dos ganhos solares excessivos das envoltórias e a promoção da ventilação natural dos espaços.

Mesmo se o efeito do fluxo de ar no meio urbano tenha sido considerado apenas indiretamente no objeto de estudo (Capítulo II, seçãoII.5.1.1), não fazendo parte do escopo dessa pesquisa, ressalva-se que este tem participação preponderante para a problemática energética nas cidades, tanto para ventilação natural dos ambientes construídos (podendo melhorar as condições de conforto), como para possível geração de energia localmente: eólica urbana[59].

A definição de tipologias de quadras (com densidade e altura construída específicas), conforme proposto nesse trabalho, podem permitir a composição de vizinhanças urbanas onde possa existir maior controle, facilitando também a predição de outros fenômenos climáticos, como a circulação do ar no conjunto edificado. Por exemplo, em contexto onde se estude a ventilação natural para um edifício, seria possível ter em conta como aquele entorno vai ser estabelecido, facilitando, portanto, a predição e garantia de um determinado desempenho estimado para as construções.

Um erro frequente na avaliação do fluxo de ar no interior de uma construção provém da falta de conhecimento do efeito das construções vizinhas (BITTENCOURT, 2010). O tecido urbano pode reduzir drasticamente a velocidade do vento devido à alta rugosidade da malha urbana, como foi visto no Capítulo I e II, e as deflexões causadas por edifícios localizados próximos ao local que se quer estudar (KOENIGSBERGER et al., 1977). O arranjo das construções, sua configuração e a presença de obstáculos externos também representam papel relevante na modificação do perfil do vento (GANDEMER et al., 1992; TSUSTSUMI, KATAMAYA; NISHIDA, 1991).

Dada a também relevante participação desse condicionante climático na adequação ambiental das construções em clima tropical úmido, algumas observações qualitativas importantes podem ser feitas ao estudo da tipo-morfologia das quadras urbanas no contexto de Maceió.

A uniformidade formal (principalmente em termos de altura construída) encontrada nos projetos situados no extremo da fronteira de Pareto, quando se busca a maximização do potencial solar, corre o risco de produzir uma nova superfície (ou "novo solo urbano"), correspondente ao plano da coberta das edificações, que passa a se constituir no limite mais baixo do gradiente do vento, comprometendo a circulação do ar no interior da malha, na altura do pedestre e no interior das construções. Entretanto, se existirem espaços entre as edificações, uma recuperação da velocidade do vento nos níveis das construções pode ser obtida. Estudos desenvolvidos por Lee, Hussain e Solliman (1980) sugerem que construções afastadas entre si, que produzem menores densidades, representam um melhor arranjo para o movimento do ar, visto que elas produzem uma porosidade mais elevada do tecido urbano. Conforme os autores, o aumento da densidade dos assentamentos urbanos produz uma queda no potencial de utilização da ventilação natural como estratégia de resfriamento dos espaços habitados.

A partir dos resultados obtidos nessa pesquisa, algumas cenários poderiam ser esboçados diante de tal contexto:

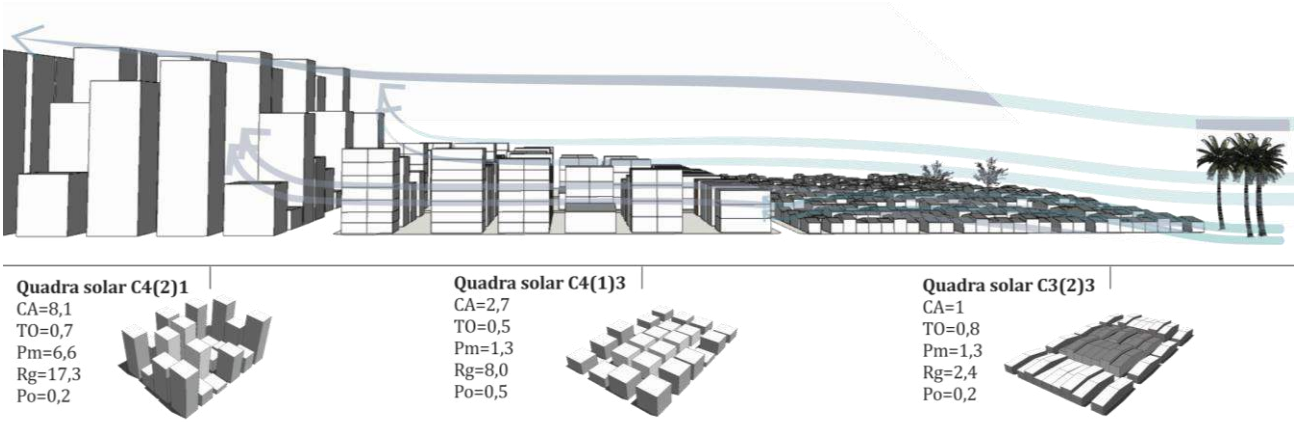
a. *Quadras de densidade moderada* - os projetos intermediários mais próximos do maior potencial solar encontrado (entre as soluções compromisso) apresentam variabilidade moderada na altura

[59] A "eólica urbana" designa os sistemas de produção de energia eólica especialmente adaptados ao ambiente urbano. Todavia, mesmo se o potencial existe (ver ABDELLI, 2007), a implantação de geradores eólicos urbanos ainda permanece um fenômeno bastante limitado por diversas razões (ver ROBOAM, 2005).

construída com espaçamentos mais amplos, em prospectos e rugosidade moderados e de maior porosidade (e.g. quadra solar C4(1)3). Essa configuração poderia favorecer, portanto, uma melhor circulação do ar no interior da quadra.

b. *Efeito pirâmide* - Se pensarmos na organização da vizinhança tirando partido de determinadas tipologias de quadras para uma aplicação na evolução de bairros poucos adensados na baixada litorânea norte de Maceió (e.g. em bairros como Cruz das Almas, composto de muitos vazios e bastante ocupado por habitat individual), as diferentes densidades entre quadras urbanas poderiam favorecer uma maior permeabilidade e porosidade do meio urbano local. Considerando que os ventos predominantes locais sejam provenientes do quadrante leste, ou seja, vindos do litoral, seria possível criar uma densidade progressiva a partir das primeiras quadras da orla até o interior. De modo que as primeiras quadras possuíram maior potencial de aproveitamento para produção local de energia elétrica de fonte solar, com reduzidas obstruções do entorno e sem comprometer o potencial das demais quadras, também em termos de ventilação natural (Figura 216). Na figura abaixo ilustra-se graficamente um perfil integrando três das quadras solares propostas.

Esse tipo de arranjo de quadras permitiria a criação do efeito pirâmide[60] abaixo do dossel urbano. Com a redução da distância entre o topo dos edifícios menor altura e a camada urbana do dossel, uma aceleração do vento é produzida.



Potencial solar para produção energética em cobertas:

Baixo	Elevado	Elevado

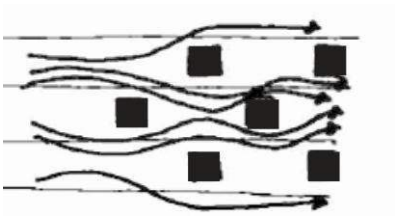
CA=Coeficiente de Aproveitamento; TO= Taxa de Ocupação; Pm=Prospecto médio; Rg= Rugosidade; Po=Porosidade.

Figura 216: proposição de vizinhança a partir das quadras solares propostas com densidade progressiva, gerando o efeito pirâmide e favorecendo a circulação do ar na malha urbana. Fonte: ilustração do autor.

c. *Arranjo intra e entre quadras* – a orientação das ruas criadas entre as quadras propostas perpendicularmente à direção predominante dos ventos favorece a canalização dos mesmos na malha entre quadras, porém a circulação do ar entre os edifícios intraquadra ficaria mais restrita. O arranjo proposto entre os edifícios segue um plano de grelha, porém o arranjo da vizinhança pode ser proposto em plano escalonado, de modo a melhorar a distribuição do vento entre os edifícios (Tabela 63 e Figura 217).

[60] O efeito da pirâmide é um efeito de ventilação causado por um agrupamento de natureza piramidal dos edifícios. Formas piramidais, pela sua geometria bastante aerodinâmica não oferecem resistência importante ao vento (continuidade na evolução da altura). Ao nível do solo, os fluxos são relativamente rápidos (GANDEMER e BARNAUD 1975).

Tabela 63 : esquema ilustrativo da distribuição do fluxo do vento em diferentes configurações de arranjos urbanos – edifícios alinhados e escalonados. Fonte: ilustração do autor.

Disposição dos edifícios no interior das quadras propostas	Disposição entre as quadras sugerida
	
Vento canalizado entre os edifícios. As primeiras unidades face aos ventos são favorecidas, porém os edifícios opostos podem ficar na sombra do vento dos primeiros.	**O fluxo desloca-se para os lados, aumentando a permeabilidade da malha urbana**

d. *Efeito pilotis e pavimentos vazados*– as edificações nas quadras intermediárias e das torres de grande altura poderiam ter seus pavimentos térreos dotados de pilotis (sem alteração da altura e do potencial solar prescritos) a fim de favorecer a circulação do ar ao nível dos pedestres. Outrossim, poder-se-ia imaginar que as torres de grande altura também pudessem ser dotadas de pavimentos vazados, incrementando a porosidade da malha urbana. Esse partido arquitetônico, além de favorecer a permeabilidade da morfologia urbana aos ventos, permitiria tornar o aproveitamento solar mais rentável, visto que reduziria a densidade de ocupação do imóvel.

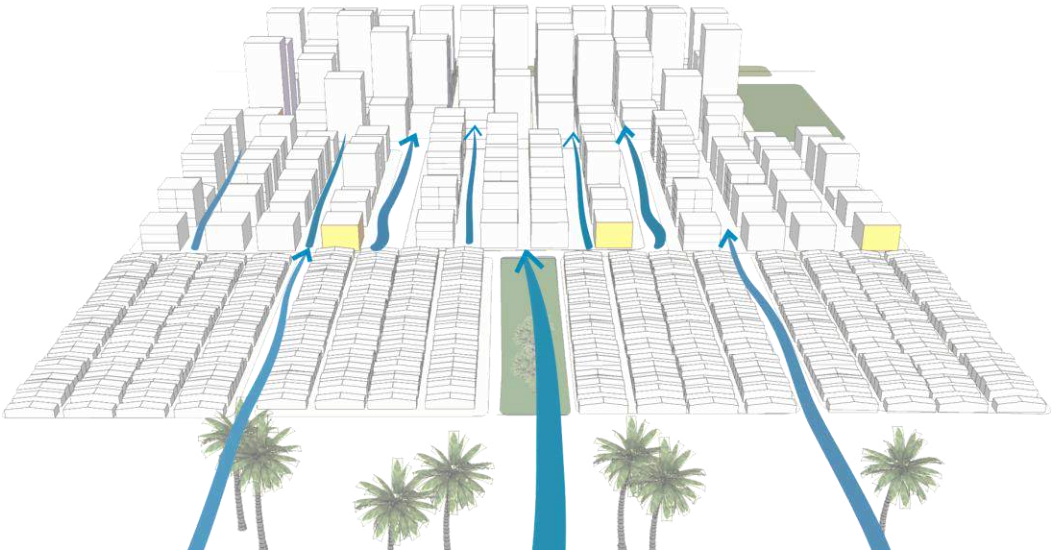


Figura 217 :ilustração esquemática da orientação das quadras (com ruas perpendiculares aos ventos dominantes) e arranjo escalonado. Fonte: ilustração do autor.

A circulação do ar, em qualquer escala de análise, consiste em fenômeno de natureza extremamente complexa. Quando esta interage com a morfologia da cidade, sua predição torna-se ainda mais caótica. Embora seja possível estabelecer avaliações qualitativas a partir de experiências prévias relatadas em estudos encontrados na literatura sobre o assunto, só será possível estimar o real impacto desses fatores, a partir de um estudo paramétrico em modelagem mais detalhada do problema. Esse condicionante pode certamente ser integrado em avaliações futuras, onde as quadras pudessem ser otimizadas também em função da adequação da sua forma ao melhor aproveitamento e permeabilidade do vento.

V.1.2. Implantação de microrede local de produção e distribuição de energia de fonte solar

Do ponto de vista energético, se pensarmos as quadras urbanas como dotadas de sistemas fotovoltaicos de produção de eletricidade (tal como quadras solares), todas as soluções não-dominadas propostas poderiam também ser consideradas de forma integrada, no sentido da criação de unidades de vizinhança com densidades e funções energéticas distintas (diferentes níveis de oferta e demanda) (Figura 218).

Os projetos resultantes de quadra urbana obtidos que apresentam maior potencial de aproveitamento da energia solar pelas suas coberturas, além de poder atender toda ou parte de sua própria demanda de energia, poderiam também funcionar associados aos edifícios das quadras de menor potencial solar e de maior demanda potencial (maior densidade construída), formando uma microrede energética complementar. As quadras de maior densidade ocupada partiriam, por outro lado, da vantagem de já ter potencialmente um menor consumo, considerando-o associado ao menor ganho solar em suas fachadas e cobertas (Figura 219). Lembra-se que, em baixas latitudes, os ganhos solares pelas envoltórias construídas são bastante determinantes para o desempenho energético dos edifícios.

Ao associar graus diferentes de oferta e demanda, bem como funções distintas de oferta (e.g. fotovoltaico e solar térmico) no interior de cada quadra e também entre as quadras vizinhas, seria possível conceber unidades de vizinhança com relativa autonomia energética. Isso seria possível através da possibilidade de criação de uma microrede de produção e distribuição de energia localmente, tendo em vista a proposta de inserção de energia renovável de forma descentralizada e intermitente na rede convencional de eletricidade das cidades.

Na hipótese de existência de recursos financeiros para esse tipo de investimento em Maceió, por exemplo, as quadras solares propostas na escala da vizinhança funcionariam como unidades energéticas fornecedoras, de forma complementar, reduzindo, por exemplo, o efeito (das horas) de pico de consumo da rede convencional.

Vale lembrar que a grande vantagem, em climas como o de Maceió, é que o pico de consumo de equipamentos extremamente energívoros (e.g. ar-condicionado) para determinadas tipologias, como as tipologias comerciais, coincidiria com o pico de produção de energia via solar.

Na mesma lógica, a partir de uma abordagem de baixo para cima (*bottom-up*), essas microredes poderiam ser implantadas em diversos setores e hierarquizadas para criação de geração na escala do bairro e da cidade de forma eficiente, a partir do emprego de redes inteligentes ou *smart-grids*.

A microrede local de produção e distribuição inteligente de energia ou a chamada *smart-grid* emprega para isso tecnologias informáticas de maneira à otimizar a produção, a distribuição, o consumo, tendo como objetivo, otimizar o conjunto de malhas da rede de eletricidade que vai de todos os produtores para todos os pontos de consumo, a fim de melhorar a eficiência energética de toda a unidade local. Como não faz parte do foco desse trabalho o funcionamento de uma *smart-grid*, informações mais detalhadas sobre o assunto podem ser encontradas em Gellings (2009) e Toledo (2012). O desenvolvimento e viabilidade técnica, tecnológica e econômica não fazem parte do escopo desse trabalho, mas poderão ser integrados em trabalhos futuros.

Para ilustrar essa proposta, foi elaborado um esquema onde algumas das várias quadras urbanas geradas pelo nosso estudo poderiam ser implantadas e hierarquizadas em função da densidade e da heterogeneidade de altura de cada uma. De modo que as sombras produzidas pelas quadras mais verticais (de menor potencial solar) não pudessem reduzir a eficiência das quadras mais horizontais (de maior potencial), nas horas em que a altitude solar é mais baixa. Outrossim, esse exemplo de organização na malha urbana poderia estar associada à uma lógica da rede também

de transporte, como ilustra a Figura 218. De modo que as quadras de maior densidade, maior compacidade e menor potencial solar de produção energética estariam mais próximas dos eixos estruturantes de transporte coletivo, facilitando o acesso de um número maior de habitantes e, reduzindo por sua vez, sua pegada energética, concomitantemente.

Isto posto, as quadras urbanas como os projetos indicados no extremo máximo das fronteiras de Pareto da Figura 198 e Figura 208 seriam, portanto, os maiores produtores potenciais de energia de fonte solar. Sendo estas quadras de menor densidade, sua oferta de energia poderia estar também ligada à demanda dos edifícios das demais quadras de menor potencial e maior demanda, e assim sucessivamente, formando uma microrede intra e entre quadras.

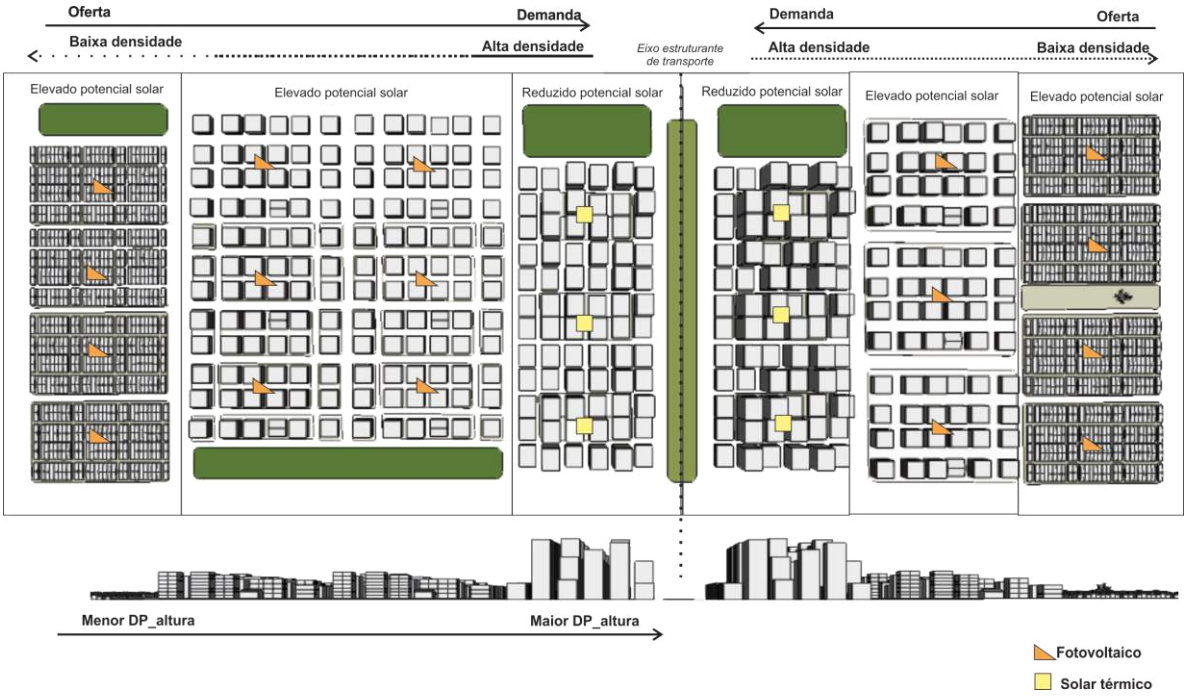


Figura 218 : exemplo de projeto de unidades de vizinhança a partir das quadras solares propostas, associando-se potencial de oferta e demanda das mesmas.

A Figura 219 abaixo ilustra comparativamente o potencial de produção de energia solar e de redução de ganhos solares nas fachadas para alguns dos projetos obtidos com o processo de otimização e que estão integrados no esquema da Figura 218.

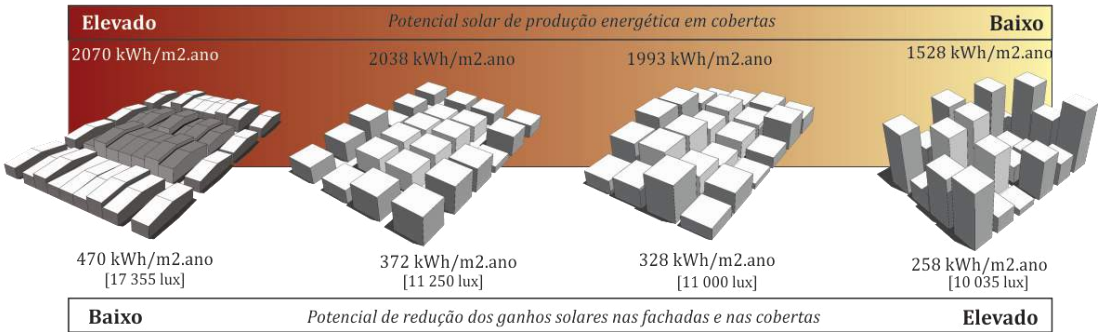


Figura 219 : comparação entre os projetos de maior e menor potencial de oferta de energia solar e menor e maior potencial de redução dos ganhos solares em fachadas.

A Figura 220 ilustra a proposta discutida de integração e compatibilização de oferta e demanda energética intra e entre quadras. No esquema abaixo, sistemas fotovoltaicos concebidos para a coberta de quadras dotadas de edificações geminadas (contínuas) teriam um potencial médio maior dada sua grande taxa de ocupação do solo e menor obstrução produzida pelas edificações vizinhas e, poderiam produzir energia ligados à microrede local e à rede convencional fornecendo, quando necessário e de forma complementar, para as edificações de maior densidade ocupada, em quadras mais heterogêneas, como é o caso da quadra *C4(2)* ilustrada abaixo (Figura 220).

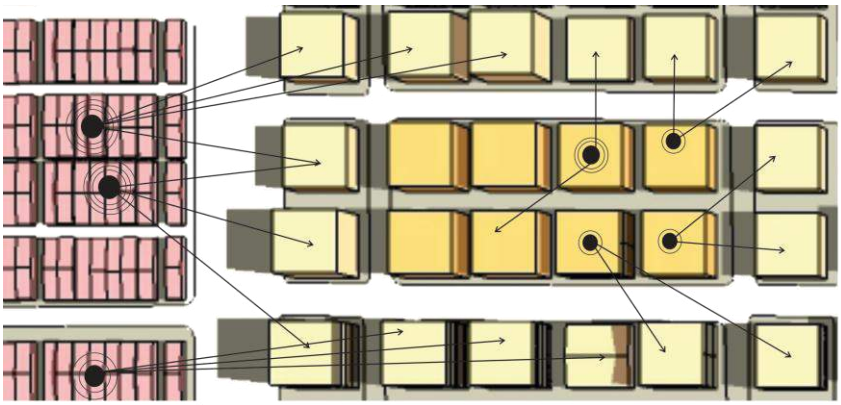


Ilustração esquemática em planta

Ilustração esquemática em corte

Figura 220 : esquema ilustrativo de distribuição de energia solar das construções de maior potencial para as de menor potencial.

V.1.3. Concepção de quadras mistas ou multifuncionais

Dos resultados obtidos, um amplo repertório de possibilidades formais entre os extremos do Pareto encontrado também pode ser proposto.

Como já dito, os resultados sugerem a força da variabilidade da forma construída para obtenção de soluções de compromisso entre os critérios empregados. Essa variabilidade, em termos, principalmente, de verticalidade e aproveitamento do solo, pode constituir soluções urbanas bastante diversificadas também em outros aspectos: diversidade de uso e ocupação do solo, de paisagem construída e de classes sociais.

De um extremo a outro da frente de Pareto, tais soluções sugerem tipos de quadras urbanas contrastadas e entre as soluções intermediárias, maior complexidade. Face a isso, é possível imaginar a integração dessas soluções para criação de uma variabilidade ou complexidade formal, ao mesmo tempo, intraquadra e entre quadras, na escala da vizinhança, bairro e da cidade, com a implantação conjunta de habitação multifamiliar em edificações verticais altas, verticais baixas (e.g. edifícios de até quatro pavimentos para habitação da população de baixa renda), comércio ou mesmo habitações individuais, de modo que se possa introduzir diversidade, proximidade e conectividade (Figura 221).

A mistura ou diversidade urbana consiste na repartição equilibrada de diferentes funções urbanas no interior de uma dada estrutura, tendo-se em conta fatores sociais e econômicos (e.g. habitat social, privado, atividades econômicas, comércio, serviços, etc.) em detrimento da "especialização urbana" ou ao zoneamento urbano clássico na escala da aglomeração ou da cidade.

Essa repartição equilibrada encurta as distâncias a serem percorridas pelos habitantes para atender demandas e atividades mais recorrentes, evitando fluxos de transporte unidirecionais criados pelos espaços monofuncionais previstos ainda em muitos códigos de urbanismo.

Propõe-se com esse trabalho que a otimização da morfologia urbana possa não apenas responder de modo eficaz à uma demanda ou problemática de ordem energética, mas que deva também ser integrada à outros condicionantes igualmente importantes, como a mistura urbana ao nível da quadra e da unidade de vizinhança.

Além disso, formas urbanas como as identificadas por meio da metodologia proposta são bastante compatíveis com as tipologias existentes. Essa diversidade tipológica intra e entre quadras podendo ser convocada para essas vizinhanças existentes, como nos bairros da orla marítima de Maceió em forte transformação, ou mesmo nos bairros situados na borda do tabuleiro, por exemplo, pode trazer benefícios diversos: integração social, acessibilidade, proximidade e maior eficiência energética.

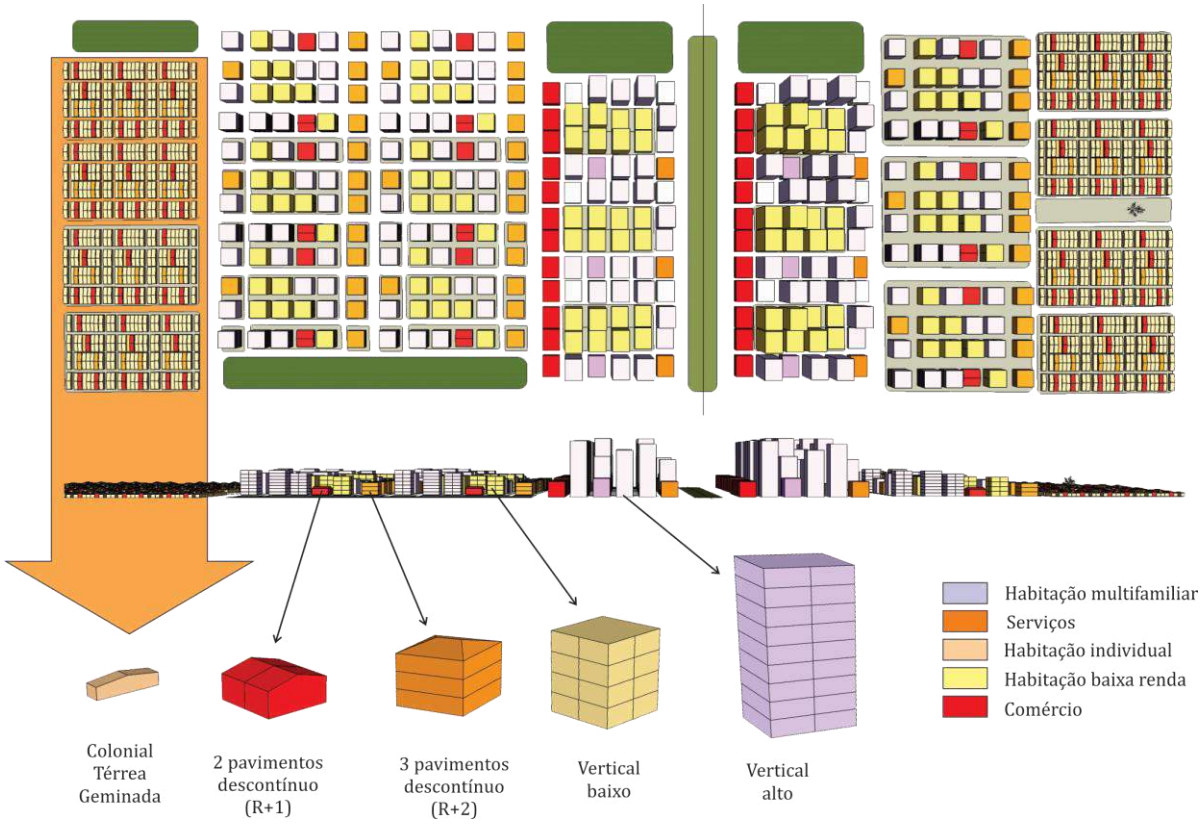


Figura 221 : proposta de integração de mistura do uso e ocupação do solo às diferentes formas de quadras urbanas obtidas.

Outrossim, a densidade deve ser adaptada ao contexto para a qual foi estabelecida: mais do que a densidade, é sobretudo o contraste entre diferentes densidades – a “granolumetria” de densidades (MAUGARD, 2007) que definirá a cidade. Estudos realizados por Salat (2011) e Arantes (2012) sugerem ainda que a variedade de tipologias contribuiria para a aceitabilidade da densidade, em outras palavras, para criar locais de "intensidade".

A diversificação das formas urbanas também pode contribuir para "aumentar a eficiência global das cidades, (ou pelo menos dos bairros/distritos) e reduzir o impacto sobre o meio ambiente" (ROGERS, 2000). Associada à presença de paisagens naturais, a exploração e a integração de novas tecnologias na escala da vizinhança (com uso de sistemas fotovoltaicos para produção de

eletricidade a partir de fonte solar), a mistura de formas urbanas e a granulometria da densidade seria uma maneira de compensar as desvantagens de determinadas tipologias, para alcançar um desempenho aceitável em escala maior. Richard Rogers fala sobre a invenção de uma "nova forma de urbanismo holística e global" (ROGERS, 2000).

A partir das discussões e repercussões obtidas com os resultados do trabalho, observa-se que:

- Pode existir uma compatibilidade da diversidade formal encontrada no estudo, com a diversidade ou complexidade existente atualmente em muitos bairros de cidades brasileiras. No caso de Maceió, apesar da predominância de determinadas características morfológicas entre os bairros e distritos da cidade (conforme identificado no início desse estudo), existe ainda uma complexidade, em escala menor, e contrastes importantes ligados à forma construída que se evidencia, especialmente, em bairros onde ocorrem modificações mais intensas e rápidas, como na planície litorânea da cidade. No entanto, a complexidade sugerida pelo presente estudo é proposital, devendo, portanto, ser planejada. Essas questões serão melhor discutidas nos próximos tópicos dessa seção.

- É possível propor um conjunto de outros e novos indicadores para serem integrados na abordagem, a fim de incluir a complexidade da forma na escala do bloco ou a unidade de vizinhança e a dinâmica que surge com novas demandas. Esses indicadores teriam em conta a heterogeneidade da altura construída, como através do desvio padrão da altura já mencionado na primeira parte das análises dos resultados e indicadores mais qualitativos que auxiliem no planejamento dos espaços, como acessibilidade, diversidade, disponibilidade e evolução. Essas questões serão também melhor tratadas adiante.

- Dotada de um amplo repertório de arranjos bastante variáveis, dentro de taxas de ocupação, gabarito, aproveitamento e prospectos definidos por parcela, a quadra urbana solar pode se constituir no elemento ou tipo básico do tecido urbano, para projetos de renovação pontuais em alguns distritos urbanos da cidade. Além disso, entre os arranjos variados prescritos a partir de critérios energéticos, não se prefigura nenhuma solução arquitetônica específica. Dentro do esquema geral de densidade e diversidade, os proprietários e projetistas têm a liberdade de construir os edifícios.

V.2. Auxílio à decisão urbana

V.2.1. Proposta de inclusão de novos indicadores da forma urbana ao sistema

A forma e densidade das cidades não estão apenas ligadas às relações e medidas físicas como as empregadas neste estudo (e.g. taxa de ocupação, coeficiente de aproveitamento, verticalidade, etc.). A densidade urbana está também implicada a elementos qualitativos e perceptivos, típicos de contextos urbanos. Talvez menos relevante aos critérios físicos examinados (e.g. potencial solar, iluminação), mas não menos importantes.

A fim de estudar qualitativamente os subprodutos dessa pesquisa, propõe-se avaliar os projetos obtidos a partir de algumas métricas que tragam outros significados à densidade física encontrada, como por exemplo, aqueles relacionados à questão da mistura urbana mencionada anteriormente. Para isso, alguns dos parâmetros já abordados foram utilizados também para qualificar a intensidade de aspectos relativos à diversidade (morfológica e de uso potencialmente atribuído), à acessibilidade e à adaptabilidade (ADOLPHE, 2013; SALAT, 2011).

A *diversidade* é um conceito bem explorado quando se trata de desenvolvimento sustentável. Quando aplicado à sustentabilidade urbana, refere-se frequentemente à mistura do uso do solo. Esta diversidade física pode ser generalizada para morfologia do espaço, diversidade social e funcional de um sítio urbano (ADOLPHE, 2013). Para caracterizar esse aspecto utilizou-se os indicadores: coeficiente de aproveitamento do solo, taxa de ocupação, desvio padrão da altura

média construída e a razão da área construída pela área de espaços abertos (presença de espaços vazios em detrimentos de espaços cheios, para criação de espaços de solo permeável, por exemplo).

A *acessibilidade* quando aplicada a um lugar, define, o modo como um ou mais indivíduos, usando vários meios de transporte, pode ir de um lugar à outro. Em primeiro lugar, acessibilidade depende de distâncias entre as localidades de origem e destino. Em macro-escala, a compacidade da expansão urbana e o nível de polarização da urbanização em diversas centralidades de um sítio urbano podem afetar drasticamente estas distâncias (CERTU, 2002)(MORENCY, 2006). Indicadores de compacidade urbana, ou dispersão podem ser utilizados como um dos critérios para qualificar esta problemática. Para exemplificar e ilustrar esse indicador, utilizou-se umas das métricas propostas por Adolphe (2013): a compacidade urbana. Essa métrica é definida pela raiz quadrada da razão da área urbana obtida (área da quadra urbana, nesse caso) pelo seu perímetro. Evidentemente, que outros aspectos extremamente importantes, que não são considerados nessa abordagem, tais como os suportes físicos da mobilidade e conectividade da rede urbana, entre outros, também estão relacionados a esta problemática.

É importante mencionar outro caráter que é extremamente relevante para a sustentabilidade urbana, o da *adaptabilidade* dos espaços. Ou seja, da capacidade dos espaços em evoluir e se adaptar a novas demandas e novas complexidades. Apenas a título ilustrativo, qualifica-se aqui a capacidade de adaptabilidade das quadras.

Por exemplo, conforme Salat (2011), a evolução de tramas urbanas tradicionais são mais facilmente adaptáveis e se reproduzem por meio de redistribuições pelo traçado viário, adensamento de pátios internos ou quintais (no caso de imóveis antigos dotados de pátios ou quintais) e re-ordenamento das parcelas (SALAT, 2011ª). A razão dessa facilidade reside em parte na forma do parcelamento do solo. Os pequenos lotes podem ser adensados individualmente sem muitos transtornos para a trama urbana. Darley e Zunino (2010) apontam que a regularidade dos tecidos com construções contínuas, alinhadas na rua e de alturas relativamente homogêneas (desvio padrão da altura construída reduzido) facilitam a evolução, pois permite inserir-se na continuidade do existente mais facilmente, prolongando as dimensões, a forma e o alinhamento das quadras. Edificações individuais térreas ou de até dois ou três pavimentos descontínuas (com recuos generosos ou jardins) podem facilmente ser adensadas ou mesmo, em alguns casos, re-parcelado. Já as malhas com edificações descontínuas e já bastante adensadas verticalmente, possuiriam um potencial de adaptação mais dificultado.

A partir dessas indicações, sugeridas em Salat (2011) e em Darley e Zunino (2010), a forma das quadras urbanas propostas foram qualificadas quanto a capacidade destas em adaptar-se a novas intervenções.

Para todos os indicadores e respectivos parâmetros morfológicos mencionados, foi atribuído uma nota de 1 a 5, a fim de qualificar e facilitar a leitura das formas obtidas (ver Tabelas 64-69).

V.3. Dispositivos no contexto da intervenção urbana

V.3.1. Proposta de um código de microurbanismo

Os códigos de urbanismo e edificações possuem uma participação crucial nos processos de transformação da morfologia construída nas cidades e, consequentemente, terá uma participação direta no desempenho ambiental dos espaços. Muitos desses códigos no Brasil, como na cidade de Maceió, apresentam seus parâmetros restritivos baseados em zoneamentos monofuncionais e em macro-escala. Esses tipos de macro-zoneamento encaminham progressivamente setores das cidades à uma certa uniformização e à setorização das funções e da forma construída. Tais regras sugerem a criação de densidades específicas por bairro e de tipos, baseados, muitas vezes, em interesses

econômicos e políticos locais. Essa setorização separa distritos por classe de renda (e.g. residencial I, II, III, residencial de interesse social, etc.), por funções (e.g. residencial, comercial, turístico, histórico), aumentando, assim, a segregação dos espaços, dos usos e a necessidade de maiores deslocamentos. Além disso, a densidade estabelecida para algumas dessas zonas tem sobrecarregado a infra-estrutura das cidades, como é o caso de alguns bairros da planície litorânea de Maceió, devido ao descompasso entre o crescimento da demanda e a ampliação da infra-estrutura.

Poucos esforços puderam ser efetivamente implantados a fim de que o planejamento proposto por instrumentos regulatórios, como códigos de urbanismo e edificações, pudessem controlar a qualidade ambiental e o desempenho energético dos espaços construídos. Não basta prever parâmetros morfológicos importantes, que definirão a densidade e verticalidade da forma urbana de uma cidade, por exemplo, se a oferta de infra-estrutura (e.g. água, eletricidade, saneamento, acessibilidade, etc.) não for antecipada ao mesmo tempo.

O presente trabalho trouxe, portanto, os importantes aspectos da forma urbana ao encontro dos condicionantes solares, a fim de proporcionar conhecimentos que sejam relevantes no auxílio à decisão no ordenamento das cidades, permitindo antecipar oferta e demanda energética de fonte solar (extremamente abundante na região).

A partir do repertório de formas de quadras solares propostas nesse trabalho, é possível extrapolar os conhecimentos obtidos para elaboração de uma biblioteca de variações possíveis dentro dos mesmos intervalos de parâmetros tipo-morfológicos, tal como uma gramática de formas. Sendo a escolha das quadras em função das prioridades (morfológicas e energéticas) estabelecidas para cada distrito urbano.

Assim, é possível propor diretrizes para adaptação ou inserções no atual código de urbanismo para Maceió. No âmbito dessa pesquisa denominaremos de código de microurbanismo solar. A proposta seria estabelecer um urbanismo de granularidade mais fina de intervenção, ou seja, atribuindo um conjunto de regras na escala da parcela por quadra ou unidade de vizinhança (e.g. gabarito por edifício, quadras com gabaritos múltiplos). A tipologia das edificações ficaria condicionada a parâmetros restritivos estabelecidos por parcela urbana no interior da quadra. O código urbano na escala da quadra permitiria maior controle da qualidade ambiental e energética dos espaços construídos, tendo em vista o grande impacto produzido pela forma do entorno no desempenho das edificações. Por exemplo, no caso das quadras solares propostas, se as alturas construídas ou os albedos prescritos não forem respeitados, o potencial solar previsto poderá não ser o mesmo, prejudicando a eficiência do sistema. Da mesma forma, para o potencial da forma em reduzir ou aumentar a insolação e a iluminação nas fachadas.

Antes que a cidade seja totalmente consolidada, a abordagem desse trabalho oferece um dado número de formas projetadas a partir de critérios morfológicos e energéticos, de uma maneira integrada. O processo de otimização da geometria em busca de projetos mais eficientes, permitiu estabelecer pelo menos 85 projetos eficientes (projetos da fronteira de soluções não-dominadas), dos quais, apenas alguns deles encontram-se ilustrados separadamente e contrastados na Tabela 64 a Tabela 67 e Figura 222 a Figura 225. Essa abordagem oferece, portanto, grande liberdade na escolha da evolução da cidade, ao propor reflexões sobre uma ampla variedade de quadras e de ordenações possíveis (na escala da vizinhança).

Qual tipologia de quadra, qual heterogeneidade ou diversidade para um dado contexto urbano? Qual tipologia de quadra é mais compatível com a heterogeneidade de uma vizinhança existente? Qual tipologia entre quadras? Ou seja, como organizar o distrito de modo que a densidade, o uso, o potencial de gerar energia, e a demanda potencial, possam ser previstos?

Propõe-se, portanto, com os resultados obtidos, a elaboração de dois instrumentos possíveis, a fim de auxiliar na resposta dessas questões apresentadas:

V.3.1.1. Elaboração de um código de microurbanismo solar

Propõe-se a adoção de parâmetros restritivos estabelecidos por tipo de quadra (ver Tabela 64 a Tabela 67). As Tabelas ilustram esquematicamente os microzoneamentos propostos por quadra urbana. Para cada possibilidade de quadra, é possível identificar seu potencial tipológico de densidade (*TO* e *CA*), de diversidade (*Divers*.), acessibilidade (*Acess*.), adaptabilidade (*Adapt*.) e de oferta e demanda energética (solar), estabelecer as dimensões dos edifícios por parcela, a partir do potencial desempenho solar das mesmas.

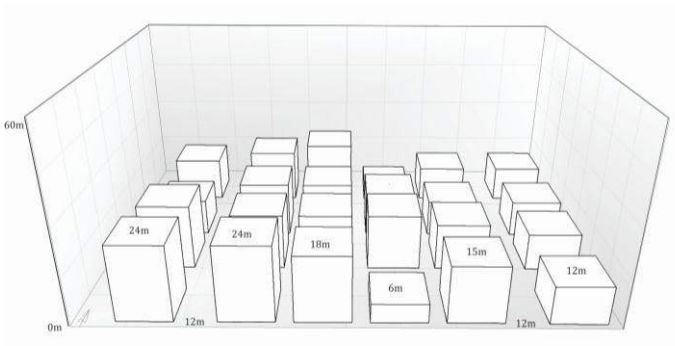
As tabelas abaixo ilustram e descrevem o perfil e desempenho estimado previsto para algumas quadras retiradas das fronteiras de Pareto obtidas a partir do processo de otimização dos parâmetros morfológicos, intervalos e restrições para a cidade de Maceió. Busca-se, na sequência, comparar e contrastar o desempenho de alguns tipos que pudessem ser empregados no planejamento e microzoneamento de um distrito urbano na cidade. Na sequência, um exemplo de intervenção pontual é também indicado.

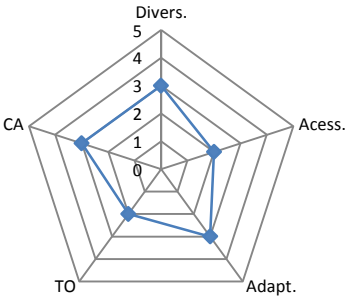
Tabela 64 : quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo solar: exemplo de quadra tipo C4(1)6.

QUADRA SOLAR C4(1)3

Potencial de oferta	Potencial de demanda	Potencial de economia
Elevado	**Moderado**	**Reduzido**

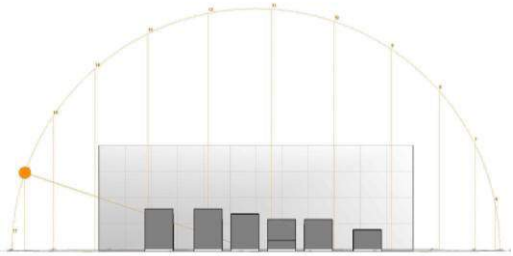
TIPO-MORFOLOGIA

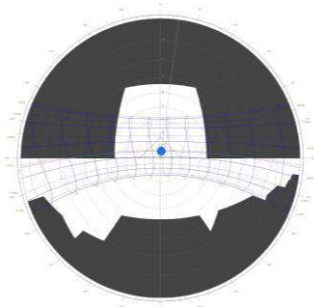




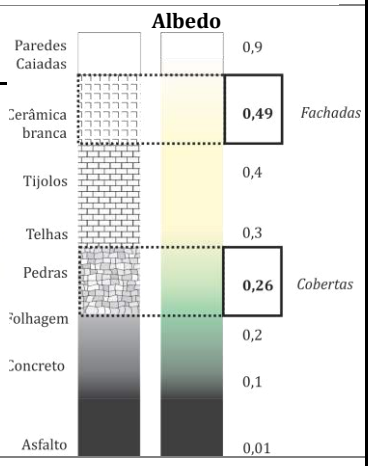
Tipologias compatíveis:
Térreo ou Pilotis (T/P) +1 andar [*individual*] – T/P+2 [*horizontal*] - T/P +3 [*vertical baixo*] - T/P +5 [*vertical*] - T/P +7 [*vertical*]

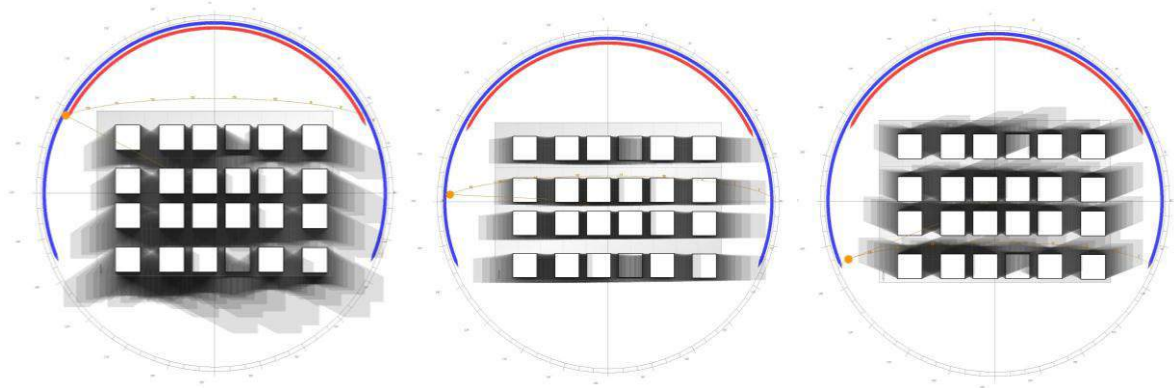
MORFOSOLAR





Máscara de obstrução do céu para o entorno





Solstício de inverno *Equinócios* *Sosltício de verão*

ENERGIA

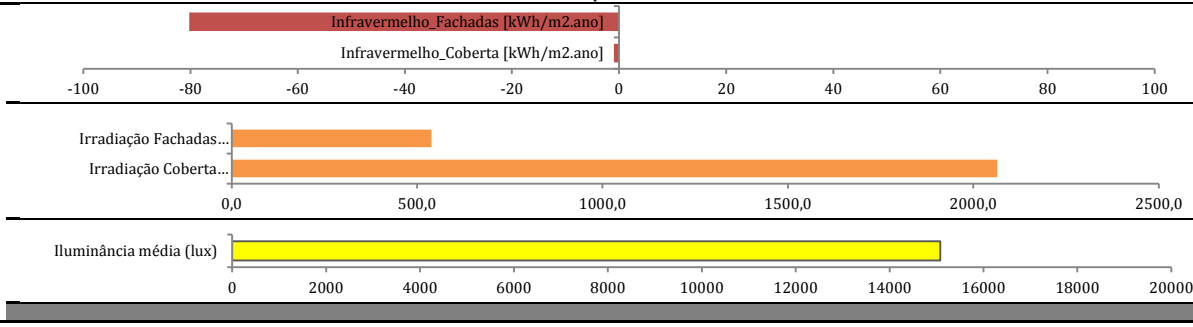
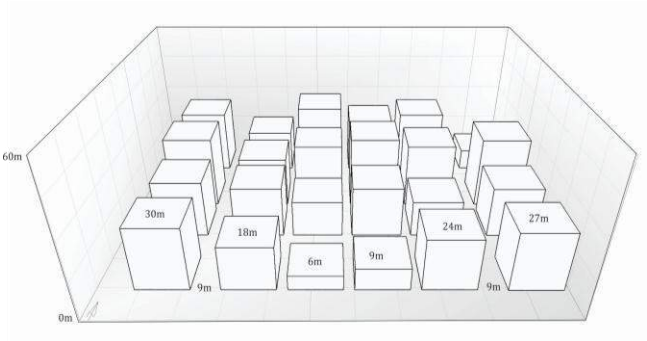
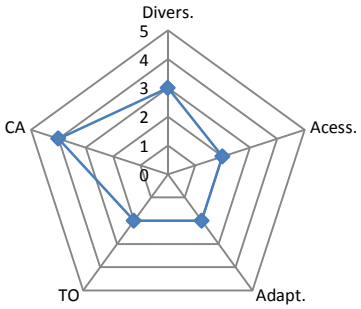


Tabela 65 : quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo solar: exemplo de quadra tipo C4(1)8.

QUADRA SOLAR C4(1)1		
Potencial de oferta **Reduzido**	Potencial de demanda **Elevado**	Potencial de economia **Elevado**

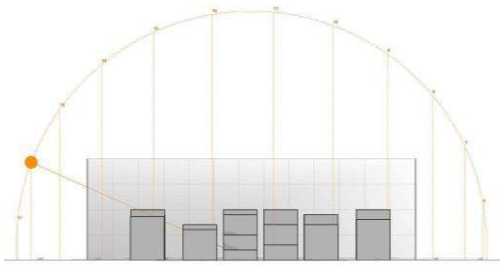
TIPO-MORFOLOGIA

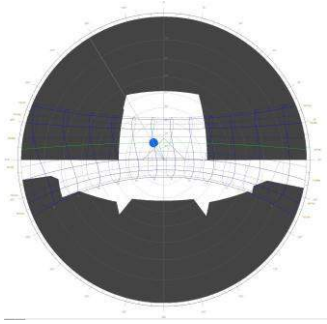


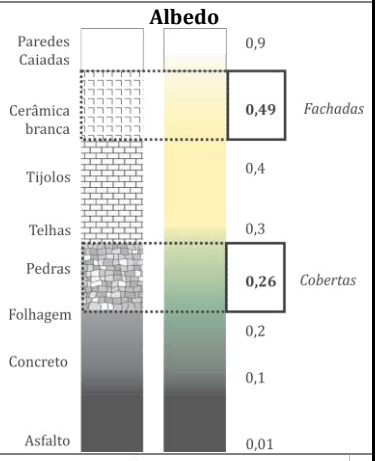


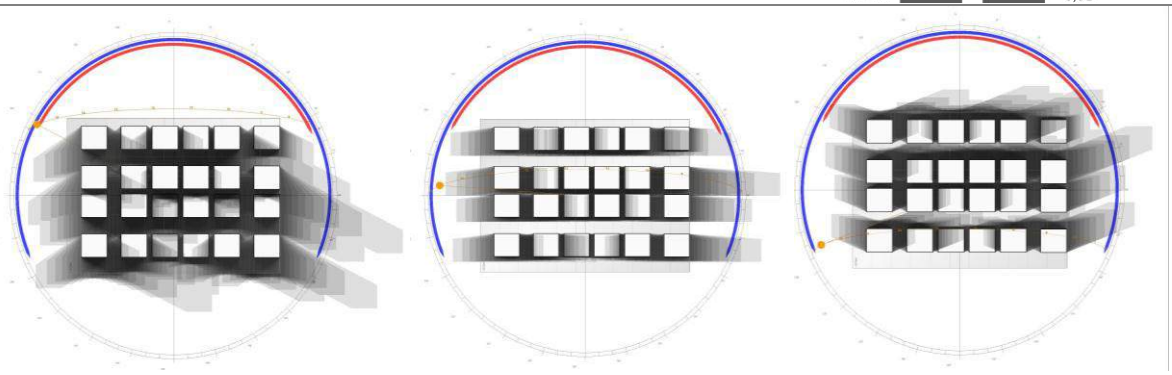
Tipologias compatíveis: descontínuas
Térreo ou Pilotis (T/P) +1 andar [*individual*] - T/P +2 [*horizontal*] - T/P +3 [*vertical baixo*] - T/P +5 [*vertical*] - T/P +7 [*vertical*] – T+8 [*vertical*] – T/P +9 [*vertical*]

MORFOSOLAR









Solstício de inverno *Equinócios* *Sosltício de verão*

ENERGIA

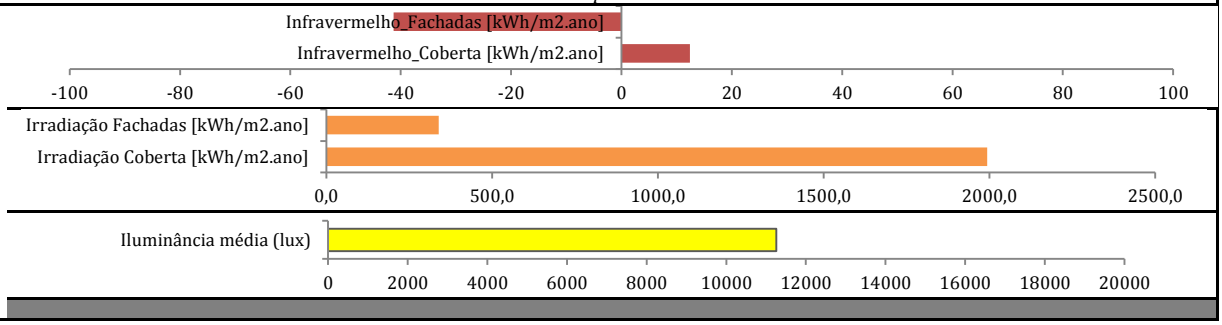
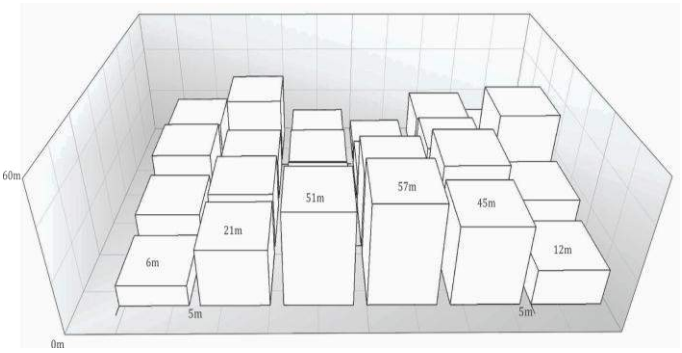


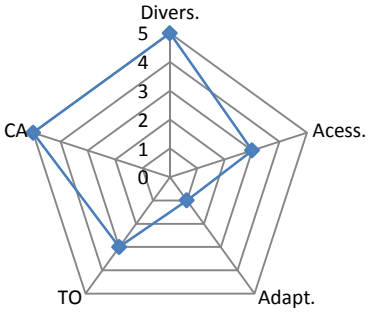
Tabela 66 : quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo solar: exemplo de quadra tipo C4(2)9.

QUADRA C4(2)1

Potencial de oferta	Potencial de demanda	Potencial de economia
Reduzido	**Elevado**	**Elevado**

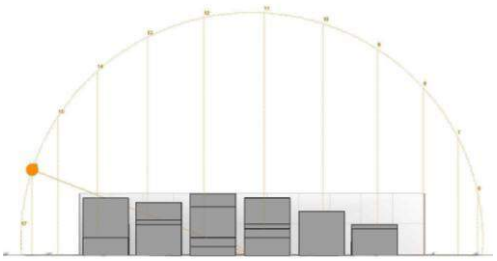
TIPO-MORFOLOGIA

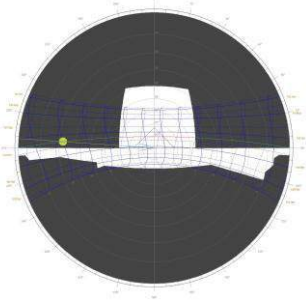


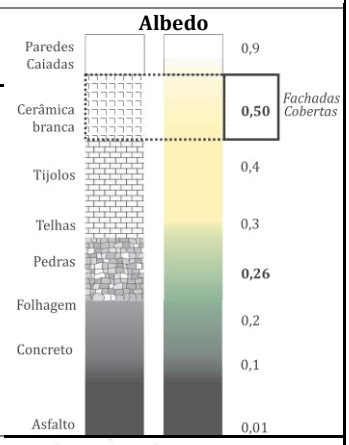


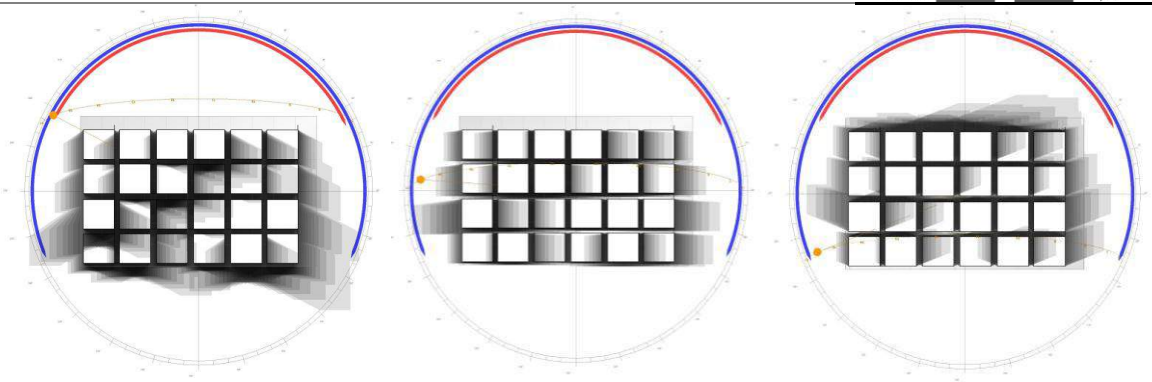
Tipologias compatíveis : descontínuas
T/P +1 [*individual*] - T/P +2 [*horizontal*] - T/P +3 [*vertical baixo*] - T/P +5 [*vertical*] – T/P +7 [*vertical*]

MORFOSOLAR









Solstício de inverno *Equinócios* *Sosltício de verão*

ENERGIA

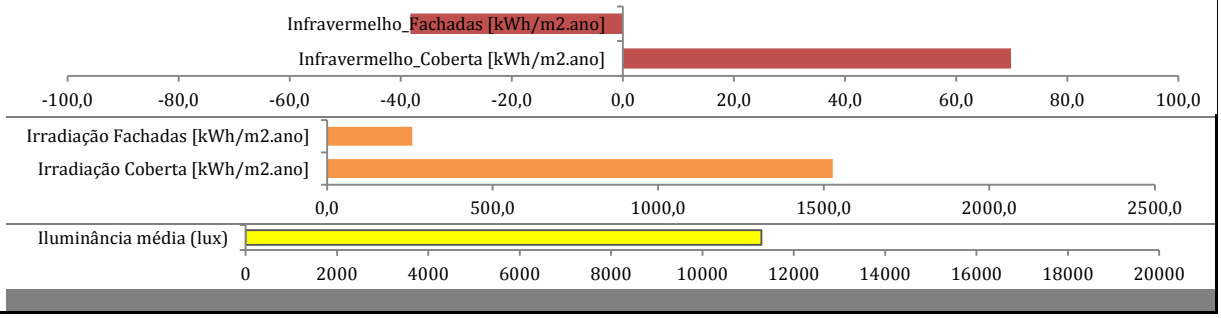
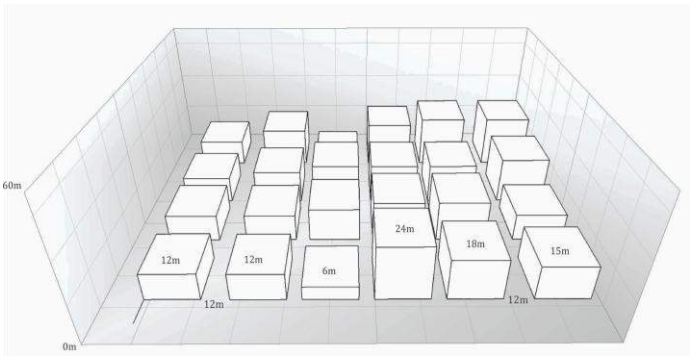


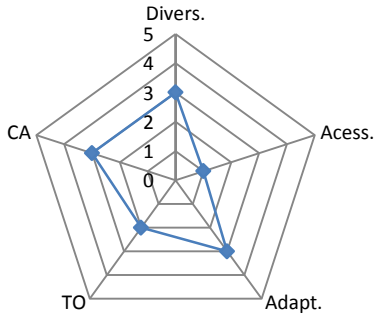
Tabela 67: quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo: exemplo de quadra tipo C4(2)3452.

QUADRA C4(2)3

Potencial de oferta	Potencial de demanda	Potencial de economia
Elevado	**Moderado**	**Reduzido**

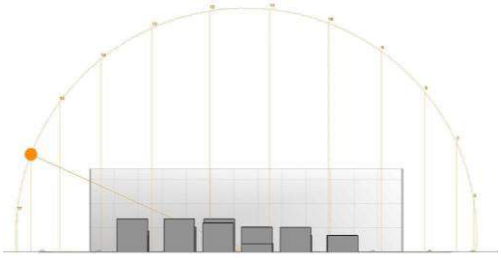
TIPO-MORFOLOGIA

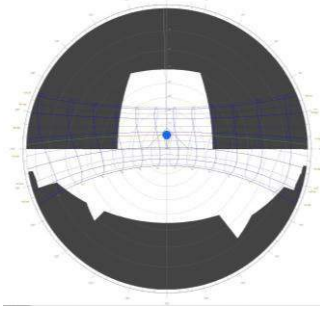


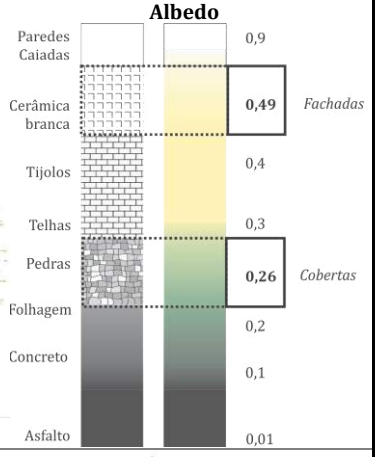


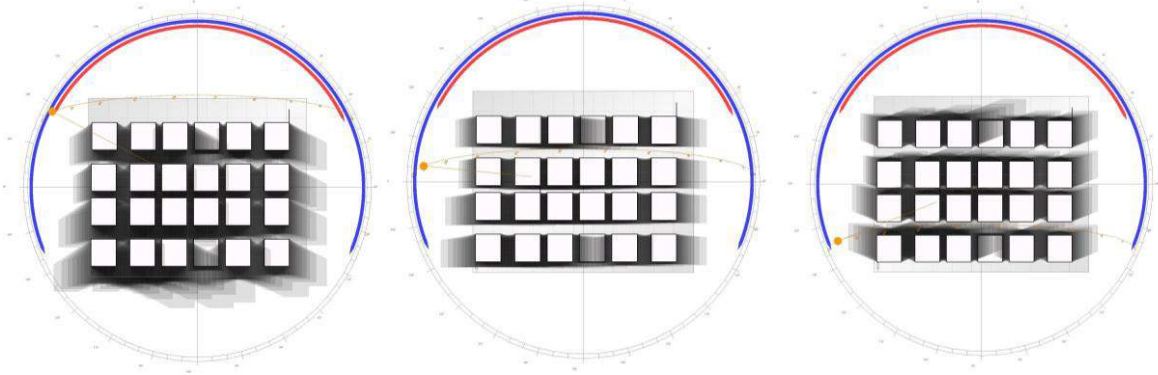
Tipologias compatíveis : descontínuas
T/P +1 [*individual*] - T/P +2 [*horizontal*] - T/P +3 [*vertical baixo*] - T/P +5 [*vertical*] - T/P +7 [*vertical*]

MORFOSOLAR









Solstício de inverno *Equinócios* *Sosltício de verão*

ENERGIA

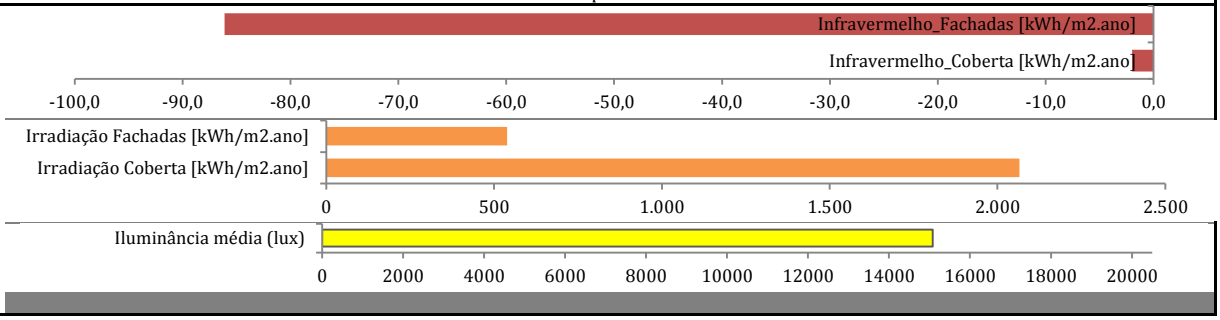
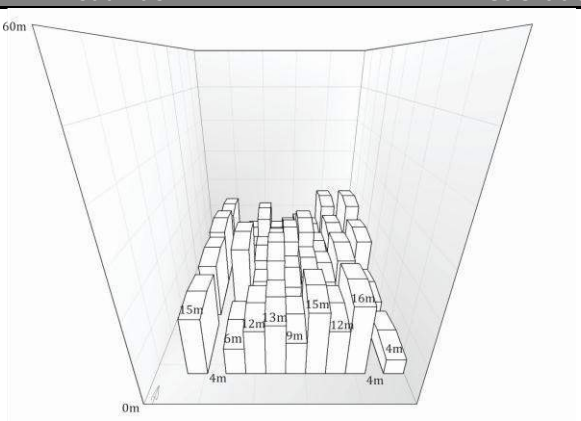


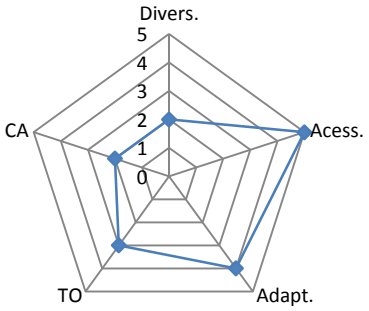
Tabela 68 : quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo solar: exemplo de quadra tipo C3(2).

QUADRA C3(2)1

Potencial de oferta Reduzido	Potencial de demanda **Moderado**	Potencial de economia **Elevado**

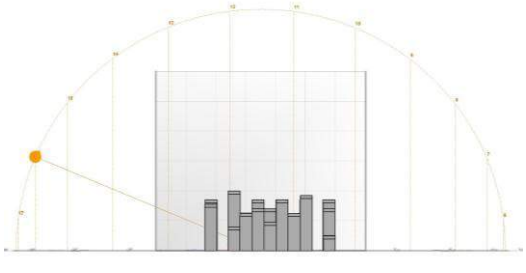
TIPO-MORFOLOGIA

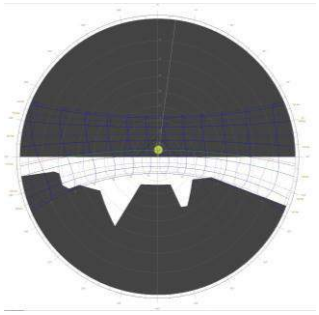


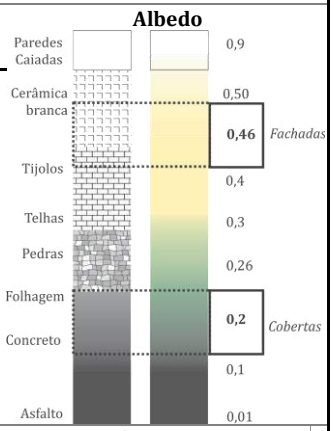


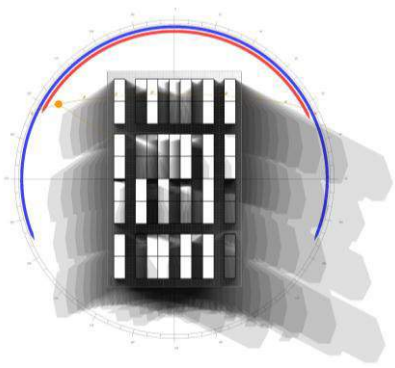
Tipologias compatíveis: contínuas/geminadas
T +1 [*individual*] - T +2 [*horizontal*] - T+3 [*vertical baixo*]

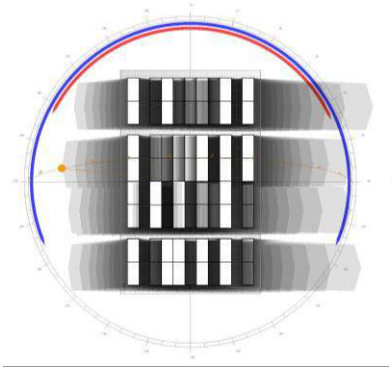
MORFOSOLAR

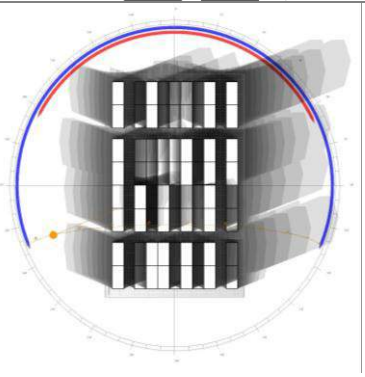












Solstício de inverno *Equinócios* *Sosltício de verão*

ENERGIA

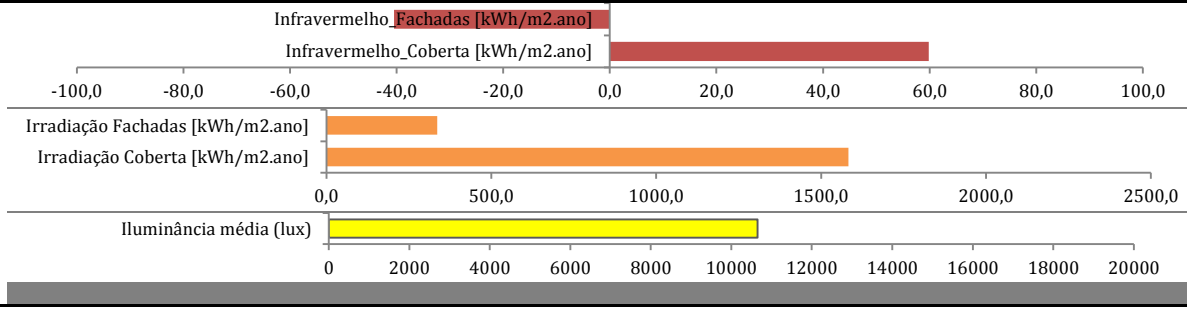
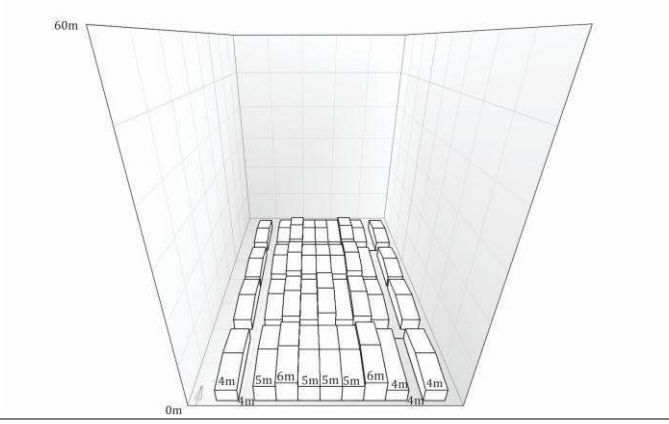
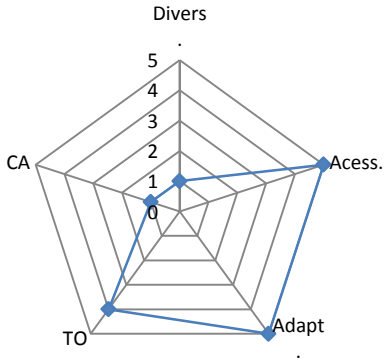


Tabela 69 : quadro síntese de diretrizes do código de microurbanismo solar: exemplo de quadra tipo C3(2)3.

QUADRA C3(2)3		
Potencial de oferta **Elevado**	Potencial de demanda **Reduzido**	Potencial de economia **Reduzido**

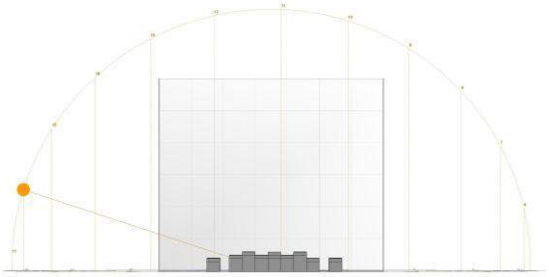
TIPO-MORFOLOGIA

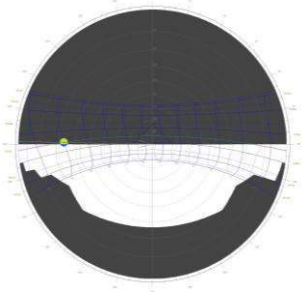


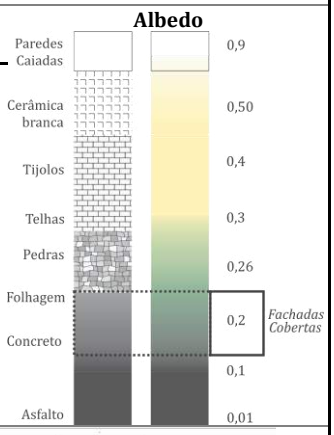


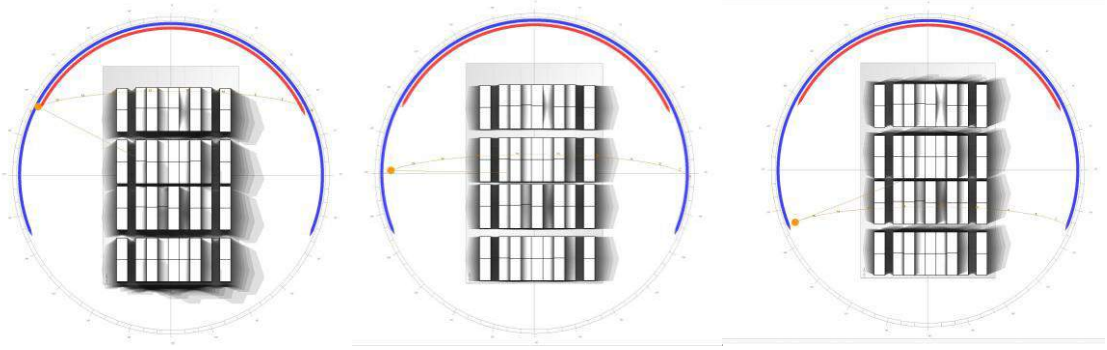
Tipologias compatíveis: Edificações contínuas ou geminadas
T+1 [*individual*]

MORFOSOLAR



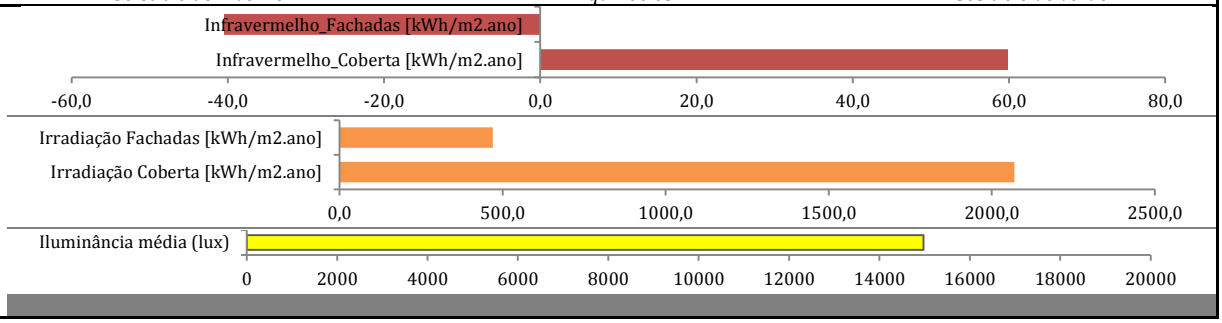






Solstício de inverno *Equinócios* *Sosltício de verão*

ENERGIA



Conforme as informações apresentadas acima, as quadras de maior adaptabilidade são as quadras solares contínuas, devido a sua horizontalidade e relativa heterogeneidade (ver também Figura 222). Os edifícios podem também ser mais facilmente modificados, associando-os, recuando o alinhamento ou densificando-os. De modo que outras alternativas podem substituí-las a longo prazo. Sua forte compacidade está associada às suas pequenas dimensões (menor perímetro) quando comparadas às demais quadras, tornando-as, fisicamente, mais acessíveis em termos de deslocamento na quadra.

Já as quadras de maior densidade e diversidade são as quadras descontínuas, provenientes da otimização da classe de referência 4. A heterogeneidade da altura e densidade (CA) encontrada no interior dessas quadras, pode oferecer maior oportunidade de misturar os usos e as classes, tanto morfológicas como sociais (Figura 222), conforme já discutimos.

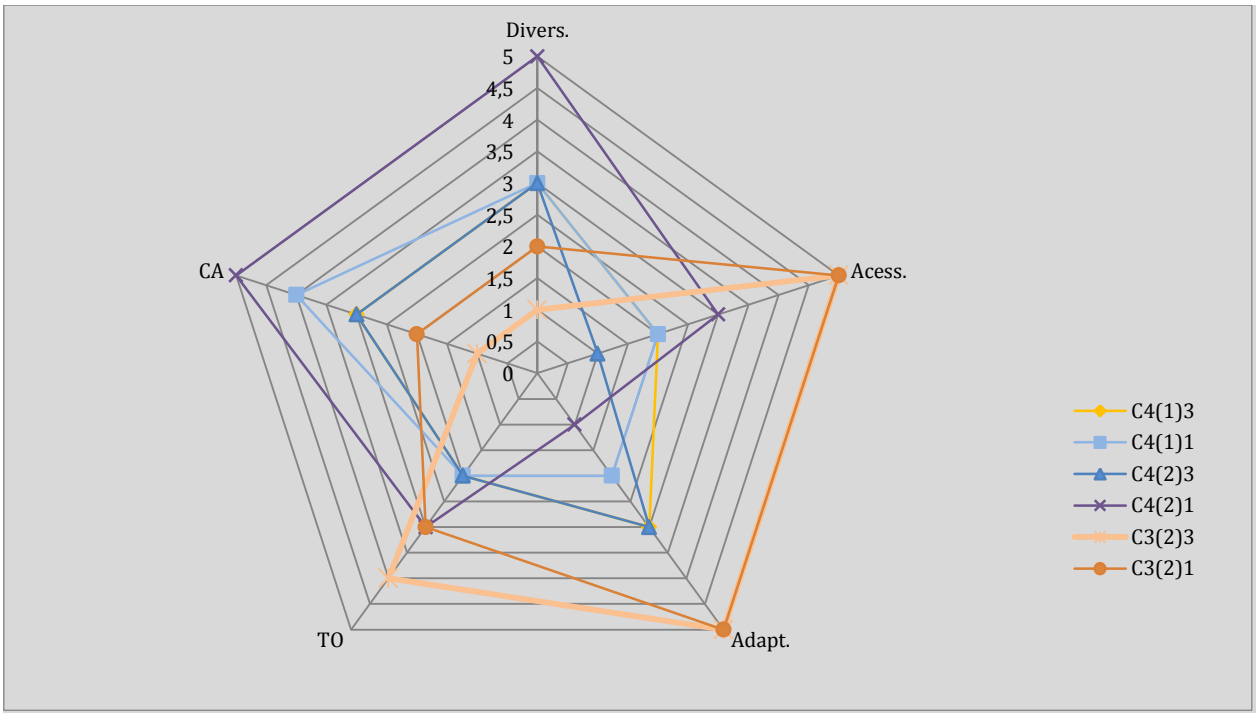


Figura 222 : gráfico comparativo do potencial tipo-morfológico entre algumas das quadras solares propostas.

Todas as quadras solares propostas e ilustradas acima apresentam desempenhos relativamente contrastados e ampla diversidade formal. Tanto as quadras solares descontínuas como, as mais compactas podem ser empregadas para um elevado potencial solar ou para um elevado potencial de redução dos ganhos solares em toda envoltória. Como exemplo, destaca-se o excelente desempenho apresentado pelas quadras *C3(2)3* e *C4(1)3* quanto ao potencial solar de produção e, as quadras *C4(2)1* e *C3(2)1* quanto à importante redução da insolação nas fachadas e cobertura (Figura 223 e Figura 224). O aumento e a redução do nível de insolação nas superfícies vêm também acompanhado de um acréscimo ou decréscimo no nível médio de iluminação (Figura 225).

Como é possível observar, o nível de obstrução do entorno em relação à visão do céu das fachadas associado também ao albedo, corresponderá a um nível maior ou menor de insolação e, consequentemente, de iluminação nas mesmas. Nas tabelas apresentadas, os valores do albedo propostos para cada quadra (fachadas e cobertas) estão associados a um espectro de cores e texturas, a fim de associar à grandeza, a algum componente recorrente. Diversas outras possibilidades de texturas podem ser prescritas para os mesmos valores indicados. Conforme visto

no estudo de sensibilidade, o albedo é um dos fatores mais significativos na modificação do balanço radiativo e da iluminância encontrada nas superfícies construídas. Sendo, portanto, extremamente relevante que possa ser prescrito juntamente com as demais medidas morfológicas para obtenção do desempenho desejado.

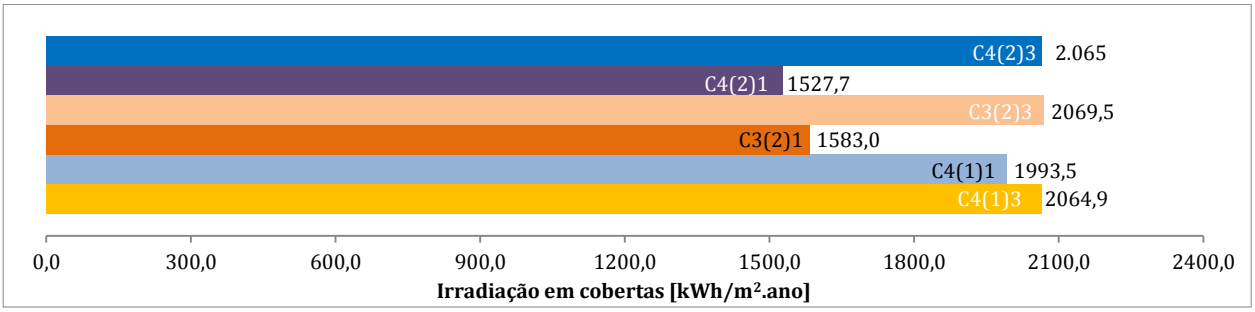


Figura 223 : gráfico comparativo do potencial solar nas cobertas entre algumas das quadras solares propostas.

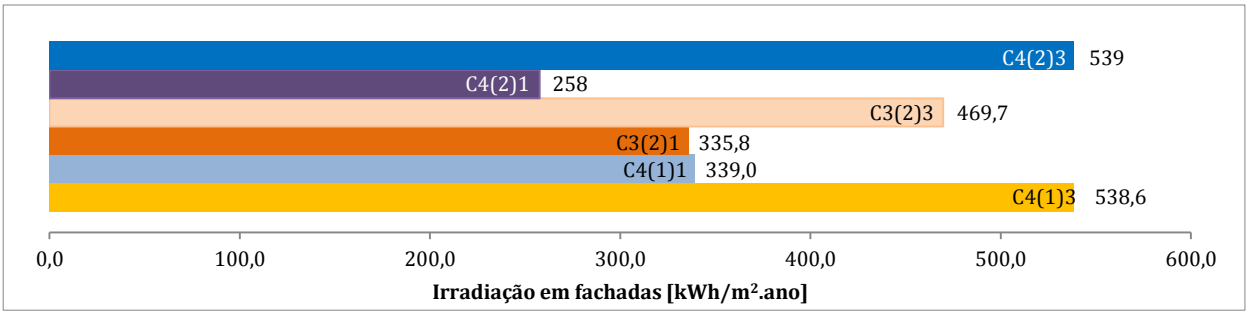


Figura 224 : gráfico comparativo da irradiação em fachadas para algumas das quadras solares propostas.

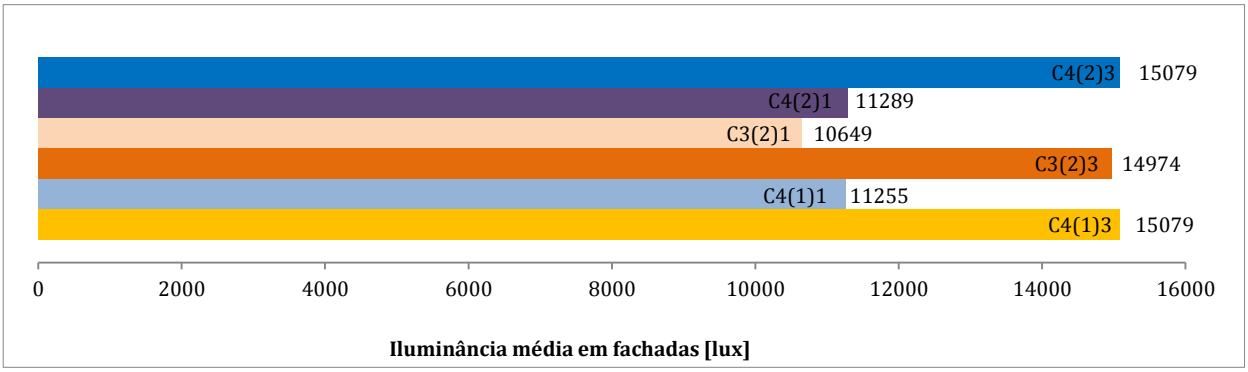


Figura 225 : gráfico comparativo da iluminância em fachadas para algumas das quadras solares propostas.

A fim de exemplificar o que foi discutido, passou-se a utilizar algumas das possibilidades tipológicas de quadra solar para proposição de uma intervenção em uma área predominantemente residencial, morfologicamente horizontal e de relativa adaptabilidade na planície litorânea de Maceió. O esquema ilustra um futuro possível, considerando-se o planejamento na escala da quadra e da vizinhança, para uma das áreas em rápido processo de modificação e especulação imobiliária na cidade. Quatro tipos de quadras solares foram ordenados para a vizinhança indicada, adaptando as dimensões das quadras e traçado existentes (Figura 226 a Figura 228). A variabilidade dentro da quadra e a complementaridade energética entre quadras que é proposta permitirá contemplar a complexidade formal (de paisagem e de usos) necessária ao desenvolvimento mais sustentável das cidades.



Figura 226 : exemplo de intervenção pontual em vizinhança situada na planície litorânea de Maceió - planta. Fonte: ilustração do autor.

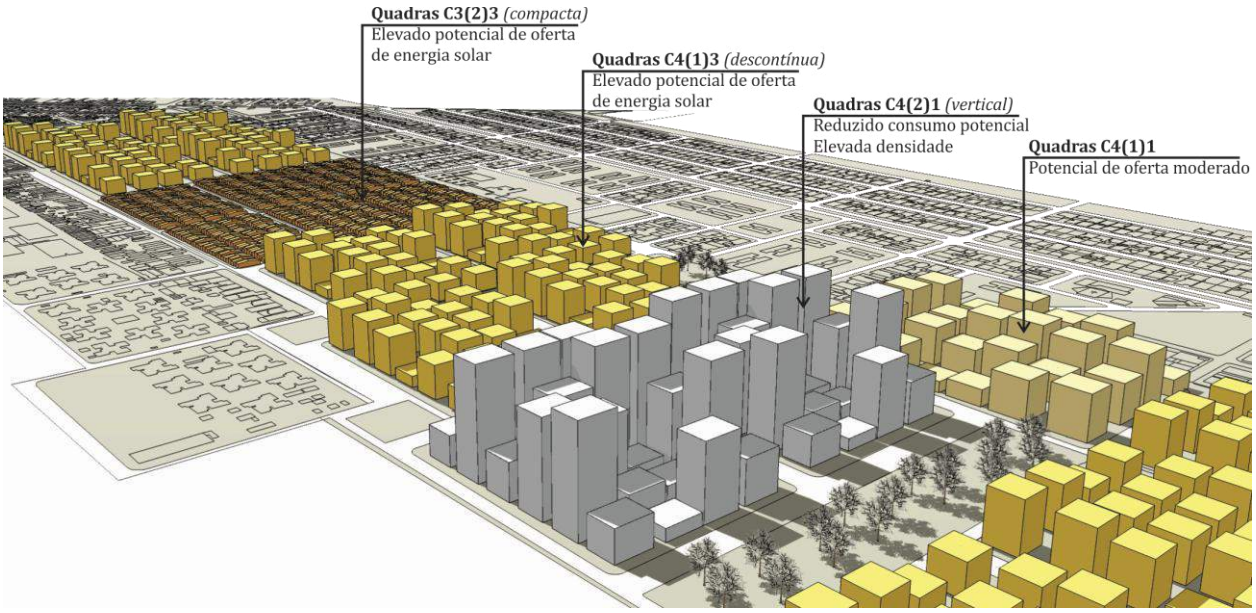


Figura 227 : exemplo de intervenção pontual em vizinhança situada na planície litorânea de Maceió – perspectiva e especificações das tipologias de quadra solar. Fonte: ilustração do autor.

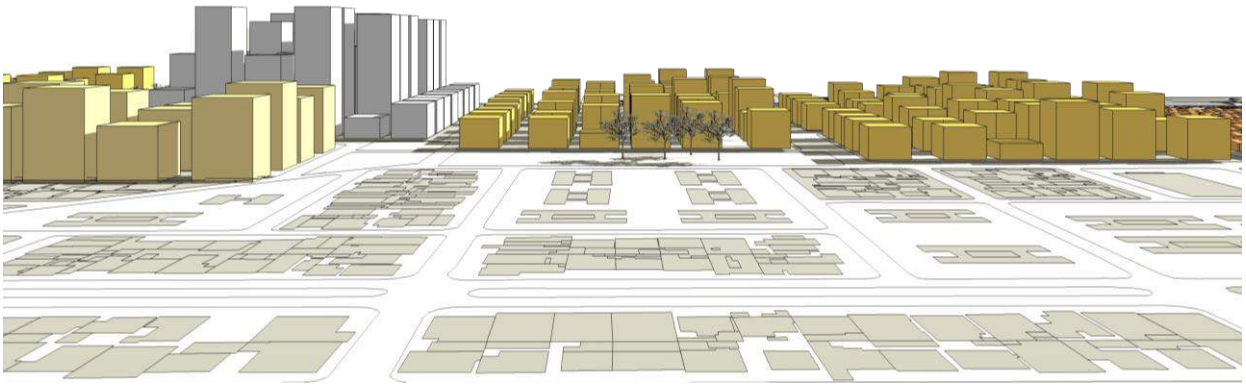


Figura 228 : exemplo de intervenção pontual em vizinhança situada na planície litorânea de Maceió - perspectiva. Fonte: ilustração do autor.

V.3.2. Criação de um banco de dados sistematizado

Propõe-se estabelecer um banco de dados das simulações realizadas. A partir de alguns modelos matemáticos existentes, é possível interpolar os pontos não simulados entre os pontos referentes aos projetos encontrados[61], formando uma ampla malha de projetos ou uma superfície de resposta, de modo à tornar disponível as respostas (do potencial solar) encontradas para uma completa gama de combinações possíveis dos parâmetros estudados. Uma tal ferramenta facilitaria a proposição de tipologias que pudessem ser compatibilizadas da forma mais eficaz e possível com a complexidade já existente, auxiliando no processo de decisão.

Uma das metodologias empregadas para isso é, portanto, a metodologia da superfície de resposta (MSR). A MSR, também conhecida como modelo substituto, consiste em uma técnica bastante útil para modelagem e análise nas aplicações em que a resposta de interesse sofre influência de várias variáveis e nas quais o objetivo consiste em otimizar essa resposta. Segundo Montgomery e Runger (2009), a primeira etapa da MSR é encontrar uma aproximação adequada para a verdadeira relação entre a resposta e as variáveis independentes.

A utilização da MSR é particularmente interessante para o problema abordado no presente trabalho, uma vez que o mesmo envolve a análise dinâmica do balanço radiativo de fachadas de formas construídas na escala urbana, o que demanda custo computacional relativamente elevado, devido à escala trabalhada. Com o intuito de reduzir tal custo e proporcionar mais eficiência ao processo de otimização, torna-se adequado o uso de metamodelos para mapear o comportamento das geometrias possíveis em termos dos parâmetros de resposta de interesse, o que permite a predição dessa resposta em função somente dos dados de entrada do sistema. A partir de tal mapeamento, no processo de otimização pode-se substituir a análise dinâmica de determinada configuração pela consulta direta à superfície de resposta mapeada. Quando devidamente validada, a superfície de resposta fornece resultados confiáveis e é capaz de reduzir significativamente o custo computacional associado à análise de otimização.

Na literatura é possível encontrar diversas referências com descrição e aplicação de técnicas de otimização baseadas em metamodelos (MYERS E MONTGOMERY, 1995; WANG et al., 2001; WANG E SHAN, 2007; GOMES, 2007; FONSECA, 2009; SONG et al., 2010). Nessas referências os autores utilizam a MSR ajustando metamodelos com base em informações obtidas empiricamente em análises anteriores e utilizam a superfície mapeada no processo de otimização com a obtenção de grande ganho de desempenho.

Os resultados apresentados na literatura comprovam a importância e benefícios proporcionados pela utilização de técnicas de metamodelos associadas a processos de otimização. Essa abordagem, no entanto, não é incorporada ao presente estudo, mas a utilização da mesma é fortemente recomendada e sugerida como continuidade do trabalho.

Apenas a título de ilustração, uma superfície de resposta simples foi construída a partir de um dos conjuntos de simulação gerados, de algumas das variáveis envolvidas e do modelo evolucionário de regressão (*Evolucionary Design model).* Não detalharemos aqui a metodologia nem os procedimentos matemáticos envolvidos na constituição dessa superfície, pois não faz parte dos objetivos desse trabalho, consistindo em desdobramentos futuros da pesquisa.

[61] O conjunto de simulações (de oito rodadas no total), permitiu gerar mais de 40.000 projetos restritos de quadras urbanas possíveis para variados desempenhos energéticos.

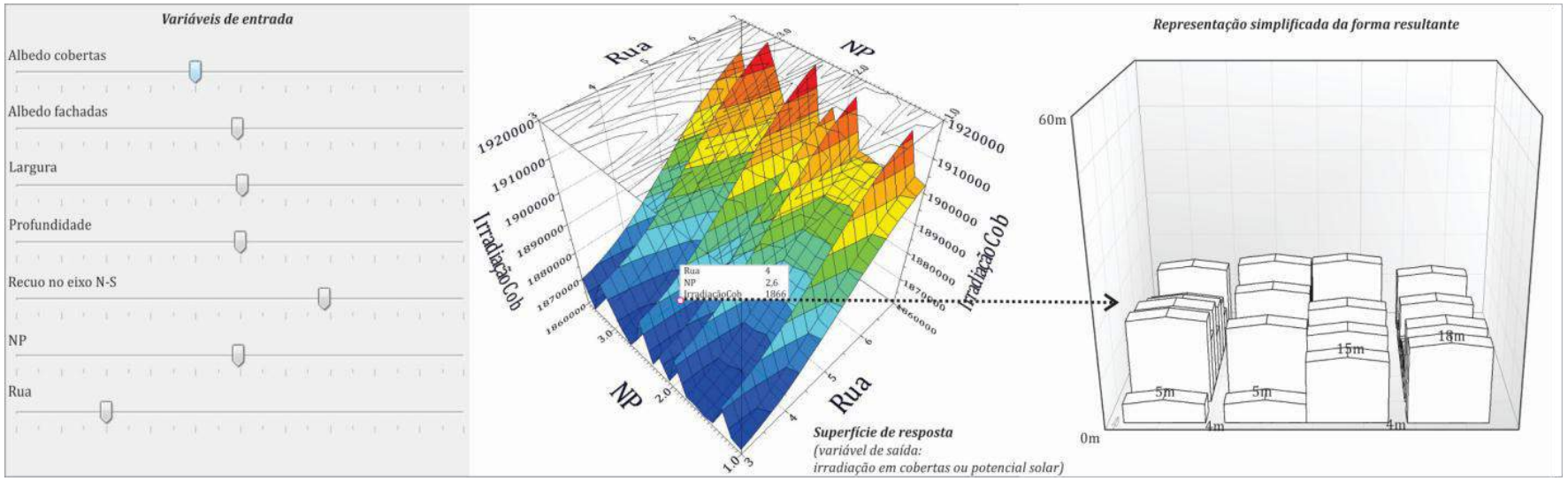


Figura 229 : exemplo de superfície de resposta de alguns projetos simulados e interpolados por um modelo evolucionário de regressão para futuro desenvolvimento de ferramenta de auxílio à decisão. Fonte: adaptado de modeFRONTIER, 2013.

Conclusões do Capítulo V

O Capítulo V procurou explorar os resultados das múltiplas formas "ótimas" obtidas a partir do processo de concepção da forma via otimização no Capítulo IV. Os resultados distinguiram oportunidades bastante convenientes em termos de diversidade morfológica que apontariam para variadas proposições no interior das quadras e entre as mesmas. Destacou-se com isso, a relevante definição da escala: o elemento da quadra e da relação entre elas no contexto da vizinhança. Essa diversidade encontra e a relação de escalas possibilitaria:

- a criação de micro-redes de geração de energia, associando diferentes níveis de demanda e oferta na quadra e entre quadras e, assim, criando-se uma variedade de densidade talvez bastante desejável e mais aceitável.

- a integração de outros critérios e disciplinas, como a ventilação da malha urbana, pela criação de efeitos como o efeito pirâmide e um aumento da permeabilidade dos ventos no tecido.

- a integração de uma mistura funcional e social a partir das variações tipológicos obtidas.

Esse trabalho buscou ainda tornar os conhecimentos obtidos acessíveis e exploráveis a partir da proposição de dois dispositivos de auxílio à decisão urbana:

- a criação de um código de microurbanismo solar, de modo que o planejador urbano possa compor vizinhanças em função do maior ou menor grau de adaptabilidade local, integrando aspectos relativos à acessibilidade, densidade e potencial solar de produção energética descentralizada.

- a proposição de maquete de ferramenta informática baseada em metodologias como a metodologia da superfície de resposta, para criação de um banco de formas (e densidades) em função do potencial solar das mesmas.

CONCLUSÕES

Conforme foi apresentado no início do texto desta tese, os assentamentos urbanos estão cada vez mais numerosos e densamente habitados. As projeções estatísticas indicam que esse crescimento deverá continuar com bastante ênfase ao longo das próximas décadas, principalmente para os países em desenvolvimento. A ausência de um controle efetivo desse crescimento urbano, pelo não ordenamento racionalizado das suas estruturas, tem repercutido na reprodução de modelos de ambientes construídos ineficientes energeticamente e de baixa qualidade ambiental, entre outras questões, o que acarreta em ambientes urbanos grandes consumidores e predadores de recursos naturais globais.

Como é inevitável que as cidades cresçam e, com isso, suas demandas energéticas também o façam, as cidades podem e devem, a princípio, ser repensadas a fim de gerir os recursos que necessitam de forma mais eficiente.

Conforme visto, a morfologia das cidades possui um papel extremamente importante nesses processos, e consiste em elemento chave de transformação das cidades.

Medidas elencadas para atender aos requisitos de eficiência energética para os espaços construídos devem, todavia, atravessar as escalas espaciais e temporais que as encerram. Uma maior imbricação das escalas é indispensável. Medidas para melhorar a eficiência energética da arquitetura são importantes, mas podem ser ineficazes se tomadas individualmente, visto que o edifício não está isolado e seu desempenho dependerá de sua relação com as demais construções do seu entorno. Pois, se o entorno construído não for bem definido poderá comprometer a estratégia de eficiência adotada para o edifício objeto-isolado. Torna-se assim, cada vez mais indispensável num contexto do desenvolvimento urbano sustentável, considerar e estabelecer medidas que permitam regular o espaço construído, portanto, em uma escala mais ampla que a escala do edifício.

Essa pesquisa é uma contribuição à problemática atual que envolve as questões da **cidade** e sua inter-relação com as condições locais climatológicas, e também a avaliação prospectiva sobre o comportamento em potencial das construções urbanas relativo ao consumo de recursos e a geração de energia via conversão solar.

Essa contribuição está centrada no estudo da **cidade enquanto morfologia urbana. Ou seja,** na construção de cenários prospectivos de requalificação e concepção urbana da cidade de Maceió, a partir de uma abordagem energética, em clima tropical no Brasil. Tal região climática possui elevado potencial de aproveitamento de recursos energéticos renováveis, tal como a energia solar, um dos elementos principais de investigação dessa pesquisa.

O trabalho insere-se, portanto, no novo paradigma baseado no conceito da cidade produtora de energia, além do que já tem sido estabelecido historicamente: a cidade apenas consumidora de recursos. Esse desafio exige, no entanto, a revisão de alguns padrões relacionados à forma como densidade, a forma como ocupação e enquanto organização do tecido urbano.

Além disso, construir em regiões tropicais significa lidar com estratégias conflituosas que remete ao chamado “paradoxo da superfície”. Sabe-se que uma das mais importantes estratégias bioclimáticas de projeto nessas regiões climáticas é o controle dos ganhos solares excessivos nas edificações por meio de seus envelopes (e.g. redução do fator de forma, aumento da verticalidade). Estratégias que entrariam em conflito, com essa nova problemática que se impõe: a da integração da energia solar como fonte de produção energética renovável descentralizada nas cidades. A verticalidade e o adensamento do solo urbano produzem sombras desejáveis para redução da irradiação solar no envelope de uma edificação, mas reduziria por outro lado o potencial de geração de energia e poderia também reduzir substancialmente as condições de iluminamento natural no interior dos espaços construídos.

Síntese conclusiva do trabalho

A fim de tentar levantar respostas para essas questões, foi estabelecida na presente pesquisa uma metodologia que se inicia com o estudo da forma urbana em uma dada cidade, e com o seu estabelecimento em classes tipológicas de referência, indo até a parametrização de seus componentes mais significativos, com o objetivo de gerar novos projetos via otimização, em função de critérios energéticos.

A partir da aplicação da metodologia proposta na cidade de Maceió (AL), instrumentos de leitura da forma urbana, sob o olhar do desempenho energético (condicionantes solares) foram empregados para caracterização e identificação de estruturas urbanas representativas do tecido da cidade. Cinco classes de tipo-morfologias urbanas predominantes nesse tecido foram reconhecidas por métodos estatísticos e com auxílio de um SIG. Verificou-se no contexto de Maceió, a presença de uma crescente verticalização em pontuais centralidades e crescente horizontalização das periferias, características morfológicas fortemente atreladas às peculiaridades da renda imobiliária da terra e aos frágeis instrumentos regulatórios. Identificar essas tipologias nos permitiu também estudá-las a partir da aplicação de modelos físicos de simulação. De modo que para cada tipo, seu desempenho e o potencial solar de produção energética foram estabelecidos. Esse diagnóstico inicial sobre os espaços existentes nos permitiu estabelecer relações importantes entre a forma urbana e o balanço radiativo e a disponibilidade de iluminação natural nas superfícies de fachadas e cobertas das edificações.

A partir dos resultados obtidos nessa etapa, foi possível verificar um importante potencial solar da cobertura dos edifícios para todas as tipo-morfologias de referência identificadas neste estudo para a cidade de Maceió-AL, demonstrando inicialmente pouca influência do entorno construído na produção do efeito de sombras em cobertas, por exemplo. De fato, para fins de aproveitamento da energia solar, a trajetória do sol em baixas latitudes favorece bastante a captação desse recurso por meio das cobertas em diversas formas construídas, principalmente, se o desvio-padrão da altura construída do entorno não for muito importante.

No entanto, esse potencial de aproveitamento quando ponderado pela densidade ocupada (número de pavimentos e/ou unidade de ocupação), estabelece-se de outra forma. Verificou-se uma importante dependência da verticalidade, do coeficiente de aproveitamento e taxa de ocupação para adequabilidade otimizada do potencial solar das construções urbanas. Destacando-se o elevado potencial das vizinhanças urbanas predominantemente horizontais e de grandes superfícies construídas no solo, como em alguns bairros da periferia da cidade e de centralidades como no bairro situado no tabuleiro da cidade. A verticalização das construções na cidade, ao minimizar a superfície de envoltória exposta à radiação solar por unidade habitacional, reduz o potencial solar para produção de energia descentralizada por metro quadrado habitado, mas pode, por outro lado, contribuir para a redução dos ganhos térmicos por aporte solar nesses envelopes construídos, podendo melhorar as condições de conforto interior e, assim, reduzir a demanda energética. No entanto, para algumas tipologias, isso comprometeu expressivamente no nível de iluminação natural recebidos pelas edificações.

Esses resultados contribuíram para responder a hipótese formulada no início da pesquisa, que afirmava a influência determinante dos parâmetros da forma construída no potencial energético, tanto em termos de potencial de aproveitamento para produção quanto de potencial de redução da demanda.

A partir do uso de determinados indicadores da forma (em função da relevância aos condicionantes solares em estudo) foi possível, portanto, construir relações importantes entre as características morfológicas de uma dada tipologia e o comportamento físico obtido pela mesma. De modo que esses indicadores podem ser referidos e empregados na prática da concepção permitindo

esboçar tendências importantes de desempenho qualitativo das formas, corroborando para a segunda hipótese assumida na pesquisa.

Diante dos condicionantes solares, os indicadores da forma urbana também foram analisados quanto à sua magnitude de impacto, a fim de se conhecer a influência relativa dos diferentes fatores tipo-morfológicos implicados. A partir de uma análise de sensibilidade considerando-se o efeito principal de cada fator e o efeito de interação entre eles nas respostas de irradiação e iluminação nas envoltórias, foi possível definir a significância do comportamento de cada um, hierarquizando-os e desprezando os fatores que não produziam modificações importantes nas mesmas. Uma tal abordagem, permite priorizar decisões de projeto, otimizando também o tempo de modelagem. Nessa etapa destacou-se a influência do prospecto médio e do albedo das superfícies. Ou seja, conforme resultados obtidos, variações importantes nesses fatores são as que mais produzem impacto nas trocas radiativas em envoltórias construídas em meio urbanizado (no espectro solar, no infravermelho e no visível). Essa informação pode ser bem relevante para integração em qualquer processo de projeto urbano: em análises multicritérios por métodos discretos (Auxílio à Decisão Multicritério) ou por otimização clássica (pesquisa operacional).

Por último, os fatores mais pertinentes e influentes foram retidos para um estudo paramétrico no sentido da proposição de formas de quadra urbana, com base nas tipologias encontradas em Maceió e visando o aproveitamento da energia solar pelas cobertas das envoltórias e a redução do aporte solar nas fachadas das edificações. Nessa etapa, apenas duas das cinco classes tipológicas de referência de Maceió foram consideradas, a fim de ilustrar o processo para intervenção pontual em distritos que passam por transformações mais rápidas e significativas.

O uso de métodos paramétricos de projeto integrado ao uso de algoritmos evolutivos para concepção da forma das quadras urbanas permitiu gerar variadas soluções de compromisso para os dois objetivos conflitantes assumidos. A partir da rotina de cálculos de analogia ao processo de evolução das espécies, projetos mais evoluídos e adaptados aos critérios de interesse foram encontrados. Mais de 80.000 simulações foram realizadas para obtenção das soluções não-dominadas propostas. Outras soluções, mais ou menos eficientes, poderiam, todavia, ser geradas com mais ou menos simulações, com uma probabilidade maior de mutabilidade ou de cruzamento ou com uma população inicial mais ampla. De modo que os resultados “ótimos” gerados dependem muito das definições estabelecidas para o modelo. Assim como da escolha do algoritmo. Nesse trabalho, essas definições foram baseadas em valores encontrados e recomendados pela literatura.

Não muito distante do que se poderia esperar, os projetos encontrados nos extremos da fronteira de Pareto apresentaram soluções com morfologias mais uniformes. Ou seja, uma cidade pouco densa, horizontal e com desvio mínimo ou inexistente da média da altura construída seria a solução ótima para um maior potencial solar e, uma cidade bastante adensada, com bastante desnível da altura construída seria uma solução ótima para um menor ganho solar em fachadas, potencialmente reduzindo a demanda energética. No entanto, nenhuma dessas soluções previsíveis, isoladamente seriam desejáveis. A cidade de baixa densidade, conforme mostrado, produz potencialmente mais energia, porém consome mais, não só mais energia, como consome mais espaço no solo e mais dinheiro (para extensão necessária de redes de infra-estrutura: água, energia, saneamento, transporte, etc.). A cidade muito verticalizada e adensada reduz esses consumos, mas por outro lado, reduz o potencial de produção de energia localmente e pode produzir congestionamento na infra-estrutura existente, além de possíveis efeitos intensificadores das mudanças ambientais localmente, como o efeito da ilha de calor, aumento local da poluição do ar e danos sonoros amplificados.

Para além das respostas evidentes encontradas, a diversidade de soluções da fronteira de projetos entre os dois extremos, mostrou que para uma perda muito pequena (2 a 5%) em termos

de potencial solar nas cobertas, seria ainda possível ter projetos com elevado potencial de oferta, para uma redução bastante significativa de demanda potencial (em relação aos extremos). Para isso, um espectro bastante variado de soluções mais heterogêneas puderam ser propostas.

Os resultados apontaram para oportunidades bastante convenientes em termos de diversidade morfológica que apontariam para variadas proposições na quadra e entre quadras. Destacou-se com isso, a relevante definição da escala: o elemento da quadra e da relação entre elas no contexto da vizinhança. Essa relação de escalas possibilitaria, por exemplo, a criação de micro-redes de geração de energia, associando diferentes níveis de demanda e oferta na quadra e entre quadras e, assim, criando-se uma variedade de densidade talvez bastante desejável e mais aceitável.

A integração de tecnologia de produção energética, como aquela de sistema de painéis fotovoltaicos, é notavelmente adaptável ao contexto das cidades por diversas razões: a modularidade dos painéis facilitaria sua instalação; a capacidade de produzir perto de centros de demanda; a capacidade de integração ao envelope dos edifícios, substituindo parcial ou totalmente alguns componentes do telhado; e a crescente importância nos regulamentos de eficiência energética para edifícios (EP, 2009) (BRASIL., 2001). Além disso, são possíveis de serem conectadas à rede local de energia, que representa um desafio para os operadores do sistema se for usado em larga escala e em curto prazo, devido à introdução de harmônicos (CELLURA, DI GANGI, *et al.*, 2012). Mas, sobretudo, há sistemas recentes que permitem a integração da energia gerada localmente à rede convencional, e podem possibilitar uma mudança importante para um contexto promissor de poli-geração energética, com construção e aplicações em redes inteligentes (ou *smartgrids*), distrito integrado de sistemas de energia ou de redes de centros de energia, conforme discutimos no último capítulo da tese.

No entanto, observa-se que a inserção dessa tecnologia no contexto brasileiro encontra ainda barreiras importantes. Em alguns países nos quais a micro-geração distribuída à base solar fotovoltaica passou a ser fonte relevante de injeção de energia de volta à rede, as distribuidoras de energia elétrica foram um tanto refratárias. As principais razões disso (ABINEE, 2012):

- A intermitência da geração solar fotovoltaica, com grandes variações de potência ocorrendo em curto espaço, por exemplo, na passagem de nuvens, é aspecto de preocupação porque levam a um uso mais intensivo de componentes, tais como transformadores, reduzindo a vida útil do equipamento;

- Preocupação sobre eventual redução do controle operativo sobre sua rede através da injeção "não firme" (intermitente) de energia.

- Exigência de celebração de contrato de acordo operativo para se resguardar de responsabilidade para qualquer incidente (como choque elétrico) ocorrido na instalação de gerador distribuído, fora, portanto, de seu controle.

No entanto, em quase todos os mercados mais maduros a maioria destas questões já foi tratada e resolvida, havendo hoje percepção favorável às instalações fotovoltaicas pelos serviços prestados à rede. Além disso, vai se tornando cada vez mais clara a oportunidade de se explorar a energia fotovoltaica no Brasil, não apenas por causa da maior irradiação solar, que é sem dúvida um fator relevante, mas também pela firme trajetória de aumento de eficiência e queda dos custos de implantação de módulos e sistemas fotovoltaicos em nível internacional. Em relação a isso, publicações recentes afirmam que a perspectiva de crescimento dessa energia é extremamente positiva e expressiva. Um exemplo disso, diz respeito ao aprimoramento no rendimento (ou percentual de conversão) dos sistemas. Estudos apontam que o rendimento que hoje é de cerca de

15%[62], em laboratórios já se tem alcançado de 25 a 30% (LINCOT, 2013).

Em contrapartida, a implantação de sistemas de aproveitamento da energia solar para aquecimento de água (solar térmico) já consiste em estratégia amplamente viável, difundida e aplicada em diversas tipologias construídas de várias capitais brasileiras, como Maceió. Resta, no entanto, que com a evolução da morfologia urbana, o acesso solar para estes fins (produção solar térmica e elétrica) possam ser garantidos.

Os resultados da última etapa propositiva deste trabalho de pesquisa permitiu também corroborar com a hipótese assumida de que a integração de técnicas provenientes de outros domínios de investigação ao método de projeto de construções, como por meio de técnicas paramétricas de projeto por otimização (domínio da pesquisa operacional), seria capaz de produzir soluções mais robustas e adaptáveis ao contexto estudado.

Conclui-se que essa vantagem é também atribuída ao fato de que o modelo de otimização foi aplicado em contexto metodológico de pesquisa onde os dados urbanos locais alimentaram o processo de projeto (a partir do reconhecimento de tipologias de referência existentes).

Apesar da etapa final da metodologia (otimização) ter sido apenas aplicada a duas das cinco tipologias identificadas em Maceió, os resultados obtidos mostram o potencial que apresenta a geração paramétrica de projetos contextualizados, o que pode aumentar a capacidade de adaptação de novas soluções formais às quadras existentes.

Os limites da abordagem metodológica da pesquisa

A cidade, onde se conjugam fenômenos naturais e antrópicos é, sobretudo, um sistema aberto e complexo onde tudo possui influência em tudo (LOWRY, 1964), mas no qual só é possível integrar a complexidade por partes. E, para isso torna-se, muitas vezes, difícil encerrá-las por hipóteses simplificadoras. A avaliação de um projeto de ordenamento urbano não seria, portanto, sinônimo de uma previsão (precisa), mas antes um estudo comparativo de cenários possíveis e prováveis (ALLAIN, 2012).

O presente trabalho teve como base os conhecimentos específicos ou respostas particulares a uma problemática de grande relevância, a energia nas cidades. Procurou-se então com a presente pesquisa contribuir para ampliar o conhecimento existente e mostrar que a partir do particular, do estudo das partes, é possível gerar oportunidades ao universal, conjugando outras problemáticas e outras contribuições.

Porém, sabe-se que nada poderá jamais substituir o estudo de uma cidade particular entendida na sua totalidade. Conforme afirma Rémy Allain, "assim como uma frase é mais que a soma das palavras que a compõe, um poema infinitamente mais....uma cidade é uma totalidade complexa". E cada um pode fazer sua própria leitura.

No estudo realizado tratou-se da forma urbana dotada de certa autonomia, ao examinar suas partes e seus componentes, no entanto, sabe-se que a morfologia não pretende dar conta da intensa e complexa vitalidade dos organismos urbanos. É nesse viés que se encontra um dos principais limites da abordagem empregada. A forma também dependerá de outros aspectos igualmente importantes e, por vezes, menos físicos, menos "visíveis" como o que caracterizará sua percepção e aceitação por partes de seus usuários. As formas construídas de uma cidade não podem ser consideradas meramente como simples quadros passivos. Estas consistem também de marcos, elementos essenciais de identidade, no contexto visual de todos os dias e, por fim, uma das razões de compor uma cidade (ALLAIN, 2012).

[62] 15% de 1000 W/m² representaria cerca de 150 W de energia.

A classificação tipológica realizada nesse trabalho por meio de métodos estatísticos possuem limites importantes. Por se tratar de uma repartição do tecido urbano em função de similaridades morfológicas dadas apenas por um conjunto restrito de indicadores quantitativos, esta não permite considerar correntes histórias do urbanismo, período de construção, agregando atributos e detalhes sobre as construções. Atributos estes que permitiriam uma maior precisão em predições energéticas dos edifícios.

No entanto, a metodologia empregada na pesquisa, assim como as diretrizes propostas com os resultados, podem ser facilmente estendidas para a integração de novas questões e novos olhares.

A partir dos importantes indicadores da morfologia urbana utilizados, diversas problemáticas puderam ser confrontadas. Por exemplo, a densidade construída por quadra ou por vizinhança urbana pode ser analisada juntamente à densidade humana e à densidade de empregos ofertados, trazendo contribuições à diversidade, proximidade, a priorização do transporte público para a mobilidade urbana, a reorganização das densidades da cidade de acordo com os eixos de transporte coletivo de massa e o reequilíbrio dos usos no território entre a oferta de trabalho e o local de moradia, complexidade incontornável às reflexões para uma cidade mais sustentável.

O presente estudo focou na modelagem dos condicionantes solares de projetos a fim de abordar a problemática energética nas cidades, ligadas à demanda dada aos ganhos solares em fachadas e o potencial solar de produção de energia em cobertas, além dos ganhos possíveis em termos de iluminação natural. No entanto, sabe-se que, mesmo sendo um elemento climático extremamente importante para considerações projetuais em clima tropical, o sol não é o único elemento.

A problemática energética da cidade envolve numerosos fatores e critérios além dos condicionantes solares, tais como o complexo balanço de energia (solo-superfície-atmosfera) da cidade, onde se conjugam fatores relativos às trocas radiativas, fluxos turbulentos de calor sensível e latente, estoque calor, advecção, modificações no escoamento do ar, calor antropogênico, entre outros. O clima urbano local é produto da interação de vários elementos e em várias escalas (desde a escala regional até a micro-escala urbana). Os fenômenos da meso-escala interferindo significativamente e determinando as modificações do clima local ou abaixo do dossel urbano, torna necessário a sobreposição das dimensões espaciais e temporais. No entanto, esse desafio, em termos de modelagem dos complexos sítios urbanos para que possa ser integrado ao balanço energético dos edifícios e, portanto ao processo de projeto na escala da quadra ou do edifício ainda está longe de ser resolvido.

Todavia, a energia proveniente do sol é um dos elementos de maior magnitude de efeito nessas complexas interações climatológicas, pois está, conforme visto no Capítulo I, na origem de todos os processos termodinâmicos. Outrossim, a partir de estudos como este, com foco no impacto da morfologia urbana nas trocas radiativas em meio urbano, é possível ter elementos de resposta que poderão alimentar investigações futuras sobre outros elementos/aspectos contribuindo para construção de cenários sobre a influência do clima urbano na energia das construções.

Outra limitação do trabalho é relativa às hipóteses simplificadoras assumidas pelo próprio modelo de simulação empregado para cálculo das trocas radiativas em meio urbano. Uma dessas hipóteses (a mais significativa) consiste em que todas as superfícies urbanas estudadas são superfícies lambertianas, ou seja são superfícies difusoras ideais (reflexão uniforme em todas as direções). Essa simplificação apresentou-se como limitação quando do estudo de sensibilidade, indicando uma significância pouco expressiva da fração de vidro das fachadas.

O algoritmo de radiosidade utilizado não considera o cálculo em superfícies especulares, como o faz a técnica de raio-traçado que é usualmente empregada em simulações dinâmicas na

escala do edifício. Nesta escala a existência de uma fração expressiva de vidro em fachadas do entorno, poderia representar um incremento em termos de energia radiante refletida para um dada hora do dia, em um dado ponto de avaliação no plano de trabalho no interior de uma sala de um edifício. Ao avaliar um valor instantâneo de irradiação ou iluminação para um dado ponto, o fator *fração de vidro* poderia apresentar uma significância importante.

No entanto, na escala espacial urbana e, em termos de saldo anual (escala temporal do ano), esse comportamento pontual fica combinado em uma média de variações (e.g. média dos diferentes ângulos de incidência, fluxo solar, etc.), de modo que o impacto individual do fator *fração de vidro* passaria a ser bem menos relevante. Assim, a média da variação do fluxo solar em fachadas se aproximará do que seria uma superfície lambertiana, reduzindo as diferenças encontradas entre os modelos. Sendo esta simplificação que favorece o tempo de cálculo razoável do modelo, permitindo que seja integrado em processos de otimização, como nesse estudo.

É importante ainda ressaltar que todo estudo de modelagem é sobretudo uma avaliação de desempenho relativo na comparação entre cenários e será a interpretação dos resultados que atribuirá valor à investigação. Portanto as informações obtidas no estudo e que constituem o conhecimento gerado é que serão úteis para uma prescrição de recomendações, e não necessariamente os valores absolutos obtidos.

Conclusão geral

Diante das ponderações feitas, algumas conclusões gerais podem ainda ser apresentadas:

- Conclui-se que para avançar no sentido do desenvolvimento urbano energeticamente mais equilibrado e sustentável, fazem-se necessárias abordagens interdisciplinares e multiescalares.

- Portanto, o uso de indicadores da morfologia urbana servindo para identificação de padrões construídos no tecido urbano, consiste em uma metodologia pertinente para o cruzamento de diferentes temáticas, critérios e escalas, pois oferece como base, uma linguagem comum ao projetista, podendo ser atribuída de diferentes significados, aproximando-se mais da complexidade dos numerosos aspectos que compõem a cidade.

- Um dos aspectos integrados e discutidos nesse trabalho diz respeito à mistura social e de usos, por exemplo. Essa questão tem sido bastante enfatizada hoje nos debates entre urbanistas, teóricos e profissionais da prática da cidade. No entanto, além de argumentos práticos ligados à questão da proximidade, mobilidade e integração social, esse trabalho propôs elementos de resposta à problemática energética da cidade.

- No entanto, para que todos esses aspectos possam ser levados em conta de maneira mais eficaz, faz-se necessário rever os instrumentos de controle do uso de ocupação do solo urbano, principalmente em termos de escala. A abordagem do macro-zoneamento clássico funcionalista encontrado hoje como regulamento para maioria das cidades, não permite um controle efetivo do solo urbano, tampouco poderá garantir um desempenho energético satisfatório.

- A partir de metodologias como a proposta nessa pesquisa, onde numerosas possibilidades "ótimas" foram geradas e, onde certa heterogeneidade formal foi encontrada para isto, a proposta de um código de micro-urbanismo poderia ser bastante adequado. Assim, as construções (tipo, forma e uso) e a relação entre elas e com os demais elementos urbanos (ruas, espaçamentos) poderiam ser especificados, sem necessariamente haver um plano macro-urbano. Um código mais generativo (micro-urbanismo solar) seria capaz de criar 'variações quase infinitas em torno de um tema' (LEJEUNE, 2005). Entre oferta e demanda de energia, globalmente, vizinhanças urbanas teriam seus elementos construídos e as relações entre eles controlados pelo código, mas a forma

global seria de certa maneira emergente, deixando um potencial importante de diversidade arquitetônica.

- A fim de conduzir a complexidade inerente aos desafios da gestão energética na Cidade (ligada ao consumo e produção de energia nas suas construções), os planejadores e os gestores urbanos necessitam de diretrizes, de metodologias, instrumentos de representação e de avaliação para compreender os fenômenos em curso, comparar cenários possíveis ou prováveis, para fazer escolhas, e enfim, poder agir. O presente trabalho procurou oferecer algumas respostas à gestão dessa complexidade. A abordagem de estratégias energéticas conflituosas de projeto mostrou que muito além da imposição de restrições e complexidades ao processo, há oculta uma grande oportunidade na procura para novas soluções que possibilitem uma revisão da Arquitetura da cidade.

Perspectivas para trabalhos futuros

O estudo realizado nessa pesquisa pode ser aprimorado e estendido de diversas formas a partir de alguns estudos complementares, tais como:

- A incorporação de outros condicionantes climáticos ao processo de otimização formulado. Além das trocas radiativas em meio urbano, seria bem interessante otimizar a circulação do ar nas vizinhanças. Em clima tropical, o movimento do ar, tanto em meio urbano como no interior das edificações, é componente de grande importância, tanto para o conforto humano, como para qualidade do ar e do ambiente (e.g. dispersão dos poluentes). Um estudo a partir dos projetos de quadras e vizinhanças propostas poderia ser vislumbrado ou ainda a integração desse componente no novo estudo de otimização que vise soluções de compromisso entre todos os critérios climáticos.

- Consideração de variações mais amplas de orientação na implantação dos edifícios por parcela urbana.

- Consideração de outros cenários de otimização, com objetivos diferentes, como maximizar o potencial solar de produção em algumas fachadas verticais (e.g. oeste) ou ainda minimizar a irradiação solar tanto nas fachadas como nas coberturas, em clima tropical.

- A incorporação de outras variáveis de projeto, incluindo uma terceira escala ao estudo, a escala arquitetônica. Com a definição de dados de entrada mais precisos sobre os possíveis componentes das envoltórias – para uma etapa de projeto mais avançada – seria possível obter configurações arquitetônicas mais eficientes, não apenas em termos de volume e forma, mas também de dispositivos, aberturas e materiais.

- Integração de novas temáticas: outras fontes de energia renovável e energia total dos materiais

- Desenvolvimento de uma ferramenta informática para sistematização e automatização dos dados gerados na pesquisa a partir, por exemplo, da metodologia de superfície de resposta, de modo a torná-los mais acessíveis e legíveis no auxílio à decisão dos planejadores urbanos, no sentido da especificação e organização das quadras solares em vizinhanças urbanas mais energeticamente eficientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR15215-3/2004. Iluminação natural – Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos.**. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro: ABNT, , p. 33. 2004.

ACHARYA, P. K. et al. **MODTRAN user's manual versions 3.7 and 4.0**. Air Force research Laboratory. [S.l.]. 1998.

ADENE. **Eficiência energética dos edifícios residenciais.** ADENE. Lisboa. 2008.

ADOLPHE, L. **L'intégration des contraintes techniques dans le processus de conception architecturale**. EMP. Paris. 1995.

ADOLPHE, L. A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 28, p. 183-200, 2001.

ADOLPHE, L. et al. **SAGACités Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines**. MENRT. Toulouse. 2002.

AIDA, M.; GOTOH, K. Urban albedo as a function of the urban structure - a two dimensional numerical simulation (Part II)'',. **Boundary Layer Meteorology**, v. 23, p. 415-423, 1982.

AIDA, M.; GOTOH, K. Urban albedo as a function of the urban structure – a two- dimensional numerical simulation. **Boundary-Layer Meteorology**, 23, n. 4, 1982. 415- 424.

AIT-AMEUR, K. **Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les esapces publics urbains: validation d'un système d'indicateurs «morpho-climatqiues et d'un indicateur de confort**. Tese (Doutorado em Arquitetura). Université de Nantes. Nantes. 2002.

AIT-AMEUR, K. **Vers une méthode multicritère de carcatérisation du microclimat dans les esapces publics urbains: validation d'un système d'indicateurs «morpho-climatqiues et d'un indicateur de confort**. Tese (Doutorado em Arquitetura). Université de Nantes. Nantes. 2002.

ALBERTI, M.; WADDELL, P. An integrated urban development and ecological simulation model.. **Integrated Assessment** , v. 3, n. 1, p. 215-227, 2000.

ALCOFORADO, M. J. . et al. **Orientações climáticas para o ordonamento em Lisboa.** Universidade de Lisboa.. [S.l.]. 2005.

ALENCAR, B. J. **A análise multivariada aplicada ao tratamento da informação espacial: uma abordagem matemático-computacional em análise de agrupamentos e análise de componentes principais**. Tese (Doutoradoem Geografia), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 200. 2009.

ALLARD, F.; SANTAMOURIS, M. **Natural ventilation in buildings:** a design handbook. Londres: James & James, 1998.

AMORIM, L.; BARROS FILHO, M. N.; CRUZ, D. **Urban Texture and Space Configuration Analysing Recife's Urban Fragments**. 7th International Space Syntax Symposium. Stockholm: KTH. 2009.

ANGSTROM, A. **A study of the radiation of the atmosphere**. [S.l.]: Smithsonian Int. Misc. Coll., v. 65, 1915. 1-159 p.

APUR. **Densités vécues et formes urbaines. Étude de quatre quartiers Parisiens**. Atelier Parisien d'Urbanisme. Paris. 2003.

APUR. **Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes.** Paris: Atelier Parisien d'Urbanisme, 2007.

ARANTES, L. **Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située**. Tese (Doutorado em matériaux, mécanique, génie civil et eletronique), Université de Grenoble. Grenoble, p. 456. 2012.

ARNFIELD, A. Two decades of urban climate research : a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, 1, n. 23, 2003. 1-26.

ARROYO, J. E. C. **Heuristicas e Metaheuristicas para Otimização Combinatória Multiobjetivo**. Tese (Doutorado em Computação). Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.

ARTIS, D. A.; CARNAHAN, W. H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. **Remote sensing of environment**, 12, 1982. 313-329.

ASAEDA, T.; CA, V. T.; WAKE, A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. **Atmospheric Environment,** 30, n. 3, 1996. 413-427.

AUGOYEARD, F. L'environnement sensible et les ambiances architecturales. **l'Espace Géographique**, v. 4, p. 302-318, 1995.

AYMONINO, C. **O significado das cidades**. Lisboa: Editorial Presença, 1984.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 1, 1996. 332 p.

BAKER, N. V.; STEEMERS, K. A. **LT Method Version 2.0**. Cambridge: Cambridge Architectural Research Ltd, v. 1, 1994.

BANDO, M. et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. **Physical Review**, v. 51, n. 2, p. 1035-1042, 1995.

BANOS, R. et al. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1753–1766, 2011.

BARBIRATO, G. M. **Aplicação do Modelo de Balanço de Energia para Análise do Ambiente Térmico Urbano de Maceió – AL**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 1998.

BARBOSA, A. M.; RIBEIRO, L. C.; ARANTES, J. M. O. **Algoritmo Genético Multiobjetivo:** Sistema Adaptativo Com Elitismo. 9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications. Serra Negra, São Paulo, Brasil.: [s.n.]. 2010.

BATTY, M.; LONGLEY, P. **Fractal Cities:** a Geometry of Form and Function. Londres: Academic Press, 1994.

BEHLING, S.; BEHLING, S. **Sol Power. The evolution of solar architecture**. Munique: Éditions Prestel, v. 1, 1996. 240 p.

BENENSON, I.; ARONOVICH, S.; NOAM, S. **OBEUS:** Object-Based Environment for Urban Simulation. 6th international conference on GeoComputation. Brisbane, Australie: [s.n.]. 2001. p. 1-10.

BENZERZOUR, M. **Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique"**. Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. Nantes. 2004.

BERARDI, U. Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable. **Sustainable cities and society**, v. 8, p. 72-28, 2013.

BERDAHL, P.; FROMBERG, R. The thermal radiance of clear skies. **Solar Energy**, 29, n. 4, 1982. 299-314.

BERDAHL, P.; MARTIN, M. Emissivity of clear skies. **Solar Energy**, 32, n. 5, 1984. 663-664.

BHIWAPURKAR, P.; MOSCHANDREAS, D. Street geometry and energy conservation of urban buildings in Chicago. **Intelligent Buildings International**, v. 2, p. 233-250, 2010.

BITTENCOURT, L. **Uso das cartas solares. Diretrizes para arquitetos**. Maceió: EDUFAL, v. 1, 2005.

BITTENCOURT, L. S. **Ventilation as a cooling resource for warm-humid climates:** An investigation on perforated block wall geometry to improve ventilation inside low-rise buildings. Londres: Architectural Association Graduate School, 1993. 314 p.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 2. ed. Maceió: EDUFAL, v. 1, 2005.

BJARKE INGELS GROUP. **Reciprocity, Réponse à l'appel à projets Low2No Competition by SITRA**. [S.l.], p. 72. 2009. (Entry no.76520).

BLENNOW, K. Sky View Factors from High-Resolution Scanned Fish-eye Lens Photographic Negatives. **Journal Atmospheric and Oceanic Technology**, p. 1357–1362, 1995.

BLOCKEN, B.; JANSSEN, W. D.; HOOFF, T. V. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. **Environmental Modelling & Software** , 30, 2012. 15-34.

BOAS, M. V. **Significado da arquitetura nos trópicos- um enfoque bioclimático**. Seminário Nacional sobre Arquitetura nos Trópicos. Recife: Fundação Joaquim Nabuco. 1985. p. 40.

BONHOMME, M. **Contribuition à la generation des bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'energétique urbaine**. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Toulosue, p. 540. 2013.

BONHOMME, M.; MASSON, V.; ADOLPHE, L. **The block generator:** A tool for classification and evolution of urban typologies to assess environmental performances at the city scale. PLEA - Passive and Low Energy Architecture. Lima, Peru: [s.n.]. 2012. p. 1-6.

BORDAS-ASTUDILLO, F. **Quelle forme urbaine pour quelle densité vécue ?** Atelier Parisien d'Urbanisme. [S.l.], p. 4. 2003. (10).

BOTTEMA, M. Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion, Atmos. Environ. 18, 3059-3075. **Atmospheric Environment**, v. 18, p. 3059-30175, 1997.

BOUDON, R.; BOURIAUD, F. **Dictionnaire critique de la sociologie**. 1. ed. Paris: PUF, v. 1, 1982.

BOUSSOUALIM, A. **Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur**. Université de Nantes. Nantes. 2002.

BOYEUR, J. **Modélisation et simulation des microclimats urbains. Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments**. [S.l.]: École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, 2009.

BRASIL. **Balanço Energético Nacional 2013: ano base 2012 - relatório síntese**. Empresa de Pesquisa Enegértica. Rio de Janeiro. 2013.

BRASIL. **Lei n. 10295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia.**. Lex: Diário Oficial da União. Brasília. 2001.

BRONIN, S. C. Solar rights. In: _____ **BOSTON UNIVERSITY LAW REVIEW**. [S.l.]: [s.n.], v. 89, 2009.

BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. **J. R. Met. Soc.**, 28, 1932. 389-418.

BUENO, F. **Métodos Heurísticos: Teoria e Implementações**. Tutorial. Instituto Federal de Santa Catarina. Araranguá,SC, Brasil. 2009.

BULHÕES, R. L. **Método de redução de perdas elétricas em sistema de distribuição**. Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2011.

BUTERA, F. Towards the renewable built environment. In: DROEGE, P. **Urban energy transistion:** from fossil fuels to renewable power. Amsterdam: Elsevier, 2008.

CABUS, R. **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil**. Sheffield University. Sheffield. 2002.

CALDAS, L. G.; NORFORD, L. K. A design optimization tool based on a genetic algorithm.. **Automation in Construction**, v. 11, n. 2, p. 173–184, 2002.

CALVINO, Í. **Cidades invisíveis**. 12. ed. Alfragide: Teorema, v. 1, 2008.

CAMPOS-ARRIAGA, L. **Wind Energy in the Built Environment: A Design Analysis Using CFD and Wind Tunnel Modelling Approach**. PhD thesis, University of Nottingham. [S.l.]. 2009.

CANAN, A. **Performative architecture as a guideline for transformation of the defence line of Amsterdam**. Middle East Technical University. Delft, p. 107. 2011.

CANEPARO, L.; GUERRA, F.; MASALA, E. **UrbanLab – Generative platform for urban and regional design**. 8th International DDSS Conference. Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning. Eindhoven, The Netherlands: [s.n.]. 2006. p. 235-251.

CANTAT, O. **Télédétection spatiale et microclimats – Le cas de la région Ile-de- France.** Paris: [s.n.], 1987. 190 p.

CAPULETO, I.; GUEDI, S. E. On the use of 'solar volume' for determining the urban fabric''. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 275-280, 2001.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 1: método prescritivo.. **Ambiente Construído (online)**, Porto Alegre, RS, Brasil, v. 10, n. 2, p. 7-26, 2010.

CARVALHO, A. Smart-grids: a luz que faltava ao mercado. **Ambiente Energia** , Janeiro 2014.

CASTRO, E. B. P. D. **Método de Auxílio à Concepção Arquitetônica Baseado na Análise Multicritério e em Dados Simulados dos Comportamentos da Edificação.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.

CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. **Recent Developments In Biologically Inspired Computing**. [S.l.]: Idea Group Publishing, 2004.

CATTELL, R. B. The screen test for the number of factors. **Multivariate Behavioral Research**, v. 1, p. 245-276, 1966.

CAVALCANTE, M. M. P. D. **Meio Ambiente Construído, Globalização e Sustentabilidade Cultural – Estudo de Caso: O Bairro de Ponta Verde (Maceió)**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil. 2000.

CELANI, G. An educational experiment with shape grammars and computer. **International Journal of Design Computing**, v. 3, 2002.

CHANGNON, S. A. Inadvertent weather modification in urban areas: Lessons for global climate change. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 73, n. 5, p. 619-627, 1992.

CHAPMAN, L. Sky-view factor approximation using GPS receivers. **International Journal of Climatology** , v. 22, n. 5, p. 615-621, 2002.

CHEN, H.; JIA, B.; LAU, S. S. Y. Sustainable urban form for chinese compact cities: challenges of a rapid urbanized economy. **Habitat Internationl**, v. 32, n. 1, p. 28-40, 2008.

CHENG, V. et al. **Urban form, density and solar**. The 23rd PLEA Conference. Geneva, Suiça, 2006: [s.n.]. 2006. p. 6.

CHIMKLAI, P.; HAGISHIMA, A.; TANIMOTO. A computer system to support Albedo Calculation in urban areas.. **Building and Environment**, 39, Jun 2004. 1213-1221.

CHIRKOV, V. Anthropogenic Heating of the Atmosphere. **Anthropogenic Heat**, 2003. http://www.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/heat/.

CIE. **Standardisation of luminous distribution on clear skies**. Commission Internacionale de lÉclairage. Vienna. 1973.

CIE. **Spatial distribution of daylight - CIE Standard Overcast Sky and clear sky**. Commission Internationale de l'Eclairage. Vienna. 1996.

CIE. **Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky**. Commission Internationale de lÉclairage. Vienna. 2002.

CLARKE, K. C.; GAYDOS, L. J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 7, p. 699-714., 1998.

CLOSE, J. The integration of photovoltaics within high-rise buildings in the dense urban environments of SE Asia, consideration of legislation to promote it and to maintain solar energy access. **Renewable Energy**, 8, n. 1, 1996. 471-474.

COELHO, G. A. G.; AFONSO, S. M. B.; HOROWITZ, B. **Estudos Iniciais para a Construção de uma Ferramenta de Seleção Automática de Parâmetros dos Algoritmos Genéticos.** Anais do XXXII CILAMCE. Ouro Preto, MG: [s.n.]. 2011. p. 1-11.

COELLO, C. A. C. Evolutionary Multi-Objective Optimization: A Historical View of the Field. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, v. 1, n. 1, p. 28–36, 2006.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B. L.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. [S.l.]: Springer, v. 1, 2007.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B. L.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2007.

COENEN-HUTHER, J. Compréhension sociologique et démarches typologiques. **Revue Europeenne des Sciences Sociales**, Géneve, v. Tome XLIV, n. 135, p. 195-205, 2006.

COHON, J. **Multiobjective Programming and Planning**. [S.l.]: Courier Dover Publications, 2004.

COLOMBERT, M. **Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville.** Université Paris-Est. Paris. 2008.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE. **Quatrieme rapport annuel au Parlement sur la mise en œuvre des engagements du Grenelle Environnement.** Ministere de l'Ecologie, du developpement durable et de l'energie. Paris. 2012a. Consultado na internet em: http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/4e_rapport_grenelle_finale_COMPLET-2.pdf.

COMPAGNON, R. **PRECis: Assessing the Potential for Renewable Energy in Cities, Annexe3: Solar and daylight availability in urban areas**. University of Applied Sciences of Western Switzerland (HES-SO). Fribourg. 2000.

COMPAGNON, R. Solar and daylight availability in the urban fabric. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 4, p. 321-328, 2004.

COMPAGNON, R.; RAYDAN, D. **Irradiance and illuminance distributions in urban areas.** PLEA - 17st International Conference on Passive and Low Energy Architecture. [S.l.]: [s.n.]. 2000.

COOPER, P. I. The absorption of solar radiation in solar stills. **Solar Energy**, 12, n. 3, 1969. 333-346.

CORBIN, A. **Le miasme et la jonquille**. Paris: Flamarion, 2008.

CORBUSIER, L. **Carta de Atenas**. São Paulo: Hucitec, 1933.

COUTARD, O.; RITHERFORD, J. Les réseaux transformés par leur marges: développement et ambivalence des techniques "descentralisées". **Flux**, v. 2, n. 76-77, p. 6-13, 2009.

CRUTZEN, P. J. New directions: The growing urban heat and pollution « island » effect – impact on chemistry and climate. **Atmospheric Environment**, 38, 2004. 3539-3540.

CRUZ, J. M. **Sustentabilidade do ambiente construído: Conservação de energia através do uso da ventilação natural como forma de refrigeração passiva do ambiente urbano**. Dissertação (mestrado em Arquitetura), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil, p. 220. 2001.

CURRELI, A.; COCH, H. **Solar acess in the compact city:** a study case. PALENC 2010: Passive and Low Energy Cooloing of Built Environment. Rhodes Island, Greece: [s.n.]. 2010. p. 1-10.

DE JONG, K. **Evolutionary Computation - a Unified Approach.** Cambridge: MIT Press, v. 4, 2006.

DEB, K. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**. New Jersey: John Willey and Sons, 2001.

DEB, K. **Optimization for Engineering Design:** Algorithms and Examples. 8. ed. New Delhi: Prentice Hall of India Private Limited, 2005.

DEB, K. et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.

DEL RIO, V. **Introdução ao desenho urbano no processo de planejamento**. 5. ed. São Paulo: Pini, v. 1, 2000.

DEMAZIERE, D.; DUBAR, C. **Analyser les entretiens biographiques. L'exemple de récits d'insertion.** 1. ed. Paris: Nathan, v. 7, 1997.

DENÈGRE, J.; SALGÉ, F. **Les systèmes d'information géographiques**. Paris: PUF, 1997.

DETTWILLER, J. L'évolution séculaire de la température à Paris. **La Météorologie**, 13, 1978. 95-130.

DIDAY, E. et al. **Eléments d'analyse de données**. Paris: Editions Dunod-Bordas, v. 1, 1982.

DORIGO, M. **Optimization, Learning and Natural Algorithms**. Tese de Doutorado. Politecnico di Milano. Milano, Italie. 1992.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents Colony of Cooperating Agents. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B**, v. 26, n. 1, p. 29–41, 1996.

DUARTE, J. et al. **Alberti Digital – Tradição e inovação na teoria e prática da arquitectura em Portugal**. SIGRADI 2012 | FORMA (IN) FORMAÇÃO. Fortaleza - Brasil: [s.n.]. 2012. p. 212-215.

DUBOIS, C.; BERGERON, O. **Adapting cities to climate change:** heat and urban form. ICUC8. Dublin: [s.n.]. 2012.

DUFFIE, J. A.; BECKMANN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: Wiley, 1980. 792 p.

EERE. **Building energy software tools directory,**. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. [S.l.]. 2008.

ELIASSON, I. The use of climate knowledge in urban planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 48, p. 31-44, 2000.

ELLERKAMP, P. **Simulation de dynamiques spatiales, Exemple de la densification de la population autour d'Avignon**. V rencontre de Théo Quant. Besanço: [s.n.]. 2001.

ESCOURROU, G. **Climat et environnement, les facteurs locaux du climat.** Masson: [s.n.], 1981. 168 p.

ESCOURROU, G. **Le climat et la ville.** Paris: Presses universitaires Nathan , 1991.

ESTOURNEL, C. et al. Observations and modeling of downward radiative fluxes (solar and infrared) in urban/rural areas. **Journal of climate and applied meteorology,** 22, 1983. 134-142.

EWING, R.; PENDALL, R.; CHEN, D. Measuring Sprawl and Its Impact. **Sprawl and Health**, 2002.

FERRARI, C. **Curso de planejamento municipal integrado**. São Paulo: Pioneira Editora, 1979.

FILHO, N. G. R. **Quadro da arquitetura no Brasil**. São Paulo: Perspectiva, v. 1, 1970.

FISHBURN, P. C. Methods for estimating additive utilities. **Management Science**, v. 1, n. 7, p. 435-453, 1967.

FISHER, R. A. **The Design of Experiments**. 9 Ed.. ed. [S.l.]: Macmillan, 1971.

FLÉTY, Y. et al. **étiquettes énergétiques de mobilité:** un indicateur pour la ville durable. Actes du Congrès Mondial de l'Énergie. [S.l.]: [s.n.]. 2010.

FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. **Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization:** Formulation, Discussion and Generalization. International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo, EUA: [s.n.]. 1993.

FONTENELLE, M. **A abordagem multicritério na concepção arquitetônica: um estudo sobre as aberturas laterais em edifício de escritórios no Rio de Janeiro**. Dissertação (mestrado em Arquitetura). Programa de Pós-graduação em Arquitetura. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.

FOSTER, N. Foster and Partners. **Foster and Partners**, 1998. Disponivel em: <http://www.fosterandpartners.com/>. Acesso em: setembro 2013.

FOUAD, A. O. **Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec.**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Université du Laval. Quebec. 2009.

FOUCHIER, V. **Les densités urbaines et le développement durable:** le cas de l'île-de-France et des villes nouvelles. Paris: Éditions du SGVN, 1998.

FREYRE, G. **Novo mundo nos trópicos**. São Paulo: Nacional/EDUSP, v. 1, 1969.

GÜRSEL DİNO, İ. CREATIVE DESIGN EXPLORATION BY PARAMETRIC GENERATIVE SYSTEMS IN ARCHITECTURE. **METU Journal of the Faculty of Architecture**, v. 29, n. 1, p. 207-224, 2012.

GALSTER, G. . H. R. . R. M. R. **Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept**. Housing Policy Debate. [S.l.], p. 681–717. 2001. (12).

GICQUEL, R. **Approche systémique et thermique instationnaire**. Actes du colloque SFT92 de thermique Systèmes thermiques instationnaires. Paris: École des Mines de Paris. 1992. p. 337-355.

GIVONI, B. **Climate considerations in building an Urban Design.** Londres: John Wiley & Sons, v. 1, 1998. 480 p.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. 1. ed. Boston, EUA.: Addison-Wesley LongmanPublishing, 1989.

GORAL, C. M. et al. "Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces." **Computer Graphics**, 18, n. 3, 1984.

GRAZZIOTIN, P. **Visualization Techniques in a Building Potential Simulator Using Sunlight Access Control.** SIACG – Ibero-American Symposium in Computer Graphics. Guimaraes, Portugal: [s.n.]. 2002.

GRIMMOND, C.; OKE, T. R. Heat storage in urban areas, local-scale observations and evaluation of a simple model. **Applied Meteorology**, v. 38, p. 922-940, 1999.

GROLEAU, D. **Analyse de la variation de l'albédo effectif urbain en fonction de la densité construite et de la forme urbaine**. CERMA. Nantes, França. 2008.

GROLEAU, D.; MARENNE, C. **Environnemental specifities of the urban built forme**. Rebuildrebuilding the European city, Integration renewable energies in established urban structure. Corfou: [s.n.]. 1995. p. 8.

GROSSO, M. Urban form and renewable energy potential. **Renewable Energy**, 1998. 331-336.

HASTINGS, R. S. **The Evolution of solar architecture**. [S.l.]: Swiss Federal Office of Energy, 2002.

HAUGHTON, G.; HUNTER, C. **Sustainable cities**. Londres: Jessica Kingsley, 1994.

HAY, J. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. **Solar Energy**, 23, n. 3, 1979. 301-307.

HELBING, D.; MOLNAR, P.; MINGOTAUD, M.-J. **Modélisation et simulation des flux de piétons**. Congrès Modélisation du trafic, Groupe de travail, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité,. Arcueil: [s.n.]. 1997. p. 53-79.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. [S.l.]: University of Michigan Press, 1992.

HOPKINSON, R. G.; KAY, J. D. **The lighting of buildings**. Londres: Faber and Faber, v. 2, 1972.

HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Daylighting**. Londres: Heinemann, v. 1, 1966.

HORN, J.; NAFPLIOTIS, N. **Multiobjective Optimization Using the Niched Pareto Genetic Algorithm.**. IlliGAL Report No. 93005, Illinois Genetic Algorithms Laboratory, University of Illinois. Urbana, Champaign. 1993.

HUANG, J.; LUB, X. X.; SELLERS, J. M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. **Landscape and Urban Planning** , v. 82, p. 184–197, 2007.

HUI, S. C. Low energy building design in high density urban cities. **Renewable Energy**, v. 24, p. 627-640, 2001.

IBGE. **Censo Demográfico 2010: Características da População e dos Domicílios - Resultados do Universo.** Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Rio de Janeiro, p. 270. 2010.

IEA. **Cities, towns and Renewable energy - Yes in my front yard**. International Energy Agence. [S.l.]. 2009.

IRANZO, M. M. et al. Applied Pareto Multi-Objective Optimization by Stochastic Solvers. **Engineering Applications of Artificial Intelligence",** v. 22, p. 455–465, 2009.

JACOBS, J. **Morte e vida nas grandes cidades**. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

JANTZ, C. A. et al. Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, p. 1-16, 2010.

JARRETT, H. R. **Tropical geography. "Aspect" geographies.** Plymouth: MacDonald & Evans, 1977.

JIANG, Y. **Does Energy follows urban form? an examination of neighborhood and transport energy use in Jinan, China**. Massachusetts Institute of tecnhnology. Massachusetts, p. 163. 2010.

JORMAKKA, K.; SCHÜRER, O.; KUHLMANN, D. **La Recherche de la forme**. Berlim: Birkhäuser, v. Coll. Basics, 2008.

JUDET DE LA COMBE, A. et al. **Principes de l'Aéraulique Appliqués au Génie Climatique. Principles of air movement applied to thermal analysis of buildings.** Paris: PYC Editions, 1991.

KÖPPEN, W. **Das Geographische System der Klimate**. Berlin: Kraus-Thomson, 1936.

KAMPF, J. **On the modelling and optimization of urban energy fluxes**. Tese (Doutorado em Meio Ambiente). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, Suisse. 2009.

KEENY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives:** preferences and value tradeoffs. Nova Iorque: Wiley and Sons, 1976.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. **Particle Swarm Optimization**. IEEE, IV Conference on Neural Networks. [S.l.]: [s.n.]. 1995. p. 1942-1948.

KITTLER, R. **Standardisation of the outdoor conditions for the calculation of the Daylight Factor with clear sky**. Conf. Sunlight in Buildings. Rotterdam: Bouwcentrum. 1967. p. 273-286.

KLUCHER, T. M. Evaluation of models to preict insolation on tilt surfaces. **Solar Energy**, 23, n. 2, 1979. 111-114.

KNIGHT, T. W. **Shape grammar in education and practice: history and prospects**. MIT. Massachusetts. 1999. (MIT Workshop on Shape Computation).

KNOWLES, R. L. **Energy and Form:** An Ecological Approach to Urban Growth. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 1974.

KNOWLES, R. L. **Sun Rhythm Form**. Cambridge, Massachusetts: Éditions MIT Press, 1981.

KNOWLES, R. L. The Solar envelope: its meaning for energy and buildings. **Energy and Buildings**, v. 35, p. 15.25, 2003.

KOENIGSBERGER, O. H. et al. **Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales**. Madrid: Paraninfo, v. 1, 1977.

KONDO, A. et al. The influence of the urban canopy configuration on urban albedo. **Boundary Layer Meteorology**, v. 100, n. 2, p. 225-242, 2001.

KRETZ, T. **Pedestrian Traffic, Simulation and experiments**. Tese (Doutorado) Universidade Duisburg-Esssen. [S.l.], p. 231. 2007.

LAARIBI, A. **SIG et analyse multicritères**. Paris: Hermes, 2000.

LAM, K. P. et al. **COMPARATIVE STUDY OF SKY LUMINANCE MODELS IN THE TROPICAL CONTEXT**. IBPSA. Praga: [s.n.]. 1997.

LAMAS, J. M. G. **Morfologia urbana e desenho da cidade**. 12. ed. Lisboa: [s.n.], v. 1, 2009.

LAMM, L. O. A new analytic expression for the equation of time. **Sola Energy**, 26, 1981.

LANDSBERG, H. E. **The urban climate.** New York,: Academic Press, v. 28, 1981.

LECHETA, E. M. **Algoritmos Genéticos para Planejamento em Inteligência Artificial**. Tese (Doutorado em Informática). Curso de Pós-Graduação em Informática. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2004.

LECHNER, N. **Heating, Cooling, Lighting – Design Methods for Architects**. New York: John Wiley & Sons, 1990.

LECLERCQ, L. **Modélisation dynamique du trafic et applications à l'estimation du bruit routier**. Tese (Doutorado em Engenharia), LICIT. [S.l.], p. 310. 2002.

LEIRAS, A. Otimização de Parâmetros de um Algoritmo Genético. **RICA - Revista de Inteligência Computacional Aplicada**, v. 6, p. 1-7, 2010.

LEVY, A. **La qualité de la forme urbaine problématique et enjeux I**. Ministère de l'Équipement et des Transport - Sécretariat Permanent du Plan Urbain. Paris, p. 157. 1992.

LIMA, H. G.; ASSIS, E. A. **Building mass calculation using GIS software for climate responsible urban planning applications**. The 20th Conference on Passive Low Energy Architecture - PLEA. Santiago: [s.n.]. 2003.

LINS, R. D. B. et al. **Vazios urbanos:** entendendo as especificidades territoriais e ambientais das terras sem ocupação do litoral norte da cidade de Maceió, Alagoas, Brasil. IV Congresso Luso Brasileiro para o Planeamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável - PLURIS 2010. Faro, Portugal: [s.n.]. 2010.

LINS, R. D.; ZACARIAS, P.; SCOTT, C. **A UTILIZAÇÃO DE SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NO MAPEAMENTO DOS VAZIOS URBANOS DO "LITORAL NORTE" DA CIDADE DE MACEIÓ, ALAGOAS**. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, PE, Brasil: [s.n.]. 2008. p. 1-4.

LOBACCARO, G. et al. District geometry simulation: a study for the optimization of solar façades in urban canopy layers. **Energy Procedia**, v. 30, p. 1163 – 1172, 2012.

LONG, N.; KERGOMARD, C. Classification morphologique du tissu urbain pour des applications climatologiques, Cas de Marseille. **Revue Internationale de Géomatique**, v. X, p. 1-27, 2005.

LOUAIL, T. **Comparer les morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis par la simulation à base d'agents – Approches multi-niveaux et environnements de simulation spatiale**. Tese (Doutorado em Sciences Fondamentales et Appliquées), Université d'Évry-Val-d'Essonne, U.F.R.. Evry, França, p. 233. 2010.

LOWRY, W. P. Empirical estimation of the urban effects on climate: A problem analysis. **J. Appl. Meteorol.**, 16, 1977. 129–135.

LUCAS, D. C. **Algoritmos Genéticos: uma Introdução**. Apostila de curso Ferramentas de Inteligência Artificial. [S.l.]. 2002.

LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J. **The atmosphere**. 7. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1998.

LUZ, B. et al. **Céu Artificial Retilíneo a FAU-USP:** Desenvolvimento e Construção de Equipamento para Aplicação Didática. NUTAU - 7º Seminário Internacional Espaço Sustentável Inovações e Edifícios e Cidades. São Paulo: USP. 2008.

MAÏZIA, M. et al. **Energy requirements of characteristic urban blocks.** CISBAT 2009-Renewables in a changing climate-From Nano to urban scale. [S.l.]: [s.n.]. 2009.

MAÏZIA, M. L. U. E. L. M. D. V. **Les annales de la recherche urbaine, n°103, septembre 2007, pp.79-85.**, n. n°103, septembre 2007, pp.79-85., p. 79-85, 2007.

MAGNIER, L.; HAGHIGHAT, F. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network.. **Building and Environment** , v. 45, p. 739–746, 2010.

MAITELLI, G. T.; SOUZA, S. C.; PINHO, J. G. **THE MAGNITUDE OF URBAN HEAT ISLAND IN THE TROPICAL CONTINENTAL AREAS IN BRAZIL**. ICUC5. Lodz: [s.n.]. 2005.

MAITELLI, G. T.; WRIGHT, I. R. The climate of a riverside city in the Amazon Basin: urban-rural differences in temperature and humidity. **Amazonian deforestation and climate**, 1996. 1-14.

MAIZIA, M. et al. **Energy requirements of characteristic urban blocks**. Proceedings of CISBAT 2009 - Renewables in a changing climate-From Nano to urban scale. Lausanne, Suisse: EPFL. 2009. p. 1-6.

MARDALJEVIC, J. Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. **Lighting Research and Tecnology**, 27, n. 4, 1995. 181-188.

MARIOLLE, B. L'espace anthropologique D comme Densité. **Les Cahiers de la recherche architecturale et urbaine,** v. 1, p. 64-67, 2007.

MARIQUE, A. F. Ç.; REITER, S. A method for evaluating transport energy consumption in suburban areas. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 1, n. 33, p. 1-6, 2012.

MARKS, W. Multicriteria optmisation of shape of energy-saving buildings. **Buildings and Environment**, v. 4, p. 331-339, 1997.

MARLER, R. T.; ARORA, J. S. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 41, n. 6, p. 853–862, 2010.

MARRY, S. **Densité urbaine et qualité de vie. En quoi la compréhension des représentations de la densité urbaine est-elle prépondérante dans l'analyse et la conception de formes urbaines propices à une certaine qualité de vie ?** Prix Étudiant EpE-Metro 2009, Densité urbaine et qualité de vie : comment mieux faire ?. Grenoble, p. 28. 2009.

MARSH, A. **Non-uniformity in incident solar radiation over the facades of high-rise buildings**. PLEA - Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven: [s.n.]. 2004. p. 1-6.

MARTIN CENTRE, F. S. G. R. T. V. R. **Towards zero emissions urban development**. University of Cambridge. Cambridge. 1997.

MARTIN, L.; MARCH, L. **Urban Space and Structures**. 1. ed. Cambridge: University Press, v. 1, 1972.

MARTINS, T. A. L.; ADOLPHE, L.; KRAUSE, C. B. **Microclimate Effects of Urban Geometry on Outdoor Thermal Comfort in the Brazilian Tropical Semi-arid Climate**. PLEA - 28th Passive Low Energy Architecture Conference. Lima: PUC-Lima. 2012.

MASSON, V. et al. Modélisation urbaine et stratégies d'adaptation au changement climatique pour anticiper la demande et la production énergétique (MUSCADE). **RéférenceS**, v. 1, n. La modélisation intégrée de la ville, p. 174-184, Setembro 2012.

MAUGARD, A. **Regards sur le bâtiment:** Le futur en construction. Paris: Editions Le Moniteur, 2007.

MENDLER, S.; ODELL, W. **The HOK Guidebook to Sustainable Design**. New York: Éditions John Wiley & Sons, 2001.

MENDONÇA, R. S. R.; ASSIS, E. S. Conforto térmico urbano: estudo de caso do bairro Floresta de Belo Horizonte. **Ambiente Construído (online)**, v. 3, n. 3, 2003.

MESSAOUD, B. O. **Approche physico-morphologique de l'albédo effectif. Vers une stratégie de formes et de matériaux urbains**. Dissertação (Mestrado em Sciences et Techniques des Environnements), École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. Nantes, França, p. 205. 2009.

MESTAYER, P. G.; ANQUETIN, S. **climatology of cities**. In 3 on Air Pollution, Air Pollution 95. [S.l.]: [s.n.]. 1994.

MESTAYER, P. G.; DURAND, P.; AUGUSTIN, P. The urban boundary-layer field campaign in marseille (ubl/clu-escompte): set-up and first results. **Boundary-Layer Meteorology**, 114, n. 2, 2005. 315-365.

METEOFRANCE. **Comprendre la météo - glossaire.** Metofrance. Toulouse. 2011.

MICHALSKY, J. J. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050). **Solar Energy**, 40, n. 3, 1988. 227-235.

MILES, J. C.; SISK, G. M.; MOORE, C. J. The conceptual design of commercial buildings using a genetic algorithm. **Computer and Structures**, v. 79, n. 17, p. 1583-1592, 2001.

MINDLIN, H. E. **Arquitetura moderna no Brasil**. Rio de Janeiro: Aeroplano, v. 1, 1999.

MODEFRONTIER. **The Multi-objective Optimization and Design Environment. Versão 4.4.1.** ESSS / ESTECO. [S.l.]. 2013.

MOLION, L. C. B. Considerações sobre o aquecimento global antropogênico. **Instituto de Ciências Atmosféricas, Departamento de Meteorologia.**, Maceió, v. 1, 2008.

MOLLE, N. **Étude Théorique et Expérimentale du Comportement Thermique de l'Habitat en Milieu Tropical Humide,**. Thèse de doctorat, École Central des Arts et Manufactures. Paris. 1984.

MONTAVON, M. **Optimisation of Urban Form by the Evaluation of the Solar Potential**. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. 2010.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiment**. 5. Ed. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2001.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4 Ed. ed. Rio de Janeiro,: LTC, 2009.

MOON, P.; SPENCER, D. E. Illumination from a non-uniform sky. **Illuminating Engineering**, 37, n. 10, 1942. 707-726.

MORELLO, E.; RATTI, C. Sunscapes: 'Solar envelopes' and the analysis of urban DEM. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 33, p. 26-34, 2009.

MOUDON, A. V. Urban morphology as an emerging disciplinary field. **Urban Morphology Review**, 1997.

MOULINIÉ, C.; NAUDIN-ADAM, M. **Appréhender la densité 2 - Les indicateurs de densité (Understanding density 2 - Indicators of density). Note rapide sur l'occupation du sol.** Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France. Paris. 2005.

NAJJAR, G. et al. **Bilans radiatif et 331 International version 1 - 6 Apr 2010 d'énergie dans un canyon urbain.** Association Internationale de Climatologie. [S.l.]: [s.n.]. 2005.

NAKAMURA, Y.; OKE, T. R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. **Atmospheric Environment**, 22, n. 12, 1988. 2691-2700.

NEWMAN, P.; KENWORTHY, J. **Cities and automobile dependence, an international sourcebook**. Aldershot, Reino Unido: Gower Technical Editions, 1989.

NIEMASZ, J.; SARGENT, J.; REINHART, C. F. **Solar zoning and energy in detached residential dwellings'', in Attar Ramtin**. SimAUD 2010 - Simulation for Architecture and Urban Design. Boston, MA, USA: [s.n.]. 2011. p. 105-113.

NIEUWOLT, S. The urban microclimate of Singapore.. **Journal of Tropical Geography** , 22, 1966. 30–37.

NIJKAMP, P.; RIETVELD, P.; VOODG, H. **Multicriteria evaluation in physical planning**. North-Holland: [s.n.], 1990.

NORDPIL. Nordpil. **World database of large urban areas, 1950-2050**, 2007. Disponivel em: <http://nordpil.com/go/resources/world-database-of-large-cities/>. Acesso em: 15 dezembro 2013.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. The energy balance of an urban canyon. **Journal of Applied climatology**, 16, n. 1, 1977.

OKE, T. R. **Overview of interactions between settlements and their environments**. WMO experts meeting on Urban and building climatology. Genève: WMO. 1982.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 1. ed. Londres: Routledge, 1987.

OKE, T. R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103-113, 1988.

OKE, T. R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and Observing Methods**. WMO/TD. [S.l.]. 2006. (81).

OLIVEIRA, L. S. **Uma Contribuição ao Estudo dos Métodos de Otimização Multi-objetivo**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecância). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG. 2005.

PAIO, A.; TURKIENICZ, B. An Urban Grammar Study: A Geometric Method for Generating Planimetric Proportional and Symmetrical Systems. **Nexus Network Journal**, Turin, v. 13, n. 1, p. 151–169, 2011.

PANAO, M. J. N. O.; GONÇALVES, H. J. P.; FERRÃO, P. M. C. Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach. **Renewable Energy**, v. 33, p. 887–896, 2008.

PANERAI, P.; DEPAULE, J.-C.; DEMORGON, M. **Analyse urbaine**. 4. ed. Marseille: Parantheses, v. 1, 2009.

PARKER, D. C.; EVANS, T. P.; MERETSKY, V. M. **easuring emergent properties of agent-based landuse/ landcover models using spatial metrics.** Seventh annual conference of the international society for computational economics. [S.l.]: [s.n.]. 2001.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Update world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2007. 1633-1644.

PEREIRA, F. . N. C. **Proposta sistemática de uso em planejamento urbano do envelope solar como forma de controle da ocupação do solo urbano em função da**. ENCAC - ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Salvador, Bahia, Brasil: [s.n.]. 1997. p. 1-10.

PEREZ, D. R. C. **O envelope solar e o direito ao sol.**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas.. Campinas, São Paulo. 2007.

PEREZ, R. et al. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. **Solar Energy**, 39, n. 3, 1987. 221-231.

PEREZ, R. et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, 44, n. 5, 1990. 271-289.

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution - preliminary configuration and validation. **Solar Energy**, 50, n. 3, 1993. 235-243.

PERRIN DE BRICHAMBAUT, C. **Estimation des ressources énergétiques solaires en France**. Paris: Edition Européennes Thermique et Industrie, v. 1, 1996.

PICCOLI, B.; TOSIN, A. Time-evolving measures and macroscoopic modeling of pedestrian flow'. **Archive for rational mechanics and analysis**, v. 199, n. 3, p. 707-738, 2011.

PINHO, A. F.; MONTEVECHI, J. A. B.; MARINS, F. A. S. Análise da Aplicação de Projeto de Experimentos nos Parâmetros dos Algoritmos Genéticos. **Sistema e Gestão**, v. 2, n. 3, p. 319-331, 2007.

PMM. **Zoneamento de uso do solo urbano de Maceió**. Prefeitura Municipal de Maceió-AL. Maceió. 2007.

POMEROL, J. C.; BARBA-ROMERO, S. **Choix multicritère dans l'entreprise - principe et pratique**. Paris: Hermes, 1993.

RAMOS, G.; GHISI, E. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. **Ambiente Construído**, 10, n. 2, jun 2010. 157-169.

RAO, S. S. **Engineering Optimization:** Theory and Practice. 1. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2009.

RAPOPORT, A. **House form and culture (Foundations of Cultural Geography Series)**. New Jersey: Éditions Prentice Hall, v. 1, 1969. 150 p.

RAPOPORT, A. **Pour une anthropologie de la maison**. Paris: Éditions Dunod, v. 1, 1972. 207 p.

RASHEED, A. **Multiscale Modelling of Urban Climate.** École Polytéchnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. 2009.

RATTI, C. A. R. P. Urban texture analysis with image processing techniques. In: AUGENBROE, G.; EASTMAN, C. **Computers in Building:** Proceedings of CAAD Futures 99. Boston: Kluwer Academic, v. 1, 1999. p. 49-64.

RATTI, C.; BAKER, N.; STEEMERS, K. Energy consumption and urban texture. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 7, p. 762-776, 2005.

RATTI, C.; RAYDAN, D.; STEEMERS, K. "Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. **Energy and Buildings**, v. 35, p. 49-59, 2003.

RATTI, C.; RICHENS, P. Raster Analysis of Urban Form.. **Environment and Planning B: Planning and Design**, 31, 2004. 297-309.

RAYNAUD, D. **Forme urbaine:** une notion exemplaire du point de vue de l'épistémologie des sciences sociales. Actes du Colloque LOUEST. Paris: [s.n.]. 1999. p. 1-23.

REINDL, D. T.; BECKMANN, W. A.; DUFFIE, J. A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. **Solar Energy**, 45, n. 1, 1990. 9-17.

REINHART, C. F.; HERKEL, S. The simulation of annual daylight illuminance distributions - a state-of-the-art comparison of six Radiance-based methods. **Energy and Buildings,** 32, 2000. 167-187.

RICHENS, P. **Image processing for urban scale environmental modelling**. IBPSA. Praga: [s.n.]. 1997.

RINGENBACH, N. **Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg.** Strasbourg I. [S.l.], p. 167. 2004.

ROBINSON, D. Urban Morphology and indicators of radiation availability.. **International Journal of Solar Energy**, 80, n. 12, 2006. 1643-1648.

ROBINSON, D. **Computer modelling for sustainable urban design**. Londres: Earthscan, v. 1, 2011.

ROBINSON, D.; STONE, A. Solar radiation modeling in the urban context. **Solar Energy**, 77, n. 3, 2004. 295-309.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 2a Ed. ed. Campinas: Cárita editora, v. 1, 2009.

RODRIGUES, M. R. B. **A Forma Urbana em Portugal Continental: Aplicação de Índices Quantitativos na Caracterização Morfológica das Cidades. Dissertação**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamento). Universidade de Lisboa. Lisboa. 2009.

ROGERS, R. **Des villes pour une petite planete**. Paris: Le moniteur Editions, 2000.

ROSENFELD, A. H.; AKBARI, H.; BRETZ, S. Mitigation of urban heat island : materials, utility programs, updates. **Energy and Buildings**, 22 , 1995. 255-265.

ROSSI, A. **Arquitetura da cidade**. 2. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.

ROULET, C. A. et al. A multicriteria rating methodology for buildings. **Buildinga and Environment**, v. 37, p. 579-586, 2002.

ROUSSEAUX, F.; LONG, N.; RENOUARD, A. Vers une simulation de l'évolution des structures urbaines à partir d'une modélisation multi-agents.. **Vertigo**, v. 11, n. 3, 2011.

SAATY, S. A scaling method for priorities in hoerarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, 1977.

SACRE, C. **Le confort dans les espaces extérieurs:** analyse microclimatique. Nantes: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, division climatologie, 1983. 138 p.

SALAT, S. **Les et les formes. Sur L'urbanisme durable.** 1. ed. Paris: CSTB, v. 1, 2011.

SALLEZ, A. **Urbaphobie et désir d'urbain, au péril de la ville**. La ville mal aimée, Colloque au château de Cerisy-la-Salle. [S.l.]: [s.n.]. 2007. p. 12.

SAMPAIO, P. R. **Teoria, Métodos e Aplicações de Otimização Multiobjetivo**. Tese (Doutorado em Matemática). Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

SANTAMOURIS, M. **Energy and climate in the urban built environment.** Londres: James and James, 2001. 402 p.

SANTAMOURIS, M. **Passive cooling of buildings**. London: James and James Science Publishers, 2005.

SCHAFFER, J. D. **Multiple Objective Optimization with Vector EvaluatedGenetic Algorithms**. Dissertação. Vanderbilt University. [S.l.]. 1984.

SCHAFFLER, S.; SCHULTZ, R.; WEINZIERL, K. Stochastic method for the solution of unconstrained vector optimization problems. **Journal of Optimization Theory and Application**, v. 114, n. 1, p. 209–220, 2002.

SCUESSEL, M. C. B.; SATTLER, M. A. Cidades em (trans)formação: impacto da verticalização e densificação na qualidade do espaço residencial. **Ambiente Construído (online)**, Porto Alegre, RS, Brasil, v. 10, n. 3, p. 137-150, Jul/Set 2010.

SHARLIG, A. **Décider sur plusieurs critères:** panorama de l'aide à la décision multicritère. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes , 1995.

SHELTON, T. **Reconciling housing density and housing diversity in inner ring neighbourhoods**. PLEA 2008 Proceedings, 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Dublin: [s.n.]. 2008. p. 6.

SKARTVEIT, A. et al. On the estimation of atmospheric radiation from surface meteorological data. **Solar Energy**, 56, n. 4, 1996. 349-359.

SOARES, J. P.; TRAMONTANO, M. Arquitetura emergente, design paramétricos e o representar através de modelos de informação. **Virus (online)**, São Carlos, v. 8, Dezembro 2012.

SOGA, K.; AKASA, H.; NIMIYA, H. **A COMPARISON OF METHODS TO ESTIMATE HOURLY TOTAL IRRADIATION ON TILTED SURFACES FROM HOURLY GLOBAL IRRADIATION ON A HORIZONTAL SURFACE**. IBPSA. Kyoto: [s.n.]. 1999.

SOUAMI, T. Conceptions et répresentations du territoire énergétique dans les quartiers durables. **Flux**, v. 2, n. 76-77, p. 71-81, 2009.

SOUZA, L. C. L. et al. Fator de visão so céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. **Ambiente Construído (online)**, v. 10, n. 4, 2010.

SPENCER, J. W. Fourier series representation of the position of the sun. **Search**, 2, n. 5, 1971. 172.

SRINIVAS, N.; DEB, K. Multi-objective Function Optimization Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm. **Evolutionary Computation**, v. 2, n. 3, p. 221-248, 1994.

STANHILL, G.; KALMA, J. D. Solar dimming and urban heating at Hong Kong. **International Journal of Climatology**, 15, n. 8, 1995. 933-941.

STEEMERS, K. Energy and the city: density, buildings and transport. **Energy and Buildings**, 35, 2003. 3-14.

STEEMERS, K. et al. City Texture and Microclimate. **Urban Design Studies**, v. 3, p. 25-50, 1997.

STEINØ, N. **PARAMETRIC THINKING IN URBAN DESIGN:** a geometrical approach. eCAADe 28: Future Cities. Zurich: [s.n.]. 2010. p. 1-8.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. **Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitidue in the canopy layer.** Symposium Eighth Symposium on Urban Environment. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 1-6.

STEWART, I.; OKE, T. Classifying Urban Climate Field Sites by « Local Climate Zones ». **International Association for Urban Climate**, v. 1, p. 1-10, 2009.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, 25, n. 2, 1997(a). 99-103.

TAN, K. C.; LEE, T. H.; KHOR, E. F. Evolutionary Algorithms for Multi-Objective Optimization: Performance Assessments and Comparisons.. **Artificial Intelligence Review** , v. 17, p. 253–290, 2002.

TELLER, J. **Spherical instrumentation for the urban morphology analysis**. 21st Urban Data Management Symposium. Venice-Italy: [s.n.]. 1999.

TELLER, J.; AZAR, S. Townscope II - a computer rendering system to support solar access decision making. **Solar Energy**, 70, n. 3, 2001. 187-200.

THIBERGE, C. **La ville en creux**. Paris: Editions du Linteau, 2002.

TIMMIS, J. **Artificial Immune Systems: a Novel Data Analysis Technique Inspired by the Immune Network Theory**. Tese de Doutorado. University of Wales. Aberystwyth, Reino Unido. 2000.

TIWARI, P.; PARIKH, J. Cost of CO 2 reduction in building construction. **J. Energy**, n. 20, 1994. 531-547.

TORRENS, P. M.; ALBERTI, M. **Measuring Sprawl**. Center for Advanced Spatial Analysis. University College. Londres. 2000. (27).

TORRES, S. **Arranjos Construtivos Urbanos: Um Estudo sobre a Influência da Configuração de Conjuntos Habitacionais Verticais na Qualidade Térmica de Edificações em Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil, p. 180. 2006.

TRAISNEL, J.-P. **Cours Urbanisme et énergie - quartiers durable**. Institut Français d'Urbanisme. Paris. 2006.

TREGENZA, P. R. Subdivision of sky hemisphere for luminance measurements. **Lighting Research and Technology**, 19, 1987. 13-14.

TREGENZA, P.; SHARPLES, S. **Daylighting algorithms**. ETSU. [S.l.]. 1993.

UN. **World Urbanization Prospects: The 2003 Revision**. United Nations. [S.l.]. 2004.

UNSWORTH, H. M.; MONTEIGH, J. L. Longwave radiation at the ground - I. Angular distribution of incoming radiation. **Q. J. R. Met. Soc.**, 101, 1975. 13-24.

VETTORATO, D.; GENELETTI, D.; ZAMBELLI, P. Spatial comparison of renewable energy supply and energy demand for low-carbon settlements. **Cities**, 28, n. 6, 2011. 557-566.

VIANNA, H. D.; POUEY, M. T. F. **Montagem e teste de um simulador físico de insolação - Heliodon - a ser usado como recurso diático no ensino de conforto térmico para edificações agrícolas**. CIC - XV Congresso de Iniciação Científica. Pelotas: UFPEL. 2006.

VINCKE, P. **l'Aide multicritère à la décision**. Bruxelles: Editions de l'Université de Bruxelles, 1989.

VITRUVE. **Les dix livres d'Architecture**. Paris: Errance, v. 1, 2006. 159 p.

WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Our Ecological Footprint:** Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island, BC: New Society Publishers, 1996.

WADDELL, P.; ULFARSSON, G. Introduction to Urban Simulation: Design and Development of Operational Models. In: STOPHER, P. R.; BUTTON, K. J.; KINGSLEY **Handbook in Transport, Volume 5:** Transport Geography and Spatial Systems. [S.l.]: Éditions Pergamon Press, 2004. p. 203-236.

WALRAVEN, R. Calculation the position of the sun. **Solar Energy**, 20, n. 5, 1978. 393-397.

WANG, B. Estimation of wind energy over roof of two perpendicular buildings. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics (trabalho em processo de avaliação)**, 2013.

WARD, L. G.; SHAKESPEARE, R. **Rendering with Radiance - The Art and Science of Lighting Visualisation**. San Francisco: Morgan Kauffmann, v. 1, 1997.

WASSERMAN, P. **Neural Computing Theory and Practice**. Nova York, EUA: Van Nostrand Rheinhold, 1989.

WETTER, M.; WRIGHT, J. A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization. **Building and Environment**, v. 39, p. 989-999, 2004.

WHILLIER, A. Calculating the position of the sun. **Solar Energy**, 20, n. 5, 1978. 393-397.

WRIGHT, J. A.; LOOSEMORE, H. A.; FARMANI, R. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 9, p. 959–972, 2002.

WRIGHT, J.; PEREZ, R.; MICHALSKY, J. J. Luminous efficacy of direct irradiance variations with insolation and moisture conditions.. **Solar Energy,** 42, n. 5, 1989. 387- 394.

YU, H. S. **Parametric architecture: performative/responsive assembly compon**. Massachusetts Institute of Technology. Boston, p. 126. 2009.

ZELLNER, P. **Hybrid space:** New forms in digital architecture. Londres: Thames and Hudson, 1999.

ZITZLER, E.; DEB, K.; THIELER, L. Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: empirical results.. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation** , v. 8, p. 173–95, 2000.

ZITZLER, E.; THIELE, L. Multi-Objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 3, n. 4, p. 257-271, 1999.

ZUNINO, G. et al. **Densité :opérations de logements et quartiers urbains,**. Rapport d'études, IAURIF. Paris, p. 94. 2009.

GLOSSÁRIO

A

Afastamentos – é a distância medida entre qualquer elemento construtivo da edificação e o alinhamento (afastamento frontal) e as divisas laterais e de fundos (afastamento lateral ou de fundos) (MACEIÓ, 2010).

Albedo (*albédo*) - consiste na relação entre a energia solar refletida por uma superfície e a energia solar incidente. Trata-se de uma grandeza adimensional, que pode variar de 0 a 1. Um corpo negro perfeito que absorve todos comprimentos de onda sem refletir alguma, possui albedo igual a zero, enquanto um espelho dito perfeito, que refletiria todas os comprimentos de onda, sem absorver alguma, teria um albedo igual a um. Sabe-se que essa propriedade define, portanto, tanto a reflexão especular (como a do espelho), como a reflexão difusa, na qual um raio refletido pode percorrer um caminho de retorno aleatório no meio adjacente (CPTEC/INPE, 2013).

Alelos (*alléles*)**-** na genética, representam os valores atribuídos aos genes. Na analogia considerada para elaboração do algoritmo genético, correponde aos valores atribuídos às variáveis de projeto.

Ângulo sólido (*angle solide*) - um ângulo sólido de **ômega** ster-radianos (sr) (*stéradians*) corresponde a uma superfície de área **A** sobre uma esfera de raio **R**, tal que **ômega = A / R²**. Quantifica a noção de "campo de visão".

Aptidão ou *fitness* - referente a cada indivíduo, é o valor da função a ser otimizada. Consiste na composição da função objetivo, com funções de penalidade estabelecidas a partir das restrições do problema. De modo geral, representa uma medida da capacidade de sobrevivência de um cromossomo no processo de evolução e, consequentemente, a probabilidade dele se reproduzir com mais frequência. No caso de um problema de minimização, por exemplo, quanto menor o valor da função objetivo, maior a aptidão de um determinado indivíduo. Isso representa que a solução deste indivíduo é uma melhor solução para o problema quanto maior for a aptidão. A aptidão pode ser calculada de diversas maneiras, mas sempre em função do valor de função objetivo (Figura 230).

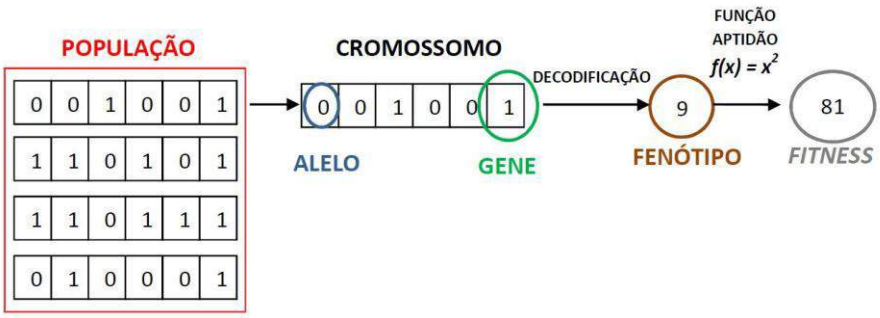


Figura 230 : analogia genética e definição de adaptação no processo de projeto.

Azimute (*azimuth*) - medida de posição de um astro (e.g. o Sol) no sistema horizontal local de coordenadas. Consiste no ângulo contado sobre o plano do horizonte, de Norte para Leste, a partir do Norte até o semi-plano vertical que contém o astro. Assume valores entre 0° e 360° (Leste: 90°). No caso do Sol, pode ser avaliado com grande precisão a partir de informações acerca da declinação solar, do ângulo horário solar, e da posição geográfica do observador, através de algoritmos tais como o proposto por Michalsky (1988).

B

Balanço de radiação (*bilan radiatif*) - procedimento através do qual é avaliado o saldo entre a quantidade de energia radiante que incide num dado sistema e a quantidadede energia radiante que dele emerge, com vistas à obtenção da quantidade de energia disponível para outros processos (p.ex.: vaporação à superfície do solo). Esta noção pode ser aplicada tanto para um planeta como um todo quanto para um pontoà sua superfície ou de sua atmosfera. A avaliação deste saldo pode se referir apenas à radiação de onda curta, apenas à radiação de onda longa, ou ainda ao conjunto de ambas.

C

Calmaria - condições atmosféricas destituídas de vento ou de qualquer outro movimento do ar. Em termos oceânicos, é a ausência aparente de movimento da superfície de água, quando não há nenhum vento ou ondulação.

Canion urbano (*canyon urbain*) – uma rua cânion designa uma rua relativamente estreita e circundada de edifícios relativamente elevados dos dois lados (ROBINSON e STONE, 2004).

Capacidade térmica (*capacité thermique*) [J/K] – quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a tempertaura de um sistema (ABNT, 2005).

Casa geminada (*habitat mittoyen*)– Aquelas que têm parede divisória comum e forma um conjunto arquitetônico único (Figura 231).

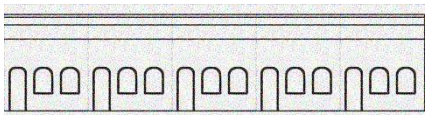


Figura 231: casas geminadas de meia-morada. Fonte: ilustração do autor, 2012.

Coeficiente de aproveitamento (*Coefficient d'occupation du sol - COS*)– coeficiente que, multiplicado pela área do lote, determina a área líquida edificada, admitida no terreno.

Coeficiente de forma reduzido ou compacidade (*compacité*) – é a relação entre a superfície de envoltória exterior e o volume construído de um edifício, este último elevado à potência de 2/3.

Coeficiente de dimensão ou fator de escala (*coefficient de taille ou coefficient d'échelle*) - é a relação entre a superfície de envoltória exterior e o volume construído de um edifício, este último elevado à potência 1/3.

Coeficiente de forma ou fator de forma (*coefficient de forme*) - é a relação entre a superfície de envoltória exterior e o volume construído de um edifício.

Coeficiente de correlação de Pearson - também chamado de "coeficiente de correlação produto-momento" ou simplesmente de "**ρ** de Pearson" mede o grau da correlação (e a direcção dessa correlação - se positiva ou negativa) entre duas variáveis de escala métrica (intervalar ou de rácio/razão) (WIKIPEDIA, 2014).

Este coeficiente, normalmente representado por **ρ** assume apenas valores entre -1 e 1.

- **ρ = 1,** significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.
- **P = -1, s**ignifica uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis - Isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui.
- **ρ = 0,** Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode existir uma dependência não linear. Assim, o resultado **ρ = 0** deve ser investigado por outros meios.

Condomínio horizontal – Conjunto de edificações, distribuídas horizontalmente em um mesmo terreno, sem o parcelamento do solo.

Condomínio vertical – Conjunto de unidades autônomas dispostas verticalmente em uma única edificação ou em mais de uma edificação, distribuídas em um Único terreno, sem parcelamento do solo.

Condutividade térmica (*conductivité thermique*) [W/(m.K)]– propriedade física de um material homogêneo e isótropo, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1W/m², quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro (ABNT, 2005).

Contiguidade (*contiguité*) – indica a relação da superfície de uma envoltória adjacente a outros edifícios e a superfície dessa mesma envoltória voltada para o exterior (Figura 232).



Figura 232: ilustração esquemática da cotiguidade horizontal (esquerda) e contiguidade horizontal e vertical (direita).

Corpo cinza (*corps gris*) - sistema físico cuja emissividade não apresenta dependência espectral.

Corpo negro *(corps noir*) - sistema físico capaz de produzir a radiação de corpo negro. Representa o sistema físico que, sob equilíbrio termodinâmico, possui a máxima capacidade de emitir e de absorverradiação.

Cruzamento multi-pontos -consiste na estratégia de troca de material genético em mais de um ponto do cromossomo. Um exemplo dessa estratégia é apresentado na Figura 233.

Cruzamento uniforme - não utiliza pontos de cruzamento, mas determina, através de um parâmetro global, qual a probabilidade de cada variável ser herdada de cada pai (FALKENAUER, 1999).



Figura 233: exemplo de cruzamento de multipontos. Fonte: adaptada de Amorim, 2006.

Cruzamento de um único ponto

Consiste no tipo mais simples de cruzamento. A partir dessa estratégia, apenas um ponto do cromossomo é sorteado aleatoriamente e a partir deste ponto as informações genéticas dos pais são trocadas. A Figura 234 mostra um exemplo de cruzamento de um único ponto. Assim, após esta operação, os cromossomos gerados substituem os genitores na nova população.



Figura 234: exemplo de cruzamento de um único ponto. Fonte: adaptada de Amorim, 2006.

D

Declinação (*déclinaison*) - medida de posição de um astro (e.g. o Sol) no sistema equatorial horário de coordenadas. Consiste no ângulo contado a partir do Equador celeste até o paralelo celeste que contém o astro. Assume valores entre -90° (Pólo Sul Celeste) e +90° (Pólo Norte Celeste). No caso do Sol, assume valores ao longo do ano entre -23,5° e 23,5°, aproximadamente.

Densidade (*densité*) – consiste na relação entre um indicador estatístico (população, habitação, superfície construída etc.) e uma superfície (MERLIN e CHOAY, 1988).

Densidade construída (*densité construite ou densité bâtie*) – corresponde à relação da superfície total construída e a superfície no solo (Figura 235).

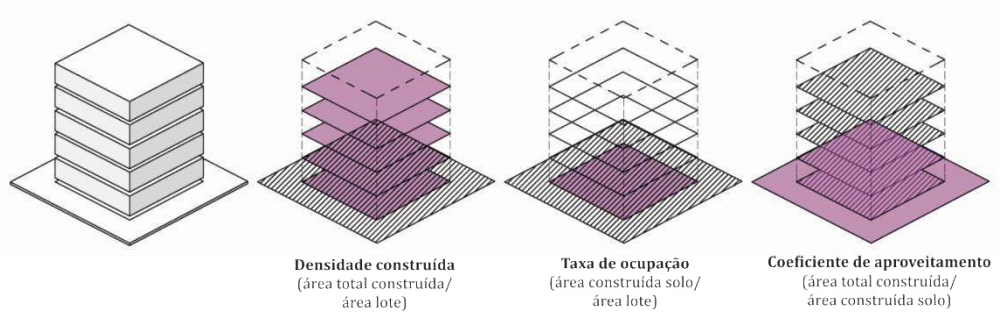


Figura 235 : ilustração dos diferentes indicadores de densidade.

Desvio padrão (*écart type*) – consiste em noção matemática que pode ser aplicada à estatística e que permite caracterizar a dispersão dos dados, é definido como a raiz quadrada da variância (SAPORTA, 2011). Na teoria da probabilidade e na estatística, a variância de uma variável aleatória é uma medida da sua dispersão estatística, indicando quão longe em geral os seus valores se encontram do valor esperado. Se consideramos uma variável x calculada para n indivíduos estatísticos, seu desvio padrão calcular-se-á, portanto, da seguinte maneira:

$$\sigma_x = desvio\ padrão\ de\ x = \sqrt{\frac{\sum n\ indivíduos\ (x_{médio} - x_n)^2}{n^o\ de\ indivíduos - 1}}$$

Difusividade térmica (*difusivité thermique*) [m^2/s] – quociente da condutividade térmica de um material pela sua capacidade de armazenar energia térmica (ABNT, 2005).

Dossel urbano (*canopée urbaine*) – camada de car entremeada entre os edifícios, árvores e outros objetos que compõem a cidade, extendendo-se para cima até a altura média dos edifícios e árvores.

E

Efeito Estufa *(l'effet de serre)***-** aquecimento global da parte mais baixa da atmosfera da Terra, devido principalmente à presença de dióxido de carbono e vapor de água, que permitem que os raios do Sol aqueçam a Terra, mas impedem que parte desse aquecimento retorne para o espaço.

Emissividade (*emissivité*)- Em física, emissividade é relação entre o poder emissivo de um corpo qualquer e a de um corpo negro. É conhecida como emissividade, e pode ter um máximo igual a 1, que é correspondente à de um corpo negro, e um mínimo igual a zero. Corpos que possuem emissividade inferior a 1 são chamados corpos cinzas. Corpos onde a emissividade é também dependente da temperatura e comprimento de onda são chamados corpos não-cinzas. A emissividade representa a maior ou menor tendência que determinado corpo tem em emitir radiação. O poder de emissividade está associado à natureza do corpo, à área exposta e à temperatura absoluta a que se encontra.

Emitância (*émittance*)[W/m^2] – taxa de emissão de radiação por unidade de área.

Energia renovável (*energie renouvelable*) – é a energia que vem de recursos naturais como sol, vento, chuva, marés e energia geotérmica, que são recursos renováveis (naturalmente reabastecidos). Os combustíveis fósseis são fontes não-renováveis de energia, ou seja, não é possível repor o que se gasta, uma vez que podem ser necessários milhões de anos para ser renovado. São aqueles cujas reservas são limitadas. As principais são a energia da fissão nuclear e os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) (WIKIPEDIA, 2014).

Energia descentralizada (*energie descentralisée*) – é um conceito que designa uma nova forma de fornecer, armazenar, distribuir e utilizar energia. Trata-se de desenvolver localmente um conjunto de modos de produção de energia coerentes, diversificados e otimizados para reduzir as emissões poluentes e tornar viável e disponível a energia em nível local. O desenvolvimento de energias descentralizadas passa pela implantação de uma rede específica ou "rede inteligente".

Espaço de busca - define a região do domínio viável do problema. Essa região é delimitada pelas restrições pertinentes à análise, bem como pelos limites superior e inferior de cada variável de projeto. É possível encontrar soluções para o problema fora desse domínio viável que tenham valores de função objetivo melhores do que o valor encontrado dentro do espaço de busca, entretanto tais soluções violam as restrições, tornando o modelo encontrado tecnicamente inviável.

Espalhamento Mie (*diffusion Mie*) - designação freqüentemente aplicada a um conjunto de procedimentos teóricos para avaliação de propriedades ópticas seção eficaz de atenuação, seção eficaz de espalhamento, função de fase) correspondentes a uma população de partículas esféricas. Kerker (1969, pp.54-59) discute as origens históricas de procedimentos deste tipo.

F

Fachada (*facade*)– Face externa da edificação.

Fator de vista do céu (*facteur de vue du ciel*) – corresponde à porção do céu vista a partir de uma dada superfície considerada. Esse fator varia de 0 a 1 (1 correpondento à uma superfície horizontal sem obstáculo) (ADOLPHE et al., 2002).

Fenótipo - corresponde a decodificação de um ou mais cromossomos que leva a uma determinada resposta de interesse do sistema em estudo.

Forma urbana (*forme urbaine*) – ou morfologia urbana é uma noção complexa. De acordo com o dicionário de urbanismo de Merlin e Choay (1988), falar de morfologia urbana supõe o reconhecimento de uma "Arquitetura urbana", específica à cidade. Trata-se da repartição de edificações particulares ou públicas e de espaços livres: ruas, praças, parques, jardins,...

Nesse trabalho, conserva-se a definição da morfologia urbana como forma física do objeto urbano construído. Nota-se, no entanto, que esse objeto não é autônomo, não é constante no espaço, nem no tempo. Com efeito, a forma da cidade apresenta-se com uma dimensão histórica, resultado de sua evolução temporal. Outrossim, a cidade é o resultado de uma justaposição de forma urbanas heterogêneas (BONHOMME, 2013).

Função objetivo - A função objetivo consiste na representação matemática do critério de eficiência adotado, definido e influenciado pelas variáveis de projeto e sob o qual o sistema estrutural deve ser otimizado. Esse critério de eficiência pode ser determinado por apenas uma função, no caso de problemas mono-objetivo, ou possuir vários critérios a serem otimizados, no caso de problemas multiobjetivo.
Normalmente a função objetivo possui dependência em mais de uma variável de projeto, sendo, então, caracterizada como multidimensional; no caso de dependência de apenas uma variável é classificada como unidimensional. Outra característica importante diz respeito à quantidade de máximos ou mínimos da função: quando essa apresenta um único ponto de mínimo (ou máximo), ela é dita unimodal; caso a função possua mais de um valor extremo, ela é multimodal.

Em problemas que envolvem o projeto de edifícios, a função objetivo pode ser representada pelo custo de uma estrutura, pela eficiência de um sistema, pelos volumes ou área de envoltória disponível para produção de energia solar ou qualquer outra medida de desempenho desejada.

G

Gases do efeito estufa, GEE (*gaz à effet de serre*) – são substâncias gasosas que absorvem parte da radiação infra-vermelha, emitida principalmente pela superfície terrestre, e dificultam seu escape para o espaço. Isso impede que ocorra uma perda demasiada de calor para o espaço, mantendo a Terra aquecida. O efeito estufa é um fenômeno natural. Esse fenómeno acontece desde a formação da Terra e é necessário para a manutenção da vida no planeta, pois sem ele a temperatura média da Terra seria 33 C mais baixa impossibilitando a vida no planeta,tal como se conhece hoje (WIKIPEDIA, 2014).

Genes - representam as variáveis de projeto. Correspondem ao elemento constituinte de um cromossomo, geralmente responsável pela codificação de um único parâmetro, ou seja, consiste em um elemento do vetor que representa um cromossomo. Cada indivíduo, ou cromossomo, tem um determinado número de genes, cada um descrevendo uma variável específica do problema.

Genótipo (*Genotype*)- corresponde a informação contida no cromossomo. Consistem em uma estrutura de dados que representa uma solução candidata a um determinado problema.

Geração - Equivale ao número de iterações que o algoritmo genético executa.

Gleba (*glébe*) – Porção de terra que, não tendo sofrido nenhum parcelamento anterior de caráter urbano (loteamento ou desmembramento urbano), é subdividida em outras porções (lotes) destinadas à edificação.

I

Ilha de calor urbano (*ilot de chaleur urbain*) – consiste no aumento da temperatura do ar na cidade em relação ao meio rural próximo (OKE, 1987).

Indicador (*indicateur*) – é um instrumento que permite avaliar uma situação, um fenômeno, um objeto ou um conjunto estatístico. O indicador pode ser quantitativo ou qualitativo, objetivo ou subjetivo. Os indicadores são, muitas vezes, empregados para auxílio à decisão (COUNCIL OF EUROPE, 2005).

Insolação (*ensoleillement*) - período de tempo durante o qual o feixe solar direto ilumina uma superfície. Pode ser avaliada experimentalmente a partir de registros obtidos com heliógrafos [unidades usuais: horas].

Irradiação (*irradiation*) [W/m^2]- quantidade de energia radiante que atravessa uma superfície durante um certo intervalo de tempo, por unidade de área desta. É numericamente igual à integração da irradiância sobre ao longo do intervalo de tempo em questão.

Irradiância (*éclairement énergétique*) [W/m^2] - fluxo que atravessa uma superfície, por unidade de área desta.

Irradiância difusa (*irradiance diffuse*) - conceito freqüentemente aplicado à radiação de onda curta. Consiste na irradiância descendente numa superfície horizontal, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc). Pode ser avaliada experimentalmente empregando-se um piranômetro equipado de dispositivo de sombreamento do disco solar.

Irradiância direta (*irradiance direct*) - conceito freqüentemente aplicado à radiação de onda curta. Consiste no produto entre a irradiância direcional e o cosseno da distância zenital solar. Pode ser avaliada experimentalmente empregando-se doispiranômetros, um efetuando medições de irradiância global e outro de irradiância difusa.

L

Latitude - medida angular, em graus, entre o plano do Equador e a normal a um ponto qualquer sobre a superfície elipsoidal de referência. É com freqüência representada, graficamente, por linhas que se distribuem paralelamente ao Equador, em direção aos pólos norte e sul, localizados a 90º em relação ao Equador.

Latitudes Altas (*hautes latitudes*)- faixa localizada, aproximadamente, entre os paralelos de 60 e 90 graus, em ambos os hemisférios. Esta região é também denominada de Região Polar.

Latitudes Baixas (*basses latitudes*)- faixa localizada, aproximadamente, entre os paralelos de 0 e 30 graus, em ambos os hemisférios. Esta região é também denominada de Região Tropical ou Tórrida.

Latitudes Médias (*latitudes moyennes*)- faixa localizada, aproximadamente, entre os paralelos de 35 e 65 graus, em ambos os hemisférios. Esta região é também denominada de Zona Temperada.

Lei de Kirchhoff - designação genérica atribuída na literatura a resultados obtidos ao longo de uma série de estudos conduzidos por G. Kirchhoff no século XIX. Três "leis" resumem as características básicas do espectro de emissão de sistemas físicos; a primeira estabelece que sólidos, líquidos e gases sob alta pressão, uma vez incandescentes, dão origem a um espectro contínuo de emissão (ou seja, emitem em todos os comprimentos de onda), enquanto que as duas outras leis tratam da emissão / absorção por gases a pressões não tão elevadas (Swihart, 1968, p.11). Segundo uma outra forma da lei de Kirchhoff, a radiância espectral emitida por um objeto em equilíbrio termodinâmico é função apenas da temperatura absoluta do objeto e do comprimento de onda; esta radiância espectral seria independente do tamanho, da forma e da composição do objeto (Swihart, 1968, p.7). Uma outra forma da lei de Kirchhoff é freqüente em livros-texto, segundo a qual a absortância e a emissividade de um sistema sob equilíbrio termodinâmico seriam numericamente iguais; ainda, tal identidade seria válida tanto para cada comprimento de onda quanto para toda a extensão do espectro eletromagnético. De acordo com esta última formulação, a absortância e a emissividade de um corpo negro assumem, por definição, valor unitário.

Lei de Planck - relação verificada experimentalmente, descrevendo a radiância espectral emitida por um corpo negro como função de sua temperatura e do comprimento de onda. A busca de argumentos teóricos que viessem a justificá-la conduziu ao desenvolvimento da teoria quântica (Sears & Salinger, 1979, pp.357-360; Liou, 1980, pp.356-357).

Lei de Stefan-Boltzmann - estabelece que a irradiância emitida por um corpo negro é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta deste, por um fator $5{,}67051.10^{-8}\ W.m^{-2}.K^{-4}$ (constante de Stefan).

Leis de Wien - duas características associadas à radiação de corpo negro, formuladas por W. Wien no século XIX. A primeira delas (denominada lei de deslocamento) estabelece que o comprimento de onda associado à máxima radiância espectral emitida por um corpo negro é diretamente proporcional ao valor inverso da temperatura absoluta deste, por um fator 2,897756.10-3 m.K (constante de Wien). A segunda lei estabelece que o valor assumido pela máxima radiância espectral emitida por um corpo negro é diretamente proporcional à quinta potência da temperatura absoluta deste, por um fator $4{,}09580.10^{-6}\ (W.m^{-2}.sr^{-1}/m).K^{-5}$.

Lote – Parte resultante do parcelamento de gleba, com frente para a via pública e destinado a receber edificação.

Loteamento – Subdivisão das glebas em lotes destinados a edificações, com abertura de novas vias de circulação de logradouros públicos ou o prolongamento, modificação ou ampliação das vias públicas.

Luminância (*luminance*) - quociente da intensidade da luz emitida numa direção dada, pela projeção da área de uma superfície luminosa emissora sobre um plano perpendicular àquela direção.

M

Metropolização (*métropolisation*) – crescimento da população urbana organizada em volta das cidades (ASCHER, 2010). A metrópole distingue-se de cidade pelo fato que o limite entre urbano e rural está menos presente. É formada de vastos espaços urbanizados, porém descontínuos, integrando num mesmo conjunto, a cidade densa, os vilarejos, os neo-rurais...(BONHOMME, 2013).

Microclima (*microclimat*) –

Morfologia urbana (*morphologie urbaine*) – ver forma urbana.

Mutação - é efetuada alterando-se o valor (alelo) de um determinado gene de um indivíduo sorteado com uma determinada probabilidade, denominada probabilidade de mutação. Desta forma, alguns indivíduos da nova população podem ter um de seus genes alterados aleatoriamente. A mutação é utilizada para garantir que diversas alternativas sejam avaliadas na busca pelo ótimo, possibilitando uma maior varredura do espaço de busca e evitando que o algoritmo genético convirja prematuramente para mínimos locais. A Figura 236 apresenta um exemplo esquemático do operador de mutação para codificação binária.

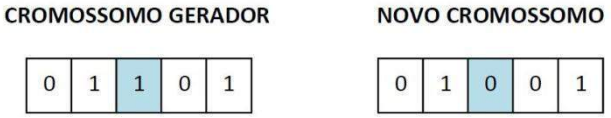


Figura 236: exemplo de operação de mutação de um ponto escolhido aleatoriamente.

N

Nebulosidade (*nebulosité*) - parte do céu encoberto por uma camada de nuvem. O conceito parte da spanisão da abóbada celeste em oito oitavos.

O

Operações Genéticas - Consistem nas operações que o algoritmo genético realiza sobre cada um dos indivíduos (cruzamento e mutação).

P

Parâmetro (*paramètre*) –Grandeza mensurável destinada à caracterizar uma situação, um fenômeno, um objeto ouum conjunto estatístico (LAROUSSE, 2009).

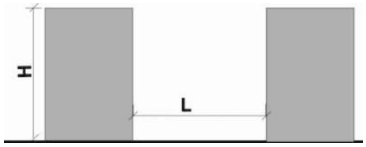
Ponto de Orvalho (*température de rosée*) - temperatura na qual ocorre saturação do vapor d'água contido em uma parcela de ar. A temperatura do ponto de orvalho é sempre inferior ou igual à temperatura do ar.

Ponto ótimo - é representado pelo vetor composto pelos valores das variáveis de projeto que extremizam a função objetivo e satisfazem as restrições impostas. O valor da função objetivo nesse ponto é denominado valor ótimo. O par formado pelo ponto ótimo e pelo valor ótimo é denominado solução ótima. Essa solução é considerada local caso o valor ótimo esteja localizado apenas numa vizinhança, ou global, caso o valor ótimo seja referente a todo espaço de busca.

População - Representa um conjunto de indivíduos ou configurações a serem analisadas.

Pró-espalhamento (*diffusion vers l'avant*) - espalhamento "para a frente" em relação ao plano perpendicular à direção de incidência. Corresponde a valores de ângulo de espalhamento entre 0° e 90°.

Prospecto (*prospect*) – corresponde à relação entre a altura das edificações (H) e a distância que as separa (L)(ADOLPHE et al., 2002).



Q

Quadra urbana (*ilot urbain*) – designa um edifício ou o conjunto de edifícios separados do restante da cidade pela presença de espaços públicos (ruas, calçadas, praças públicas...) (PANERAI et al., 1999). Unidadade morfológica bastante utilizada na análise da forma urbana. Agrupa subunidades, mas pode também consituir-se na parte mínima identificável. A definição de quadra pode basear-se tanto na sua forma (retangular, triangular etc), no tipo (aberta, fechada, livre), como no processo de traçado e divisão fundiária (Figura 237). Corresponde ao modo que se agrupam os edifícios no espaço delimitado pelo cruzamento de traçados (LAMAS, 2010).

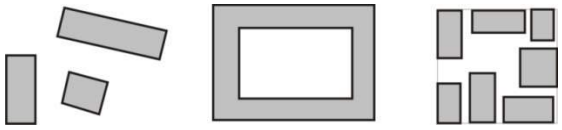


Figura 237: diferentes tipos de quadra : plano livre, quadra fechada e modelo de quadra aberta. Fonte: ilustração do autor, 2012.

R

Radiação Solar (*rayonnement solaire*) - são ondas eletromagnéticas curtas emitidas pelo Sol responsáveis pelo aquecimento terrestre.

Radiação (*rayonnement)*- forma de transferência de energia através da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons.

Radiação de onda curta (*rayonnement de courtes longueurs d'onde*) - designação usualmente aplicada a irradiâncias. Indica radiação associada sobretudo ao espectro solar, com comprimento de onda inferior a 5 μm (ou a algum valor próximo).

Radiação de onda longa (*rayonnement de grandes longueur d'onde*) - designação usualmente aplicada irradiâncias. Indica radiação associada sobretudo ao espectro de emissão terrestre, com comprimento de onda superior a 5 μm (ou a algum valor próximo).

Radiância (*luminance énergétique*) - quociente entre a intensidade observada num certo elemento de superfície, numa dada direção, e a área da projeção ortogonal deste elemento de superfície num plano perpendicular àquela direção [unidades SI : $W.m^{-2}.sr^{-1}$]. Freqüentemente referida como intensidade específica em textos de Astronomia.

Radiosidade (*radiosité*) [W/m²]– taxa de emissão de radiação de uma superfície por unidade de área, incluindo a parcela refletida da radiação incidente (ABNT, 2005).

Recuo – Distância entre a edificação e os limites das divisas do terreno.

Redes inteligente (réseaux intelligents) – é a tradução do ingês « smart grids ». Trata-se de uma rede de distribuição de energia caracterizado por um fluxo bidirecional de eletricidade e de informações. A rede inteligente deve ser capaz de controlar e solicitar instalações de produção, armazenamento e utilização da energia. Assim, esta pode permitir a obtenção de informações sobre os usos particulares, públicos e de empresas, e assim otimizar os sistemas de produção e armazenamento.

Refletância ou refletividade (*réflectance*) – fração do fluxo incidente sobre um sistema que é por ele desviada para o hemisfério de origem, seja por reflexão à superfície, seja por retroespalhament devido a gases e partículas em suspensão, seja por ambos os fenômenos. Recomenda-se que este termo seja aplicado apenas ao caso monocromático ou para intervalos espectrais bem definidos, permitindo desta forma caracterizar o termo albedo como sinônimo de refletância média sobre toda a extensão do espectro solar.

Restrições de projeto - consistem em equações de igualdade ou desigualdade que determinam os limites de viabilidade do projeto, expressando uma condição desejável do comportamento do sistema. Normalmente essas condições ou restrições são relacionadas ao material escolhido, resistência, durabilidade, funcionalidade, confiabilidade, eficiência, recursos disponíveis, entre outras.
É importante ressaltar que o correto equacionamento das restrições é determinante para a obtenção da solução ótima viável do problema analisado. A consideração equivocada dessas restrições pode conduzir a uma resposta inviável ou até mesmo resultar em um problema sem solução.

Retroespalhamento (*rétrodiffusion*) - espalhamento "para trás" em relação ao plano perpendicular à direção de incidência. Corresponde a valores de ângulo de espalhamento entre 90° e 180°.

S

Seleção - consiste no processo de selecionar os indivíduos da população que resultam no melhor desempenho. Por meio desse processo os algoritmos genéticos são capazes de identificar os indivíduos mais aptos, para que permaneçam.

SIG (*Sistema de Informação Geográfica*) – é um sistema informático de materiais, programas, dados e fluxogramas que permitem coletar, armazenar, analisar e difundir as informações geográficas. Os programas SIG representam geralmente informações em mapas sob forma de camadas de dados utilizados para análise e visualização (BONHOMME, 2013).

T

Taxa de ocupação *(Coefficiente d'Emprise au sol - CES)*– Relação entre a área da projeção horizontal da edificação e a área total do terreno.

Tecido urbano (*tissu urbain*) – assimila células construídas e os vazios de um meio urbano ao entrelaçamento de fios de um textil (MERLIN e CHOYA, 1988). Essa expressão designa, portanto, o conjunto de elementos físicos que contribuem para a forma urbana: a rede viária, a forma e o estilo dos edifícios, assim como as relações entre esses elementos. O tecido urbano é bastante ligado à história da cidade.

Tempertaura sol-ar (*température sol-air*) [°C] – temperatura fictícia que representa o efeito combinado da radiação solar incidente no fechamento e dos intercâmbios de energia por radiação e convecção entre a superfície e o meio envolvente (ABNT, 2005).

Termômetro infra-vermelho (*radiomètre infra-rouge*) - designação aplicada a instrumentos concebidos para medir radiâncias oriundas de um dado sistema, estando o sensor em condições de receber energia radiante proveniente de um ângulo sólido relativamente pequeno, considerando-se apenas uma região do espectro de emissão terrestre caracterizada por elevada transmitância atmosférica (por exemplo, entre 8 e 14 μm). Deve ser lembrado que muitos sistemas não se comportam como um corpo negro dificultando a interpretação das medições efetuadas com este tipo de instrumento em termos da (verdadeira) temperatura do sistema visado.

Testada - Linha limítrofe entre a gleba ou lote e o logradouro público que coincide com o alinhamento.

Tipologia urbana *(typologie urbaine)* – Esse termo pode ser expresso a partir de várias definições. Significa, de modo geral, um elemento representativo de uma classe de indivíduos ou um "esquema geral de estrutura" (MERLIN e CHOYA, 1988). A tipologia é estabelecida a partir de um certo número de critérios. Em urbanismo, esses critérios podem tratar de grupos sociais, de usos, da morfologia, entre outros. Nesse último caso, a morfologia e a tipologia podem ser articulados por uma análise histórica ou por uma análise conforme variantes formais (altura, densidade, etc.) (BOHNOMME, 2013).

Das relações tipologia-morfologia, ressalta-se que o espaço urbano depende dos tipos edificados e do modo como estes se agrupam. A tipologia edificada determina a forma urbana e a forma urbana condiciona a tipologia edificada. Esta interdependência é um dos campos mais sólidos em que se colocam as relações entre a cidade e a arquitetura (LAMAS, 2010). A noção de tipo será abordada mais adiante na seção 4.1.

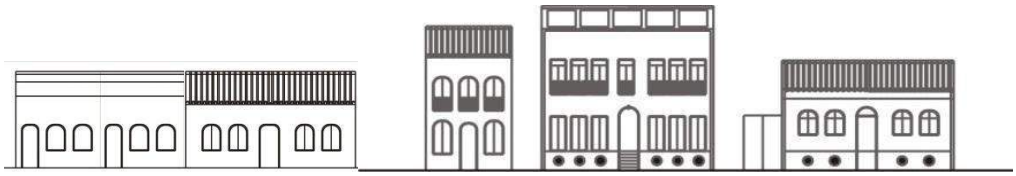


Figura 238: variações arquitetônicas do tipo edificado - herança colonial portuguesa no Brasil. Fonte: ilustração do autor, 2012.

U

Urbanização (*urbanisation*)– Obras e serviços executados numa determinada área com vistas a sua utilização para fins urbanos.

Uso comercial e de serviços – Destinado a comercialização de mercadorias ou prestação de serviços à população e de apoio às atividades comerciais e industriais.

Uso especial – Exercido por atividades de prestação de serviços públicos : de comunicação, saúde, educação, hospedagem, esporte, cultura, lazer, atividades religiosas, terminais de carga ou de passageiros, matadouros e/ou frigoríficos, cemitérios , crematórios e demais serviços prestados à coletividade.

Uso industrial – Destinado à extração, beneficiamento, desdobramento, transformação, manufatura, montagem, manutenção ou guarda de matérias-primas ou mercadorias de origem mineral, vegetal ou animal.

Uso institucional – Exercido por atividades de prestação de serviço público por parte do governo estadual, municipal ou federal.

Uso misto – Exercício concomitante do uso residencial e do não residencial.

Uso não-residencial – Exercido por atividades de comércio, serviços, de uso coletivo, industrial, misto, institucional e especial.

Uso residencial – Exercido em edificações unifamiliares, multifamiliares e coletivas, horizontais ou verticais, destinadas à habitação permanente.

V

Variável (*variable*) – designa um elemento que pode assumir diferentes valores no interior de um conjunto, de um sistema, de uma relação (LAROUSSE, 2009).

Variáveis de projeto - Os parâmetros variáveis no processo do projeto ótimo e que definem as características determinantes do modelo analisado são denominados variáveis de projeto. São, portanto, as variáveis para as quais o problema é resolvido, ou seja, são os valores que se deseja determinar.
Em geral, as variáveis de projeto não podem assumir valores arbitrários quaisquer, uma vez que podem fatalmente resultar em uma solução impossível ou inviável na prática. Por isso, faz-se necessário delimitar a faixa de variação das mesmas, definindo os limites superior ub_k e inferior lb_k para cada variável x_k..
As variáveis de projeto são classificadas em contínuas ou discretas. Se forem contínuas, podem assumir qualquer valor dentro de um determinado intervalo de variação. No caso de variáveis discretas, podem assumir apenas determinados valores específicos. Em um mesmo problema pode haver variáveis de projeto contínuas e discretas simultaneamente.
No caso de otimização aplicada à forma de edifícios, as variáveis de projeto podem representar os parâmetros que definem a geometria de um elemento, propriedades dos materiais, entre outros.

Ventos alísios (*vents alizés*) - ventos fortes derivados do movimento de rotação da Terra, posicionados próximos ao Equador.

Volume passivo (*volume passif*) – corresponde à porção da edificação que pode ser iluminada e ventilada naturalmente. Calcula-se como o volume situado ao nível das fachadas exteriores sobre uma profundidade situada à menos de duas vezes o pé-direito (SALAT, 2011).

Z

Zênite (*zénith*) - intersecção da linha vertical (perpendicular ao plano horizontal local) com a esfera celeste, no próprio hemisfério em que se encontra o observador. Lugar geométrico oposto ao nadir (CPTEC/INPE, 2013).

Zona de Convergência Intertropical (*zone de convergence intertropical*) - área de ventos convergentes nos Hemisférios Norte e Sul, geralmente, localizada a 10 graus entre o norte e o sul do Equador. É uma extensa área de baixa pressão atmosférica onde, tanto o efeito Coriolis como o declínio da baixa pressão atmosférica estão enfraquecidos permitindo, ocasionalmente, a formação de perturbações tropicais.

Zona urbana *(aire urbain)*– Área caracterizada pela continuidade das edificações dos logradouros, provida com dois dos seguintes equipamentos: meio-fio ou pavimento com canalização de águas pluviais, rede de abastecimento de água potável, rede de esgotamento sanitário, rede de iluminação pública, escola primária ou posto de saúde, numa distância máxima de 3 Km (três quilômetros), do imóvel considerado. Para efeito de parcelamento do solo a zona urbana é definida por lei, não necessitando atender à definição.

Zoneamento *(zonage urbain)* – Parcelamento do solo urbano em zonas, seguindo necessidades e conveniências existentes ou pré-estabelecido.

ANEXO A

Tabela 70 : coeficientes estatísticos das funções de brilho circumsolar e do horizonte para o modelo de céu de Perez.

ε bin	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
1 (ε < 1065)	-0,008	0,588	-0,062	-0,060	0,072	-0,022
2 (1065 ≤ ε < 1230)	0,130	0,683	-0,151	-0,019	0,066	-0,029
3 (1230 ≤ ε < 1500)	0,330	0,487	-0,221	0,055	-0,064	-0,026
4 (1500 ≤ ε < 1950)	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	-0,014
5 (1950 ≤ ε < 2800)	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,462	0,001
6 (2800 ≤ ε < 4500)	1,132	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
7 (4500 ≤ ε < 6200)	1,060	-1,600	-0,359	0,264	-1,127	0,131
8 (6200 ≤ ε)	0,678	-0,327	-0,250	0,156	-1,377	0,251

ANEXO B

Extrato do arquivo de entrada do Citysim, a partir do qual o seus modelos de análise fazem a leitura da geometria, componentes materiais, arquivo climático etc.

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<CitySim name="New Scene copy copy">
<Simulation beginMonth="1" endMonth="12" beginDay="1" endDay="31"/>
<Climate location="Maceio.cli" city="Maceio"/>
<FarFieldObstructions>
<Point phi="0.0" theta="2.0"/>
<Point phi="10.0" theta="2.0"/>
….
</FarFieldObstructions>
<District>
<WallType id="3407" name="classeHorizontal">
<Layer Thickness="0.02" Conductivity="1.15" Cp="1000.0" Density="2000.0"/>
<Layer Thickness="0.15" Conductivity="0.9" Cp="920.0" Density="1600.0"/>
<Layer Thickness="0.15" Conductivity="0.9" Cp="920.0" Density="1600.0"/>
</WallType>
<WallType id="3461" name="classeVertical">
<Layer Thickness="0.02" Conductivity="1.15" Cp="1000.0" Density="2000.0"/>
<Layer Thickness="0.15" Conductivity="0.9" Cp="920.0" Density="1600.0"/>
<Layer Thickness="0.15" Conductivity="0.9" Cp="920.0" Density="1600.0"/>
</WallType>
<Building Name="" id="1" key="341" Vi="165.7591999792494" Ninf="0.15" Tmin="20.0"
Tmax="30.0" Simulate="true">
<heatTank V="0.01" phi="20.0" rho="1000.0" Cp="4180.0" Tmin="20.0" Tmax="35.0"/>
<coolTank V="0.01" phi="20.0" rho="1000.0" Cp="4180.0" Tmin="5.0" Tmax="20.0"/>
<heatSource beginDay="1" endDay="365">
<boiler Pmax="1.0E7" eta_th="0.96"/>
</heatSource>
<coolSource beginDay="1" endDay="365">
<heatPump Pmax="1.0E7" eta_tech="0.3" Ttarget="5.0" Tsource="ground"
position="vertical" depth="5.0" z1="10.0" alpha="0.07"/>
</coolSource>
<Floor id="1" Area="41.4397999949779" GlazingRatio="0.99900" GlazingGValue="1.00000"
GlazingUValue="1.0000E-6" ShortWaveReflectance="7.3780E-2" Kground="0.155">
<V0 x="-9.0000E0" y="-1.0000E1" z="0.0"/>
<V1 x="-9.0000E0" y="1.0000E1" z="0.0"/>
<V2 x="9.0000E0" y="1.0000E1" z="0.0"/>
<V3 x="9.0000E0" y="-1.0000E1" z="0.0"/>
</Floor>
<Wall id="2" Area="12.098065960569768" GlazingRatio="0.99900" GlazingGValue="1.00000"
GlazingUValue="1.0000E-6" ShortWaveReflectance="2.9238E-1" type="3461">
<V0 x="-9.0000E0" y="1.0000E1" z="0.0"/>
<V1 x="-9.0000E0" y="-1.0000E1" z="0.0"/>
<V2 x="-9.0000E0" y="-1.0000E1" z="6.0000E0"/>
<V3 x="-9.0000E0" y="1.0000E1" z="6.0000E0"/>
</Wall>
<Wall id="3" Area="53.99674064063755" GlazingRatio="0.99900" GlazingGValue="1.00000"
GlazingUValue="1.0000E-6" ShortWaveReflectance="2.9238E-1" type="3461">
<V0 x="9.0000E0" y="1.0000E1" z="0.0"/>
<V1 x="-9.0000E0" y="1.0000E1" z="0.0"/>
<V2 x="-9.0000E0" y="1.0000E1" z="6.0000E0"/>
<V3 x="9.0000E0" y="1.0000E1" z="6.0000E0"/>
</Wall>
<Wall id="4" Area="12.275764740406414" GlazingRatio="0.99900" GlazingGValue="1.00000"
GlazingUValue="1.0000E-6" ShortWaveReflectance="2.9238E-1" type="3461">
<V0 x="9.0000E0" y="-1.0000E1" z="0.0"/>
<V1 x="9.0000E0" y="1.0000E1" z="0.0"/>
<V2 x="9.0000E0" y="1.0000E1" z="6.0000E0"/>
```

```
<V3 x="9.0000E0" y="-1.0000E1" z="6.0000E0"/>
</Wall>
<Wall id="5" Area="55.32445390556892" GlazingRatio="0.99900" GlazingGValue="1.00000"
GlazingUValue="1.0000E-6" ShortWaveReflectance="2.9238E-1" type="3461">
<V0 x="-9.0000E0" y="-1.0000E1" z="0.0"/>
<V1 x="9.0000E0" y="-1.0000E1" z="0.0"/>
<V2 x="9.0000E0" y="-1.0000E1" z="6.0000E0"/>
<V3 x="-9.0000E0" y="-1.0000E1" z="6.0000E0"/>
</Wall>
<Roof id="6" Area="41.4397999949779" GlazingRatio="0.0" GlazingGValue="0.7"
GlazingUValue="1.382436" ShortWaveReflectance="4.6292E-1" Uvalue="1.0000E-6">
<V0 x="9.0000E0" y="-1.0000E1" z="6.0000E0"/>
<V1 x="9.0000E0" y="1.0000E1" z="6.0000E0"/>
<V2 x="-9.0000E0" y="1.0000E1" z="6.0000E0"/>
<V3 x="-9.0000E0" y="-1.0000E1" z="6.0000E0"/>
</Roof>
</Building>
```

ANEXO C

Tabela 71: Resumo dos indicadores de densidade para os 50 bairros de Maceió.

BAIRRO	Altura média	Área construída média	CES	COS	Densidade Total construída	Desvio Padrão Altura	Densidade Humana
Antares	4,52	95,3	0,07	0,11	1,74	1,43	15,22
Barro Duro	5,11	92,5	0,23	0,47	2,00	1,86	44,26
Benedito Bentes	3,83	51,5	0,06	0,10	1,59	1,37	46,72
Bebedouro	3,86	64,2	0,21	0,27	1,32	1,14	27,60
Bom Parto	3,90	53,5	0,60	0,80	1,33	1,17	242,83
Canãa	4,31	108,1	0,30	0,49	1,64	1,40	73,32
Centro	9,13	197,8	0,80	2,79	3,48	3,77	19,24
Chã de Bebedouro	3,68	56,8	0,38	0,40	1,05	0,80	130,55
Chã da Jaqueira	3,93	57,7	0,32	0,39	1,21	0,95	160,28
Cidade universitária	5,40	952,7	0,03	0,13	4,87	2,56	25,64
Clima Bom	3,59	71,0	0,28	0,32	1,13	0,80	102,74
Cruz das Almas	4,63	97,7	0,17	0,26	1,51	3,55	41,22
Farol	4,92	136,2	0,61	1,32	2,16	2,89	59,84
Feitosa	4,09	67,0	0,35	0,49	1,38	1,34	97,44
Fernão Velho	4,14	122,2	0,12	0,19	1,50	0,86	21,22
Garça Torta	4,28	83,8	0,04	0,06	1,59	1,25	9,69
Gruta de Lourdes	6,74	105,9	0,39	1,16	2,97	3,36	42,78
Guaxuma	3,98	79,4	0,02	0,02	1,33	1,09	4,52
Ipioca	4,19	91,9	0,01	0,02	1,58	1,30	2,96
Jacarecica	7,24	101,9	0,01	0,04	2,43	2,45	15,73
Jacitinho	3,94	57,9	0,58	0,77	1,33	1,12	211,95
Jaraguá	5,20	157,6	0,43	1,09	2,55	1,78	31,12
Jardim Petrópolis	5,12	168,6	0,11	0,18	1,69	1,62	14,81
Jatiúca	6,76	116,1	0,54	1,68	3,13	6,37	116,25
Levada	4,24	94,3	0,81	1,36	1,68	1,40	120,84
Mangabeiras	6,02	165,8	0,30	0,85	2,85	5,44	48,91
Mutange	3,58	61,5	0,16	0,18	1,13	0,77	46,52
Ouro Preto	3,83	66,0	0,17	0,23	1,37	1,30	75,86
Pajuçara	7,65	111,9	0,55	2,33	4,24	7,48	49,15
Pescaria	3,88	73,2	0,02	0,02	1,32	1,09	5,38
Petrópolis	4,18	77,6	0,10	0,14	1,37	1,11	33,44
Pinheiro	4,37	90,3	0,60	1,07	1,78	1,72	100,04
Pintanguinha	4,52	94,1	0,36	0,61	1,71	1,59	49,84
Ponta Grossa	4,30	83,8	0,86	1,16	1,34	1,04	188,50
Pontal da Barra	4,53	129,9	0,06	0,09	1,61	1,16	8,62
Ponta da Terra	4,60	86,7	0,97	1,25	1,29	0,72	215,31
Poço	5,54	96,4	0,71	1,40	1,97	2,14	108,15
Prado	5,19	91,3	0,69	1,20	1,73	2,01	119,75
Ponta Verde	10,68	181,6	0,45	2,13	4,71	8,58	118,95
Riacho Doce	4,11	74,3	0,01	0,02	1,33	1,23	2,91
Rio Novo	4,63	65,1	0,05	0,07	1,52	0,97	20,85
Santo Amaro	4,59	106,0	0,43	0,69	1,62	1,33	71,11
Santa Amélia	5,33	95,5	0,11	0,20	1,84	2,10	35,00
Santos Dumont	4,37	80,0	0,07	0,11	1,57	1,28	19,46
Serraria	5,10	132,3	0,09	0,23	2,50	3,02	21,41
São Jorge	3,98	70,1	0,04	0,06	1,52	1,31	19,25
Santa Lúcia	4,83	96,3	0,16	0,26	1,62	1,40	46,81
Tabuleiro dos Martins	3,82	109,4	0,23	0,35	1,50	0,85	65,15
Trapiche da Barra	4,18	92,1	0,59	0,92	1,57	1,12	137,88
Vergel do Lago	4,29	59,4	0,72	0,98	1,35	1,07	230,62

Tabela 72: Resumo dos indicadores ambientais de forma para os 50 bairros de Maceió.

BAIRRO	Rugosidade	Compacidade	Contiguidade	Área de vazios	Porosidade
Antares	0,4	3,65	0,60	5596060	0,92
Barro Duro	1,5	2,81	0,62	1829680	0,72
Benedito Bentes	0,3	3,30	0,50	23145100	0,93
Bebedouro	1,0	1,59	1,00	1789880	0,75
Bom Parto	2,9	2,13	0,84	224717	0,35
Canãa	1,9	3,38	0,59	398785	0,61
Centro	8,8	2,18	0,89	313276	0,17
Chã de Bebedouro	1,6	1,98	0,89	441806	0,59
Chã da Jaqueira	1,4	1,63	0,97	871718	0,65
Cidade universitária	0,4	1,46	3,12	19823400	0,92
Clima Bom	1,2	2,85	0,69	3339250	0,69
Cruz das Almas	1,1	3,63	0,52	1858060	0,78
Farol	4,4	1,64	1,40	1172880	0,30
Feitosa	1,8	2,92	1,80	1695810	0,60
Fernão Velho	0,7	6,76	0,00	2334650	0,83
Garça Torta	0,2	3,81	0,37	1873180	0,95
Gruta de Lourdes	3,8	5,40	0,00	1951620	0,52
Guaxuma	0,1	4,59	0,16	4837470	0,98
Ipioca	0,1	5,19	0,00	19166800	0,98
Jacarecica	0,1	5,49	0,00	9908850	0,98
Jacitinho	2,7	2,32	0,79	1513270	0,38
Jaraguá	3,3	0,26	0,21	776056	0,48
Jardim Petrópolis	0,7	5,35	0,00	2394310	0,87
Jatiúca	5,4	5,53	0,00	1348380	0,37
Levada	4,7	5,85	0,00	168226	0,15
Mangabeiras	2,8	5,54	0,00	615340	0,61
Mutange	0,7	5,22	0,00	456140	0,82
Ouro Preto	0,8	5,11	0,00	446825	0,80
Pajuçara	7,3	5,86	0,00	296099	0,32
Pescaria	0,1	5,17	0,00	3865590	0,98
Petrópolis	0,5	5,42	0,00	4221860	0,88
Pinheiro	3,6	5,31	0,00	784845	0,33
Pintanguinha	2,1	5,33	0,00	650551	0,58
Ponta Grossa	4,2	5,60	0,00	173903	0,12
Pontal da Barra	0,3	5,82	0,00	2544700	0,93
Ponta da Terra	4,8	5,64	0,00	12611	0,03
Poço	4,7	5,63	0,00	537996	0,25
Prado	4,1	5,49	0,00	460169	0,28
Ponta Verde	6,4	4,18	0,36	754210	0,48
Riacho Doce	0,1	5,08	0,00	9906750	0,98
Rio Novo	0,2	5,14	0,00	2625900	0,95
Santo Amaro	2,6	5,81	0,00	148888	0,50
Santa Amélia	0,7	5,37	0,00	2094100	0,87
Santos Dumont	0,4	5,33	0,00	6607390	0,92
Serraria	0,7	2,11	0,03	6845200	0,87
São Jorge	0,2	5,16	0,00	2144750	0,95
Santa Lúcia	0,9	5,30	0,00	3387750	0,81
Tabuleiro dos Martins	1,0	2,15	1,09	6580090	0,74
Trapiche da Barra	3,3	5,89	0,00	729228	0,34
Vergel do Lago	3,6	5,35	0,00	387967	0,25

Tabela 73: matriz de correlação entre os indicadores considerados para os bairros de Maceió.

Variáveis	Altura média	Área construída no solo	Área total construída	Área bairro	Rugosidade	Taxa de Ocupação	Densidade construída	Verticalidade	Compacidade	Contiguidade	Coef. Aproveitamento	Área de vazios	Porosidade	DP_Altura
Altura média	**1,00**	0,11	0,52	-0,09	0,64	0,23	0,69	0,01	0,06	-0,04	0,84	-0,10	-0,27	0,72
Área construída no solo	0,11	**1,00**	0,84	0,13	0,44	0,50	0,44	0,04	-0,27	0,26	0,12	0,03	-0,51	0,03
Área total construída	0,52	0,84	**1,00**	0,13	0,64	0,46	0,66	-0,09	-0,26	0,30	0,56	0,04	-0,49	0,39
Área bairro	-0,09	0,13	0,13	**1,00**	-0,40	-0,46	-0,38	-0,15	-0,16	0,31	0,16	0,99	0,48	-0,08
Rugosidade	0,64	0,44	0,64	-0,40	**1,00**	0,86	1,00	0,10	0,03	-0,04	0,50	-0,46	-0,88	0,47
Taxa de Ocupação	0,23	0,50	0,46	-0,46	0,86	**1,00**	0,81	0,14	0,02	-0,03	0,11	-0,52	-0,99	0,09
Densidade construída	0,69	0,44	0,66	-0,38	1,00	0,81	**1,00**	0,09	0,01	-0,03	0,56	-0,43	-0,84	0,51
Verticalidade	0,01	0,04	-0,09	-0,15	0,10	0,14	0,09	**1,00**	0,11	-0,28	-0,26	-0,15	-0,12	0,02
Compacidade	0,06	-0,27	-0,26	-0,16	0,03	0,02	0,01	0,11	**1,00**	-0,73	-0,10	-0,13	-0,01	0,09
Contiguidade	-0,04	0,26	0,30	0,31	-0,04	-0,03	-0,03	-0,28	-0,73	**1,00**	0,27	0,29	0,02	-0,06
Coef. Aproveitamento	0,84	0,12	0,56	0,16	0,50	0,11	0,56	-0,26	-0,10	0,27	**1,00**	0,15	-0,16	0,71
Área de vazios	-0,10	0,03	0,04	0,99	-0,46	-0,52	-0,43	-0,15	-0,13	0,29	0,15	**1,00**	0,53	-0,09
Porosidade	-0,27	-0,51	-0,49	0,48	-0,88	-0,99	-0,84	-0,12	-0,01	0,02	-0,16	0,53	**1,00**	-0,13
DP_Altura	0,72	0,03	0,39	-0,08	0,47	0,09	0,51	0,02	0,09	-0,06	0,71	-0,09	-0,13	**1,00**

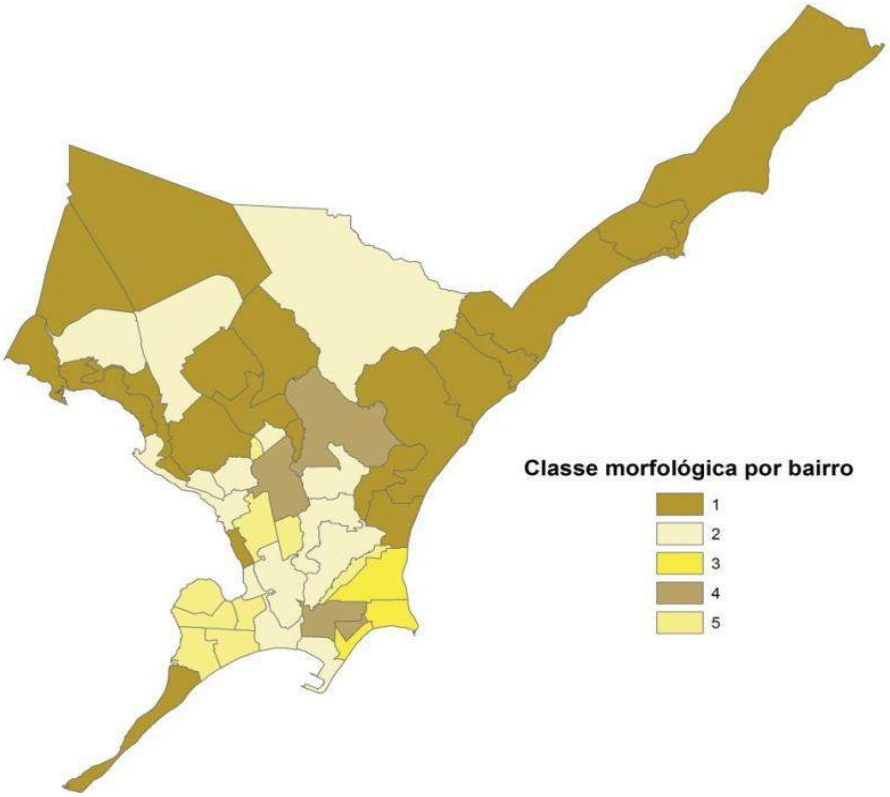


Figura 239: classificação tipomorflógica do tecido urbano de Maceió obtida pela repartição de bairros.

ANEXO D

MOGA (*Multi-objetive Genetic Algorithm*)

Este método foi proposto por Fonseca e Fleming (1993) e trouxe como inovação a aplicação simultânea dos conceitos de dominância na classificação das soluções avaliadas ao longo das gerações bem como o conceito de diversidade das soluções não dominadas. A classificação proposta para os indivíduos é baseada na definição de um parâmetro denominado *rank*. Para um determinado indivíduo, esse parâmetro é igual ao número de indivíduos da população corrente que o dominam, acrescido da unidade. Por meio dessa abordagem, todos os indivíduos não dominados possuem o valor de *rank* igual a um e a classificação dos indivíduos dominados não excede o tamanho da população. Um exemplo ilustrativo dessa estratégia de classificação é apresentado na Figura, na qual se supõe um problema de minimização.

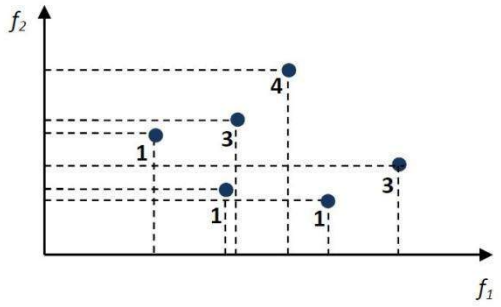


Figura 240: exemplo ilustrativo da classificação realizada pelo MOGA.

Ao final do procedimento de ordenamento pode haver a ocorrência de mais de um indivíduo compartilhando a mesma posição. Para tratar esse tipo de situação foi introduzido o conceito de nichos (MAHFOUD, 1995), que correspondem a grupos de indivíduos com características comuns; em geral, são indivíduos com valores semelhantes de aptidão e localizados em uma vizinhança próxima no espaço objetivo. A utilização da estratégia de avaliação de nichos consiste, basicamente, em calcular um parâmetro denominado fitness compartilhado de cada solução pertencente a determinado nicho. No cálculo desse parâmetro, as soluções que residem em um nicho menos ocupado terão melhor fitness compartilhado, permitindo que soluções pouco representadas em cada rank se destaquem.

Amorim (2006) destaca que esta estratégia mantém a diversidade nos valores da função de aptidão, mas pode não garantir a diversidade no conjunto das variáveis. Dessa forma, o MOGA pode não ser eficiente em encontrar as múltiplas soluções em problemas em que diferentes pontos ótimos de Pareto corresponde aos mesmos valores de aptidões. A importância desse tipo de tratamento reside no fato de que soluções diferentes com mesmo valor de função objetivo podem conduzir a um desempenho semelhante, mas o conhecimento das diversas alternativas é desejável uma vez que amplia as opções de escolha do projetista.

Após a classificação, tendo sido identificados os indivíduos (soluções) com melhor desempenho, é realizado procedimento de seleção para escolher ou descartar determinadas soluções e possibilitar a seleção dos indivíduos mais aptos para a reprodução.

A Figura 241 apresenta um fluxograma do MOGA, resumindo o procedimento geral do método. Informações mais detalhadas, com as devidas formulações incorporadas e descrição completa do algoritmo, podem ser encontradas em Konak et al. (2006), Coello et al. (2007) e Fonseca (2003).

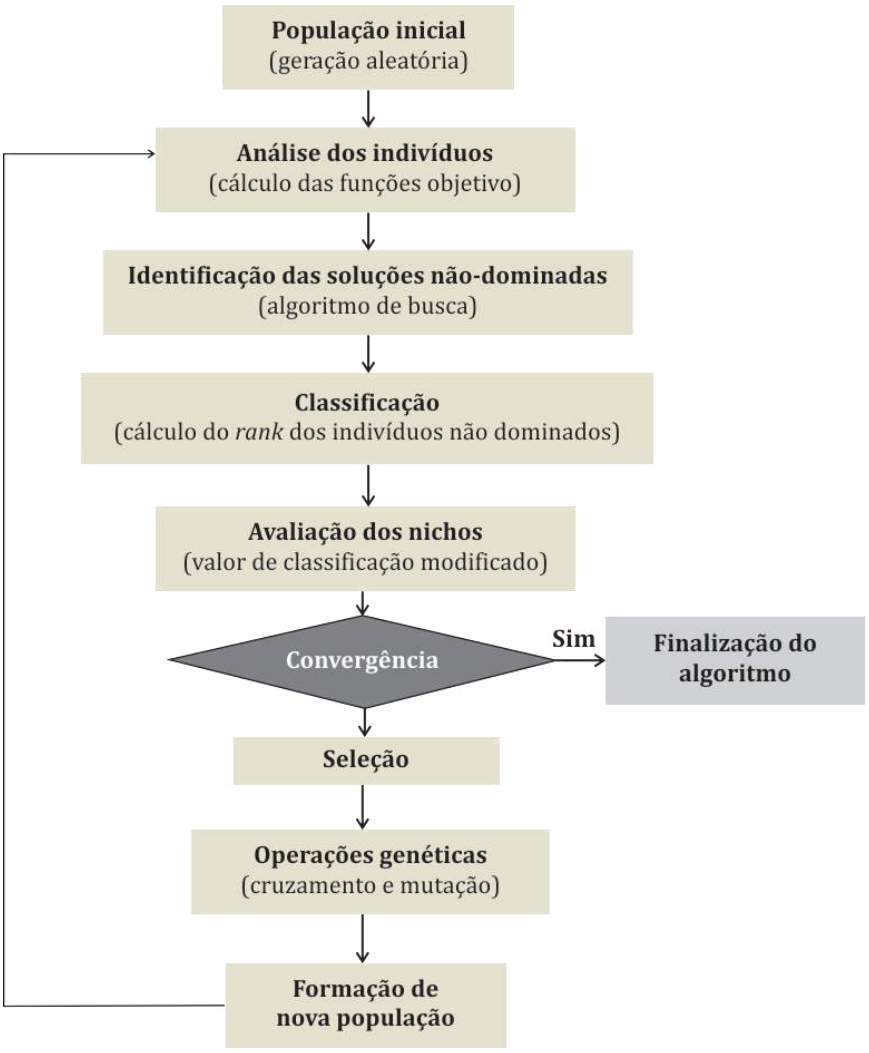


Figura 241 : fluxograma do algoritmo MOGA.

LISTA DE PUBLICAÇÕES

Artigos publicados em periódico nacional e internacional

1. MARTINS, T. A. L ; ADOLPHE, L. ; BASTOS, L.E.G. From solar constraints to urban design opportunities : optimization of urban typologies in a tropical city in Brazil. *Energy and Buildings*. V. 76, p. 43-56, Junho de 2014.

2. MARTINS, T. A. L., BONHOMME, M., ADOLPHE, L. Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL. *Ambiente Construído* (Online). v.13, p.213 - 233, Dezembro de 2013.

Artigos publicados em congressos nacionais e internacionais

1. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BASTOS, L. E. G. Avaliação preliminar do potencial solar em classes morfológicas urbanas de referência de Maceió-AL. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído., 2013, Brasília. Conforto e Projeto. ANTAC, 2013. v.1. p.1 – 10.

2. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BONHOMME, M. Building energy demand based on urban morphology analysis. Case study in Maceió, Brazil In: Passive and Low Energy Architecture, 2013, Munich. Sustainable Architecture for renewable future. , 2013. v.1. p.1-6.

3. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Análise de sensibilidade sobre o impacto da geometria urbana no conforto térmico exterior em clima tropical In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído., 2013, Brasília. Conforto e Projeto. ANTAC, 2013. v.1. p.1-10.

4. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Efeitos do uso de galerias urbanas no conforto térmico exterior em clima tropical semiárido In: ENTAC, 2012, Juiz de Fora - MG. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Juiz de Fora: UFJF, 2012. v.1. p.1- 10.

5. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Microclimate Effects of Urban Geometry on Outdoor Thermal Comfort in the Brazilian Tropical Semi-arid Climate In: PLEA - Passive and Low Energy Architecture, 2012, Lima. Opportunities, limits and needs. Lima: PUC Lima, 2012. v.1. p.1 – 6.

6. NIEMEYER, M. L. A., MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L. Towards Sustainable Urban Planning for Brazilian Cities: A Knowledge-base to Integrate Environmental Predictive Data into a DSS In: INCOM, 2012, Bucarest. Information Control Problems in Manufacturing. Bucarest: ELSEVIER, 2012. v.1. p.1 – 6.

7. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Influence of Urban Geometry on Outdoor Thermal Comfort in Tropical Climate In: Climate and Construction, 2011, Karlshure. Climate and Construction. Karlshure: KIT, 2011. v.1. p.1- 6.

Université de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse)

Cotutelle internationale avec l'Université Fédérale de Rio de Janeiro.

Présentée et soutenue par :
Tathiane AGRA DE LEMOS MARTINS

le 31 Mars 2014

Titre :

Des contraintes solaires à des opportunités de projet urbain: optimisation de typo-morphologies urbaines en climat tropical

---

École doctorale et discipline ou spécialité :
ED MEGEP : Génie civil

Unité de recherche :
LMDC (INSA) et LRA (ENSA)

Directeur(s) de Thèse :

Luc ADOLPHE

Jury :
BASTOS, Leopoldo (Codirecteur)
BARBIRATO, Gianna (Rapporteur)
CASTRO, Eduardo (Rapporteur)
BONNEAUD, Frédéric (Examinateur)
REGO, Andrea (Examinateur)
FERNANDEZ, Pierre (invité)

Université de Toulouse III – Paul Sabatier
Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse
Ecole Doctorale MEGeP - Mécanique, Génie Civil et Procédés
Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions

Thèse de Doctorat
Spécialité : Génie Civil

Titre de la thèse :

DES CONTRAINTES SOLAIRES À DES OPPORTUNITÉS DE DESSIN URBAIN : Optimisation de typo-morphologies urbaines en climat tropical au Brésil

Auteur :
Tathiane AGRA DE LEMOS MARTINS

Direction de Thèse :
Luc ADOLPHE
Leopoldo EURICO GONÇALVES BASTOS

Membres du Jury :

Gianna BARBIRATO (Rapporteur)
Eduardo CASTRO (Rapporteur)
Andrea REGO (Examinateur)
Frédéric BONNEAUD (Examinateur)
Pierre FERNANDEZ (Invité)

Rio de Janeiro
Mars, 2014.

RESUME

Environ trois quarts des ressources globales sont aujourd'hui consommés dans les aires urbaines. Le processus d'urbanisation induit des changements sévères du climat local, de la qualité environnementale des espaces, ainsi qu'une augmentation significative de la demande énergétique des bâtiments. Les projections statistiques sur la croissance de la population urbaine indiquent que cette situation tendra à s'aggraver dans les années à venir. Il devient donc impératif de chercher d'autres stratégies pour mieux adapter les environnements urbains aux nouvelles demandes énergétiques, afin de réduire l'empreinte environnementale des villes. Dans ce contexte, ce travail est une contribution à la recherche énergétique urbaine, plus particulièrement en ce qui concerne l'énergie consommée et potentiellement produite par les bâtiments à l'échelle urbaine locale. La morphologie urbaine est ici considérée comme un paramètre crucial dans le processus d'amélioration de l'efficacité énergétique du cadre bâti. Dans les zones de basses latitudes, sous climat tropical, l'énergie solaire incidente est extrêmement abondante. Toutefois, la bonne utilisation de cette ressource dans les bâtiments peut suggérer l'adoption de formes urbaines très peu denses et étales, en vue de réduire les obstructions produites par l'environnement proche. A rebours, ces formes urbaines très peu denses peuvent entrainer une augmentation des apports solaires sur les façades, élevant la demande énergétique. Le contrôle des gains solaires sur les façades pour la réduction de la demande énergétique peut ainsi représenter une perte potentielle en terme d'éclairement naturel des espaces, et une réduction du potentiel de production d'énergie solaire. Afin de quantifier le potentiel de ces stratégies conflictuelles, il devient indispensable de convoquer des modèles d'analyse pluridisciplinaires, permettant de mettre en œuvre des approches multicritères dans le processus de conception de la forme urbaine. Cette thèse s'appuie sur une réflexion prospective sur les quartiers de la ville de Maceió, Alagoas, au Brésil. Dans un premier temps, un ensemble de paramètres morphologiques caractéristiques sont employés pour identifier et caractériser le potentiel solaire de typologies de référence de la ville. Ensuite, ces paramètres sont soumis à une analyse de sensibilité via un plan d'expérience. Les paramètres statistiquement significatifs sont alors intégrés à une méthode paramétrique d'optimisation dans laquelle l'algorithme génétique NSGA-II est couplé à un algorithme simplifiée de radiosité, visant à maximiser le potentiel de production d'énergie sur les toitures des bâtiments, tout en minimisant les apports solaires sur ses façades. Nous considérons des seuils d'éclairement naturel et intégrons des règles locales d'urbanisme comme contraintes aux projets. Cinq typologies représentatives du tissu urbain de Maceió ont ainsi été identifiées. L'ensemble des indicateurs les plus influents sur le potentiel solaire des formes urbaines a été hiérarchisé, en mettant l'accent notamment sur le rôle du prospect moyen ou de l'albédo des surfaces. La méthode d'optimisation a permis de tester plus de 80.000 configurations d'ilots urbains et les résultats obtenus font apparaître une grande diversité de morphologies «optimum». Ces projets ont des performances solaires supérieures à celles des typologies existantes dans la ville. Cette intégration de stratégies énergétiques contradictoires montre qu'au-delà de l'intégration de contraintes variées et d'une meilleure adaptation à la complexité du processus de design urbain, l'approche utilisée ici apparaît très utile pour la recherche de solutions urbaines performantes à l'échelle des quartiers. Cette approche peut ainsi participer au renouvellement de l'Architecture de la Ville.

Mots-clés: morphologie urbaine; potentiel solaire; énergétique urbaine; analyse de sensibilité; optimisation; algorithme génétique; climat tropical.

Rio de Janeiro,
Mars 2014.

ABSTRACT

At the beginning of 21th century, the world was faced with unprecedented environmental transformations. The urbanization process reached record levels and it keeps increasing, especially in developing countries. Around 3/4 of global resources are currently consumed in urban settlements, with corresponding adverse environmental consequences which leads to severe local climate changes, affecting environmental quality of spaces and leading to a significant increase of energy demand in buildings. A projection of the world urban population indicates that this situation will worsen in the coming years. It is therefore imperative that we understand how to design less resource intensive urban settlements. This research consists of a contribution to the energy debate in cities, focusing on the energy potentially consumed and produced by the built environment in the neighborhood scale. Urban morphology has been pointed out as a pivotal issue on shifting to climate adapted urban environments towards energy efficiency of buildings. In tropical climate regions, solar energy represents a high potential for renewable electric production in buildings, recording high levels of irradiation throughout the year. Though, engaging such a strategy may suggest applying sparsely low-density urban forms, aiming at reducing obstructions caused by the urban built surroundings. On one hand, scattered and less dense urban forms may result in significant increase of solar thermal load in buildings vertical facades, but on the other hand, the control of the solar heat gains in urban facades may represent significant losses on indoors daylight levels and also reducing solar energy harness. Estimating the relative potential of these conflicting design strategies, taking into account the constrained parameters related to local building regulation, requires coupling multidisciplinary and multiobjective models of analysis in order to integrate multi-criteria approach in the urban design process. This thesis aims to contribute to a prospective energy debate toward sustainable urban districts for the city of Maceió in Brazil. Firstly, a set of energy-related morphological parameters are applied to identify, classify and characterize the solar potential of local urban typologies. Then, these parameters are analyzed by means of a sensitivity analysis using a design of experiments reduced factorial method. The statistically most significant parameters are then submitted to a parametric design methodology via optimization, in which the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) is coupled with a simplified radiosity algorithm. The solar constraints are integrated as design criteria aiming at maximizing the solar energy potential on building roofs and minimizing solar gains on the their vertical facades. Daylight threshold levels as well as local building regulation parameters are taken into account as design constraints. Five representative types of urban fabric of Maceió were identified which allowed examining and adapting them from the use of energy-related indicators of the urban form. A set of most influential indicators of solar potential of urban forms was hierarchized, highlighting the role of the aspect ratio and albedo of urban surfaces. The application of optimization algorithm allowed testing more than 80,000 urban settings, pointing out a great diversity of “optimum” morphologies of urban blocks. The urban block designs obtained behaved better compared to the existing local typologies. Dealing with conflicting energy strategies by means of a constrained evolutionary optimization design process offered a great opportunity in searching for new solutions to the urban design in the neighborhood scale, helping to guide urban designers’ decisions and allowing a renewal of the Architecture of the city.

Keywords: urban morphology; solar potential; energy in cities; sensitivity analysis; constrained optimization; genetic algorithms; Tropical climate.

Rio de Janeiro,
March 2014.

SOMMAIRE

RESUME **2**

ABSTRACT **3**

LISTE DE FIGURES **5**

LISTE DE TABLEAUX **6**

1. INTRODUCTION **7**
1.1. JEUX D'HYPOTHESES 8
1.2. OBJECTIFS DU TRAVAIL 10
1.3. APPROCHE METHODOLOGIQUE 10
1.3.1. Première étape *10*
1.3.2. Deuxième étape *11*
1.3.3. Troisième étape *11*

2. ANALYSE MORPHO-SOLAIRE **13**
2.1. LE BILAN RADIATIF DES SURFACES URBAINES 14
2.2. APPLICATION POUR LA VILLE DE MACEIO 15
2.2.1. Description des typologies urbaines de Maceió *17*
2.2.2. Une analyse morpho-solaire des typo-morphologies urbaines existantes *18*

3. MIS EN ŒUVRE D'UN PLAN D'EXPERIENCE **24**
3.1. METHODE DU FACTORIEL FRACTIONNE 24
3.2. TEST D'HYPOTHESE STATISTIQUE 25
3.3. DESCRIPTION DU MODELE URBAIN POUR LE PLAN D'EXPERIENCE (DOE) 25
3.4. ANALYSE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES TYPO-MORPHOLOGIQUES 26

4. LA METHODOLOGIE D'OPTIMISATION **31**
4.1. L'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIVE ET L'ALGORITHME NSGA-II 31
4.2. LA METHODOLOGIE DE PROJET PAR OPTIMISATION 32
4.2.1. La définition des variables de projet *32*
4.2.2. Les contraintes du projet urbain *32*
4.2.3. Les fonctions objectives *33*
4.3. VERS DES SOLUTIONS OPTIMALES 33
4.3.1. Optimisation pour la classe typo-morphologique 4 : la ville verticale *33*
4.1.1. Optimisation de la classe typo-morphologique 3: la ville compacte *38*

5. UNE ANALYSE PROSPECTIVE POUR LA VILLE DE MACEIO **45**
5.1. CONTRIBUTION A L'APPROCHE INTERDISCIPLINAIRE DE L'ENERGIE URBAINE 45
5.1.1. Implantation d'un micro réseau local de production et distribution d'énergie de source solaire *45*
5.1.2. La proposition des ilots mixtes et multifonctionnels *46*
5.2. AIDE A LA DECISION URBAINE 48
5.2.1. Proposition d'inclusion des nouveaux indicateurs de la forme urbaine dans le système *48*
5.3. DISPOSITIFS POUR L'AIDE A L'INTERVENTION URBAINE 49
5.3.1. Proposition d'un code de micro-urbanisme *49*

6. CONCLUSIONS **58**

7. REFERENCES **59**

ANNEXE 1 – LISTE DE PUBLICATIONS **75**

LISTE DE FIGURES

Figure 1: phénomènes radiatifs considérés dans le modèle d'analyse employé. 11
Figure 2*:* approche méthodologique de la recherche. 12
Figure 3: Moyenne mensuelle de l'irradiation solaire (directe et diffuse) pour Maceió (METEOTEST, 2011). 16
Figure 4 : Moyenne mensuelle de température et humidité de l'air pour Maceió (METEOTEST, 2011). 16
Figure 5: Distribution spatiale des typologies urbaines de référence sur le tissu urbain de Maceió, Brésil. 17
Figure 6: processus de verticalisation et densification de la plaine maritime de Maceió. Source: image de l'auteur, 2013. 18
Figure 7: modèle urbain simplifié utilisé dans l'étude statistique. 26
Figure 8: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'irradiation solaire sur les toitures des bâtiments. 26
Figure 9: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'irradiation solaire sur la façade Ouest des bâtiments. 27
Figure 10: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'illuminance sur la façade Nord des bâtiments. 27
Figure 11: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'irradiation sur les toitures 29
Figure 12: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'irradiation sur les façades Nord. 30
Figure 13: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'illuminance sur les façades Nord. 30
Figure 14: résumé des simulations pour la classe 4. 34
Figure 15: violation des contraintes pour la classe 3. 34
Figure 16: résultats du premier processus d'optimisation. 35
Figure 17: résultats de la deuxième optimisation. 36
Figure 18 : projets du front de Pareto pour les deux scenarios d'optimisation multi objective pour la classe 4. 38
Figure 19: résumé des simulations pour la classe 3. 39
Figure 20: violation des contraintes pour les simulations de la classe 3. 39
Figure 21: résultats de l'optimisation multi objective restreinte par les paramètres du code local. Source: illustration de l'auteur. 40
Figure 22: vue de la typologie *C3(1)Max* générée par le processus d'optimisation, en démontrant la variation obtenue pour la hauteur moyenne. Source: illustration de l'auteur. 41
Figure 23: vue de la typologie *C3(1)* générée par le processus d'optimisation, en démontrant la variation obtenue pour la hauteur moyenne des bâtiments. Source: illustration de l'auteur. 41
Figure 24: résultats de l'optimisation multi objective sans les contraintes du code local. Source: illustration de l'auteur. 42
Figure 25: projets des fronts de Pareto pour les deux tours de simulations réalisés pour la classe 3. 43
Figure 26: exemple de projet de voisinage a partir des ilots solaires proposés en associant les différents potentiels d'offre et demande. 46
Figure 27: comparaison entre projets de plus fort et plus faible potentiel d'offre d'énergie solaire et de réduction des apports solaire. 46
Figure 28: proposition d'intégration du mixité urbain d'usage et occupation du sol à des différentes formes d'ilot urbain obtenues. 47
Figure 29: exemple d'intervention ponctuel dans le quartier de la plaine côtière de Maceió - plan. Source: illustration de l'auteur. 55
Figure 30: exemple d'intervention ponctuel dans le quartier de la plaine côtière de Maceió – perspective et spécifications des typologies d'ilot solaire. Source: illustration de l'auteur. 55
Figure 31: exemple d'intervention ponctuel dans le quartier de la plaine côtière de Maceió - perspective. Source: illustration de l'auteur. 55
Figure 32: maquette d'un outil d'aide à la décision à partir de la méthode MSR à l'aide d'un algorithme de régression évolutionnaire. Source: adapté de modeFRONTIER, 2013. 57

LIST DE TABLEAUX

Tableau 1: les indicateurs morphologiques principaux considérés dans l'étude. 14
Tableau 2: paramétres spatiaux et performance climatique des cinq typologies urbaines de Maceió. 18
Tableau 3: synthèse des résultats des simulations et analyses portées pour la classe 1. 19
Tableau 4: synthèse des résultats des simulations et analyses portées pour la classe 2. 20
Tableau 5: synthèse des résultats des simulations et analyses portées pour la classe 3. 21
Tableau 6: synthèse des résultats des simulations et analyses portées pour la classe 4. 22
Tableau 7: synthèse des résultats des simulations et analyses portées pour la classe 5. 23
Tableau 8 : les intervalles des valeurs possibles (max et min) des facteurs principaux qui définissent les modèles urbains considérés. 25
Tableau 9: signification des résultats des tests statistiques concernant l'irradiation solaire sur les toitures des bâtiments. 28
Tableau 10: signification des résultats des tests statistiques concernant l'irradiation solaire sur les façades des bâtiments.. 28
Tableau 11: signification des résultats des tests statistiques concernant le niveau d'illuminance sur la façade Nord des bâtiments 28
Tableau 12: les valeurs limites de projet, les contraintes urbaines, le cas de base et les paramètres de projet optimaux. 37
Tableau 13: résumé des intervalles, contraintes et valeurs trouvées pour les configurations, original et optimisées, pour la classe 3. 44
Tableau 14: tableau de synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C4(1)6. 51
Tableau 15: tableau de synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C4(1)8. 52
Tableau 16: tableau de synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C4(2)9. 53
Tableau 17: tableau de synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C3(2). 54

1. INTRODUCTION

Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes (BUREAU, 2009). Dans le contexte brésilien, le processus d'urbanisation est galopant, en ayant pour conséquences deux effets collatéraux : une croissance encore plus rapide des villes plus peuplées sans un contrôle efficace en terme de politique de développement urbain et une explosion de la demande énergétique du cadre bâti. Dans la perspective de développement durable urbain, la morphologie construite joue un rôle crucial sur la demande énergétique globale des villes (OWENS, 1986) (DROEGE, 2007) (BATTY, 2008) (BREHENY, 1992) (FREY, 1999) (WILLIAMS, BURTON e JENKS, 2000). Par morphologie urbaine, nous nous référons ici à la forme et aux dimensions particulières et typiques des bâtiments. À cette échelle, les configurations des villes affectent directement les climats intérieurs et extérieurs des espaces habités et ont une répercussion directe sur la consommation de l'énergie grise et opérationnelle des bâtiments (RATTI, RAYDAN e STEEMERS, 2003).

Les bâtiments représentent une grande partie de la demande énergétique des villes. Au Brésil, ils correspondent à une fraction de 47 % (BRASIL, 2013). Bien que des nombreux efforts aient été récemment employés afin de favoriser l'efficacité énergétique des espaces construits, cela ne s'applique qu'aux bâtiments isolés (BRASIL., 2001). Cependant, quelques études ont récemment essayé de mesurer l'effet de la densité et des morphologies urbaines sur la consommation énergétique des bâtiments (MARTINS, BONHOMME e ADOLPHE, 2013) (BOYEUR, 2009), ainsi que sur leur potentiel de production d'énergie renouvelable, telle que l'énergie solaire (COMPAGNON, 2004) (MONTAVON, 2010) (KAMPF, MONTAVON, *et al.*, 2010) (HOFIERKA e KANUK) dans les pays développés. Pourtant, une approche intégrée de la morphologie urbaine et sa participation à la réduction de la demande énergétique des bâtiments et à la maximisation de la production locale d'énergie n'a pas été réellement mise en œuvre.

Dans les climats tropicaux, l'énergie solaire offre un énorme potentiel qui peut contribuer à différentes applications. En plus de l'éclairage naturel, l'énergie solaire peut être convertie pour la production locale d'énergie thermique et électrique. Toutefois, dans ces régions ensoleillées, les apports solaires sur l'enveloppe du bâtiment peuvent induire une surchauffe en produisant des conditions de confort thermique intérieur extrêmement hostiles, et qui peuvent par conséquence, augmenter la demande énergétique pour le refroidissement des espaces. Ainsi, il devient impératif de discuter des stratégies d'adaptation multicritères pour mieux répondre aux contraintes climatiques locales. En outre, étant donné que le processus de densification urbaine produit un impact important sur le bilan radiatif en ville, en particulier sur les enveloppes de bâtiments, il est important de caractériser la magnitude de cet impact selon les principaux paramètres climatiques et morphologiques. Par exemple, les obstructions hautes peuvent partiellement ou totalement bloquer la lumière du jour incidente et l'irradiation solaire par les effets d'ombrage. Mais sous les climats tropicaux, la captation de l'énergie solaire sur les toits de bâtiment semble très prometteuse, en raison de son abondance et de sa temporalité cohérente avec la demande : la pointe de production, souvent générée par les charges de climatisation, est produite au cours de la journée.

En répondant aux effets de la morphologie urbaine sur le potentiel de rayonnement solaire et de contrôle, cette étude explore un nouveau paradigme énergétique s'appuyant sur la production décentralisée d'énergie renouvelable dans les villes. Nous nous intéressons particulièrement à l'adaptation et à l'évolution du parc immobilier existant dans des quartiers à « énergie positive », en ajustant les éléments de la morphologie urbaine, tels que la densité bâtie, la géométrie et l'implantation des bâtiments.

Néanmoins, la définition de la morphologie des bâtiments, à l'échelle urbaine locale, s'appuie sur plusieurs paramètres au projet ainsi que sur plusieurs contraintes environnementales, ceux-ci augmentant avec la complexité de la conception. Par conséquence, le nombre de configurations

possibles augmente avec le nombre de paramètres du projet. Dans une modélisation à multiples critères pour la conception des bâtiments, cette complexité induite est aussi directement liée au temps et au coût de calcul. Pour ces différentes raisons, une méthodologie axée sur l'analyse globale et la conception optimale des typologies urbaines peut devenir très pertinente. En appliquant une telle méthodologie, nous cherchons à générer des connaissances sur l'importance relative de chaque variable de projet dans les phases amont de conception architecturale et urbaine, ainsi qu'à définir des configurations urbaines potentielles qui favorisent l'efficacité énergétique.

Ce travail de thèse propose une étude prospective sur la morphologie construite des typologies urbaines existantes dans les villes en climat tropical au Brésil. Une optimisation de l'énergie solaire incidente sur la surface extérieure des bâtiments est proposée, ce qui vise à favoriser, d'un côté, la production locale d'énergie sur le toits des bâtiments et, de l'autre, à réduire les apports solaires potentiels sur les façades verticales, tout en considérant des seuils d'éclairement naturel.

1.1. Jeux d'hypothèses

A partir des éléments de la problématique annoncée précédemment, quatre hypothèses principales peuvent être formulées :

Hypothèse 1: la forme et l'implantation des bâtiments, à l'échelle urbaine locale, peuvent modifier considérablement le potentiel solaire des villes.

Récemment beaucoup d'études ont abordé le thème de l'intégration de l'efficacité énergétique dans la pratique architecturale. Néanmoins, beaucoup de ces initiatives proposent des solutions qui favorisent l'utilisation raisonnée de l'énergie dans des bâtiments pris isolément, mais sans pour autant intégrer l'impact des bâtiments les uns sur les autres à l'échelle de la ville, ni l'influence de la forme urbaine dans la performance énergétique et la qualité environnementale de ces bâtiments.

Les questions sur l'économie d'énergie dans les bâtiments, ainsi que leur capacité d'en produire localement à partir d'une source renouvelable sont aussi des éléments importants dans la planification urbaine à l'échelle du quartier et de l'ilot urbain.

Ainsi, nous considérons que les aspects qui définissent la forme et l'implantation des bâtiments à l'échelle urbaine locale ont une influence déterminante sur le potentiel solaire de production énergétique (électrique, thermique et sur le niveau d'éclairement naturel), ainsi qu'un impact important sur la demande d'énergie associée aux apports solaires en région de climat tropical.

Hypothèse 2: les systèmes simplifiés d'indicateurs morphologiques du tissu urbain permettent d'identifier des typologies construites, d'aider à l'étude de leur performance énergétique et d'indiquer des tendances pour le développement des villes

La définition judicieuse de typologies urbaines de référence, à partir d'un ensemble d'attributs spatiaux et morphologiques qui caractérisent la forme, l'implantation et la densité bâtie, permet d'inférer sur la représentativité de la forme urbaine, d'aider à l'étude qualitative et quantitative du potentiel solaire de différentes types urbains, ainsi que d'être employé en tant qu'instrument permettant de mesurer, réglementer et d'évaluer des tendances d'évolution de la morphologie construite des villes.

Hypothèse 3: une approche méthodologique pluridisciplinaire ancrée sur des méthodes de projet utilisant l'optimisation mathématique permet d'explorer et de produire des solutions innovantes correspondant des compromis raisonnables pour répondre aux problèmes multicritères de conception urbaine.

Le couplage méthodologique avec des outils issus d'autres disciplines, à l'exemple des méthodes classiques d'optimisation, peut contribuer à l'étude paramétrique des aspects qui définissent la morphologie urbaine, en favorisant la proposition de solutions d'adaptation aux typologies existantes. De plus, cette méthodologie peut aussi contribuer à la proposition d'indicateurs pour l'aide à la décision dans le cadre de l'élaboration ou l'évolution des codes d'urbanisme locaux, ainsi que pour des mesures ponctuelles d'intervention urbaine.

Comme alternative à la méthodologie classique de projet (par essai et erreur) ou aux méthodes discrètes de l'approche d'aide à la décision multicritère (par pondération et *ranking*), il est possible d'adopter des techniques d'optimisation capables de minimiser la subjectivité du processus et la dépendance à la répétition de nombreux cycles d'évaluation de la performance. Cette stratégie permet au concepteur d'évaluer les diverses configurations de modèles de façon automatique et dirigée, en l'assistant dans l'analyse et la compréhension du comportement des phénomènes physiques étudiés, comme dans le cas de ce travail, le bilan radiatif des surfaces.

Hypothèse 4: *l'optimisation de la forme urbaine à partir d'objectifs énergétiques antagonistes permet de générer des opportunités de diversifier la densité urbaine construite et, par conséquent, le projet urbain.*

La prise en compte des contraintes solaires pour le renouvellement et la conception de formes urbaines performantes, en vue de la recherche des solutions qui représentent un compromis entre la réduction de la demande et l'augmentation de l'offre d'énergie à l'échelle de l'ilot urbain, est une opportunité de proposer une plus grande diversité de densité, plus raisonnée mieux adaptée à la complexité de la morphologie construite des villes.

1.2. Objectifs du travail

Ce travail de recherche est une contribution prospective pour le renouvellement et la conception des villes à partir d'une approche énergétique, focalisée sur la forme construite à l'échelle de l'ilot urbain dans le contexte du climat tropical au Brésil. Le travail a pour but de réaliser une étude prospective sur le potentiel d'exploitation raisonnée de l'énergie solaire dans les typologies urbaines de référence d'une ville de climat tropical au Brésil, Maceió (AL).

L'étude cherche à répondre à quatre objectifs spécifiques:

- Identifier et classifier les typologies urbaines les plus représentatives du tissu urbain de la ville de Maceió-Brésil.

- Etablir le bilan radiatif pour les typologies identifiées, en vérifiant leur potentiel solaire (thermique et photovoltaïque), le potentiel d'éclairage naturel et la réduction des apports solaires sur les façades des bâtiments.

- Réaliser une étude de sensibilité des principaux facteurs typo-morphologiques urbains vis-à-vis du bilan radiatif et de l'éclairement sur les enveloppes bâties.

- Réaliser une étude prospective des typologies urbaines possibles, basées sur celles identifiées initialement pour la ville de Maceió, sur le potentiel solaire des toitures et la réduction des apports solaire sur les façades verticales.

- Développer une approche nouvelle de l'aménagement pour le renouvellement et la conception urbaine, à l'échelle locale, de l'ilot urbain, afin de favoriser le potentiel de réduction de la demande et le potentiel d'offre énergétique pour les bâtiments urbains.

1.3. Approche méthodologique

Afin de tester les hypothèses formulées et de répondre aux objectifs proposés, cette recherche s'est appuyée sur une approche interdisciplinaire où différents modèles d'analyse ont été utilisés et associés. Ces modèles ont été choisis et employés en fonction de la nature du sujet d'étude et de l'objectif spécifique recherché. La méthode du travail peut être décrite selon trois étapes principales:

1.3.1. Première étape

Dans un premier temps, un cadre théorique sur les contraintes solaires dans le contexte urbain a été constitué. Ce cadre contextuel nous permettra d'identifier les jeux d'indicateurs et de paramètres descriptifs pertinents de la morphologie urbaine et de la performance des bâtiments.

A partir d'un jeu initial d'indicateurs de performance climatique de la morphologie urbaine, une étude de la forme urbaine est effectué pour Maceió, afin d'identifier les typologies urbaines les plus représentatives de la maille urbaine de la ville. A partir d'un modèle SIG (Système d'Information Géographique), les données vectorielles urbaines de la ville sont maillées, en considérant une maille d'analyse de 500m x 500m (échelle de quelques ilots urbains) sur laquelle sont programmés et calculés l'ensemble des indicateurs morphologiques (par exemple, verticalité, prospect moyen, COS, CES, etc.). Les typologies urbaines existantes sont statistiquement classées (par Analyse en Composants Principales et Analyse de *clustering*), selon leurs caractéristiques typo-morphologiques.

Les typologies de référence sont évaluées selon leur bilan radiatif (de courte et grande longueur d'onde) et le niveau de lumière naturel présent sur les enveloppes, à l'aide d'un algorithme simplifié de radiosité (SRA) codé dans le logiciel Citysim (ROBINSON, 2011). Pour cela, ce modèle physique tient compte de tous les composantes du bilan radiatif en milieu urbain : le rayonnement direct, l'anisotropie du rayonnement diffus, les effets d'obstructions des bâtiments, les inter-réflexions de l'irradiation solaire

entre les murs des bâtiments et entre les bâtiments et le sol urbain, ainsi que les échanges radiatifs dans l'infrarouge (Figure 1).

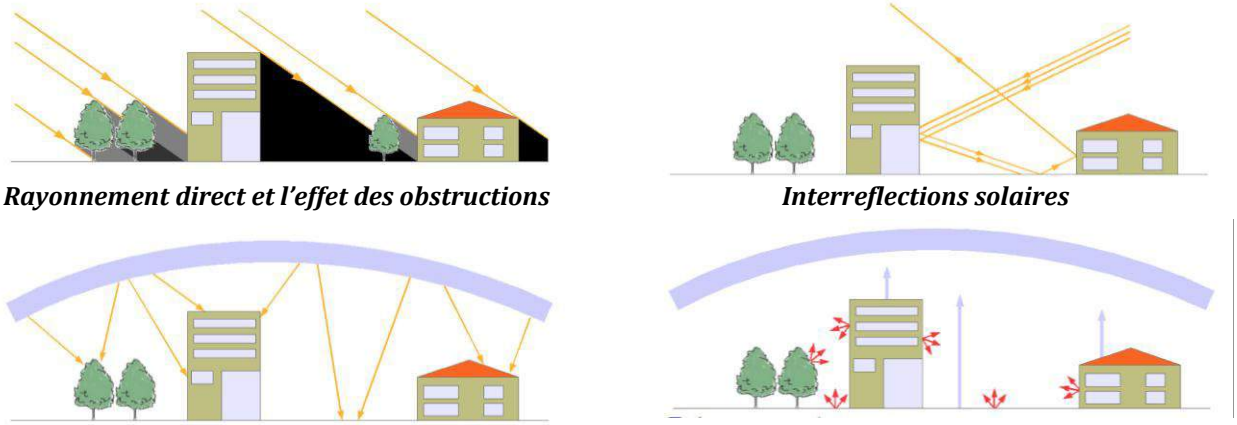


Figure 1: phénomènes radiatifs considérés dans le modèle d'analyse employé.

1.3.2. Deuxième étape

Les attributs morphologiques initialement considérés dans l'étude sont évalués au travers d'une analyse de sensibilité. Pour ce faire, nous mettons en œuvre un plan d'expérience par une méthode factorielle. Cette méthode permet d'identifier la magnitude d'effet de chaque facteur morphologique influençant différents niveaux de rayonnement solaire et d'éclairage sur les façades et toitures des bâtiments, ces variables réponses étant ensuite considérées dans un processus d'optimisation.

1.3.3. Troisième étape

Les typologies de référence sont paramétrées et soumises à un processus d' optimisation. Ce processus est automatisé en couplant l'algorithme SRA avec un algorithme évolutionnaire d'optimisation mathématique (NSGA-II - *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) à l'aide d'une plateforme multidisciplinaire d'optimisation, modeFRONTIER®. Dans cette approche multicritère, nous cherchons à aboutir simultanément au maximum de potentiel énergétique solaire pour un ensemble de bâtiments, à un minimum de demande d'énergie due aux charges thermiques issus des apports solaires, en prenant en compte l'échelle de variation de quelques variables contraintes par le réglement d'urbanisme local.

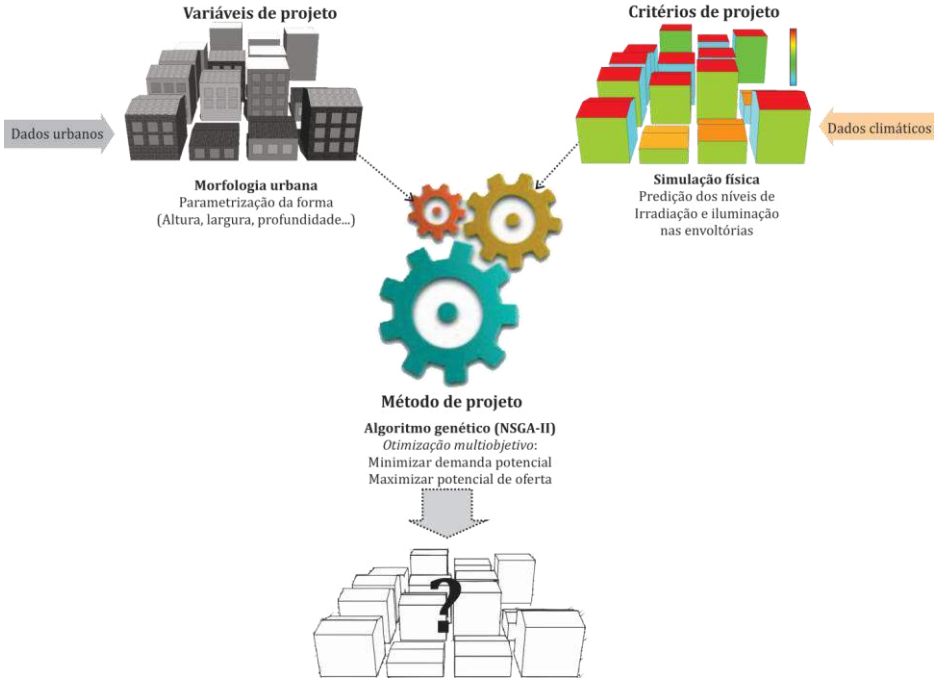


Figure 2*:* Approche méthodologique de la recherche.

2. ANALYSE MORPHO-SOLAIRE

Initialement, les données vectorielles sont traitées par le SIG, ArcMAP/ArcGIS®, ou un jeu d'attributs morpho-énergétiques sont calculés. Pour effectuer la caractérisation des structures urbaines prédominantes dans un tissu urbain donné, trois résolutions de maille de tailles différentes ont été initialement considérées (1000 m x 1000 m, 500 x 500 m et 250 x 250 m). Comme le choix d'un maillage induit un découpage des objets urbains (rues, bâtiments, etc.), cette définition peut être critique, selon les caractéristiques du tissu urbain. Les cellules de la maille ne doivent pas être trop petites, pour ne pas de représenter juste un fragment spécifique et réduit qui ne soit pas assez représentatif du tissu urbain, et pas trop grande non plus, en comprenant trop de structures différentes. Pour définir la résolution de maille la plus appropriée pour la ville étudiée, quelques tests statistiques ont été mis en œuvre pour analyser la prédominance des éléments à l'intérieur de ces trois résolutions spatiales. Les résultats de l'écart-type et la moyenne pour certains paramètres morphologiques sélectionnés, nous ont permis de choisir les mailles de 500m, qui dispose de 694 cellules d'évaluation.

Afin de définir quels seraient les attributs morphologiques clés pour l'étude, nous avons adopté la méthodologie d'Adolphe (2001). L'auteur a développé un système simplifié de modélisation spatial de la morphologie urbaine basée sur des critères climatiques. Ce travail a abouti à un ensemble de paramètres morpho-énergétiques pour l'analyse du tissu urbain. Un système d'indicateurs morphologiques est essentiel, car il permet aux aménageurs urbains d'avoir un contrôle plus important sur la performance de la forme urbaine et sur l'intensité du développement urbain. Les indicateurs principaux employés dans cette étude se trouvent indiqués dans le Tableau 1. Pour plus de détails sur la méthodologie et les hypothèses utilisées dans la définition de ce système d'indicateurs, voir Adolphe (2001) et Adolphe *et al*. (2002).

Pour établir une cartographie des types urbains, les résultats obtenus par le calcul des paramètres morphologiques pour chaque cellule de la maille considérée sont traités et analysés par une Analyse de Composantes Principales (ACP). L'ACP est une analyse statistique qui permet d'évaluer les interrelations entre un grand nombre de variables, en vue de compiler l'information apportée dans un nouvel ensemble plus restreint de variables. Cette technique statistique permet donc de minimiser les redondances qui peuvent exister, en permettant une plus grande variabilité des données, en quelques composantes, ce qui peut rendre plus facile la cartographie des informations (ALENCAR, 2009). Dans un deuxième temps, une analyse de groupement (*Clustering*) est mise en œuvre. Cette méthode statistique cherche à identifier et grouper les objets par similarité, par rapport à un ensemble d'attributs et en permettant l'identification d'un type de comportement. L'algorithme *Clustering k*-means (point *k* moyen) choisit une partition initial des données et modifie les membres des classes afin d'obtenir une nouvelle partition qui représente le mieux la structure des données initiales. Le point *k* moyen (*la moyenne de chaque attribut*) est attribué à la classe dont le centre est le plus proche (DIDAY, LEMAIRE, *et al*., 1982).

Tableau 1: les indicateurs morphologiques principaux considérés dans l'étude.

Indicateurs morphologiques		Définition
Rugosité absolu (m)	Rh	Somme des hauteurs de bâtiments pondérées par leur surface et ramenées à la surface totale du tissu urbain considéré (bâti et non bâti).
Porosité (/)	Po	Rapport des volumes utiles ouverts à l'ensemble des volumes du tissue urbain considéré.
Compacité (/)	Cm	Rapport entre la surface d'enveloppe extérieure non-contiguë du bâtiment, et son volume élevé à la puissance 2/3.
Contigüité (/)	Ct	Rapport de la surface verticale d'enveloppe adjacente à d'autres bâtiments sur la surface d'enveloppe donnant sur l'extérieur.
Coefficient d'Occupation du Sol (/)	COS	Rapport de la surface construite à la surface totale dans une aire urbain.
Coefficient d'Emprise au Sol (/)	CES	Rapport de la surface construite au sol à la surface totale dans une aire urbaine
Prospect moyen (/)	PM	Rapport de la hauteur moyenne des bâtiments d'une rue par sa largeur.
Verticalité (/)	V	Hauteur moyenne des bâtiments d'une scène urbaine par leur surface d'emprise.
Nombre d'étages (/)	NE	Hauteur totale des bâtiments divisée par la hauteur du plafond.
Distance entre les bâtiments (m)	DB	Distance minimale entre bâtiments.
Epaisseur des bâtiments (m)	EB	Moyenne des épaisseurs des bâtiments dans une aire urbaine
Largeur des bâtiments (m)	LB	Moyenne des largeurs des bâtiments dans une aire urbaine
Hauteur des bâtiments (m)	HB	Moyenne des hauteurs des bâtiments dans une aire urbaine
Largeur de rue (m)	LR	Moyenne de la distante qui sépare les parcelles dans une aire urbaine

2.1. Le bilan radiatif des surfaces urbaines

Afin de mesurer la disponibilité du rayonnement et de l'éclairement sur les façades, à l'échelle urbaine, nous avons choisi d'utiliser l'Algorithme Simplifié de Radiosité (SRA) (ROBINSON, 2011) codé dans le logiciel Citysim. Le SRA consiste en un couplage de modèles assez bien connus qui permettent de prévoir le flux d'énergie radiative arrivant sur les surfaces des bâtiments, en tenant en compte des effets des obstructions urbaines sur la réduction du rayonnement directe, l'anisotropie du diffus et la contribution du réfléchi. De même, le modèle estime la lumière du jour, compte tenu des effets des obstructions qui réduisent la vue de la voute céleste, ainsi que la contribution de l'éclairement réfléchi. Le SRA est actuellement, un des quelques algorithmes permettant d'une part, une robustesse sur la modélisation de la complexité des échanges radiatifs à l'échelle urbaine du quartier et, d'autre part, la simulation couplée à des algorithmes d'optimisation. Toutefois, pour arriver à ce compromis entre robustesse et calcul rapide, le SRA s'appuie sur deux simplifications clés : toutes les surfaces urbaines sont considérées comme des surfaces lambertiennes (surfaces qui réfléchissent le rayonnement de manière uniforme dans toutes les directions) et la moyenne de la radiance d'une zone occluse d'une partie du ciel est égale à celle calculée au centre de la surface d'occlusion la plus importante dans cette partie. La précision de l'algorithme a été testée par comparaison des résultats, avec des scénarios identiques, avec un modèle de référence qui a été largement validé, le logiciel RADIANCE, en parvenant à un bon accord (ROBINSON, 2011). Une description plus détaillée de l'algorithme SRA peut être trouvée sur Robinson (2011).

Les variables d'entrée pour ce modèle numérique de calcul se composent d'un ensemble de paramètres climatiques, géométriques et des données thermo-physiques des bâtiments. Pour les paramètres climatiques, une année climatique complète a été générée à l'aide du banc de données Meteonorm (METEOTEST, 2011). Pour la géométrie, les typologies sont représentées en 3D par des coordonnées géo-référencées. Le SRA permet également la définition des obstructions lointaines dues à la topographie du site urbain. Le ratio de surface vitrée sur les façades est introduit en attribuant une fraction par face. Les spécifications thermo-physiques des bâtiments (ex. l'albédo, la transmittance thermique des surfaces vitrées, le facteur solaire, etc.) sont attribuées par enquête sur le terrain. Les variables de sortie considérées sont : l'irradiation solaire annuelle [kWh.(m^{-2}.year)] (directe, diffus et la contribution réfléchie) et l'illuminance annuelle [lux] sur les façades des bâtiments.

Afin d'évaluer le potentiel solaire sur les toitures et la disponibilité de la lumière du jour sur les façades bâties, nous considérons certains seuils annuels, conformément aux procédures méthodologiques présentés dans (COMPAGNON, 2004), basées sur les hypothèses suivantes (COMPAGNON, 2004) (MONTAVON, 2010) (SCARAZZATO, 1995):

- les seuils requis pour la conversion de l'énergie solaire thermique et photovoltaïque sur les toitures, en considérant des conditions normales d'opération, correspondent à 600 [kWh/m².an] et 1000 [kWh/m². an], respectivement (COMPAGNON, 2004) (MONTAVON, 2010).
- L'illuminance moyenne sur les ouvertures verticales peut varier selon l'orientation de la façade. Si nous considérons 150 lux comme seuil intérieur au niveau du plan de travail au fond d'une pièce du bâtiment et nous le divisons par un coefficient de pondération lié à l'orientation de chaque façade (1,6 pour les façades au sud ; 1,3 pour les façades au nord ; 1,4 pour les façades à l'Ouest ; et 1,5 pour les façades à l'est), nous obtenons un éclairage par façade estimée de : 9375 lux pour la façade sud ; 11538 lux pour la façade nord ; 10741 lux pour la façade ouest ; et 10000 lux pour façade est (SCARAZZATO, 1995). Pour Maceió, la ville d'étude de cas, la journée utilisée sera le 11 août et les coefficients indiqués se réfèrent aux valeurs de seuil pour ciel couvert calculé pour cette ville (SCARAZZATO, 1995).

2.2. Application pour la ville de Maceió

Pour l'application de la méthode proposée, une étude de cas à Maceió a été mise en œuvre. La ville de Maceió se trouve à 9.45° de latitude sud et 35.42 ° de longitude ouest. Son centre urbain a une superficie de 510,655 km² pour une population de 936,608 habitants urbains (IBGE, 2010). En ce qui concerne son environnement urbain, Maceió comme plusieurs autres villes brésiliennes, a connu au cours de ces dernières décennies, une urbanisation très rapide et intense, mais sans qu'ait eu lieu un contrôle efficace, particulièrement en ce qui concerne les questions environnementales et d'infrastructures. Ce type de processus d'urbanisation a graduellement modifié le climat urbain local, ce qui affecte les conditions de confort thermique (à l'extérieur et à l'intérieur), ainsi que de la demande énergétique des bâtiments. À Maceió, le premier règlement d'urbanisme, créé en 1989 et revu en 2007, prend en compte un certain nombre de paramètres de forme des bâtiment (le coefficient d'occupation du sol, le coefficient d'emprise et les distance entre les bâtiments), mais est surtout focalisé sur l'occupation du sol et basé sur des questions foncières, patrimoniales ou hygiénistes.

En ce que concernent les caractéristiques climatiques de Maceió, l'énergie radiative présente de variations annuelles et saisonnières très faibles (Figure 3), démontrant son important potentiel pour engager de nouvelles stratégies énergétiques. Néanmoins, nous devons également garder à l'esprit, que dans les régions tropicales, nous avons aussi souvent des températures et des niveaux d'humidité de l'air très élevés, toute l'année (Figure 4). Du coup, suggérer une maximisation du niveau de rayonnement incident sur les bâtiments peut générer des surchauffes importantes et non souhaitables, dégradant les conditions de confort qui pourraient aussi amener à une augmentation de la consommation d'énergie. Ainsi, la révision des paramètres du règlement d'urbanisme local, notamment en ce qui concerne sa morphologie, basée sur des études climatiques plus précises, pourrait jouer un rôle décisif face à ces problématiques conflictuelles.

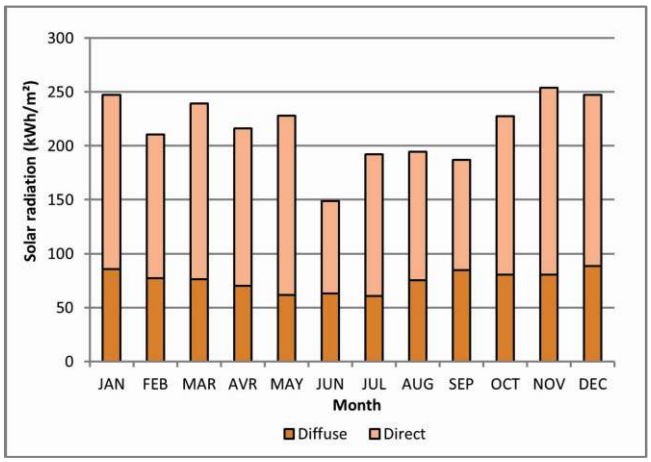


Figure 3: Moyenne mensuelle de l'irradiation solaire (directe et diffuse) pour Maceió (METEOTEST, 2011).

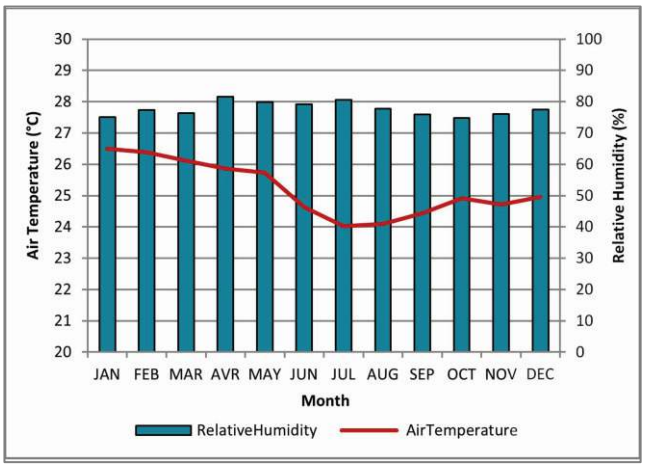


Figure 4 : Moyenne mensuelle de température et humidité de l'air pour Maceió (METEOTEST, 2011).

2.2.1. Description des typologies urbaines de Maceió

L'analyse statistique de *Clustering* a convergé sur cinq catégories de données morphologiques qui ont été donc classées comme cinq typologies urbaines de référence : *individuel dispersé* ; *vertical bas* ; *colonial compact* ; *vertical moderne de grande hauteur* et *horizontal dense*. La carte ci-dessous représente la cartographie de la distribution de ces classes de référence pour toute la ville de Maceió (Figure 5). Il est à noter que les classes typologiques définies dans cette étude sont purement morphologiques et indépendantes de leurs usages.

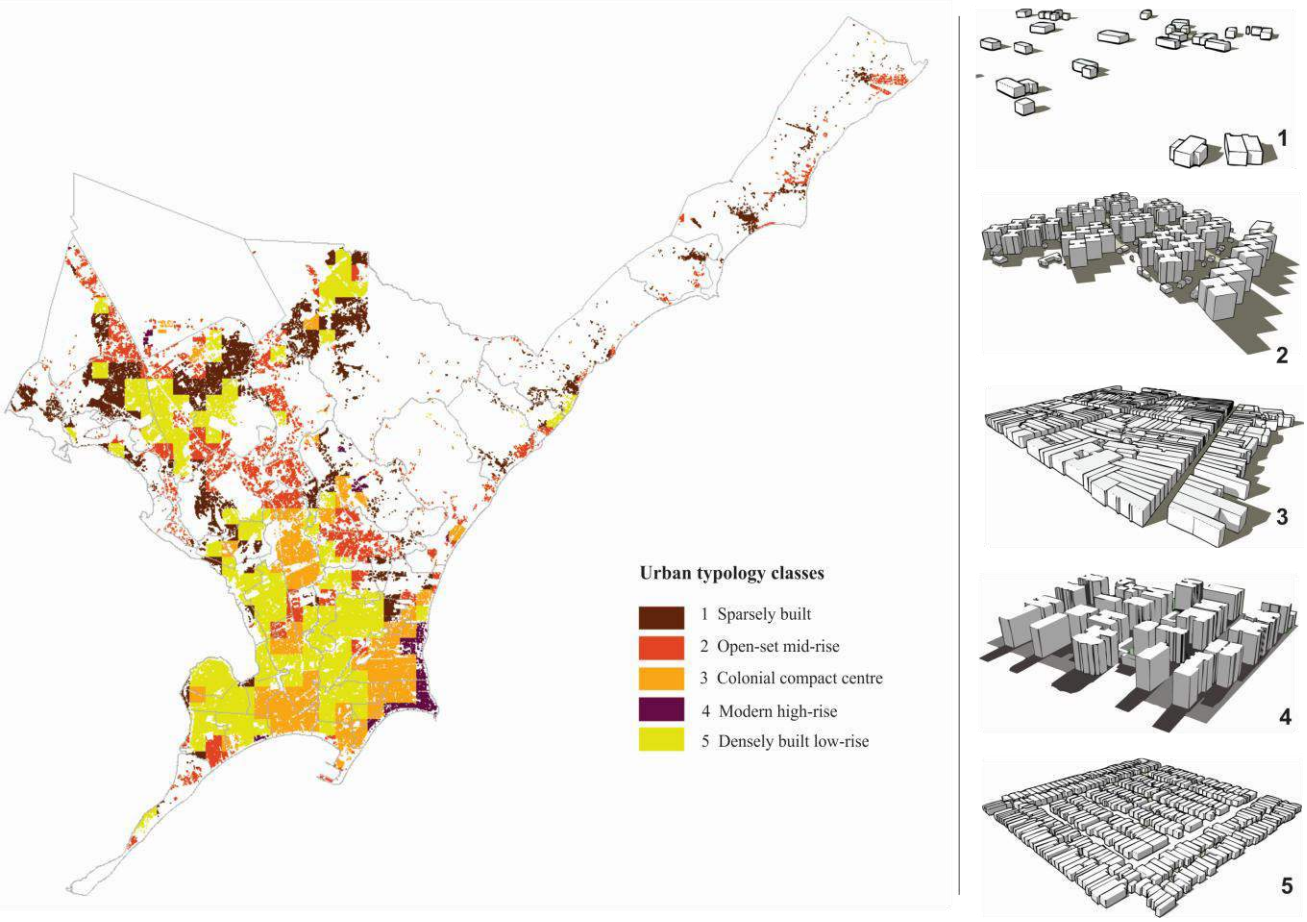


Figure 5: Distribution spatial des typologies urbaines de référence sur le tissu urbain de Maceió, Brésil.

La classe 4 (vertical moderne) et la classe 3 (compact/colonial), qui peuvent être rencontrées toutes les deux sur la plaine maritime de Maceió (Figure 6), ont été choisies comme base pour les évaluations suivantes, étant donné la croissance rapide de classe 4 en remplacement de l'habitat individuel (parfois d'origine colonial) due à l'importante offre touristique et la spéculation foncière. En outre, la densification verticale rapide de ce site urbain a déjà imposé des nombreuses et sévères contraintes structurelles et environnementales, telles que des limitations d'approvisionnement d'eau et d'énergie. Les problèmes concernant l'approvisionnement en énergie sont liés à la saturation du réseau en raison de l'augmentation régulière de la consommation. Dans l'année 2000, une nouvelle sous-station d'alimentation électrique a été construite dans le quartier pour essayer de mieux répondre à la demande locale, mais elle a déjà démarré à sa capacité maximale (CRUZ, 2001).



Figure 6: processus de verticalisation et densification de la plaine maritime de Maceió. Source: image de l'auteur, 2013.

En ce qui concerne ses caractéristiques morphologiques principales, malgré la forte densité bâtie totale (COS de 4) cette typologie est contrastée par sa grande porosité, renforcée par l'actuel réglement d'urbanisme local qui impose des reculs progressifs de bâtiments à partir des limites de leur parcelle, ainsi qu'il limite la hauteur bâtie. Ainsi, la plupart des bâtiments présentent une forte compacité, une très faible contiguïté horizontale (Ct de 0,04), mais une contiguïté verticale très élevée (unités d'habitation à plusieurs étages). Ces caractéristiques jouent un rôle décisif sur la définition de la performance climatique et le potentiel de production d'énergie solaire des bâtiments, surtout parce qu'ils impactent sur la surface total exposée à l'environnement extérieur.

2.2.2. Une analyse morpho-solaire des typo-morphologies urbaines existantes

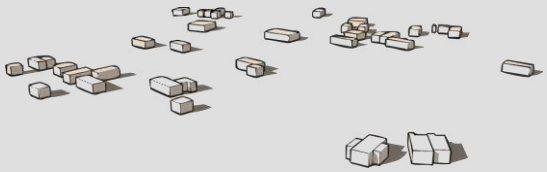
Un exemple représentatif de chaque typologie de Maceió est examiné sur la performance de son enveloppe (les surfaces de toiture et façades pondérées) en fonction de la disponibilité de l'irradiation solaire et l'éclairage naturel (Tableau 2).

Pour notre cas de base (classe 4), qui se caractérise par une verticalité importante (bâtiments jusqu'à 16 étages) et une forte densité bâtie, nous constatons un potentiel d'énergie solaire réduit, comparé aux autres typologies étudiées. En outre, les tours verticales impliquent la réduction de la surface de la toiture exposée par étage ou par unité d'habitation (due à sa forte contiguïté verticale). Sur les villes à basse latitude, les toitures peuvent correspondre à 2/3 du rayonnement solaire global reçu sur l'enveloppe des bâtiments (LIPPSMEIR, 1969). Ces caractéristiques morphologiques entraînent, d'une part une performance questionnable en termes d'accès à la lumière du jour dans les bâtiments et d'autre part, une réduction des apports de chaleur solaire. La charge thermique potentiellement produite par cette contribution solaire répresente en moyenne 85% moins que dans les unités d'habitation isolées individuelles (classe 1 – individuel dispersé) en raison de la moindre exposition des surfaces horizontales moins exposées.

Tableau 2: paramétres spatiaux et performance climatique des cinq typologies urbaines de Maceió.

Indicateurs	 **Classe 1**	 **Classe 2**	 **Classe 3**	 **Classe 4**	 **Classe 5**
Surface d'emprise du bâtiment (m^2) ou surface de toiture	1416.5	9492.0	31552.0	27190.4	22792.4
Surface totale bâtie (m^2)	1581.6	25615.7	93233.0	237367.8	34188.5
Nombre d'étages (/)	1.2	4.0	3.0	10.0	1.0
Surface d'enveloppe (m^2)	3050.4	39564.9	131376.0	15330.20	60617.9
CES (/)	0.8	0.2	0.75	0.49	0.56
COS (/)	0.1	0.9	2.4	4.2	0.75
Compacité (/)	4.8	5.1	3.9	5.0	3.6
Albédo (/)	0.12	0.18	0.15	0.20	0.15
Niveau d'illuminance des façades (Lux)	13060.4	8723.2	7706.9	1934.8	10782.1
Irradiation totale sur toitures (kWh/m^2)	2056.8	1970.2	1947.0	1930.2	2025.1
Irradiation totale sur façades (kWh/m^2)	364.3	337.3	287.9	312.8	307.2

Tableau 3: résumé du résultat des simulations et analyses portées pour la classe 1.



Petit pavillon dispersé



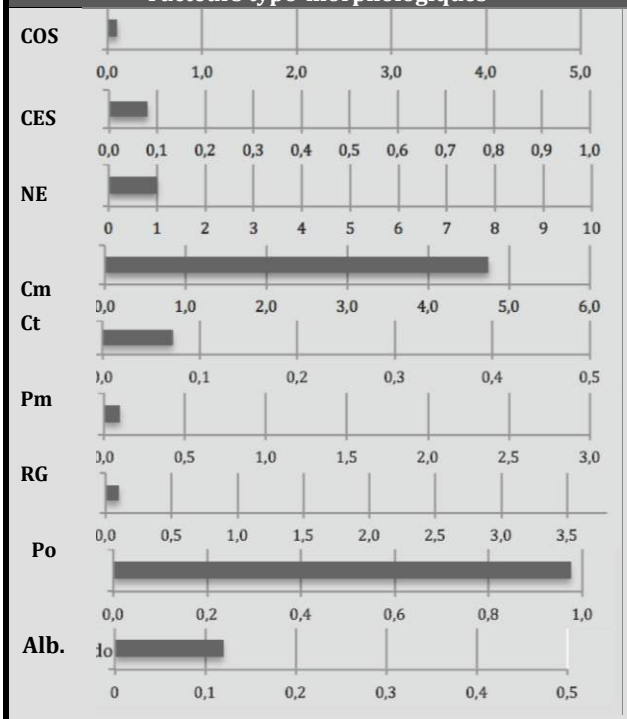
Potentiel **PV** ↑

Potentiel **solaire thermique**

potentiel **Eclairement** ↑

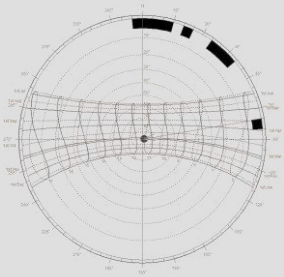
CLASSE 1

Facteurs typo-morphologiques

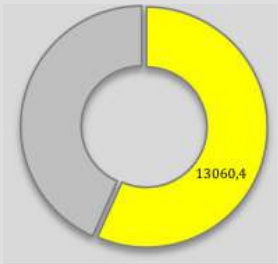


Potentiel radiatif enveloppe

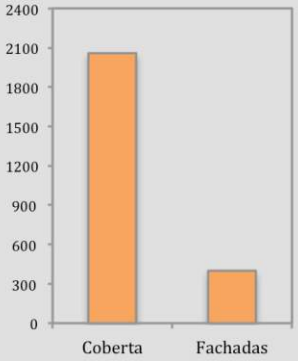
Vue du ciel



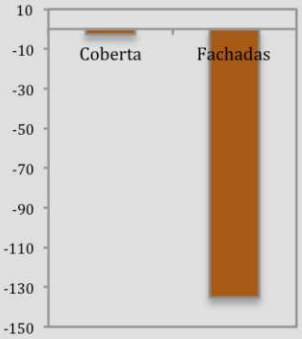
Lumière façades (lux)



Solaire [kWh/(m².an)]

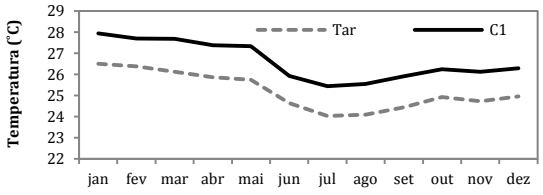


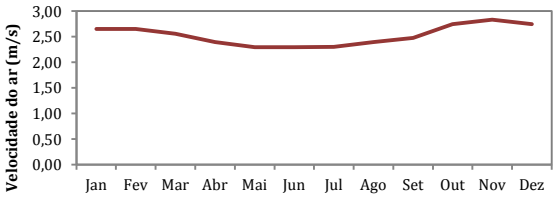
Infrarouge [kWh/(m².an)]

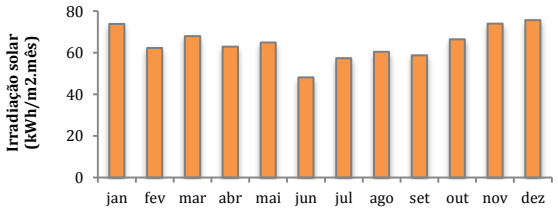


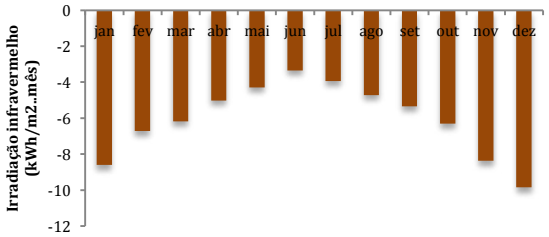
Facteurs climatiques

Temperatura de sufarce

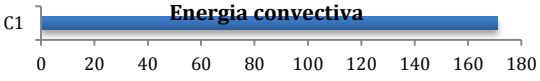






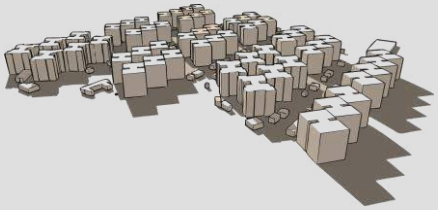


Echanges de chaleur entre l'enveloppe et le milleu extérieur



COS: Coefficient d'Occupation du Sol
CES: Coefficient d'Emprise au Sol
NE: Nombre d'Etage
Cm: Compacité
Ct: Contiguité
Pm: Prospect moyen
Rg: Rugosité
Po: Porosité

Tableau 4: résumé du résultat des simulations et analyses portées pour la classe 2.



Vertical bas



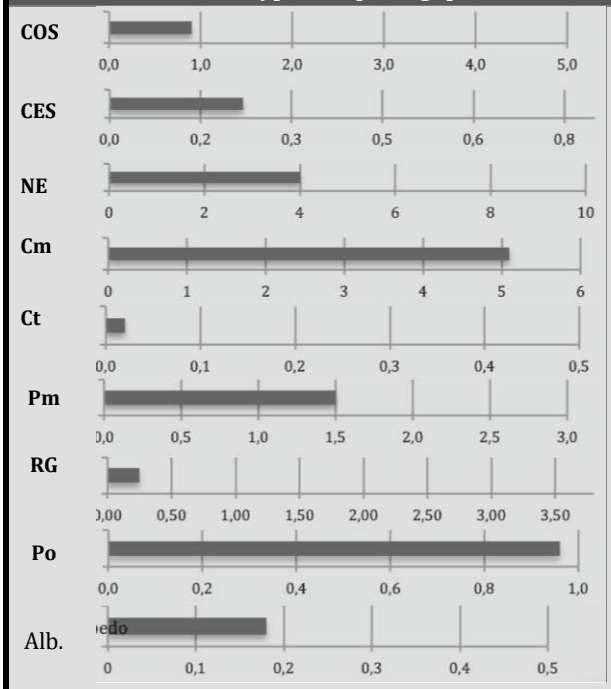
Potentiel **PV** ↑

Potentiel **solaire thermique** ↑

Potentiel **Eclairement** ↑

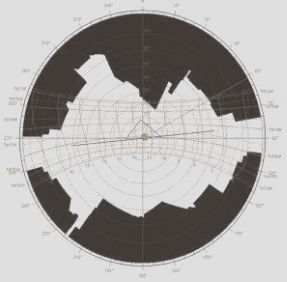
CLASSE 2

Facteurs Typo-morphologiques

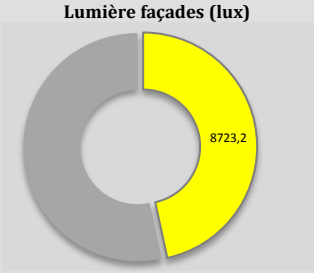


Potentiel radiatifs enveloppe

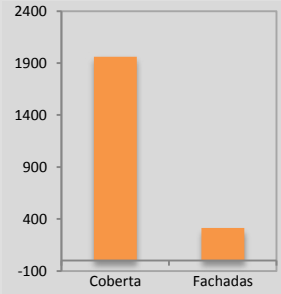
Vue du ciel



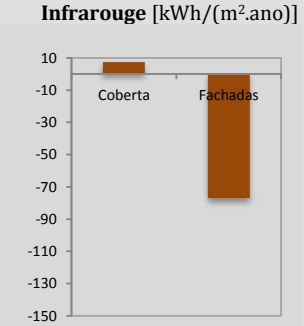
Lumière façades (lux)



Solaire [kWh/(m².ano)]

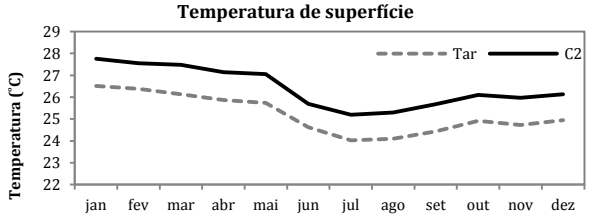


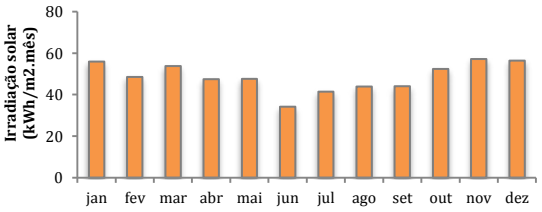
Infrarouge [kWh/(m².ano)]

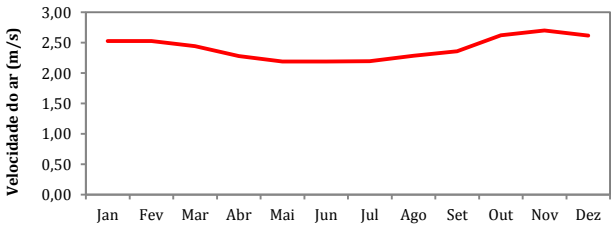


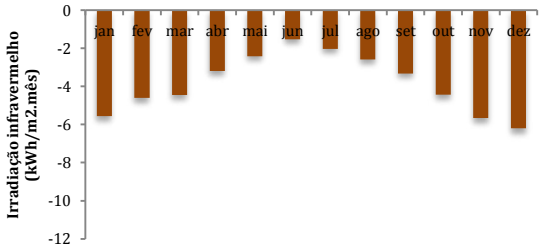
Facteurs climatiques

Temperatura de superfície

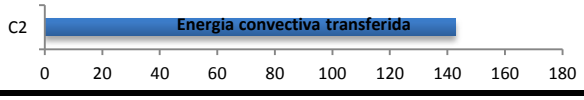








Echanges de chaleur entre l'enveloppe et le milieu extérieur



COS: Coefficient d'Occupation du Sol
CES: Coefficient d'Emprise au Sol
NE: Nombre d'Etage
Cm: Compacité
Ct: Contiguité
Pm: Prospect moyen
Rg: Rugosité
Po: Porosité

Tableau 5: résumé du résultat des simulations et analyses portées pour la classe 3.

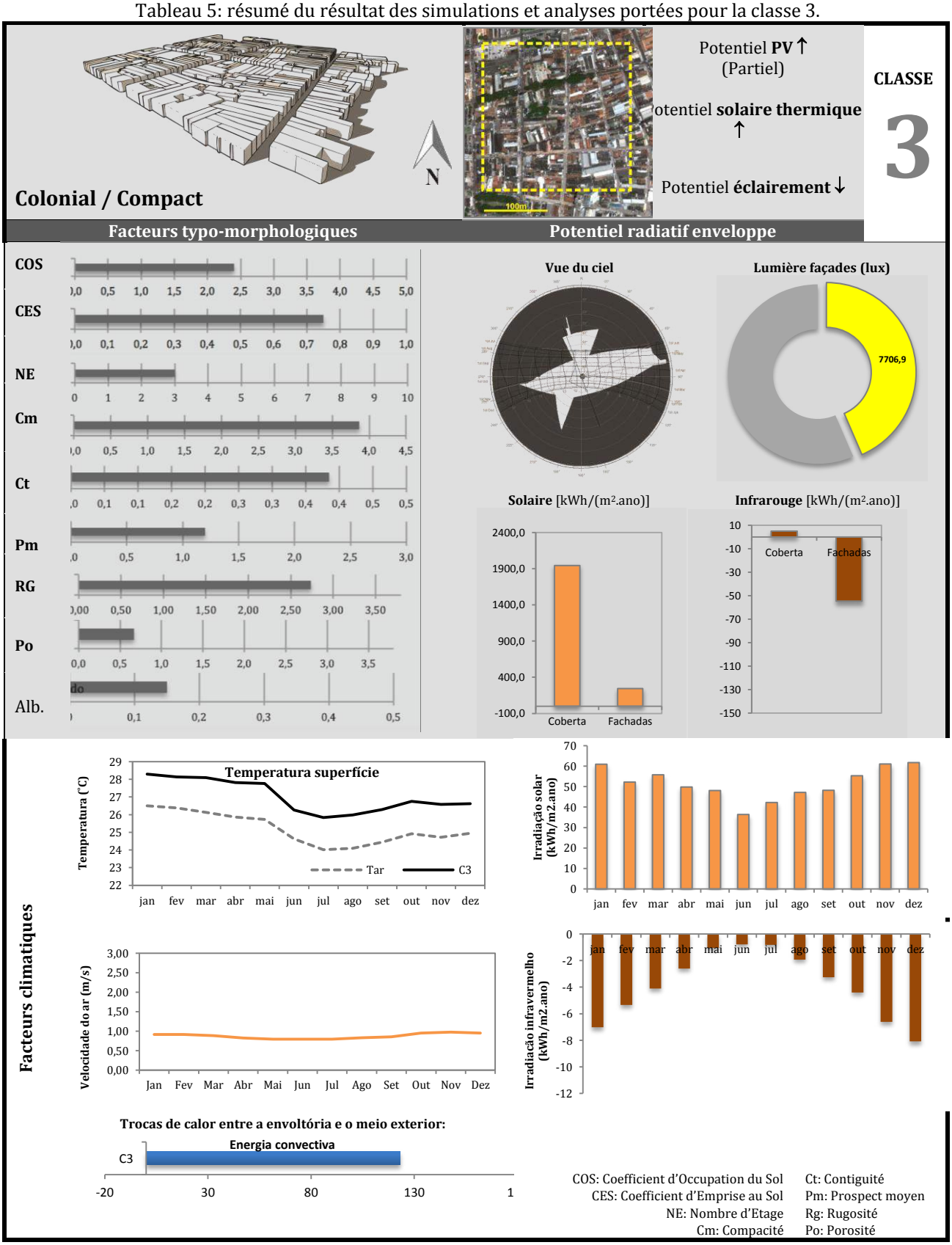


Tableau 6: résumé du résultat des simulations et analyses portées pour la classe 4.





Potentiel **PV** ↑ (Partiel)

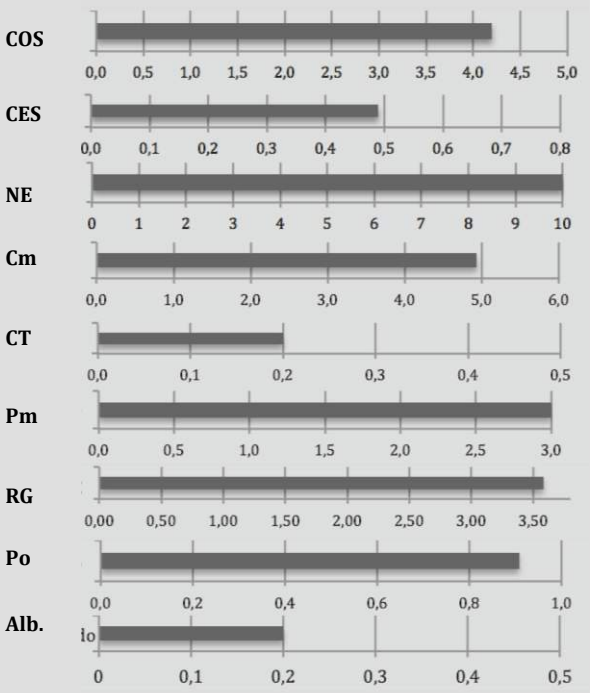
Potentiel **solaire thermique** ↑

Potentiel **éclairement** ↓

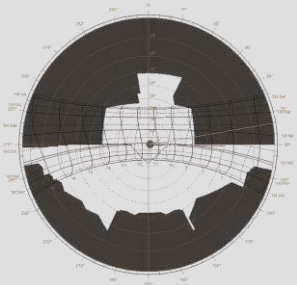
CLASSE 4

Vertical moderne

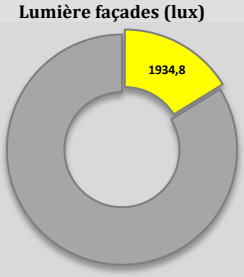
Facteurs typo-morphologiques | **Potentiel radiatif enveloppe**



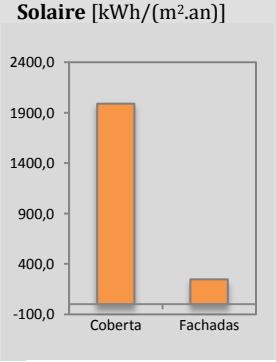
Vue du ciel



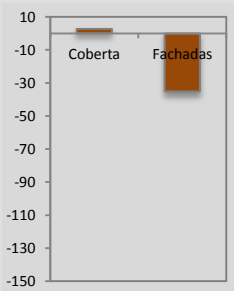
Lumière façades (lux)



Solaire [kWh/(m².an)]

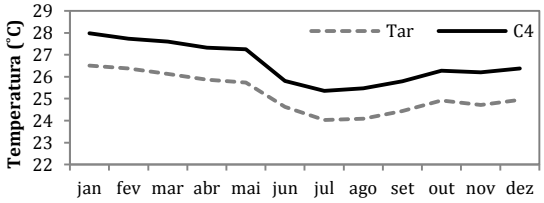


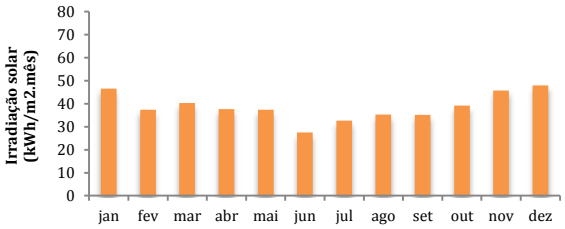
Infrarouge [kWh/(m².ano)]

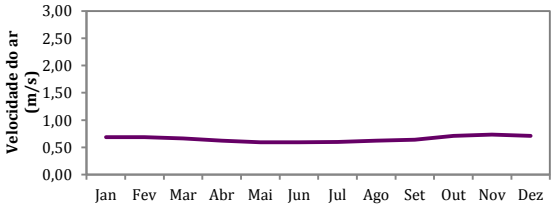


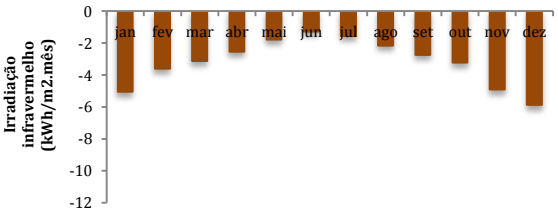
Facteurs climatiques

Temperatura de surface

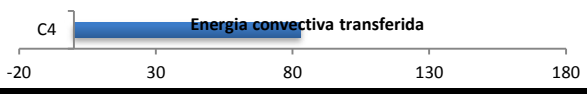






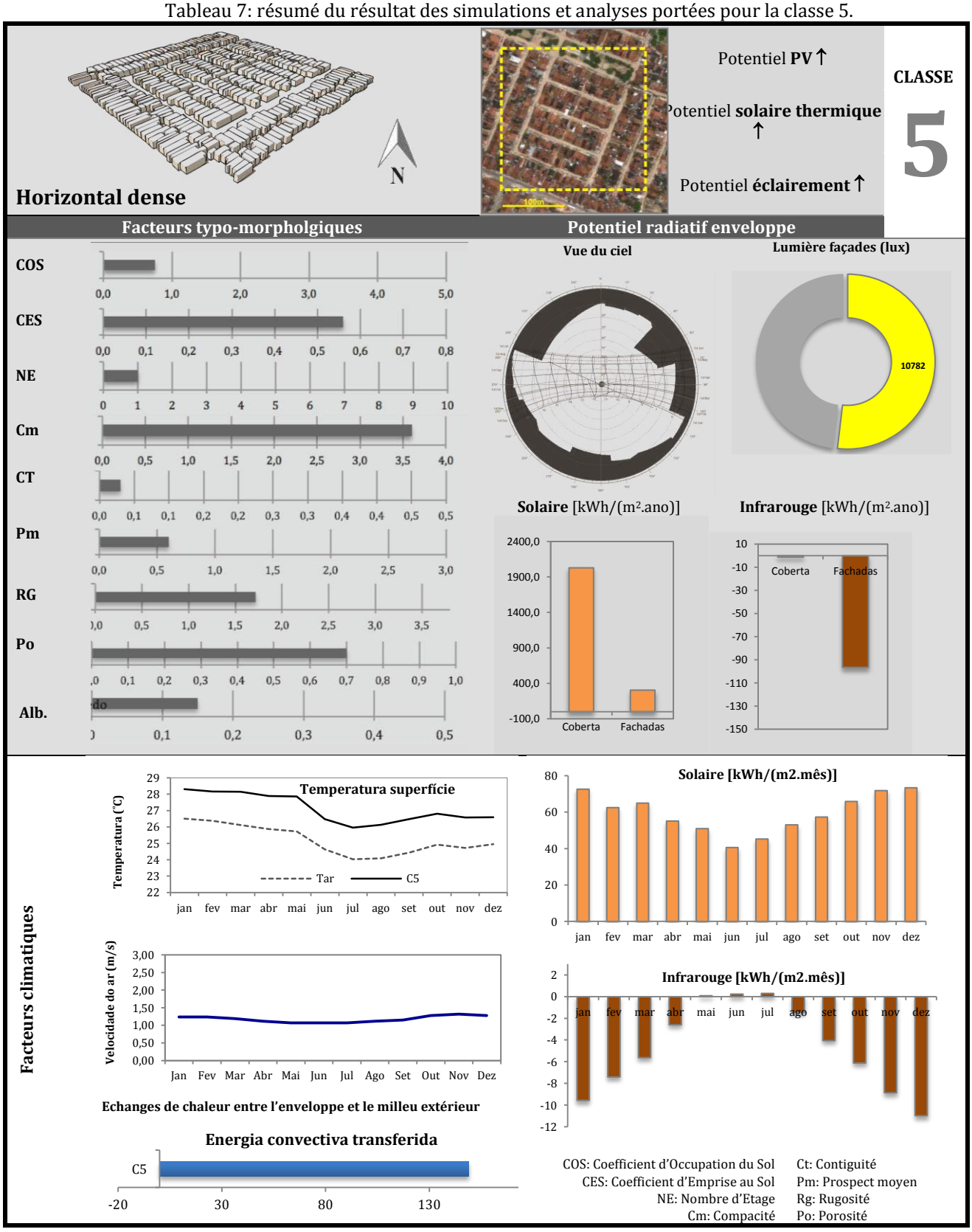


Trocas de calor entre a envoltória e o meio exterior:



COS: Coefficient d'Occupation du Sol
CES: Coefficient d'Emprise au Sol
NE: Nombre d'Etage
Cm: Compacité
Ct: Contiguité
Pm: Prospect moyen
Rg: Rugosité
Po: Porosité

Tableau 7: résumé du résultat des simulations et analyses portées pour la classe 5.



3. MIS EN ŒUVRE D'UN PLAN D'EXPERIENCE

La morphologie urbaine possède un grand nombre de paramètres qui jouent un rôle important sur le climat urbain et, par conséquent, sur la demande et l'offre potentielle d'énergie dans les villes. Afin de mieux comprendre l'impact de ces facteurs, les études paramétriques sont souvent mises en œuvre. Cependant, ces études impliquent souvent un grand nombre des cas à modéliser. Effectuer des simulations dynamiques sur ordinateur sur plusieurs cas parfois aléatoires peut être une activité extrêmement laborieuse et un temps de calcul associé très important.

Une alternative efficace pour résoudre ce problème est la mis en œuvre d'un plan d'expérience (issu de l'anglais *Design of Experiments* – DOE) sur une analyse paramétrique de sensibilité (MONTGOMERY, 2001). L'utilisation originale des DOE fait référence aux méthodes utilisées pour obtenir des informations qualitatives les plus pertinentes d'une base de données d'expériences en faisant le plus petit nombre possible d'expériences. Selon ces méthodes, les expériences sont prévues de manière à ce que les observations redondantes puissent être éliminées sans aucune perte de représentativité, en réduisant le nombre d'essais afin de fournir des informations sur les interactions les plus importantes entre les variables (MONTGOMERY, 2001) (KLEIJNEN, 2005).

Le DOE fait généralement partie du processus d'optimisation et il doit toujours être appliqué avant la phase d'optimisation elle-même car il permet de procéder à une première exploration de l'espace de projet tout en établissant la relation entre les réponses mesurées et les facteurs impliqués dans le processus (variables de projet) étudiés. Cette méthodologie permet de créer une population initiale de projets candidats potentiels et également de réduire l'éventail des variations ou même de réduire le nombre de variables.

Pour bien mener la méthodologie DOE, nous commençons par identifier les variables d'entrée et les réponses d'intérêt, dont la sensibilité sera évaluée. Pour chaque variable d'entrée, plusieurs niveaux sont définis. Ces niveaux représentent la plage de l'effet désiré sur chaque variable. Les scénarios d'expérience sont ensuite définis sur une méthode spécifique de projet expérimental, qui définit chaque paramètre d'entrée pour chaque série de tests expérimentaux. Les réponses sont évaluées, en observant les différences possibles entre les groupes des changements d'entrée. Ces différences sont alors attribuées aux variables d'entrée individuellement (effet principal) ou en combinaison avec une autre variable d'entrée (effet d'interaction). Enfin, étant donné que les expériences sont constituées sur la base de la théorie statistique, une confiance dans les résultats obtenus est définie par un test statistique.

3.1. Méthode du Factoriel Fractionné

Afin de déterminer si un changement dans les valeurs variables de projet produit des modifications sur les résultats de l'irradiation et les niveaux de lumière du jour sur les surfaces des bâtiments, l'approche la plus intuitive serait d'essayer toutes les combinaisons possibles. Mais le nombre nécessaire d'expériences augmenterait géométriquement avec le nombre de variables. Au lieu de cela, une méthode factorielle fractionnée définit des ensembles d'expériences constitués à partir d'une fraction judicieusement choisie des expériences définies par une méthode factorielle complet. Cette fraction est choisie de manière à exploiter le principe de la rareté des effets (*sparsity of effects*) capable de fournir des informations représentatives sur les effets les plus importants liés au problème, tout en utilisant une fraction réduite de l'information par un plan factoriel complet en termes d'exécutions expérimentales et des ressources informatiques.

Un projet à deux niveaux est généralement suffisant pour évaluer l'effet de facteurs dans de nombreux problèmes scientifiques (MONTGOMERY, 2001). Les « expérimentateurs » qui évaluent les changements de processus sont souvent intéressés par les directions de l'effet des facteurs qui conduisent à l'amélioration du processus. Une demi-fraction des 2^k projets est généralement adoptée car elle n'implique que l'exécution de la moitié des traitements d'un factoriel complet. Pour cette étude, comprenant 14 variables de projet urbain (voir Tableau 8), un plan factoriel complet définirait 16384 expériences (2^{14}). Une demi-fraction de cette factorielle de projet demanderait donc 8192 séries de tests.

3.2. Test d'hypothèse statistique

A fin vérifier le seuil de signification des variables de projet et leur interaction sur les variables de réponse, un test statistique est appliqué à l'aide de données tirées à partir d'un essai expérimental contrôlé. Dans cette étude, les données sont obtenues par des simulations dynamiques sur la réponse en terme d'irradiation sur les modèles géométriques des façades des bâtiments urbains. Chaque expérience définie par la méthode factorielle fractionnée représente une configuration urbaine spécifique. Un résultat est statistiquement significatif s'il est improbable qu'il ait eu lieu par hasard, selon une seuil prédéterminé appelé le niveau de signification. Les tests sur les hypothèses statistiques et sur l'estimation de l'intervalle de confiance de paramètres sont les méthodes fondamentales utilisées pour l'évaluation de l'expérience comparative.

Pour une telle analyse, on doit formuler une hypothèse à tester : la valeur nulle et les hypothèses alternatives. Nous affirmons que les quatorze facteurs typo-morphologiques urbains étudiés représentent un impact significatif sur le niveau d'éclairement et d'irradiation sur toutes les surfaces construites dans n'importe quelle scène urbaine dans le contexte climatique tropical.

La décision de rejeter ou non l'hypothèse nulle peut être pris en fonction d'un intervalle de confiance. Ici, nous considérons un intervalle de confiance de 95%, correspondant à une signification de 0,05. Afin d'évaluer l'importance de l'effet de variables de projet sur les variables de réponse un *test-t de Student* est considérée.

3.3. Description du model urbain pour le plan d'expérience (DOE)

Pour l'analyse de sensibilité des facteurs morphologiques considérés, nous utilisons un modèle urbain simplifié, à partir duquel il est possible de créer des variations contrastées suivant la méthode d'analyse statistique. Un modèle urbain simplifié composé de 25 bâtiments est considéré ; pour chacun nous faisons varier toutes les dimensions d'un bâtiment (largeur, épaisseur et hauteur) et les espaces entre eux, comme le montre la figure 4 ci-dessous. A partir de ces variables de base, il est possible d'évaluer les variations de l'ensemble de tous nos facteurs morphologiques (Tableau 8). En outre, quelques caractéristiques principales de l'enveloppe du bâtiment sont également évaluées, notamment le ratio de vitrage, l'albédo, la transmittance thermique des murs, le facteur solaire et la transmittance thermique du vitrage. Dans cette première analyse, un large éventail de valeurs possibles pour chaque variable est examiné (Tableau 8), indépendamment des règlements urbains ou des bonnes pratiques. La composition de l'espace de recherche statistique doit être aussi complète que possible permettant de mieux mesurer la sensibilité de chaque facteur sur les variables réponses, tout en évitant les biais ou les redondances sur les résultats.

Tableau 8 : les intervalles des valeurs possibles (max et min) des facteurs principaux qui définissent les modèles urbains considérés.

Hauteur	Largeur (X)	Epaisseur (Y)	Distance entre bâtiments	Facteur solaire vitrage	Transmittance thermique vitrage	Transmittance thermique murs	Ratio de vitrage	COS	CES	Compacité	Verticalité	Prospect moyen	Albédo
m	m	m	m	/	W/m²K	W/m²K	%	/	/	/	/	/	/
3	4	4	3	0.1	1.3	0.7	0.2	0.3	0.05	0.4	0.01	0.6	0.1
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
50	40	40	30	0.9	5.0	4.8	0.9	10.3	0.85	1.0	0.8	3.9	0.9

Dans cette étude, deux variables de réponse sont considérées : l'irradiation et le niveau d'éclairement sur l'enveloppe de bâtiment. Les statistiques annuelles sont considérées comme base d'une échelle de temps d'analyse, puisque dans certaines régions tropicales, comme à Maceió, les variations saisonnières du climat peuvent être relativement faibles (Figure 3). En ce qui concerne l'échelle spatiale,

nous réalisons une analyse de la forme urbaine à l'échelle du voisinage (jusqu'à 500 x 500 m) et son influence sur un ilot urbain composé de neuf enveloppes bâtis (voirFigure 7).

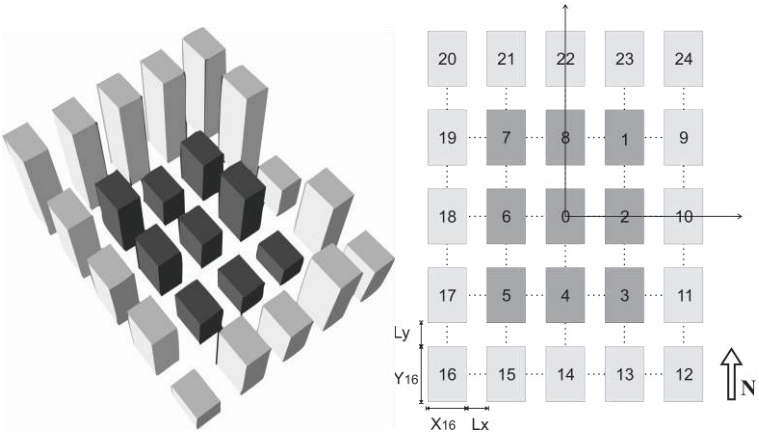


Figure 7: modèle urbain simplifié utilisé dans l'étude statistique.

3.4. Analyse de sensibilité des paramètres typo-morphologiques

A partir du test statistique global (*overall student test*), le prospect moyen (PM), la distance entre les bâtiments (DB) dans les deux axes (Nord-Sud et Est-Ouest) et l'albédo, sont identifiés comme des facteurs produisant des effets les plus pertinentes sur la modification de l'irradiation solaire, ainsi que sur les niveaux d'éclairement des surfaces de bâtiments, mais de différentes manières. L'albédo et le PM contribuent à plus de 50 % de l'impact global de l'irradiation sur les toitures, avec une participation plus importante du PM (27 %). Par rapport aux surfaces verticales, l'impact global de ces variables de projet urbain peut atteindre 75 % sur la façade sud. La pertinence de l'impact de ces variables sur le potentiel d'énergie solaire et sur la consommation d'énergie a déjà été soulignée précédemment (MONTAVON, 2010) (ADOLPHE, CHÂTELET, *et al.*, 2002), mais leur magnitude et leur importance relative, notamment dans les milieux de climat tropical, n'a pas encore été mesurée et cela peut être très utile à la priorisation de certaines décisions urbaines.

Pour identifier et qualifier l'intensité de ces effets, les facteurs sont analysés individuellement concernant les deux réponses (Figure 8, Figure 9 e Figure 10).

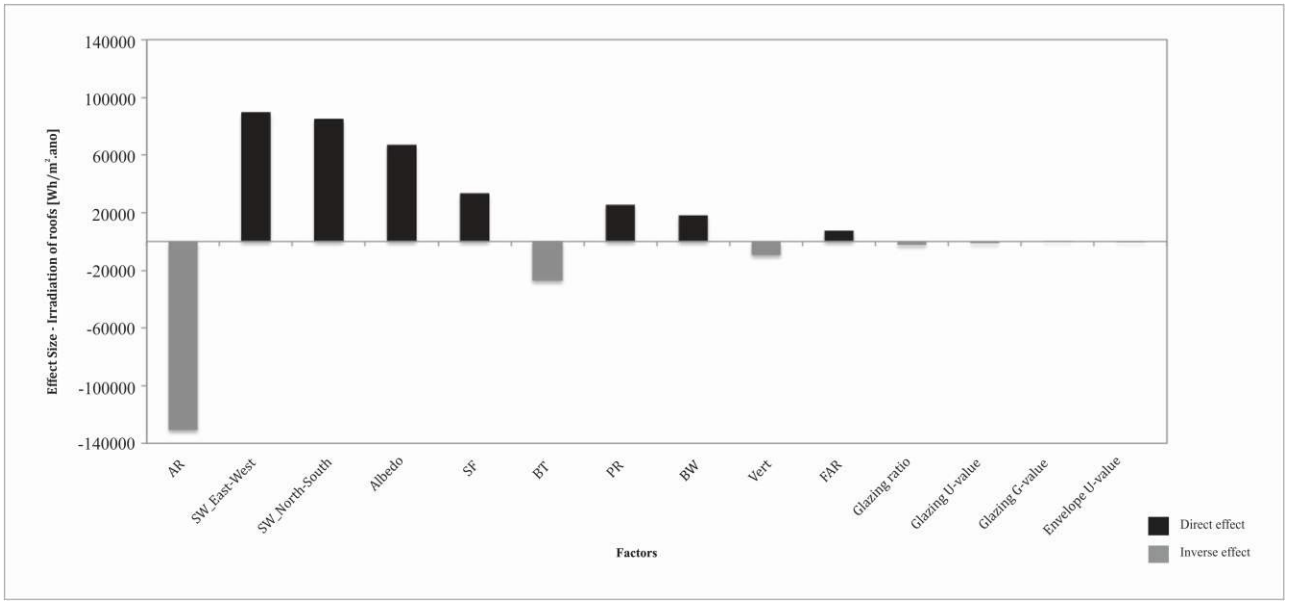


Figure 8: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'irradiation solaire sur les toitures des bâtiments.

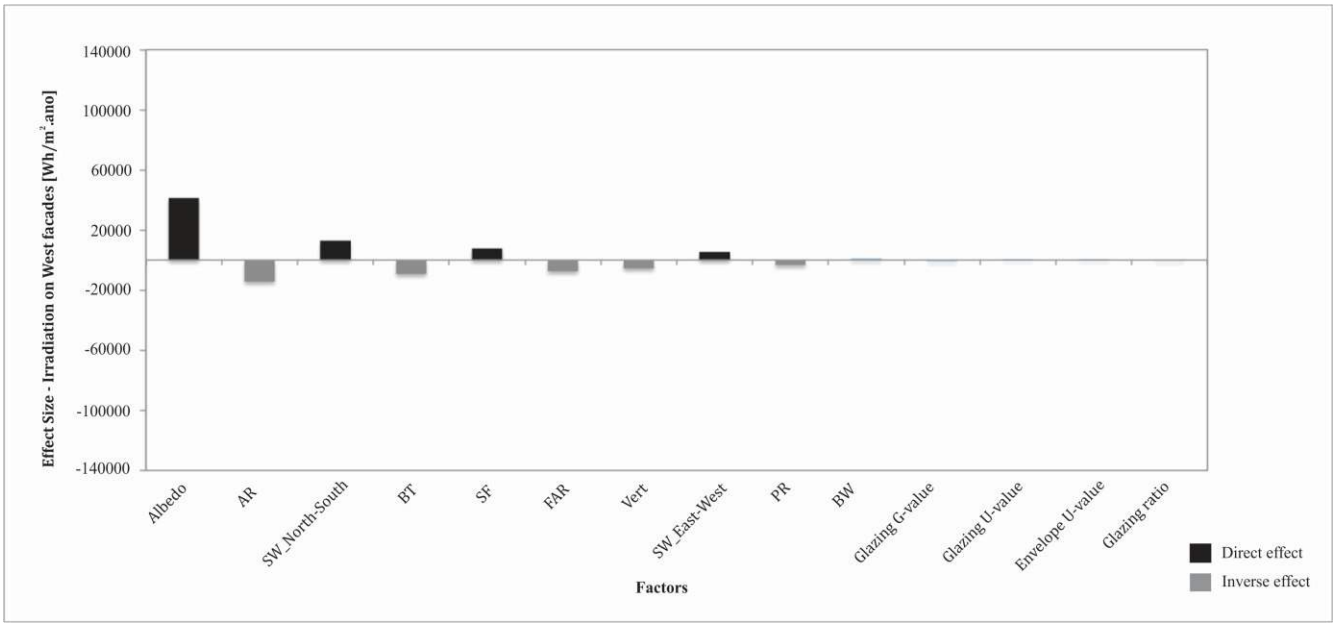


Figure 9: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'irradiation solaire sur la façade Ouest des bâtiments.

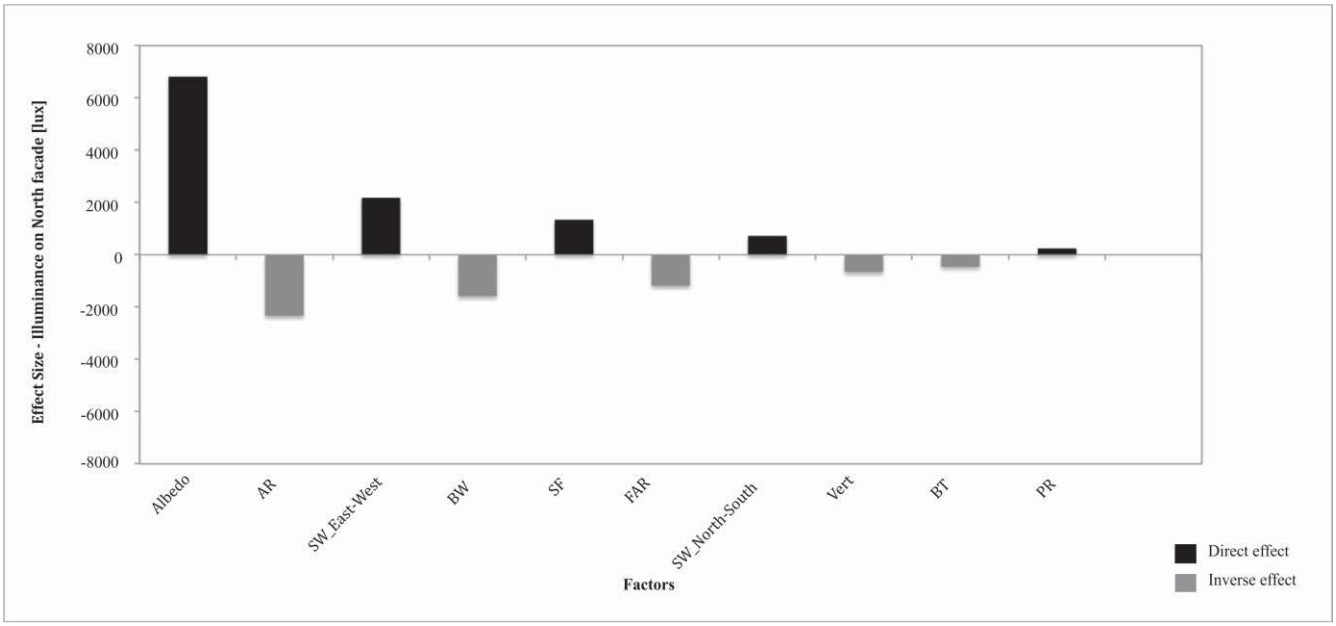


Figure 10: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'illuminance sur la façade Nord des bâtiments.

Comme indiqué précédemment, l'hypothèse nulle indique que la variable ne produit pas d'effet significatif sur la réponse. Un intervalle de confiance de 95 % est considéré ici, ce qui représente un seuil de signification de 0,05. Les tableaux 9 et 10 ci-dessous présentent les résultats des données significatives obtenues par les tests concernant l'effet de l'irradiation solaire sur les toitures et les façades. Les tableaux présentent des informations sur l'effet, la signification et le test statistique t-student. L'effet indique la relation entre le facteur et la variable de réponse : les valeurs négatives indiquent que la relation est inversée.

Tableau 9: signification des résultats des tests statistiques concernant l'irradiation solaire sur les toitures des bâtiments.

Facteurs	Taille d'effet	Signification	*t*-Student
Prospect moyen	-130810.30	0.00	9.26
Distance entre bâtiments (E-O axe)	89584.00	0.00	8.38
Distance entre bâtiments (N-S axe)	84973.60	0.00	7.84
Albédo	67109.60	0.00	5.93
Compacité	33496.10	0.00	2.49
Epaisseur des bâtiments	-26749.70	0.02	2.23
CES	25425.80	0.02	2.23

Tableau 10: signification des résultats des tests statistiques concernant l'irradiation solaire sur les façades des bâtiments..

Facteurs	Taille d'effet	Signification	*t*-Student
Albédo	413573.36	0.00	28.95
Prospect moyen	-143329.97	0.00	4.13
Distance entre bâtiments (N-S axe)	129649.06	0.00	4.55
Epaisseur des bâtiments	-92309.29	0.00	3.17
Compacité	77581.60	0.00	2.34
COS	-74298.12	0.02	1.95
Distance entre bâtiments (E-O axe)	54544.59	0.03	1.85

Tableau 11: signification des résultats des tests statistiques concernant le niveau d'illuminance sur la façade Nord des bâtiments

Facteurs	Taille d'effet	Signification	*t*-Student
Albédo	6817.85	0.00	25.76
Prospect moyen	-2331.10	0.00	3.30
Distance entre bâtiments (E-O)	2173.08	0.00	4.48
Largeur des bâtiments	-1577.27	0.00	3.19
Compacité	1337.91	0.00	2.96

Les résultats semblent cohérent en ce que concerne les réponses (l'irradiation et l'illuminance) attendues pour les configurations urbaines. L'albédo présente une importante influence directe sur les réponses. Plus l'albédo de la surface urbaine (la réflectance) est important, plus grande sera l'échange d'irradiation solaire entre eux (la réflexion) et plus important sera l'éclairement lumineux sur les façades. Pour le PM (ratio de la hauteur des bâtiments sur la largeur de la rue), cela indique un effet inverse : plus la hauteur des bâtiments est importante par rapport à la distance entre eux, plus l'ombre portée sur le toitures et les façades sera importante, ce qui peuvent réduire la réponse globale en termes d'incidence du rayonnement et de lumière du jour reçue sur les surfaces des bâtiments.

En ce qui concerne *la distance entre les bâtiments* (DB) sur les deux axes de rues (Nord-Sud et Est-Ouest), ce paramètre présente un effet direct important sur les variables de réponse. Plus les bâtiments sont espacés entre eux, plus importante sera la disponibilité de l'irradiation et le niveau d'éclairement sur les surfaces en raison de la moindre d'obstruction par rapport au soleil et à la voute céleste. Parmi les autres variables influentes, la *compacité* a présenté un effet direct. Cela pourrait s'expliquer par l'influence des inter-réflexions entre les surfaces verticales. Plus la surface d'enveloppe par rapport au volume bâti est élevée, plus importante est le niveau d'éclairement sur les façades. Le même comportement est identifié pour l'irradiation sur les façades, ce qui peut aussi représenter des apports de chaleur solaire très importants sur les bâtiments.

Selon l'intervalle de confiance adoptée dans cette étude (de 95 %), sept facteurs typo-morphologiques pourraient être mis en évidence par rapport à leur influence pertinente sur la réponse de l'irradiation, aussi bien sur les toitures et que sur les façades : le prospect moyen, la distance entre bâtiments, l'albédo, la compacité, l'épaisseur des bâtiments, les coefficients d'emprise et d'occupation du sol (Tableaux 9 et 10). Concernant la réponse de l'éclairement sur les quatre façades orientées, les cinq paramètres morphologiques plus significatifs sont : l'albédo, le prospect, la distance entre bâtiments, la compacité et l'épaisseur des bâtiments (Tableau 11).

A partir des informations obtenues jusqu'à présent, nous avons vérifié que les variables : *la largeur des bâtiments, la verticalité, le ratio de vitrage, le facteur solaire, la transmittance des vitrages et des*

murs ne sont pas suffisamment pertinents pour être considérés comme des paramètres significatifs. À l'exception de la largeur de bâtiments et la verticalité, ce résultat était attendu, puisque nous ne prenons en compte que les données obtenues pour les surfaces extérieures des bâtiments.

De toutes façons, il est nécessaire d'évaluer l'effet de l'interaction entre ces variables de projet avant que nous en tirions des conclusions. Pour ce faire, le graphique des quantiles demi-normaux des effets, basé sur les valeurs absolues de l'effet estimé sur les probabilités normales cumulatives, a été mis en œuvre (MONTGOMERY, 2001). Un graphique normal est utile pour distinguer les effets les plus importants (à haut et à droite) et les moins importants (en bas et à gauche), en considérant les effets principaux aussi que ceux d'interaction de premier ordre. Une interaction forte signifie que l'effet d'une variable dépend de la réponse d'une autre. Dans les graphiques ci-dessous (Figures 9-11), les carrés noirs représentent l'effet direct sur la réponse : lorsque la valeur d'une variable augmente, la valeur de la réponse augmente également. De même, l'effet inverse dans la réponse est représenté par les carrés gris.

A partir de la Figure 11 ci-dessous, il est possible de vérifier les mêmes effets principaux que dans l'analyse précédente, démontrant encore la grande influence du *prospect moyen* et de *la distance entre les bâtiments* (sur les deux axes) sur l'irradiation des toitures. En outre, il est également possible de vérifier l'effet d'une interaction très remarquable entre ces variables et le facteur COS. Ces résultats semblent fiables étant donné que le COS représente la relation entre l'emprise du bâtiment (et, par conséquent, la disponibilité de surface de toiture) et le nombre d'étages, qui ont un effet direct important sur le niveau d'irradiation sur les toits. Plus la surface construite est importante, plus d'énergie radiante reçue est importante.

Si nous observons les résultats pour les façades (Figure 12), on y voit aussi l'effet principal de l'albédo, mais également les effets de l'interaction entre celui-ci et les autres facteurs morphologiques qui individuellement présentaient une influence négligeable dans l'analyse précédente – tel que la *verticalité*, le COS et le CES. Si l'albédo représente individuellement un effet direct important, lorsqu'il interagit avec les autres variables morphologiques, ces derniers semblent imposer une influence majeure et l'effet s'avère inversé. Ces variables présentent donc un poids supérieur dans l'interaction, ce qui signifie que, indépendamment de la variation de l'albédo, une densité plus élevée peut amener à une réduction de l'irradiation et de l'éclairement sur les surfaces verticales. Ce résultat peut être attribué à l'important impact de l'obstruction du ciel par les bâtiments voisins. Toutes les quatre façades ont présentées des résultats similaires, à l'exception de l'importante influence des facteurs liés à l'orientation, tels que l'épaisseur et la largeur, qui, suivant l'orientation de la façade, pourront présenter des valeurs différentes.

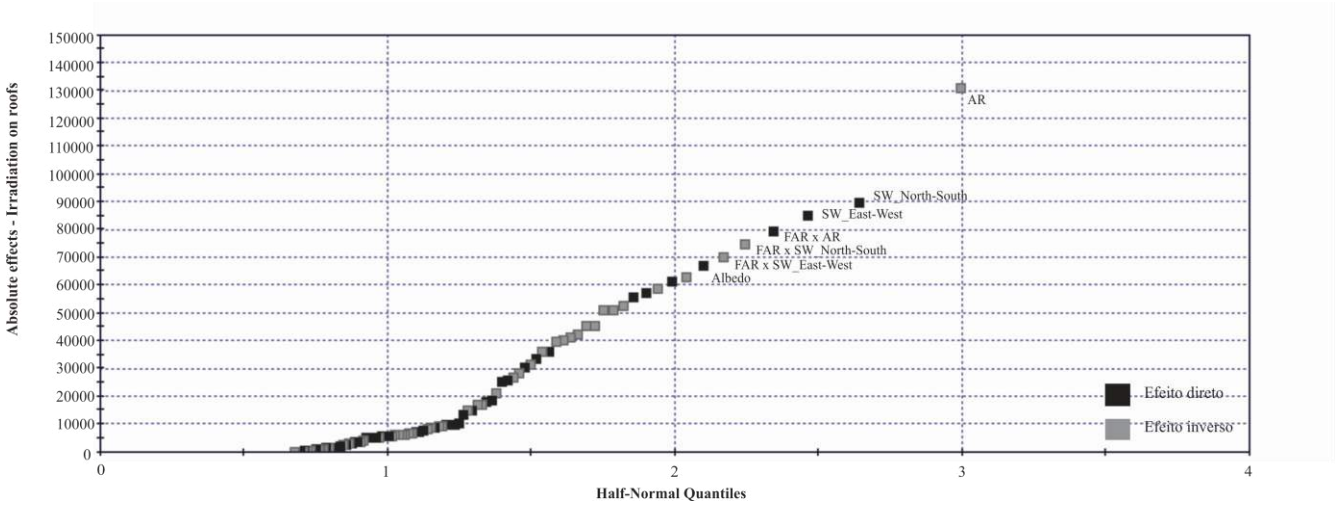


Figure 11: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'irradiation sur les toitures.

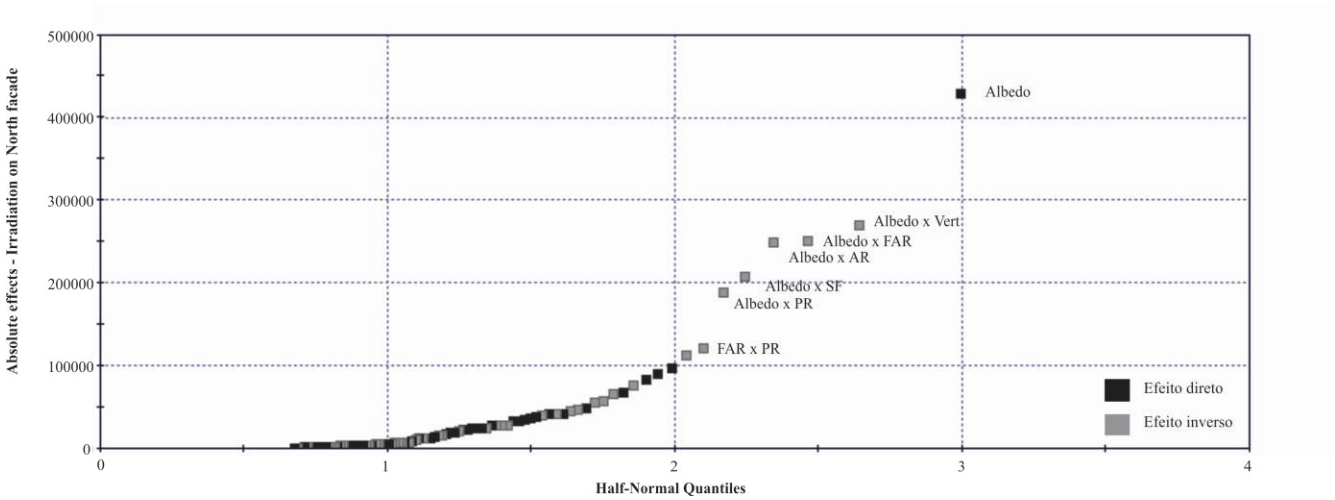


Figure 12: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'irradiation sur les façades Nord.

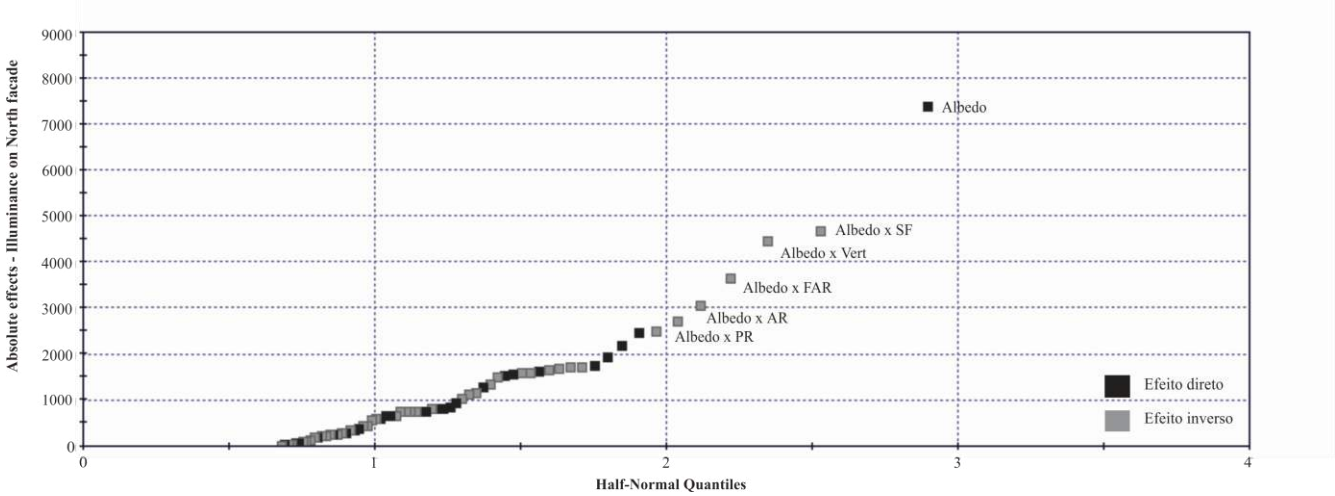


Figure 13: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'illuminance sur les façades Nord.

A partir des résultats obtenus dans cette analyse de sensibilité, nous avons pu vérifier que les facteurs suivants: *largeur du bâti, ratio de vitrage, facteur solaire, transmittance thermique du vitrage et des murs* – ne présentent pas d'effet principal ni d'effet d'interaction statistiquement significatif concernant les réponses étudiées. C'est-à-dire qu'il n'y a pas assez de preuve statistique pour affirmer que des variations sur ces facteurs produiront des modifications qui soient significatives sur la réponse d'irradiation et l'éclairement sur les surfaces extérieures des bâtiments. Ainsi, il est possible de les considérer comme des variables constantes pour des analyses subséquentes, comme lors d'un processus d'optimisation, sans qu'il n'y ait de perte de représentativité sur le problème formulé.

4. LA METHODOLOGIE D'OPTIMISATION

La difficile gestion des processus de décision a conduit vers le développement de différentes méthodes d'évaluations multicritères (WRIGHT, LOOSEMORE e FARMANI, 2002), notamment des méthodes d'optimisation. De nombreuses études d'optimisation ont été menées dans plusieurs champs thématiques, tels que la conception architecturale et urbaine (MAGNIER e HAGHIGHAT, 2010) (KAMPF, MONTAVON, *et al.*, 2010) (MONTAVON, 2010).

En général, l'optimisation désigne l'acte d'obtenir le meilleur résultat compte tenu des certaines circonstances données par la sélection du meilleur élément d'un ensemble de solutions disponibles. L'objectif principal de cette méthodologie est de minimiser ou de maximiser une mesure d'efficacité, qui doit être exprimée en fonction de certaines variables de décision « réelle ». L'optimisation consiste donc en un processus de recherche de valeurs de variables, à partir desquelles un ensemble restreint donne la valeur maximale et minimale de la fonction réelle exprimée et soumise à un certain nombre de contraintes. Les variables de projet sont constituées des paramètres dont les valeurs peuvent varier librement afin de définir une structure urbaine. Les contraintes de projet représentent les restrictions qui doivent être respectées pour produire un projet faisable et acceptable. En général, l'optimisation vise à choisir le meilleur projet basé sur les fonctions objectives définies.

4.1. L'optimisation multi-objective et l'algorithme NSGA-II

Dans certaines situations, le besoin de considérer plusieurs critères à satisfaire simultanément peut exister. Ces problèmes sont généralement appelés multi-objectifs (DEB, 2001) (COELLO, LAMONT e VELDHUIZEN, 2007). Également connu comme des problèmes multicritères, ils peuvent être menés dans les divers domaines où des décisions optimales doivent être prises, face à un compromis entre deux ou plusieurs des objectifs contradictoires.

Pour des problèmes multi-objectifs non triviaux, on ne peut pas identifier une solution unique qui optimise simultanément chaque objectif. Les algorithmes multi-objectifs cherchent des solutions telles qu'il soit impossible d'améliorer un critère sans empirer l'autre. Ces solutions sont appelées solutions non-dominées ou projets de Pareto. Trouver ces solutions non-dominées est l'objectif lorsqu'on met en place une démarche d'optimisation multi-objectif. Dans l'absence de toute information complémentaire, une des solutions optimales de Pareto ne peut pas être considérée meilleure qu'une autre. Cela demande que l'algorithme puisse trouver le plus grand nombre possible des solutions de Pareto et ensuite d'évaluer ces solutions pour n'en choisir qu'une seule. Ces algorithmes d'optimisation multi-objectifs sont catégorisés en tant que méthodes classiques et évolutives.

Les méthodes d'optimisation classiques suggèrent de « normer les échelles » (*scalarizing*) de l'ensemble des objectifs en un seul objectif en multipliant chaque objectif par un poids défini par l'utilisateur (MARLER e ARORA, 2010) (SCHAFFER, 1984) (DAS e DENNIS, 1998). On peut trouver une liste de quelques méthodes couramment utilisées d'optimisation multi-objective classique (DEB, 2001).

En revanche, les algorithmes évolutionnaires multi-objectif (AEMO) reposent sur des principes évolutifs naturels, tels que la reproduction, la mutation et la sélection, afin de définir le processus d'optimisation. Les solutions candidates pour le problème d'optimisation jouent le rôle des individus dans une population, et la fonction d'adaptation (*fitness*) détermine l'environnement au sein duquel les solutions vont survivre ou pas. L'évolution de la population a lieu après l'application répétée d'opérateurs évolutionnaires.

Parmi les méthodes d'optimisation multi-objectives évolutionnaires nous pouvons citer : VEGA (SCHAFFER, 1984), MOGA (FONSECA e FLEMING, 1993), NPGA (HORN e NAFPLIOTIS, 1993),

(SRINIVAS e DEB, 1994) et NSGA-II (DEB, PRATAP, *et al.*, 2002). Zitzler, Deb et Thieler (2000) présente une comparaison entre les différents méthodes. Ces méthodes ont été utilisées également pour résoudre des problèmes de projet architecturaux et urbains (MAGNIER e HAGHIGHAT, 2010) (GRIEGO, KRARTI e HERNANDEZ-GUERRERO, 2012). Basé sur des applications bien réussies avec l'utilisation de la méthode NSGA-II, un des MOEA les plus efficaces (COMPAGNON, 2000), ce travail a choisi d'utiliser cette méthode particulière pour l'optimisation de modèles urbains. Les caractéristiques majeures des méthodes NSGA-II sont l'utilisation de la relation de domination de Pareto et le mécanisme qui permet de conserver la diversité pour l'évaluation de la condition d'adaptation avec une sorte d'élitisme (DEB, 2001) (DEB, PRATAP, *et al.*, 2002). En raison de ces caractéristiques, la convergence et la propagation du front de solutions sont assurées, sans avoir besoin d'utiliser une population externe.

4.2. La méthodologie de projet par optimisation

Parmi les types urbains définis précédemment, seulement la classe 4 ou la typologie urbaine « verticale moderne » un seule est davantage étudiée ici grâce à l'évaluation de l'optimisation.

Ici, nous cherchons à optimiser la typologie urbaine mentionnée, basée sur les paramètres majeurs qui la définissent à l'échelle du quartier et de l'ilot. Nous ne sommes pas intéressés par les détails plus ou moins aléatoires de la forme des bâtiments à l'échelle architecturale. Le type urbain ici peut être défini comme un modèle de référence qui met en valeur les principaux traits les plus fréquents d'une forme bâtie à l'échelle urbaine et qui exercera le plus d'influence sur la performance énergétique. Pour simplifier la géométrie des bâtiments, on réduit l'impact de la complexité sur les résultats, ce qui permet d'approfondir la compréhension en ce qui concerne les liens entre les typologies et le potentiel d'énergie solaire (RATTI, RAYDAN e STEEMERS, 2003) (COMPAGNON, 2004) (GRIEGO, KRARTI e HERNANDEZ-GUERRERO, 2012) (COMPAGNON e RAYDAN, 2000). En outre, on sait que dans le processus de conception architecturale, les décisions cruciales sont prises dans les premiers étapes de la conception, lorsque le concepteur a besoin de mettre en place le volume, la proportion, la compacité, l'implantation et l'orientation souvent en appliquant des paramètres de régulation locale urbaine (COS, CES etc..).

4.2.1. La définition des variables de projet

A partir de l'analyse de sensibilité, il a été possible de définir les facteurs morphologiques les plus pertinents sur les phénomènes physiques principaux : l'irradiation et l'éclairement sur l'enveloppe des bâtiments (Tableau 9-11). Dans le processus d'optimisation, pour chacune des variables pertinentes, les plages de valeurs sont considérées en fonction des caractéristiques de la typologie *cas de base* (classe 4) et ses intervalles les plus fréquents (Tableau 12).

4.2.2. Les contraintes du projet urbain

Les contraintes de conception considérées ici sont basées sur des critères morphologiques et environnementaux. Les critères morphologiques sont définis par les paramètres du règlement d'urbanisme de Maceió pour notre typologie *cas de base* (voir Tableau 12). Généralement, ces paramètres sont constitués d'un COS maximale de 4.0, d'un CES de 0.70, d'un DB minimal de 3,0 et d'un NE maximal de 15.

Les contraintes environnementales sont établies en définissant les valeurs de seuil d'éclairement sur les façades, afin d'atteindre un niveau acceptable de lumière du jour à l'intérieur (voir section 2.1). Cela permet la recherche de projets urbains optimaux en termes d'irradiation minimale sur les surfaces verticales de façades, tout en assurant un niveau acceptable de lumière du jour.

4.2.3. Les fonctions objectives

L'optimisation de cette configuration urbaine particulière est évaluée au moyen d'une mesure de l'efficacité qui caractérise la fonction objective. Dans ce travail, nous parlons d'une optimisation multi-objectif définie par:

- Minimiser l'irradiation sur les façades verticales (f_{obj1}) et la maximiser sur les toitures des bâtiments (f_{obj2}), dans le but de réduire les apports solaires par les façades, cause de surchauffe à l'intérieur des bâtiments et en même temps d'améliorer le potentiel de production de l'énergie solaire sur leurs toits.

Trouver arg min $f_{obj} = [f_{obj1}, -f_{obj2}]$, soumis aux contraintes suivantes:
$E_S \geq 9375\ lux$; $E_N \geq 11538\ lux$; $E_O \geq 10714\ lux$; $E_E \geq 10000\ lux$; $CES \leq 0.70$; $COS \leq 4.0$

Où:
$E_{S,N,O,E}$= Illuminance sur les quatre façades: Sud, Nord, Ouest et Est; CES=Coefficient d'Emprise au Sol; COS=Coefficient d'Occupation du Sol.

Dans la suite, l'analyse d'optimisation a été réalisée à l'aide de la méthode NSGA-II. Pour cette analyse d'optimisation, il a été considéré: une population initiale de 50 personnes et 200 générations, une probabilité de croisement de 90 % et une probabilité de mutation de 10%. Les valeurs de ces paramètres ont été choisies en ayant comme base la littérature (MAGNIER e HAGHIGHAT, 2010) (ZITZLER, DEB e THIELER, 2000) (TAN, LEE e KHOR, 2002).

La population initiale a été définie aussi à partir des résultats du plan d'expérience et de l'analyse effectuée dans la section suivante, où certaines configurations faisables sont sélectionnées. Ainsi, la population initiale est composée avec les configurations faisables et choisies aléatoirement par une tentative de couvrir au maximum l'espace de recherche.

Après que les variables d'entrée aient été définies et la méthode de recherche et d'évaluation définie (méthode d'analyse DOE), et l'optimisation sur Modefrontier® (MODEFRONTIER, 2013), les valeurs des variables d'entrée sont écrites dans un fichier d'entrée de Citysim et analysées dans le solveur (code) pour être évaluées dynamiquement. Seuls les projets faisables du point de vue des contraintes du réglement d'urbanisme sont considérés. Les résultats sont ensuite renvoyés à la plateforme Modefrontier®, où les statistiques annuelles des résultats sont effectuées à l'aide de la calculatrice Matlab®. Tous les modèles faisables et infaisables générés par le processus d'optimisation sont analysés en utilisant la boite à outil statistique du Modefrontier® (MODEFRONTIER, 2013).

4.3. Vers des solutions optimales

4.3.1. Optimisation pour la classe typo-morphologique 4 : la ville verticale

La Figure 14 présente un résumé des simulations exécutées indiquant proportionnellement l'occurrence des configurations faisables et infaisables. Pour les configurations urbaines infaisables, la Figure 15 quantifie proportionnellement les contraintes qui ont été violées. Il est possible de constater que les contraintes les plus critiques sont les paramètres morphologiques, le CES et le COS, imposés par le code d'urbanisme local, suivi par les niveaux d'éclairement sur les façades.

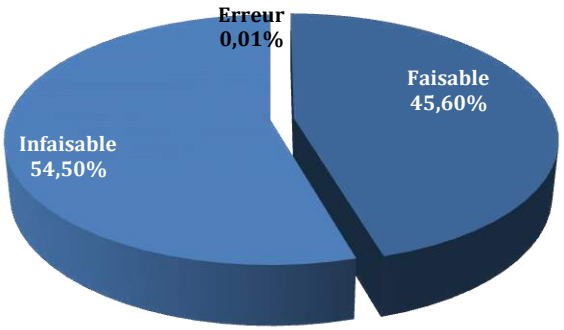


Figure 14: résumé des simulations pour la classe 4.

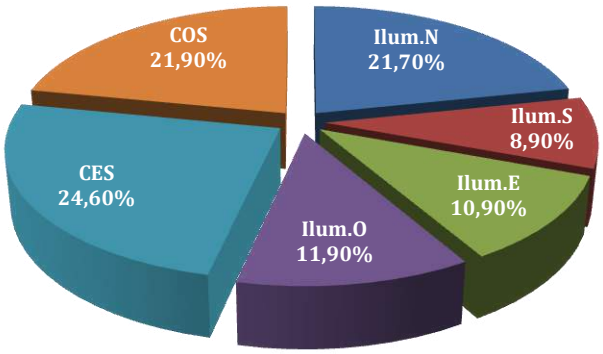


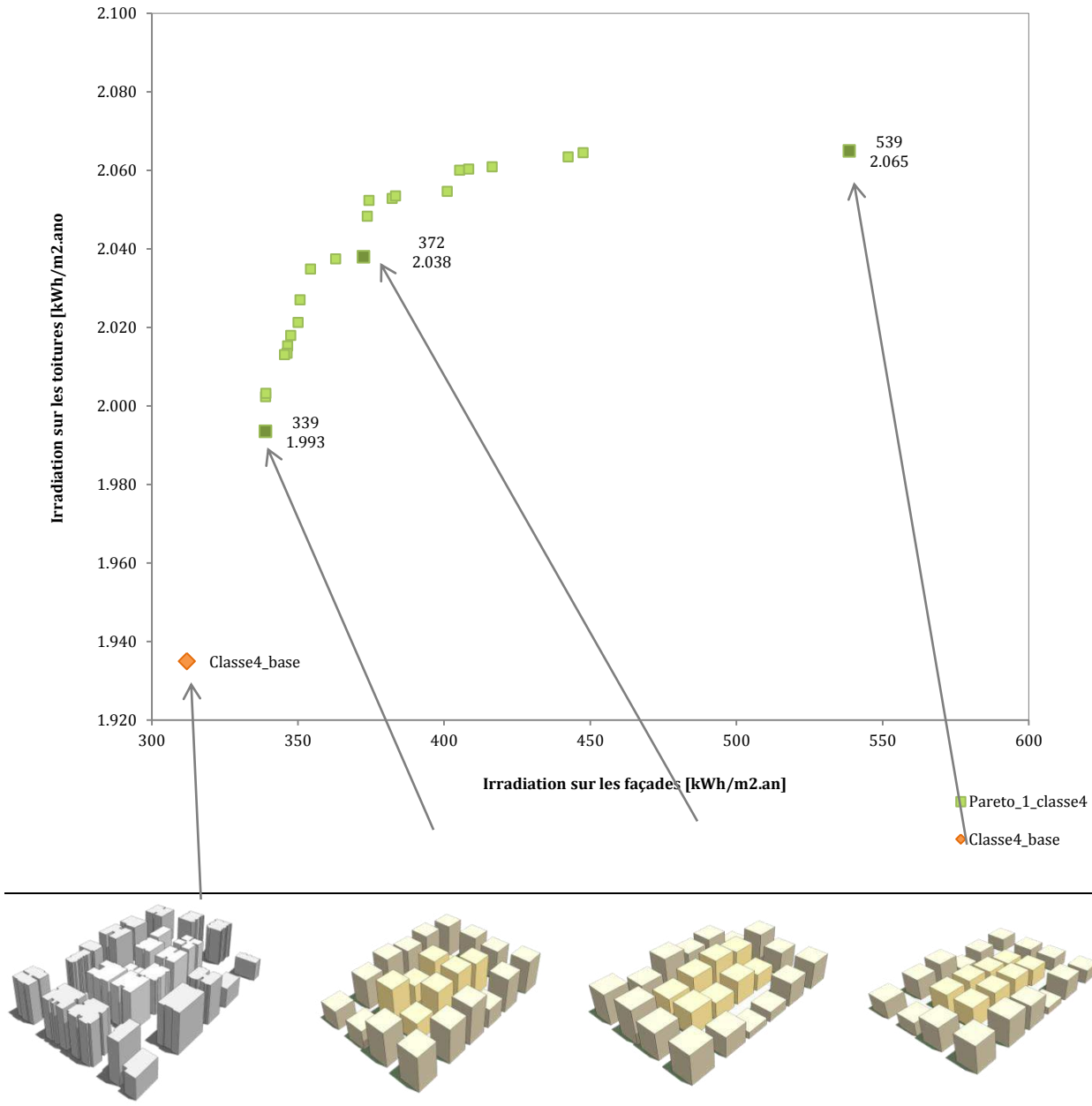
Figure 15: violation des contraintes pour la classe 3.

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 16, où l'ensemble des projets optimaux est représenté par un carré vert. Les configurations urbaines mises en évidence dans les graphiques sont celles appartenant au front de Pareto, les solutions optimales non-dominées. Une grande quantité de solutions de Pareto ont été trouvées entre les deux extrêmes des réponses, comme nous montre le graphique de la Figure 16.

Les résultats indiquent que, pour l'irradiation, un gain d'environ 12 % a été atteint sur les toitures, tandis que pour l'irradiation sur les façades, une réduction d'environ 44 % a été obtenue.

Les solutions optimales vont d'une irradiation annuelle sur les toitures de 1993kWh/m2, pour une irradiation annuelle sur les façades de 339 kWh/m2; et une irradiation sur les toitures de 2065 kWh/m2, pour une irradiation annuelle sur les façades des 538 kWh/m2. Une amélioration des solutions a pu être identifiée, mais aussi un ensemble des paramètres nous ont également indiqué des tendances très importantes qui pourront conduire à établir des indicateurs plus complets pour le développement de la morphologie urbaine dans ces régions. Par exemple, les valeurs optimales pour l'albédo des surfaces verticales, très proches de la limite supérieure de son intervalle de valeurs, semblent être très influents dans la réduction des niveaux d'irradiation sur les façades. Au même temps, imposer un taille limite (avec une limite inférieure et supérieure de 5 et 7 étages, respectivement), en évitant des écarts relatives important entre les bâtiments, peut induire à un plus grand potentiel de production d'énergie sur leurs surfaces horizontales.

A partir de la Figure 16, il est également possible de visualiser simultanément les configurations optimales du front Pareto avec la typologie *cas de base* (en losange orange). La classe de référence a été classée comme un projet infaisable en raison de son très faible niveau d'éclairement sur les façades. Cela explique aussi son niveau très faible aussi en terme d'irradiation sur les façades par rapport aux cas optimaux. En comparant avec les résultats de compromis optimisés, nous avons trouvé une amélioration de 7 % pour l'irradiation sur les toits, avec une perte de 6 % par rapport à la réduction envisagée d'irradiation sur les façades.

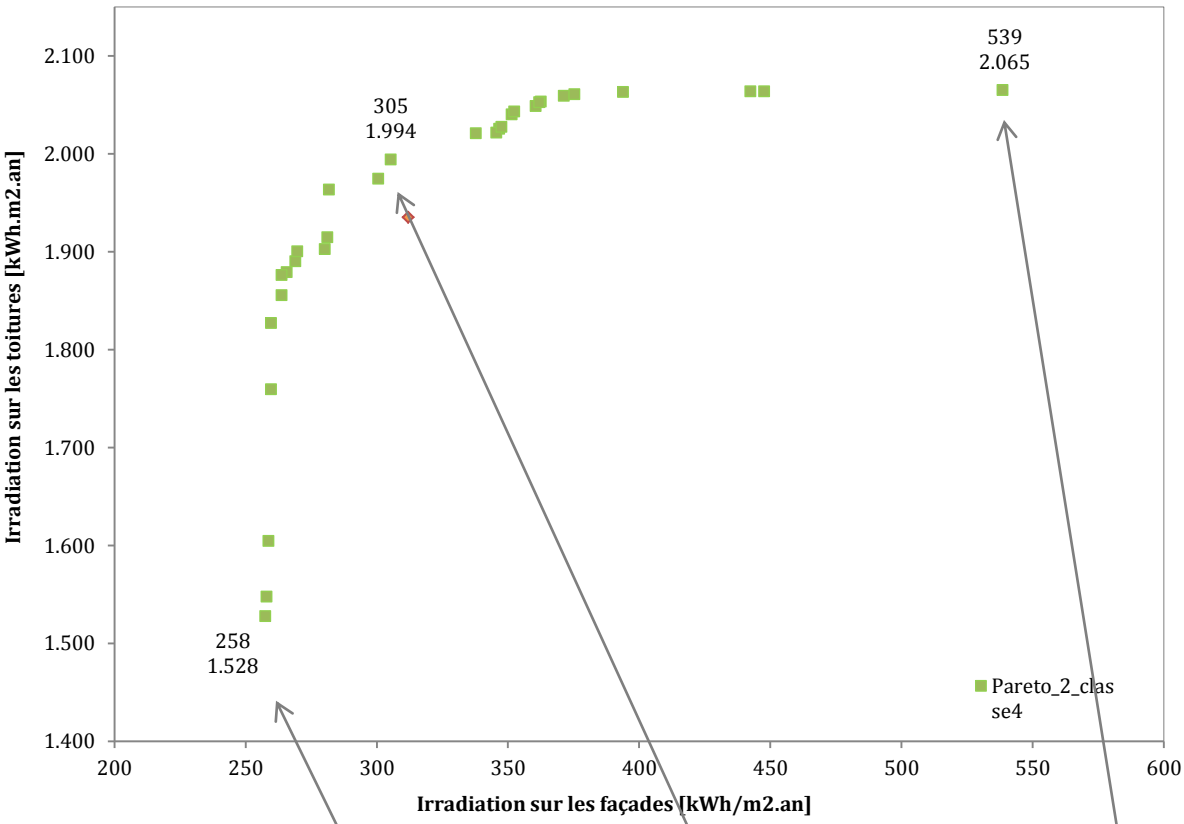


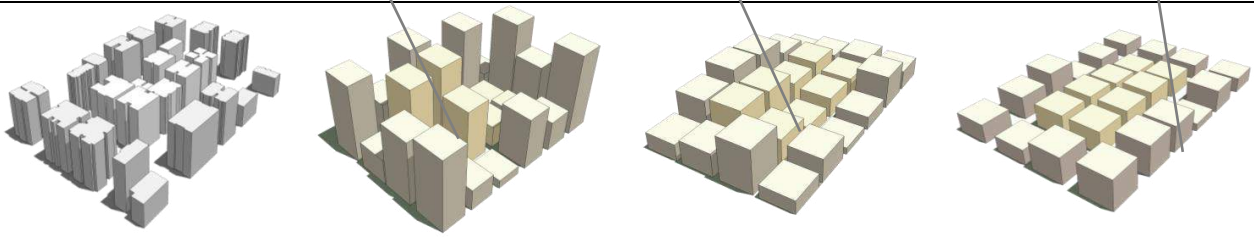
Classe4_base	C4(1)1 Min	C4(1)2	C4(1)3 Max
COS=4,2	COS =4,4	COS=4,2	COS=2,7
CES=0,49	CES =0,63	CES=0,59	CES=0,51
NE=8	NE=7	NE=7	NE=5
ET_hauteur=9	ET_hauteur =7,3	ET_hauteur =7,8	ET_hauteur =5
Prospect=3,3	Prospect=2,5	Prospect=2,4	Prospect=1,3
Albédo toiture=0,20	Albédo toiture =0,26	Albédo toiture =0,36	Albédo toiture =0,26
Albédo toiture =0,20	Albédo toiture =0,49	Albédo toiture =0,49	Albédo toiture =0,49

Figure 16: résultats du premier processus d'optimisation.

Tout en assurant le même seuil de lumière du jour intérieur, nous avons tenté d'élargir les possibilités de configurations urbaines en modifiant les paramètres de densité imposée par le code urbain local, sur une deuxième optimisation (Figure 17 et Tableau 12). Les configurations pouvant être deux fois plus denses (COS de 8.1), tout en respectant le seuil du CES (de 0,7) et NE (de 11), ont

présenté une réduction de 24 % sur le rayonnement solaire sur les façades, avec également une importante réduction de 27 % de l'énergie solaire potentielle sur les toitures. Ce résultat pourrait être aussi considéré comme une stratégie urbaine pour la réduction des gains de chaleur de source solaire dans les bâtiments, notamment dans les quartiers où la production d'énergie solaire peut être plus contraignante du point de vue budgétaire. Et pour un environnement urbain un peu moins dense (COS de 4,5 et CES de 0,6), nous avons trouvé un meilleur compromis, avec une réduction de 11 % du rayonnement sur les façades et seulement 1 % de réduction sur les toitures.





Classe4_base	C4(2)1 Min	C4(2)2	C4(2)3 Max
COS=4,2	COS =8,1	COS =5,8	COS =3,06
CES=0,49	CES =0,73	CES =0,76	CES =0,58
NE=8	NE=11	NE=8	NE=5
ET_hauteur=9	ET_hauteur =19	ET_hauteur =10	ET_hauteur =5
Prospect=3,3	Prospect=6,6	Prospect=4,5	Prospect=1,32
Albédo toiture=0,20	Albédo toiture =0,47	Albédo toiture =0,48	Albédo toiture =0,26
Albédo vertical=0,20	Albédo vertical=0,50	Albédo vertical=0,50	Albédo vertical=0,49

Figure 17: résultats de la deuxième optimisation.

Les résultats ont indiqué le rôle crucial de l'ensemble des facteurs de densité considérés, qui pourrait être revus par le décideur urbain local, favorisant des potentialités environnementales et des retombées économiques importantes dans ces domaines. Le Tableau 12 ci-dessous résume la gamme des valeurs obtenues par les variables optimales.

Tableau 12: les valeurs limites de projet, les contraintes urbaines, le cas de base et les paramètres de projet optimaux.

Facteurs	Intervalles de valeurs	Cas de base	Contraintes de projet		Solutions optimales (1st)		Solutions optimales (2nd)	
			Min	Max	Max	Max	Min	Max
Albédo toiture	0,05;0,5	0,2	-	-	0,26	0,26	0,47	0,26
Albédo façades	0,05;0,5	0,2	-	-	0,49	0,49	0,50	0,49
Epaisseur (m)	8;40	15	-	-	22,0	18,0	20,0	24,0
Largeur (m)	8;40	15	-	-	16,0	18,0	16,0	22,0
Hauteur (m)	6;45	30	-	-	22,0	16,0	33,0	16,0
BS (m)	1,5;3,0	3,0	1,5	3,0	6,0;2,0	6,0;6,0	6,0;1,0	6,0;6,0
Rue largeur (m)	9;15	9,0	9,0	-	9,0	12,0	5,0	12,0
NE	2;15	8	10	15	7	5	11	5
COS	2,0;4,0	4.2	-	4,0 (4,5)	4,4	2,7	8,1	3,06
CES	0,35;0,7	0,49	0,50	0,70	0,63	0,51	0,73	0,58
Compacité	0,05;5,0	0,30	-	-	0,26	0,29	0,26	0,24
PM	0,5;10	3,3	-	-	2,5	1,3	6,6	1,32
Surface construite (toiture) moyenne	-	225	-	-	352	324	320	528
Surface moyenne d'enveloppe	-	1800	-	-	2043	1467	2696	1988
Irrad. solaire toitures (kWh/m².an)	-	1935			1993	2065	1528	2065
Irrad. solarie façades (kWh/m².an)		312			339	538	258	539
Irrad. IR façades (kWh/m².an)		5,0			12,4	-1,0	69,9	-2,0
Irrad. IR toitures (kWh/m².an)		-54,7			-41,3	-80,3	-38,3	-86,1
Illuminance façades oest (Lux)		1.925			11.078	16.197	12.354	16.197
Illuminance façades nord (Lux)		2.002			12.491	14.942	10.519	14.943
Illuminance façades est (Lux)		1.955			11.444	13.498	12.247	13.498
Illuminance façades sud (Lux)		1.855			10.006	15.679	10.035	15.680

Le graphique de la Figure 18 présente les deux fronts de Pareto, avec et sans l'imposition des contraintes du code local d'urbanisme. Nous vérifions une légère amélioration de la performance globale des projets optimaux dans le processus d'optimisation, pour lesquels les contraintes du code local ont été imposées ainsi qu'une meilleure distribution des solutions d'un extrême à l'autre du front. Avec la possibilité d'augmenter librement la densité construite et la verticalité (sans les contraintes du code d'urbanisme), il est devenu possible de trouver des solutions avec des prospect plus importants, de plus grande diversité de hauteur et, par conséquence, une plus faible incidence solaire directe sur les surfaces. Donc, nous mettons en évidence encore une fois, l'impact prépondérant du prospect moyen sur la performance radiative des surfaces (toitures et façades).

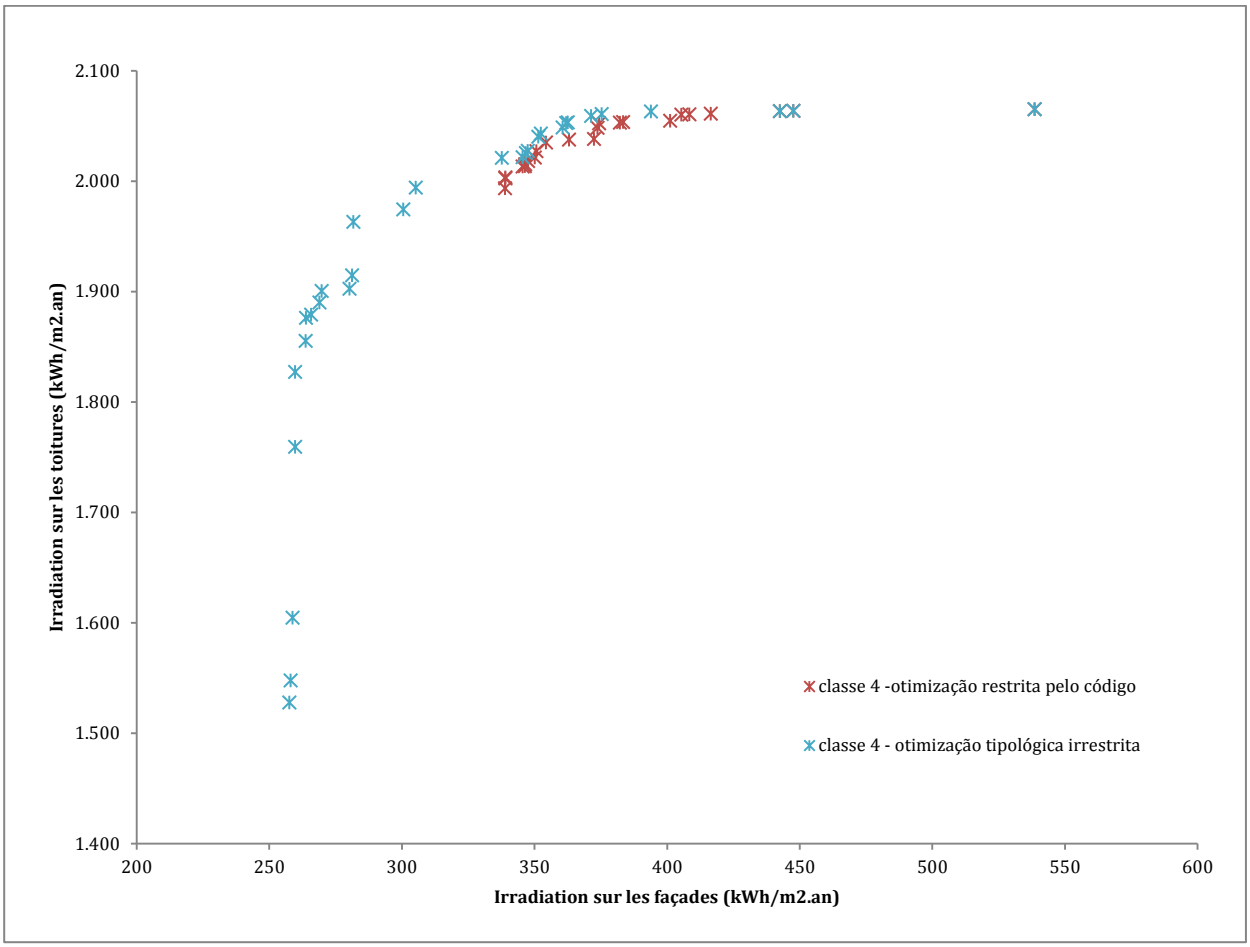


Figure 18 : projets du front de Pareto pour les deux scenarios d'optimisation multi objective pour la classe 4.

4.1.1. Optimisation de la classe typo-morphologique 3: la ville compacte

La Figure 19 présente un résumé des simulations réalisées indiquant proportionnellement l'occurrence des configurations faisables et infaisables. Pour les configurations urbaines infaisables, la Figure 20 quantifie proportionnellement les contraintes qui ont été violées. Il est possible de constater que les contraintes les plus critiques ont été, cette fois-ci, les paramètres physiques correspondants au niveau d'illuminance pour tout orientation, contrairement à ce que nous avons vu pour la classe 4. Ce résultat peut être expliqué par les caractéristiques typologiques de la classe 3. L'inexistence d'espace entre les bâtiments voisins fait que la faisabilité de ces projets semble plus contraignante dans la recherche de solutions qui présentent les niveaux minima d'éclairement.

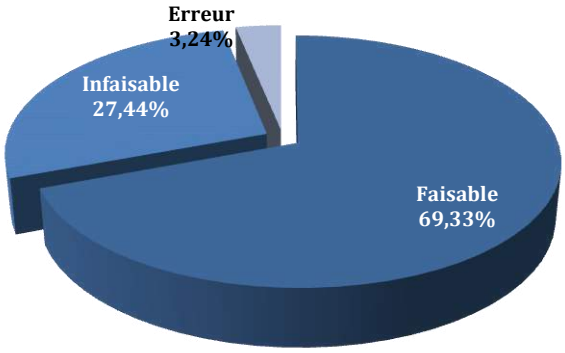


Figure 19: résumé des simulations pour la classe 3.

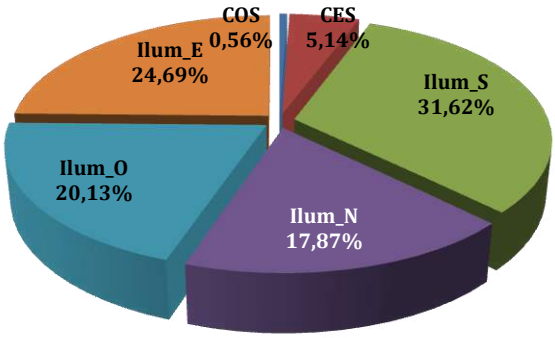


Figure 20: violation des contraintes pour les simulations de la classe 3.

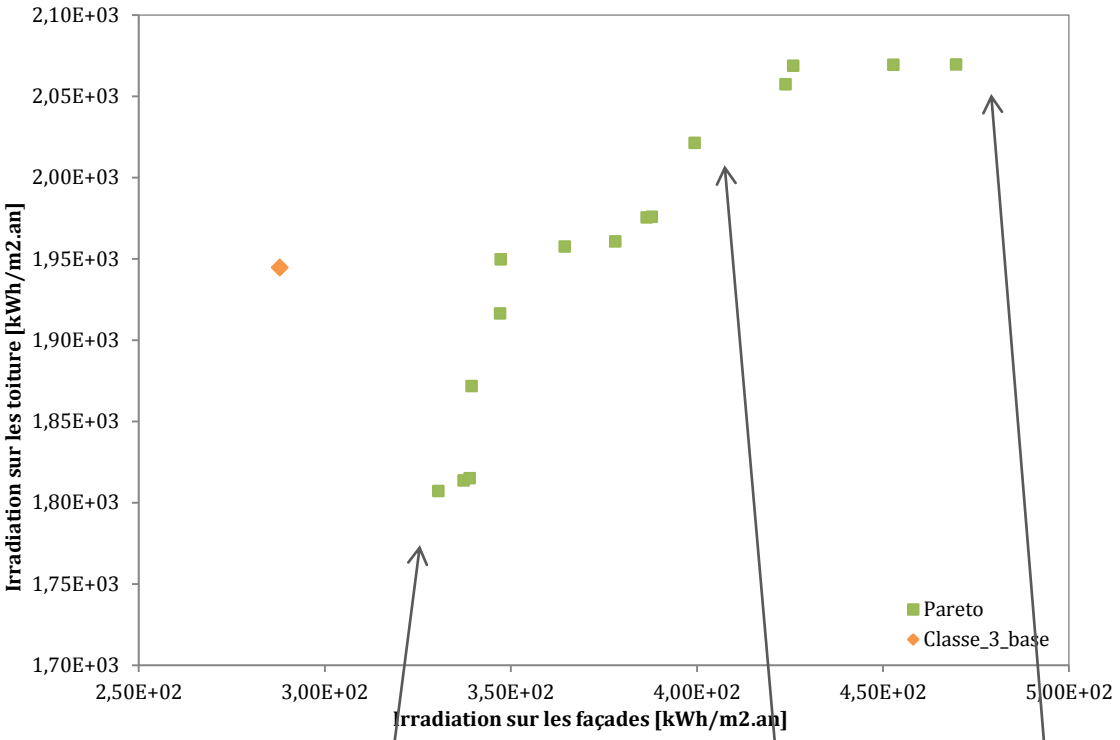
Les solutions optimales ont variées d'un extrême du Pareto (Min) avec une irradiation pour les toitures de 1810 kWh/m².an, pour une irradiation annuelle sur les façades de 331 kWh/ m².an; à l'autre extrême (Max) avec une irradiation sur les toitures de 2070 kWh/ m².an, pour une irradiation annuelle sur les façades des 470 kWh/ m².an (Figure 21).

Pour les résultats de cette optimisation multi objective, nous avons un gain de 6% pour le niveau d'irradiation sur les toits et une perte de 13% en terme de réduction du rayonnement solaire sur les façades, par rapport au cas de base (classe 3). Cependant, un gain très important en terme d'éclairement.

Parmi les projets trouvés dans les extrêmes du front de Pareto, une importante variabilité de l'écart type de la hauteur moyenne construite a été mise en évidence. Cette variabilité a permis la génération de formes qui peuvent représenter des typologies très diversifiées, en fonction des objectifs et des poids qui peuvent être attribués. Plus faible est l'écart de la hauteur, plus forte est le potentiel d'approvisionnement de l'énergie solaire. Les projets intermédiaires du front sont les plus hétérogènes, en terme de hauteur construite (Figure 18), en présentant en moyenne un excellent potentiel solaire (seulement 4% de moins par rapport à la solution appartenant à l'extrême maximale du Pareto), pour en gain de 17% en terme de réduction du rayonnement solaire sur les façades verticaux. Une solution intermédiaire est illustrée dans la Figure 21(le projet **C3(1)2)**.

Si nous comparons cette solution de compromis (intermédiaire) avec le cas de base de la classe 3, nous pouvons identifier une perte de 26% en terme de réduction de l'irradiation sur les façades. La classe 3 à l'origine serait plus efficace sur la minimisation des apports solaires non-souhaitables pour ce contexte climatique et représenterait un potentiel solaire de seulement 2% plus faible, par rapport au projet optimal intermédiaire. Cependant, comme nous le savons, le cas base de la classe 3 présente un niveau moyen d'éclairement insuffisant, par rapport aux valeurs minima établies dans la littérature, ce qui rend le projet infaisable, ce que démontre le graphique de la figure 18.

La difficulté plus importante trouvée dans le projet de cette classe typologique concerne sa mittoyenneté, puique cela peut imposer (comme nous pouvons vérifier par la performance obtenue pour le cas base) une grande réduction de l'incidence solaire moyenne sur les façades et une réduction drastique en termes d'illuminance. Afin de ne pas violer les contraintes d'illuminance imposées pour les façades, les solutions trouvées ont une variation stratégique en terme de hauteur construite et un prospect plus faible. Cet écart entre les hauteurs rend possible le fait que les bâtiments aient toujours une fraction minimale de toutes leurs façades exposées à l'extérieur.



Classe3_base	C3(1)1 Min	C3(1)2	C3(1)3 Max
COS=2,4	COS=2,3	COS=2,1	COS=1,0
CES=0,75	CES =0,74	CES =0,76	CES =0,80
NE=3	NE=3	NE=2	NE=1
ET_hauteur=1,0	ET_hauteur =3,1	ET_hauteur =3,1	ET_hauteur =1,0
Prospect=1,2	Prospecto=2,9	Prospecto=1,6	Prospecto=1,3
Albédo toiture=0,15	Albédo toiture =0,20	Albédo toiture =0,21	Albédo toiture =0,2
Albédo vertical=0,15	Albédo vertical=0,45	Albédo vertical=0,24	Albédo vertical=0,2

Figure 21: résultats de l'optimisation multi objective restreinte par les paramètres du code local. Source: illustration de l'auteur.

Avec des bâtiments plus bas et un prospect de 1.3, l'ilot urbain qui permet de maximiser le potentiel solaire (C3 (1) Max), par exemple, posséde une plus faible influence des ombres portées sur les bâtiments avoisinants et, leurs façades reçoivent, par conséquence, une plus grande incidence solaire. L'écart type de la hauteur de 1m (Figure 22) permet que l'illuminance moyenne de l'ilot soit assurée. Étant donné cet ensemble de caractéristiques morphologiques que genérent une typologie avec une plus forte compacité, c'est-à-dire, une plus grande surface d'enveloppe extérieure par rapport au volume bâti (Cm=0.9), un albédo elévé pourait produire un excés de réflexion sur les surfaces verticales, en augmentant leur irradiation. Ainsi, pour cette solution, l'abédo trouvé a été le plus faible entre les projets optimaux du front.

Pour le scénario où il est possible d'atteindre une meilleure performance pour les façades (C3 (1) Min), la moyenne de la hauteur atteint la limite supérieure de l'intervalle établi pour cette typologie. Ainsi, l'augmentation du prospect moyen a permis d'augmenter l'obstruction à l'incidence

solaire directe dans les surfaces verticales, en réduisant leur irradiation. Avec un écart type plus important de la hauteur moyenne et un albédo maximum pour les surfaces verticales, l'illuminance moyenne de l'ilot a été assurée aux niveaux minima imposés comme contrainte. Néanmoins, de par l'augmentation importante de l'écart de la hauteur (ET_hauteur), nous pouvons également noter une réduction de l'irradiation moyenne sur les toitures, due à la proximité et aux ombres portées par les bâtiments voisins. Toutefois, le niveau d'irradiation sur les toitures pour cette solution de compromis (1890 kWh/m².an) peut être assez satisfaisant, vues les valeurs minimales recommandées dans la littérature.

Nous rappelons que ces solutions ont été trouvées après la convergence de l'algorithme pour un certain nombre d'itérations limité. Les projets dit optimaux sont donc optimaux dans le contexte méthodologique déterminé par cette étude.

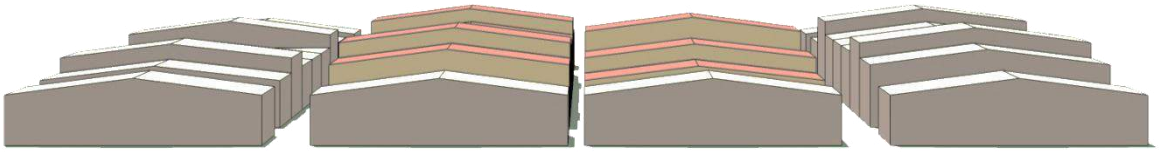


Figure 22: vue de la typologie *C3(1)Max* générée par le processus d'optimisation, en démontrant la variation obtenue pour la hauteur moyenne. Source: illustration de l'auteur.

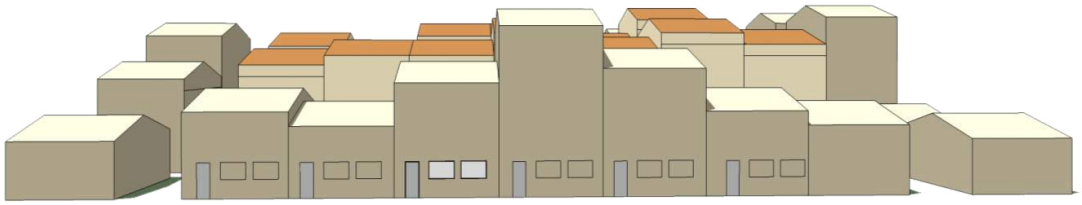


Figure 23: vue de la typologie *C3(1)* générée par le processus d'optimisation, en démontrant la variation obtenue pour la hauteur moyenne des bâtiments. Source: illustration de l'auteur.

A l'instar de la classe 4, une deuxième série de simulations a été mis en place pour la classe 3, afin d'observer l'impact des contraintes morphologiques imposées par le code d'urbanisme.

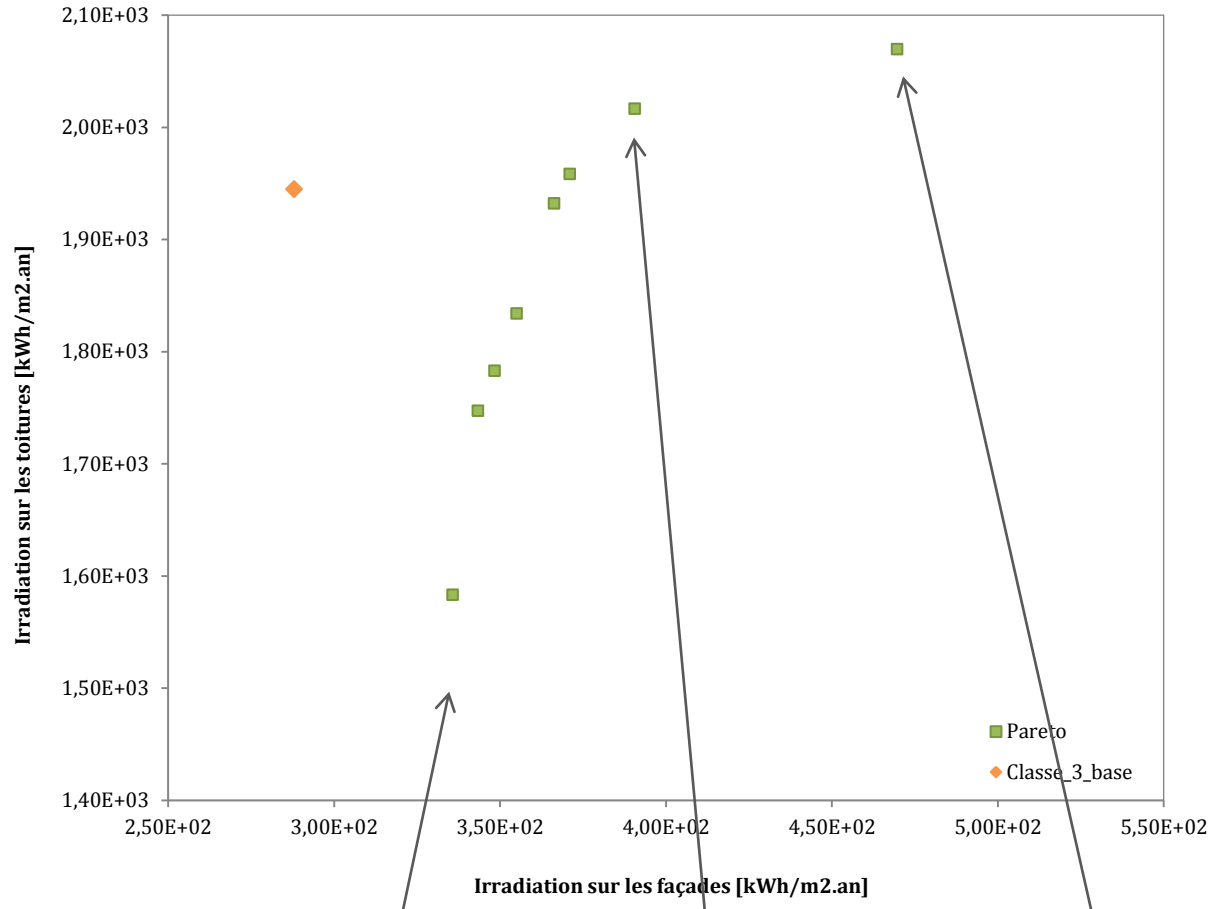
Les solutions optimales ont variées d'un extrême du Pareto (Min) avec une irradiation pour les toitures de 1580 kWh/m².an, pour une irradiation annuelle sur les façades de 336 kWh/ m².an; à l'autre extrême (Max) avec une irradiation sur les toitures de 2070 kWh/ m².an, pour une irradiation annuelle sur les façades des 470 kWh/ m².an (Figure).

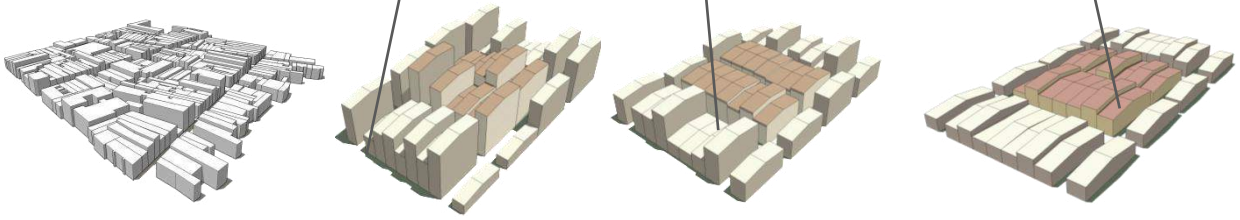
Dans la deuxième série de simulations correspondant aux mêmes objectifs, la même solution qui maximise le potentiel solaire a été trouvée. Et le projet à l'autre extrême a présenté à son tour, une performance inférieure.

Les mêmes observations que pour la simulation précédente peuvent être faites. Une importante variabilité dans la hauteur moyenne a permis la génération de formes qui peuvent représenter des typologies beaucoup plus diversifiées, en fonction des objectifs et des poids qui peuvent y être attribués.

Les projets intermédiaires sont, cependant, plus efficaces que ceux qui ont été identifiés lors de la première simulation de la classe 3, avec une perte de seulement 2% par rapport au meilleur projet (extrême max) en terme de potentiel solaire sur les toits et un gain très important de 17% en terme de réduction de l'apport solaire sur les façades.

Si nous comparons cette solution de compromis avec le cas de base, nous allons vérifier une perte de 26% en termes de réduction de l'apport solaire sur les façades, mais nous rappelons que le projet originel présente aussi un niveau insuffisant d'éclairement naturel par rapport aux seuils établis dans la littérature, ce qui l'amène à être considéré comme un projet infaisable (Figure 24).





Classe3_base	C3(2)1 Min	C3(2)2	C3(2)3 Max
COS=2,4	COS =2,5	COS =2,8	COS =1,0
CES=0,75	CES =0,74	CES =0,75	CES = 0,80
NE=3	NE=3	NE=4	NE=1
ET_hauteur=1,0	ET_hauteur =4,5	ET_hauteur =3,2	ET_hauteur =1,0
Prospect=1,2	Prospect =2,9	Prospect =1,9	Prospect =1,3
Albédo toiture=0,15	Albédo toiture =0,2	Albédo toiture =0,40	Albédo toiture =0,2
Albédo vertical=0,15	Albedo vertical=0,46	Albedo vertical=0,31	Albedo vertical=0,2

Figure 24: résultats de l'optimisation multi objective sans les contraintes du code local. Source: illustration de l'auteur.

La Figure ci-après superpose les deux fronts de Pareto trouvés pour la classe 3 (avec et sans les contraintes imposées par le code local d'urbansime). Nous vérifions que les deux fronts se sont

interceptés, mais que les projets qui minimisent l'apport solaire sur les façades sont supérieurs pour la première simulation (celles avec les contraintes du code). Nous observons que les contraintes du code local ont exercé un impact moins important sur les résultats que pour la classe 4.

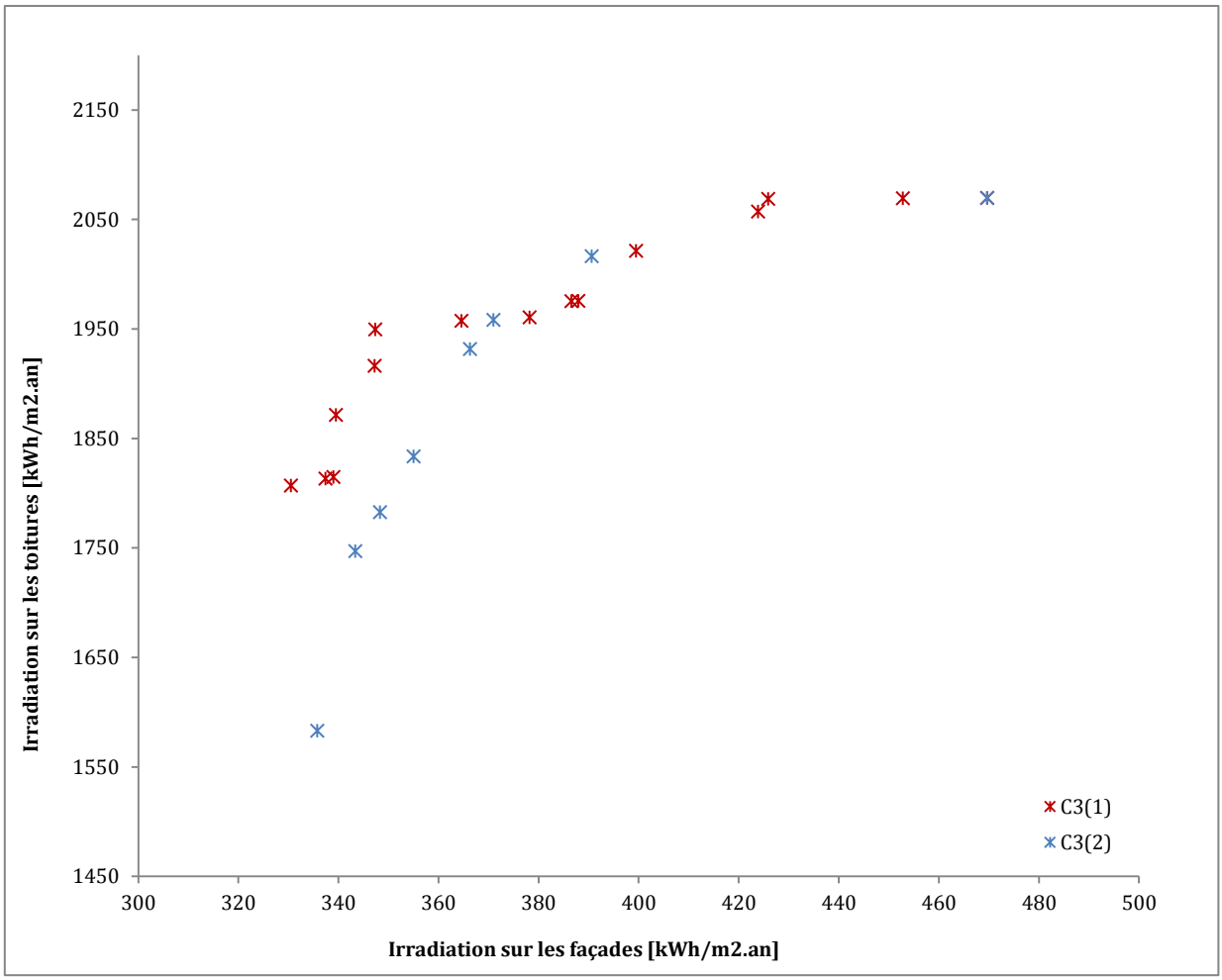


Figure 25: projets des fronts de Pareto pour les deux tours de simulations réalisés pour la classe 3.

Le tableau ci-après fait une synthèse des données, intervalles et résultats des deux séries de simulations pour la classe 3 (Tableau 13).

Nous observons encore que les valeurs présentées pour les facteurs typo-morphologiques peuvent être très proches, comme c'est le cas des deux projets de l'extrême minimale (*C3(1)Min* e *C3(2)Min*), mais en présentant des performances qui sont différentes. Dans ce sens, nous mettons en avant la performance pour le potentiel solaire des toitures. Cette différence peut être attribuée à la variabilité dans l'implantation des bâtiments et de leurs respectives hauteurs bâties. Autrement dit, les ilots peuvent avoir la même moyenne de hauteur, par exemple, mais correspondre à un placement différent des bâtiments, en générant des résultats différents.

En ce sens, il est possible d'affirmer que la magnitude d'impact dans la variabilité de la hauteur des bâtiments (ET_hauteur) annoncée précédemment, doit être aussi associée à la variabilité de l'implantation des bâtiments dans les ilots et dans la maille urbaine.

Cette constatation peut amener à des projets urbains davantage spécifiques et à une échelle plus petite par rapport à ceux trouvés actuellement dans le code d'urbanisme local. Le code actuel part d'un macro zoning urbain classique basé sur la séparation de fonctions et de typologies. Ces discussions seront reprises dans la suite des discussions des résultats.

Tableau 13: résumé des intervalles, contraintes et valeurs trouvées pour les configurations, original et optimisées, pour la classe 3.

Facteurs	**Interval les de valeurs**	**Cas de base**	**Contraintes de projet**		**Solutions optimales (1st) classe 3**		**Solutions optimales (2nd) classe 3**	
			Min	**Max**	**Max**	**Max**	**Min**	**Max**
Albédo toiture			-	-	0,2	0,2	0,2	0,2
Albédo façades			-	-	0,45	0,2	0,46	0,2
Epaisseur (m)			-	-	16	16	16	16
Largeur (m)			-	-	4	4	4	4
Hauteur (m)			-	-	11	4	11	4
BS (m)					0;1	0;1	0;1	0;1
Rue largeur (m)			-	-	4	3	3,7	3
NE					4	1	4	1
COS					2,7	1	2,5	1
CES					0,74	0,8	0,74	0,8
Compacité			-	-	0,7	0,9	0,73	0,96
PM			-	-	2,9	1,3	2,9	1,3
Surface construite (toiture) moyenne			-	-	64	64	64	64
Surface moyenne d'enveloppe			-	-	496	216	462	184
Irrad. solaire toitures (kWh/m².an)	-	1940,7	-	-	1806	2070	1583	2070
Irrad. solarie façades (kWh/m².an)	-	287,9	-	-	331	470	336	470
Irrad. IR façades (kWh/m².an)	-	-54,7	-	-	-37,2	-92,4	-40,5	-92,4
Irrad. IR toitures (kWh/m².an)	-	5,0	-	-	22,4	-2,9	60	-2,9
Illuminance façades ouest (Lux)		7.609	-	-	10.131	17.356	10.208	17.356
Illuminance façades nord (Lux)		7.602	-	-	10.119	14.124	12.096	14.124
Illuminance façades est (Lux)		7.812	-	-	10.359	15.956	10.006	15.956
Illuminance façades sud (Lux)		7.805	-	-	10.319	12.458	10.288	12.458

5. UNE ANALYSE PROSPECTIVE POUR MACEIO

Dans cette dernière étape nous cherchons à passer des contraintes solaires aux opportunités de projet urbain, en croissant les résultats issus de l'optimisation avec d'autres thématiques importantes à la problématique urbaine des villes comme Maceió. Par exemple, pour aboutir à un compromis entre les critères énergétiques imposés au processus de projet, les résultats obtenus ont exprimé une certaine variabilité formelle (principalement en terme de densité bâtie), comme nous avons pu le voir entre les deux extrêmes de notre front de solutions. Cette variabilité morphologique peut être croisée avec des concepts tels que la diversité (ou la mixité urbaine), l'accessibilité et l'adaptabilité.

5.1. Contribution à l'approche interdisciplinaire de l'énergie urbaine

5.1.1. Implantation d'un micro réseau local de production et distribution d'énergie de source solaire

Du point de vue énergétique, si nous imaginons les ilots urbains proposés comme dotées de systèmes photovoltaïques de production d'électricité (tel que des « ilots solaires »), toute les solutions non-dominées proposées pourraient également être considérées de façon intégrée, en générant des unités de voisinage avec des densités et fonctions énergétiques distinctes (différents niveaux d'offre et de demande) (Figure 26).

Les projets d'ilot urbain obtenus qui présentent un plus grand potentiel d'exploitation de l'énergie solaire par leurs toitures, en plus de répondre à toute ou à une partie de sa propre demande d'énergie, ils pourraient aussi fonctionner de manière associée aux bâtiments des autres ilots qui présentent un potentiel plus réduit et une plus grande demande potentielle (étant donné leurs plus grande densité construite) en établissant des micros réseaux énergétiques complémentaires.

Une fois associés, les différents niveaux d'offre et de demande énergétique, à l'intérieur des ilots et entre eux (intra et inter ilot), il serait possible d'imaginer des unités de voisinage avec une relative autonomie énergétique. Cela pourrait être possible à travers la possibilité de création d'un micro réseau de production et de distribution d'énergie locale, dans le but de l'insertion de l'énergie renouvelable et de production décentralisée, pouvant être reliée de façon intermittente au réseau électrique conventionnel des villes. A Maceió, une telle proposition pourrait réduire l'effet de pointe de consommation du réseau électrique. Nous rappelons que dans des villes comme Maceió (de basse latitude), le pic de consommation des équipements extrêmement énergivores (ex. les climatiseurs) – compte tenue de certaines typologies d'usage, comme les bâtiments tertiaires – peut correspondre au pic de production d'énergie solaire.

Pour illustrer cette proposition, le schéma d'un projet a été élaboré. Certains ilots urbains proposés dans notre étude pourraient être implantés et hiérarchisés en fonction de leurs densités et de leurs hétérogénéités. De manière à ce que les ombres portées par les ilots les plus verticaux (de potentiel solaire plus faible) ne réduisent pas l'efficacité des ilots plus horizontaux (de plus grand potentiel), aux heures où la hauteur solaire est la plus faible. En outre, cet exemple d'arrangement urbain pourrait aussi être associé à une logique de réseau de transport, comme montre la Figure 26. Ainsi, les ilots de plus forte densité et compacité, mais de potentiel solaire plus faible pourraient être placés proches des axes structurantes de transport collectif, rendant plus facile l'accès par un plus grand nombre d'habitants, en réduisant l'empreinte écologique.

Les ilots tels qu'indiqués sur l'extrême maximal du front de Pareto des Figure 16 et Figure 21, seraient, donc, les plus grand producteurs potentiel d'énergie via soleil. En étant des ilots de plus faible densité, l'offre pourrait être ainsi liée à la demande des bâtiments des autres ilots de plus faible potentiel et de plus forte demande et, ainsi, successivement, en composant un micro réseau intra et inter ilots.

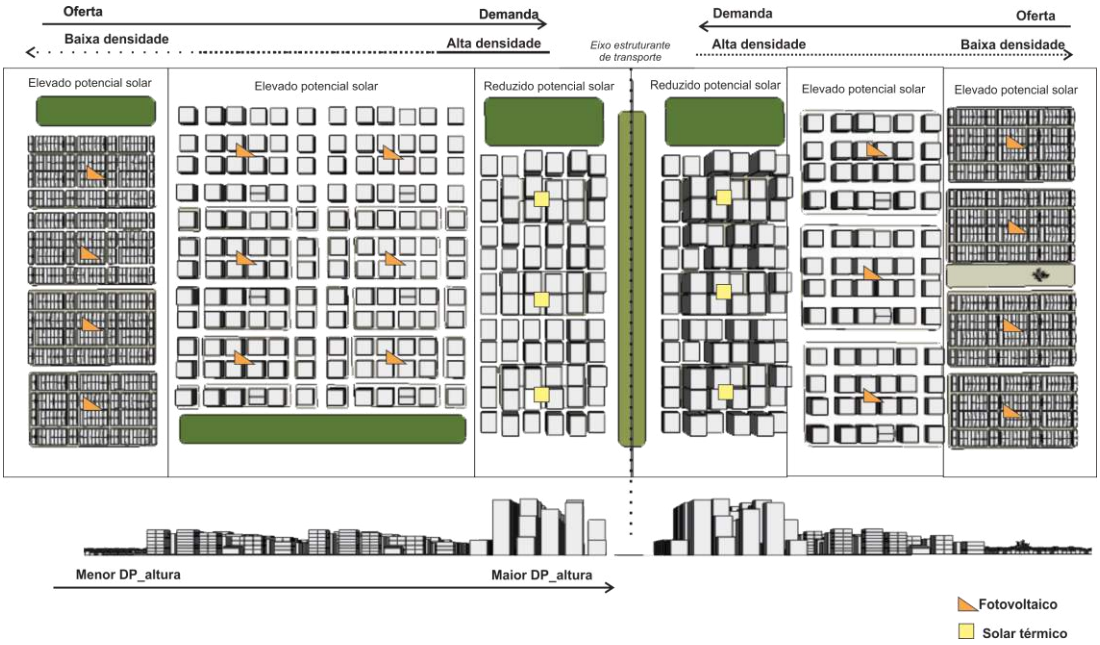


Figure 26: exemple de projet de voisinage a partir des ilots solaires proposés en associant les différents potentiels d'offre et demande.

La Figure 27 ci-dessous compare le potentiel de production d'énergie solaire et de réduction des apports solaires sur les façades pour certains projets obtenus à partir du processus d'optimisation et que sont intégrés dans les schéma de la figure précédente.

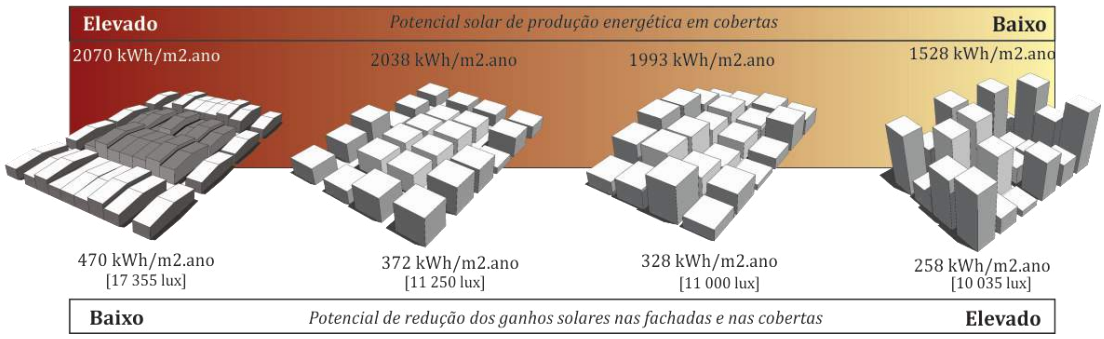


Figure 27: comparaison entre projets de plus fort et plus faible potentiel d'offre d'énergie solaire et de réduction des apports solaire.

5.1.2. La proposition d'ilots mixtes et multifonctionnels

D'après les résultats obtenus, un large répertoire de possibilités formelles entre les deux extrêmes du Pareto a pu être proposé.

Cette variabilité de la forme bâtie, notamment en terme de verticalité et d'occupation du sol, peut permettre de constituer des solutions urbaines très diversifiées aussi dans d'autres aspects : diversité de l'usage et d'occupation du sol, du paysage construit et de l'occupation par différentes classes sociales.

D'un extrême à l'autre du front de Pareto, ces solutions suggèrent des ilots urbains très contrastés et parmi les projets intermédiaires, une plus forte complexité. Cette complexité est traduite dans ce travail en tant qu'opportunité de diversité intra et inter ilot, avec l'implantation de l'habitat collectif (les tours verticales hautes), à côté de logements sociaux à quatre étages et de bâtiments d'un à trois étages avec du commerce, ou encore de l'habitat individuel, de manière à introduire diversité, proximité et connectivité (Figure 28).

Le mixité ou la diversité urbaine consiste à la répartition équilibrée de différentes fonctions

urbaines à l'intérieur d'une structure donnée, compte tenu des facteurs sociaux et économiques (ex. logement social, particulier, activités économiques, commerce, services, etc.) au détriment de la «spécialisation urbaine » ou du zoning urbain classique à l'échelle de l'agglomération ou de la ville. Cette répartition plus équilibrée raccourcit les distances parcourues par les habitants pour répondre à leurs besoins quotidiens et leurs activités plus récurrentes, en évitant des flux de transport unidirectionnel créé par les espaces monofonctionnels (toujours prévus dans beaucoup de codes d'urbanisme).

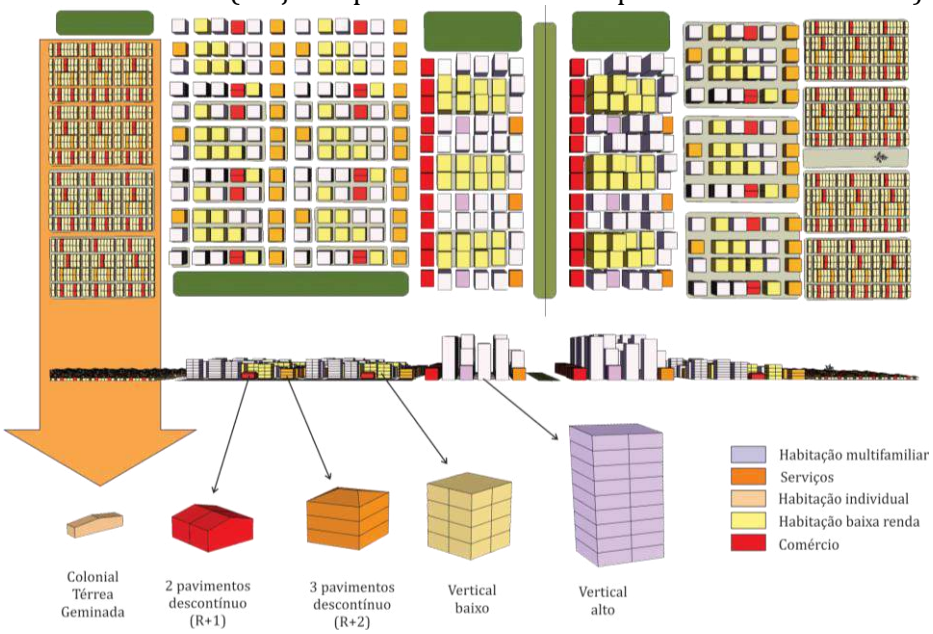


Figure 28: proposition d'intégration du mixité urbain d'usage et occupation du sol à des différentes formes d'ilot urbain obtenues.

En outre, la densité doit être adaptée au contexte dans lequel elle a été établie : plus que la densité elle-même, c'est surtout le contraste entre les différentes densités – la granulométrie des densités (MAUGARD, 2007), qui va définir la ville. Des études menées par Salat (2011) et Arantes (2012) suggèrent également que la variété typologique contribuerait à l'acceptabilité de la densité, autrement dit, à la création des « lieux d'intensité ».

La diversification des formes urbaines peut aussi contribuer à « augmenter l'efficacité globale des villes, (ou au moins des quartiers/districts) et à réduire l'impact sur l'environnement » (ROGERS, 2000). Associée à la présence de paysages naturels, l'exploration et l'intégration de nouvelles technologies à l'échelle du voisinage (tel que l'utilisation de systèmes photovoltaïques pour la production d'électricité à partir du solaire), le mixité de formes urbaines et la granulométrie de la densité seraient une manière de compenser les inconvénients de certaines typologies, pour atteindre une performance acceptable à une échelle plus large.

A partir des discussions et répercussions obtenues avec les résultats de ce travail de recherche, nous pensons que :

- Il peut exister une compatibilité de la diversité formelle trouvée dans l'étude d'optimisation, avec la diversité ou la complexité existante actuellement dans beaucoup de quartiers de villes brésiliennes. Dans le cas de Maceió, malgré la prédominance de certaines caractéristiques morphologiques dans ses quartiers (comme identifié au début de cette étude), il existe encore une complexité, à une échelle plus fine, et des contrastes importants liés à la forme construite mis en évidence, spécialement, dans les quartiers qui subissent des modifications plus intenses et plus rapides, comme dans la plaine maritime de la ville. Néanmoins, la complexité suggérée par la présente étude est programmée.

- Il est possible de proposer un ensemble d'autres nouveaux indicateurs qui puissent être intégrés dans l'approche, afin de tenir compte de la complexité de la forme à l'échelle de l'ilot ou de l'unité de voisinage, ainsi que la dynamique comme opportunité de nouvelles exigences. Ces indicateurs devraient tenir

compte de l'hétérogénéité de la hauteur construite (comme à travers l'écart type de la hauteur) et d'indicateurs plus qualitatifs qui puissent aider à l'aménagement des espaces, tel que l'accessibilité, la diversité, la disponibilité et l'évolution.

- Dotée d'un assez ample répertoire de dispositifs urbains variés, en terme de coefficient d'emprise, d'occupation, de gabarit, de prospects définis par parcelle, l'ilot solaire peut constituer l'élément ou le type de base du tissu urbain, pour les projets de renouvellement ponctuel. En outre, entre les projets variés prescrits à partir de critères énergétiques, il n'y a aucune solution architecturale spécifique. Dans le schéma global des projets proposés, en terme de densité et de diversité, les maitres d'œuvre et les maitres d'ouvrage ont une certaine liberté de conception pour ces bâtiments.

5.2. Aide à la décision urbaine

5.2.1. Proposition d'inclusion des nouveaux indicateurs de la forme urbaine dans le système

La forme et la densité des villes ne sont pas uniquement liées aux relations ou mesures physiques, tel que employées dans cette étude (ex. COS, CES, Verticalité, etc.). La densité urbaine est également définie par des éléments qualitatifs et perceptifs, typiques de contextes urbains, moins présentes dans les critères physiques examinés (ex. potentiel solaire, illumination), mais probablement aussi importantes dans la perception par les usagers.

Afin d'étudier qualitativement les résultats de cette recherche, nous proposons d'évaluer les projets obtenus à partir de quelques métriques qui apportent d'autres significations à la densité physique trouvée, comme par exemple, celles liées à la question de la mixité urbaine mentionnée précédemment. Pour cela, certains des paramètres déjà discutés ont été utilisés pour qualifier l'intensité des aspects relatifs à la diversité (morphologique et d'usage potentiel attribuée), à l'accessibilité et à l'adaptabilité (ADOLPHE, 2013; SALAT, 2011).

La *diversité* est un concept beaucoup utilisé quand nous parlons de développement durable. Appliqué au développement urbain durable, il exprime souvent la mixité d'usage du sol. Cette diversité physique peut être généralisée pour la morphologie de l'espace, la diversité sociale et fonctionnelle d'un site urbain (ADOLPHE, 2013). Pour caractériser cet aspect nous utilisons les indicateurs suivants: le coefficient d'occupation du sol, le coefficient d'emprise au sol, l'écart type de la hauteur moyenne bâtie et le rapport de la surface bâtie et non-bâtie (présence d'espaces vides au détriment des espaces construits, pour la création de sols perméables, par exemple).

L'accessibilité d'un lieu, définit, la façon dont un ou plusieurs individus, en utilisant plusieurs moyens de transport, peuvent se déplacer d'un lieu à l'autre. Premièrement, l'accessibilité dépend de distances entre les lieux d'origine et de destination. Dans le macro-zoning, la compacité de l'étalement urbaine et le niveau de polarisation de l'urbanisation dans de diverses centralités d'un site urbain peuvent affecter drastiquement ces distances (CERTU, 2002) (MORENCY, 2006). Les indicateurs de compacité ou de dispersion urbaine peuvent être utilisées pour qualifier cette problématique. Pour illustrer cet indicateur, nous utilisons une des métriques proposée par Adolphe (2013) : la compacité urbaine. Cette métrique est définie par la racine carrée du ratio de la surface urbaine obtenue (dans ce cas, la surface de l'ilot) par son périmètre. D'autres aspects extrêmement importants ne sont pas considérés ici, tels que les supports physiques liés à la mobilité et la connectivité du réseau urbain, entre autres, qui sont aussi liés à cette problématique.

Il est important de mentionner un autre caractère extrêmement important dans le développement durable des villes : *l'adaptabilité* des espaces. C'est-à-dire, la capacité des espaces d'évoluer et de de s'adapter à de nouvelles demandes et de nouvelles complexités. Seulement à titre illustratif, nous qualifions ici la capacité d'adaptabilité des ilots.

D'après Salat (2011), l'évolution des trames urbaines traditionnelles sont plus facilement adaptables et peuvent se reproduire par des redistributions du tracé viaire, la densification de patios internes ou les espaces de fonds des parcelles et le réaménagement des parcelles (SALAT, 2011ª). Cette

faisabilité est attribuée en partie à la forme du parcellaire urbain. Les plus petits ilots peuvent être densifiés individuellement sans trop endommager la trame urbaine. Darley et Zunino (2010) suggèrent que la régularité des tissus composés d'immeubles continus, alignés sur rue et des hauteurs relativement homogènes (avec des faibles écarts type de la hauteur bâtie) facilitent l'évolution, et permettent donc une insertion ou une modification plus facile dans la continuité de l'existant, en prolongeant les dimensions, la forme et l'alignement des ilots. Les pavillons individuels peuvent très facilement être densifiés et permettre une modification des parcelles. En contrepartie les mailles avec des bâtiments discontinues et de très forte densité verticale, présentent un potentiel d'adaptation plus difficile.

A partir des indications suggérées par Salat (2011) et par Darley et Zunino (2010), la forme des ilots urbains ont été qualifiées par rapport à leur capacité d'adaptation à des nouvelles interventions. Pour tout indicateur et ses respectifs paramètres morphologiques mentionnés, il a été attribué une note de 1 a 5, afin de qualifier et rendre plus facile la lecture des formes obtenues (voir tableaux 14-17).

5.3. Dispositifs pour l'aide à l'intervention urbaine

5.3.1. Proposition d'un code de micro-urbanisme

Les codes d'urbanisme ont un rôle crucial dans les processus de transformation de la morphologie construite dans les villes et, par conséquence, sur la performance environnementale des espaces. Au Brésil, les codes d'urbanisme présentent souvent des paramètres restrictifs basés sur des macro-zonings classiques monofonctionnels. Ces types de macro-zoning amènent progressivement les secteurs des villes, comme à Maceió, à une certaine uniformisation et sectorisation des fonctions et de la forme bâtie. Ces règles suggèrent la création de densités et de typologies spécifiques par quartier, basées souvent sur des intérêts économiques et politiques locaux. La sectorisation du tissu urbain sépare des districts par classe de revenu (ex. résidentiel I, II, III, résidentiels d'intérêt social, etc.), par des fonctions (ex. résidentiel, commercial, touristique, historique), ce qui entraine une forte ségrégation des espaces et des usages et une augmentation des déplacements. En outre, la densité établie sur certaines zones a surchargé l'infrastructure, à l'exemple du quartier situé sur la plaine côtière de Maceió, dû au décalage entre la croissance de la demande et de l'évolution de l'infrastructure.

Très peu d'efforts ont été effectivement mis en œuvre pour que la planification proposée par des dispositifs régulateurs, tels que les règlements d'urbanisme, puisse aider à contrôler la qualité environnementale, et assurer une efficacité du point de vue énergétique des espaces bâtis. Il n'est pas suffisant d'établir des règles sur les paramètres morphologiques importants, tel que les densités, si elle ne sont pas basées sur des études multicritères ou si l'offre d'infrastructure (ex : l'électricité, l'eau, l'accessibilité, etc.) n'est pas anticipée.

Ce travail a mis en évidence les importants aspects de la forme urbaine au croisement des contraintes solaires et énergétiques, afin de contribuer avec des éléments de réponse qui soient pertinents à l'aide à la décision pour l'aménagement des villes, en permettant d'anticiper l'offre et la demande d'énergie d'origine solaire (extrêmement abondante dans la région).

À partir du répertoire de formes d'ilot solaire proposé dans ce travail, il est possible d'extrapoler les connaissances obtenues vers l'élaboration d'une bibliothèque de variantes possibles dans les mêmes intervalles de paramètres typo-morphologiques, à l'instar d'une grammaire de formes. Le choix de l'ilot est donc ici fonction des priorités (à la fois morphologiques et énergétiques) établies pour chaque district urbain.

Ainsi, il est possible de proposer des dispositifs d'adaptation, mais également d'insertion ou de modification dans l'actuel règlement d'urbanisme de Maceió : ce que nous appellerons un règlement de micro-urbanisme solaire. La proposition serait d'établir un urbanisme de granularité plus fine d'intervention, c'est-à-dire, en attribuant un ensemble de règles à l'échelle de la parcelle, par ilot ou par unité de voisinage (ex. gabarit par bâtiment ou ilot à gabarits multiples). La typologie des bâtiments resterait conditionnée à des paramètres restrictifs établis par parcelle urbaine à l'intérieur des ilots. Le code d'urbanisme à l'échelle de l'ilot permettrait un contrôle plus important de la qualité

environnementale et énergétique des espaces construits, compte tenu de l'impact important produit par la forme de l'environnement proche dans la performance des bâtiments. Par exemple, dans le cas des ilots proposés, si les hauteurs construites ou l'albédo prescrit ne sont pas respectés, le potentiel solaire prévu ne sera pas le même, en défavorisant l'efficacité du système. De la même façon, pour le potentiel de la forme à réduire ou augmenter l'irradiation et l'illumination sur les façades.

Avant que la ville soit totalement consolidée, l'approche de ce travail offre un certain nombre de formes proposées à partir de critères morphologiques et énergétiques, de façon intégrée. Le processus d'optimisation de la géométrie vers la recherche de projets plus efficaces, a permis d'établir au moins 85 projets différents (projets du front de solutions non-dominées), à partir desquelles, certaines peuvent être illustrées individuellement et contrastées dans tableaux 14 au 17. Cette approche offre, donc, une grande liberté de choix pour l'évolution de la ville, en permettant des réflexions sur une assez large variété d'ilots et de rangements possibles (à l'échelle du voisinage).

Quelle typologie d'ilots, quelle hétérogénéité ou diversité pour un contexte urbain donné? Quelle typologie d'ilots est plus compatible avec l'hétérogénéité d'un voisinage existant ? Quelle typologie inter-ilots ? Autrement dit, comment organiser un quartier urbain de manière à ce que la densité, l'usage, le potentiel de production et la demande potentielle d'énergie, puissent être prévus ?

Nous proposons, donc, à partir des résultats obtenus, l'élaboration de **deux outils**, afin d'aider les acteurs urbains à répondre aux questions abordées :

- *Elaboration d'un code de micro-urbanisme solaire*.

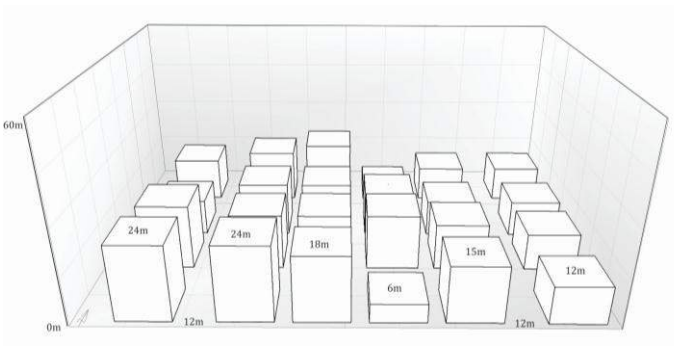
Nous proposons l'adoption de paramètres établis par type d'ilot. Les tableaux ci-après montre un schéma possible d'un micro-zoning à l'échelle de l'ilot urbain proposé. Pour chaque type d'ilot, il est possible d'identifier son potentiel typologique en terme de densité (COS et CES), de diversité, d'accessibilité, d'adaptabilité, d'offre et de demande énergétique potentielle, et les dimensions par bâtiment ou par parcelle, à partir de leurs potentiels solaire.

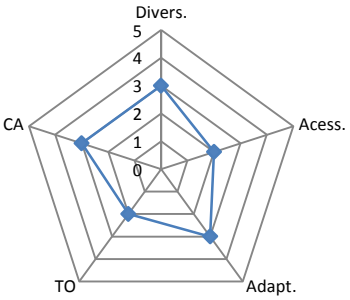
Les tableaux illustrent et décrivent le profil et la performance estimés pour quelques ilots obtenus à partir du processus d'optimisation des paramètres morphologiques et des contraintes de la ville de Maceió. Nous cherchons, dans la suite, à comparer la performance de quelques types qui pourraient être employés pour l'aménagement et le micro-zoning d'un district urbain de la ville. Ensuite, un exemple d'intervention rapide est aussi indiqué.

Tableau 14: table synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C4(1)6.

ILOT SOLAIRE C4(1)3		
Potentiel d'offre **Elevé**	Potentiel de demande **Moderé**	Potentiel d'économie **Réduit**

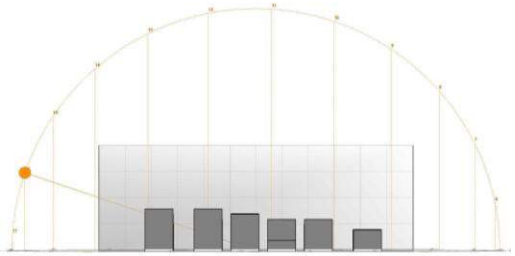
TYPO-MORPHOLOGIE

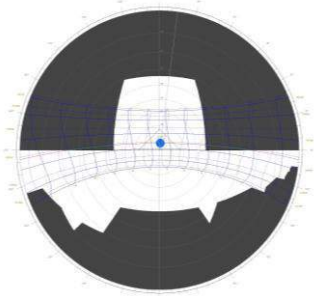




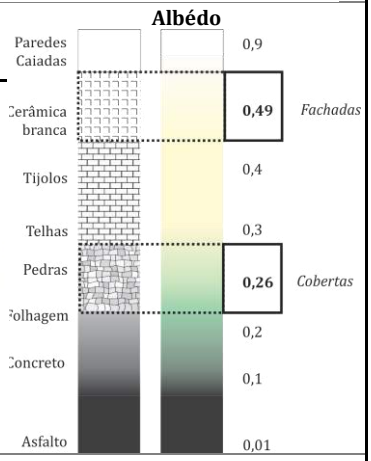
Typologies compatibles:
Rez-de-chaussée (RC) +1 étage [*individuel*] – R+2 [*horizontal*] - R+3 [*vertical bas*] - R +5 [*vertical*] - R +7 [*vertical*]

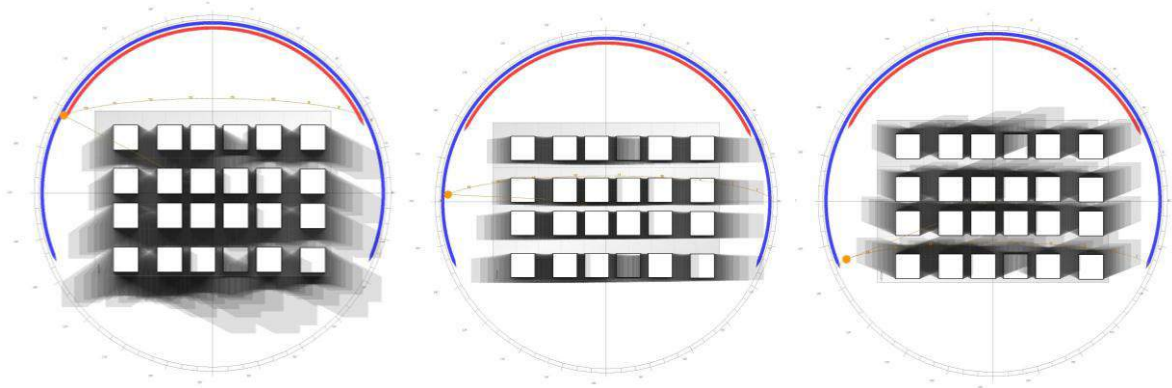
MORPHO-SOLAIRE





Vue du ciel





Solstice d'HIVER *Equinoxes* *Sosltice d'ETE*

ENERGIE

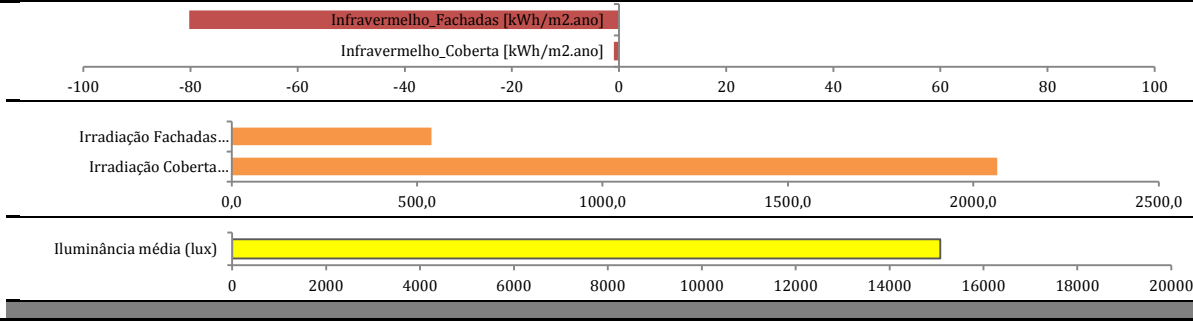
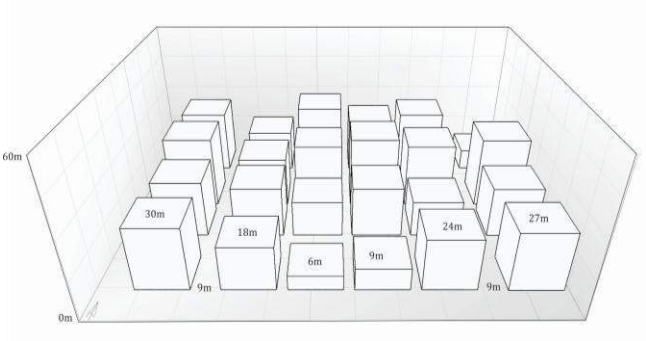


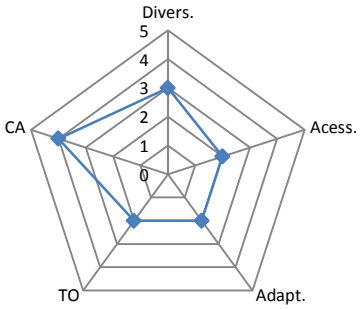
Tableau 15: table synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C4(1)8.

ILOT SOLAIRE C4(1)1

Potentiel d'offre Réduit	Potentiel de demande **Elévé**	Potentiel d'économie **Elévé**

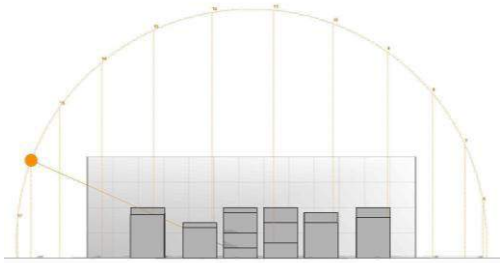
TYPO-MORPHOLOGIE

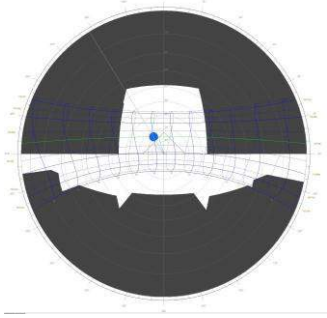


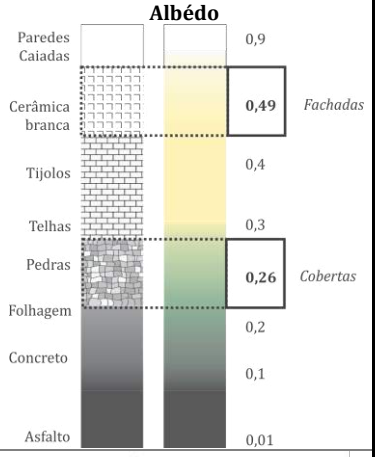


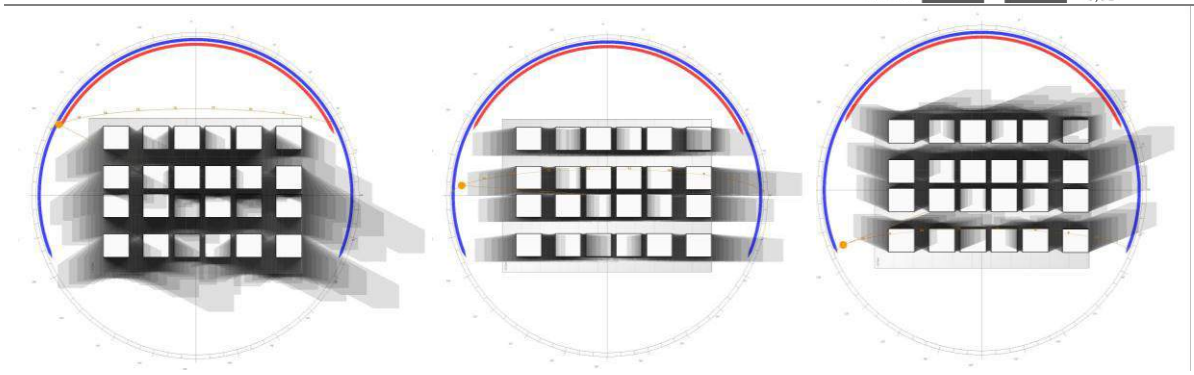
Typologies compatibles: non-mitoyennes
Rez-de-chaussée (R) +1 étage [*individuel*] - R +2 [*horizontal*] - R +3 [*vertical bas*] - RC +5 [*vertical*] - R +7 [*vertical*] – R+8 [*vertical*] – R +9 [*vertical*]

MORPHO-SOLAIRE









Solstice d'HIVER *Equinoxes* *Solstice d'ETE*

ENERGIE

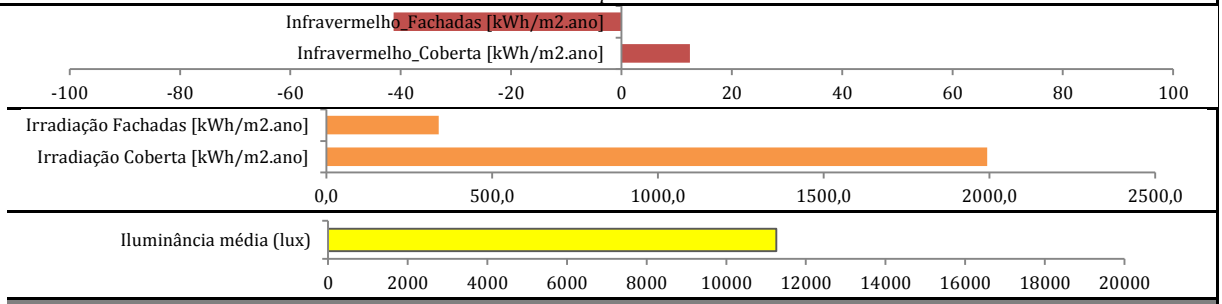
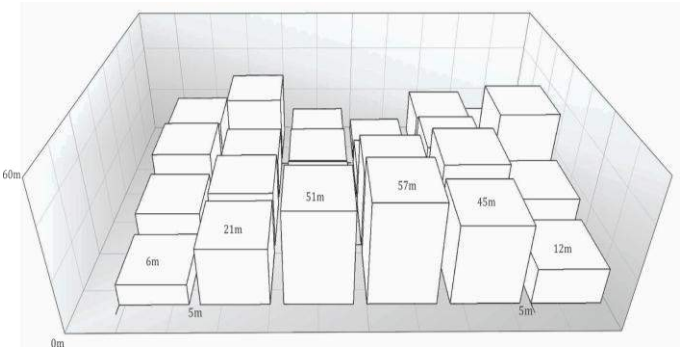
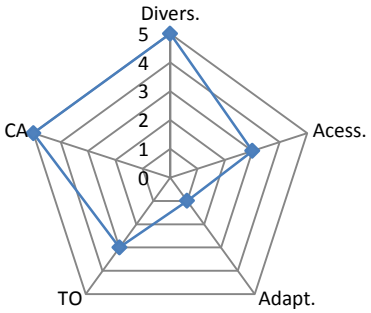


Tableau 16: table synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C4(2)9.

ILOT SOLAIRE C4(2)1		
Potentiel d'offre Réduit	Potentiel de demande **Elévé**	Potentiel d'économie **Elévé**

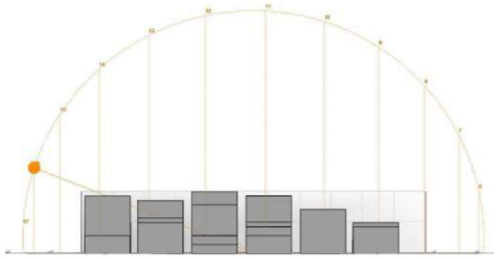
TYPO-MORPHOLOGIE

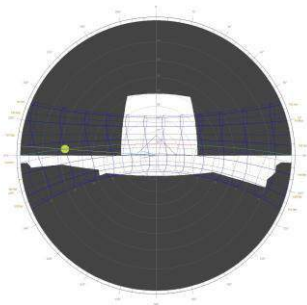


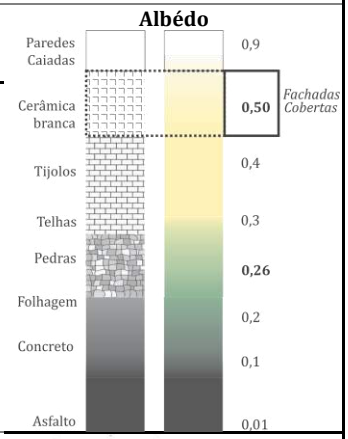


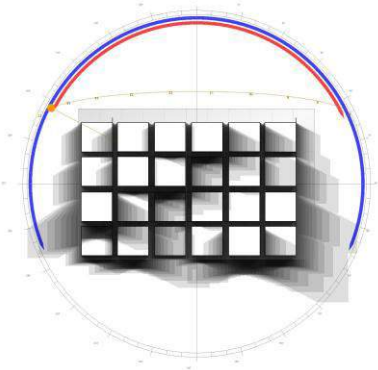
Typologies compatibles: non-mitoyennes
R +1 [*individuel*] - R +2 [*horizontal*] - R +3 [*vertical bas*] - R +5 [*vertical*] – R +7 [*vertical*]

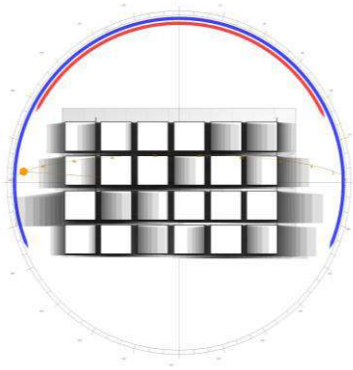
MORPHO-SOLAIRE

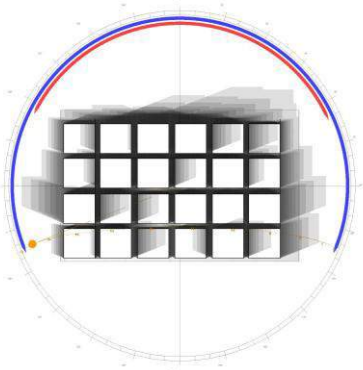












Solstice d'HIVER *Equinoxes* *Solstice d'ETE*

ENERGIE

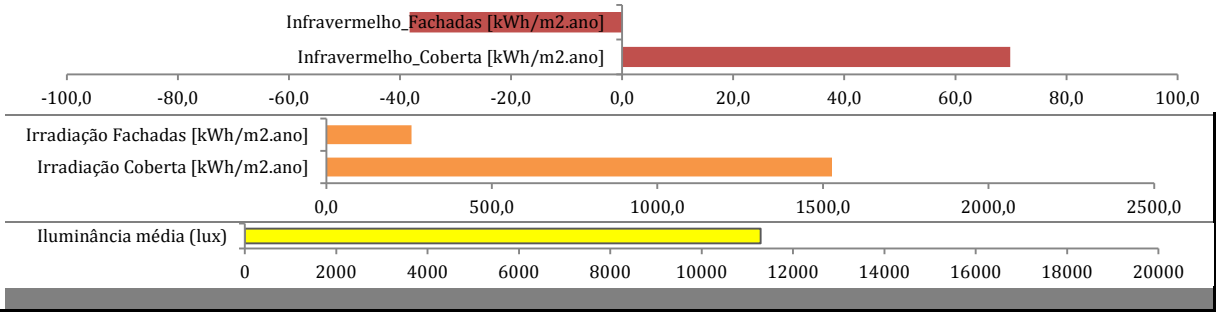
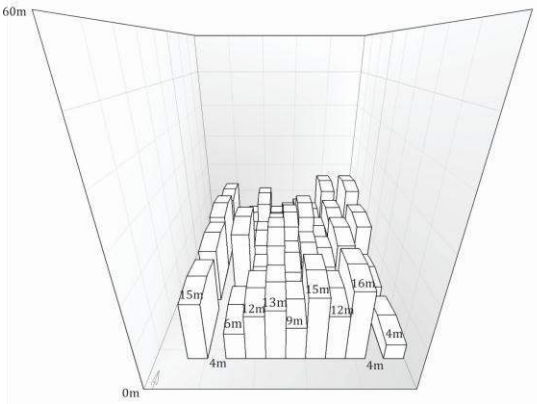


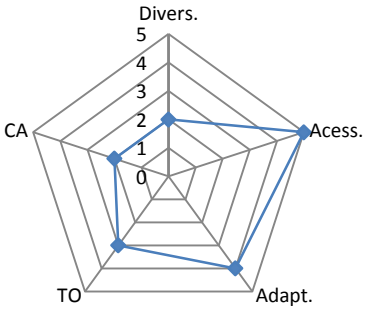
Tableau 17: table synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C3(2).

ILOT SOLAIRE C3(2)1

Potentiel d'offre **Réduit**	Potentiel de demande **Moderé**	Potentiel d'économie **Elévé**

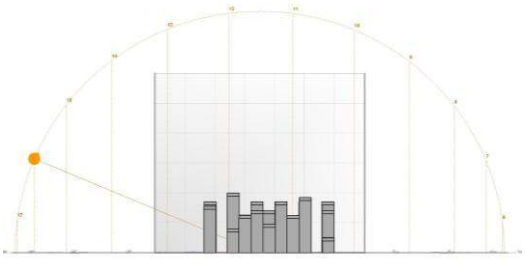
TYPO-MORPHOLOGIE

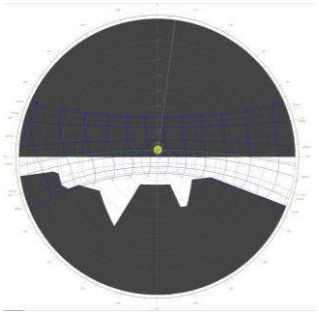


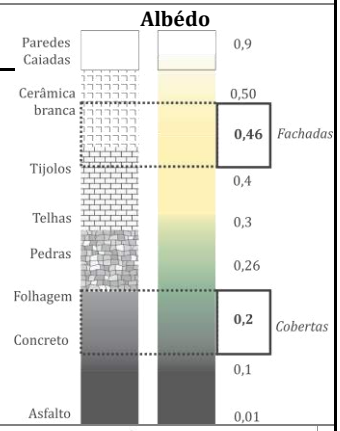


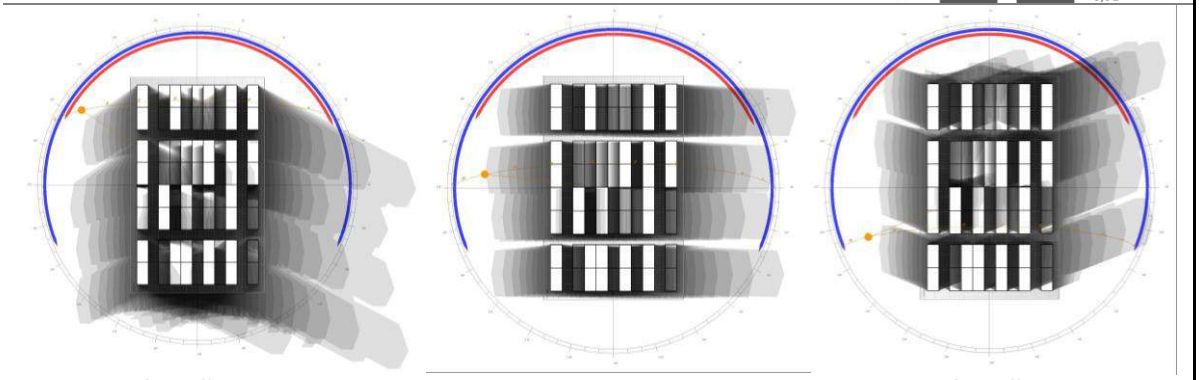
Typologies compatibles: mitoyennes
R+1 [*individuel*] - R+2 [*horizontal*] - R+3 [*vertical bas*]

MORPHO-SOLAIRE



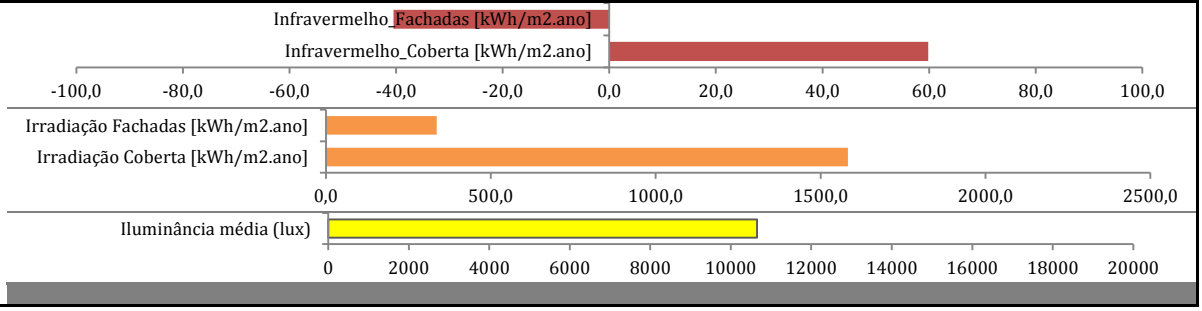






Solstice d'HIVER *Equinoxes* *Solstice d'ETE*

ENERGIE



Comme illustration, nous avons cherché à utiliser quelques possibilités typologiques d'ilot solaire pour la proposition d'une intervention sur un quartier urbain résidentiel, de morphologie horizontale et d'adaptabilité relativement intéressante, situé sur la plaine côtière de Maceió. Les schémas nous montre donc un futur possible, en considérant l'aménagement à l'échelle de l'ilot et du voisinage (Figure 29 - 31). Quatre types d'ilots solaires ont été aménagés pour le voisinage indiqué, en adaptant les dimensions et le tracé existants. La variabilité à l'intérieur des ilots et la complémentarité énergétique entre les ilots qui ont été proposés permettent d'examiner la complexité formelle (du paysage et des usages) nécessaire à un développement plus durable de la ville.



Figure 29: exemple d'intervention ponctuelle dans le quartier de la plaine côtière de Maceió - plan. Source: illustration de l'auteur.

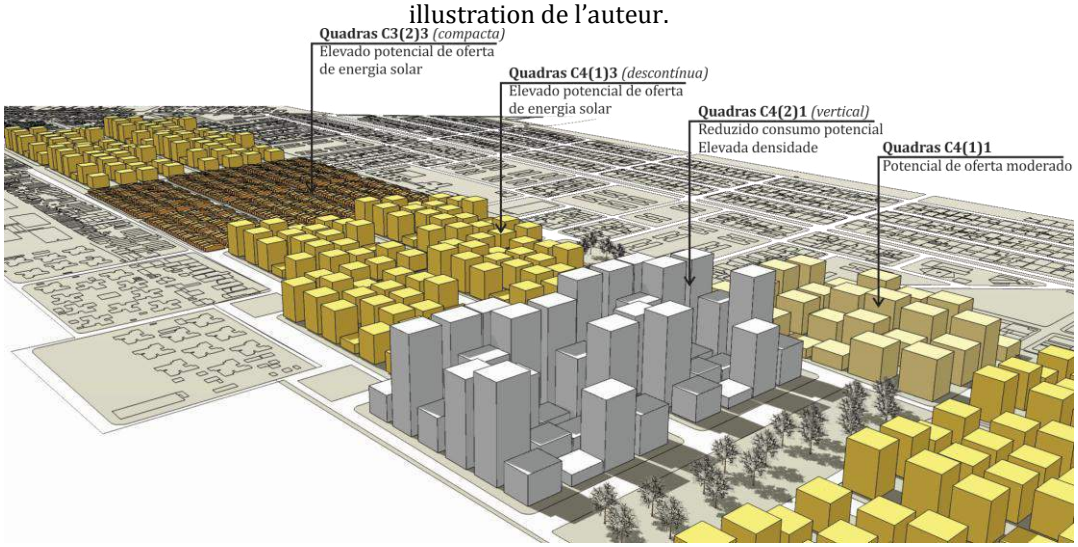


Figure 30: exemple d'intervention ponctuelle dans le quartier de la plaine côtière de Maceió – perspective et spécifications des typologies d'ilot solaire. Source: illustration de l'auteur.

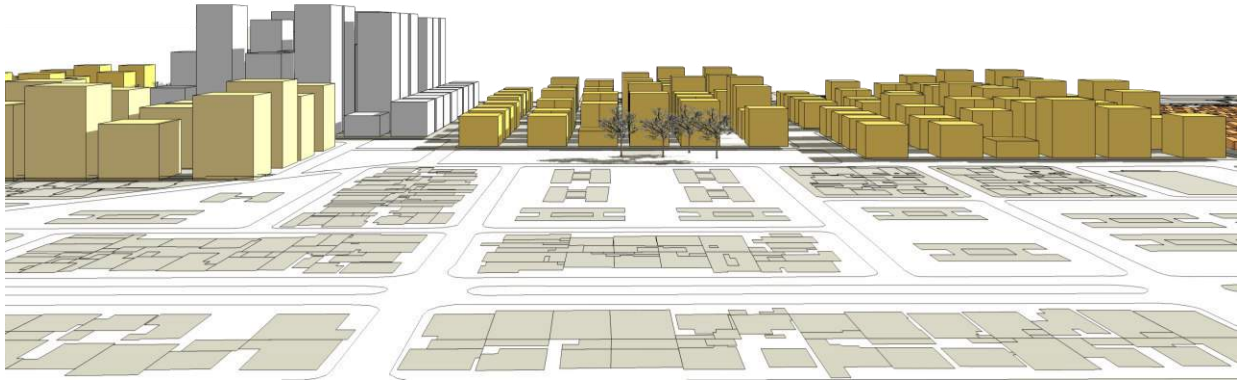


Figure 31: exemple d'intervention ponctuelle dans le quartier de la plaine côtière de Maceió - perspective. Source: illustration de l'auteur.

- Elaboration d'un banc de données systématisé

Nous proposons d'établir une série de données à partir des simulations réalisées. A partir de modèles mathématiques existants, il est possible d'interpoler les points non-calculés entre les points correspondant aux projets proposés1, pour construire un large échantillon de projets ou une surface de réponse. Cette surface permettrait de rendre disponible les réponses (du potentiel solaire) trouvées pour une gamme complète de combinaisons possibles à partir des paramètres étudiés.

Un tel outil rendrait facile la proposition des typologies que puissent être comptabilisées de façon efficace et compatible avec la complexité déjà existante, en s'adaptant au processus de décision.

Une des méthodologies utilisable est la méthodologie de la surface de réponse (MSR). La MSR, aussi connue comme un modèle substitut, est une technique très utile pour la modélisation et l'analyse des applications où la réponse d'intérêt subit une influence de plusieurs variables et dans lesquelles l'objectif consiste à optimiser cette réponse. D'après Montgomery et Runger (2009), la première étape de la MSR consiste à trouver une approximation appropriée pour la vraie relation entre la réponse et les variables indépendantes.

L'utilisation de la MSR est particulièrement intéressante pour le problème abordé dans ce travail, car il implique l'analyse dynamique du bilan radiatif des façades de bâtiments à l'échelle urbaine, ce qui demande un temps de calcul relativement élevé, dû à l'échelle de travail. Dans le but de réduire ce coût et d'offrir plus d'efficacité au processus d'optimisation, il devient approprié d'utiliser des méta-modèles pour cartographier le comportement des géométries possibles en termes de paramètres de réponse d'intérêt, ce qui permet la prévision de cette réponse en fonction seulement des données d'entrée du système. À partir de cette cartographie, dans un processus d'optimisation, l'analyse dynamique peut être remplacée par la consultation directe de la surface de réponse cartographiée. La surface de réponse fournit des résultats fiables et est capable de réduire significativement le coût informatique associé à l'analyse d'optimisation.

Dans la littérature, il est possible de trouver des références diverses sur la description et l'application de techniques d'optimisation basées sur des méta-modèles (MYERS ET MONTGOMERY, 1995; WANG et al., 2001; WANG ET SHAN, 2007; GOMES, 2007; FONSECA, 2009; SONG et al., 2010). Dans ces références, les auteurs utilisent la MSR en ajustant les méta-modèles sur la base d'informations obtenues empiriquement dans les analyses précédentes et ils utilisent efficacement la surface cartographiée à partir du processus d'optimisation.

Les résultats présentés dans la littérature démontrent l'importance et les bénéfices accordés par l'utilisation de techniques de méta-modèles associées à des processus d'optimisation. Cette approche, néanmoins, n'est pas intégrée à la présente étude, mais son utilisation est fortement recommandée et suggérée pour la continuité du travail.

Uniquement à titre d'illustration, une surface de réponse simple a été construite à partir d'un des ensembles de simulation produits, pour certaines des variables étudiées et à l'aide du modèle évolutionnaire de régression (*Evolucionary Design model*) (Figure 32). Nous ne détaillerons pas ici la méthodologie ni les procédures mathématiques engagées dans la constitution de cette surface, car il ne fait pas partie des objectifs de ce travail, mais des déroulements futurs de la recherche.

[1] L'ensemble de simulations (de huit séries de simulations), a permis de générer plus de 40.000 projets restreint d'ilot urbain faisables pour différentes performances énergétiques..

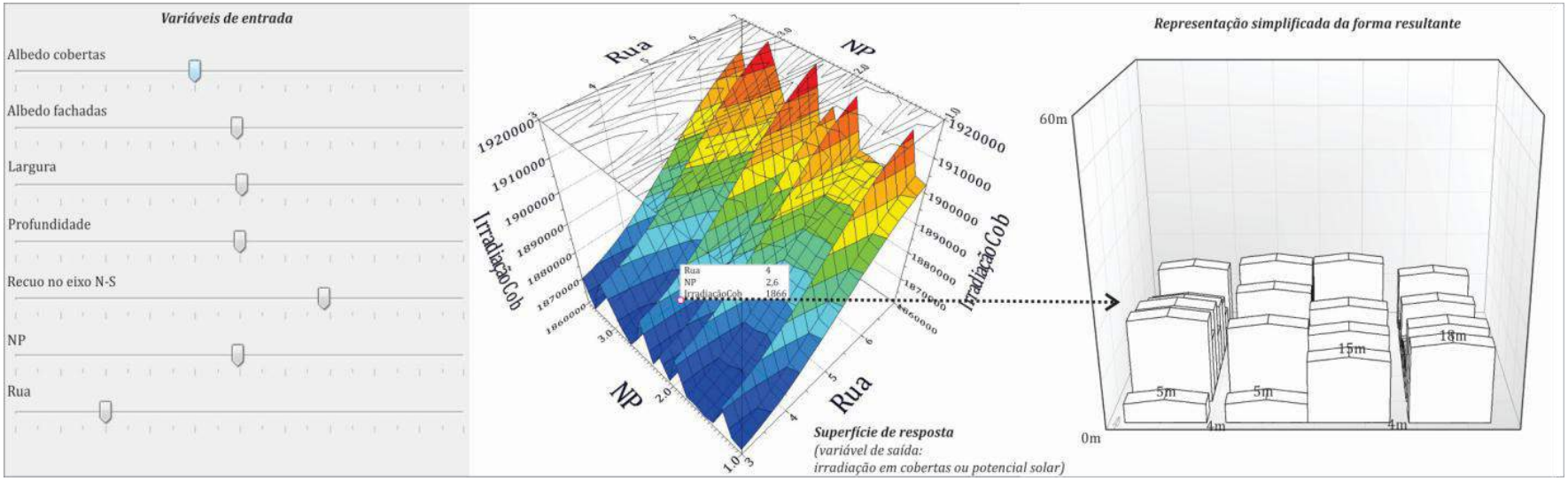


Figure 32: maquette d'un outil d'aide à la décision à partir de la méthode MSR à l'aide d'un algorithme de régression évolutionnaire. Source: adapté de modeFRONTIER, 2013.

6. CONCLUSIONS

Compte tenu de la complexité de la morphologie urbaine et des interactions entre les différentes échelles du bâti (urbaines et architecturale), ce travail a été motivé par la connaissance toujours limitée sur l'adaptation des typologies urbaines pour relever le défi énergétique en milieu urbain des régions tropicales : le contrôle de la surchauffe due aux apports solaires sur les façades et l'énorme potentiel de production d'énergie solaire par les bâtiments urbains. Dans le but de trouver des éléments de réponse à ces questions, ce travail présente une approche méthodologique interdisciplinaire qui vise évaluer le potentiel solaire des typologies urbaines existantes, précédemment identifiés dans le tissu urbain de Maceió, afin de comprendre leur performance actuelle et de les comparer aux résultats explorées par le processus d'optimisation.

Une étude statistique sur la sensibilité des principaux facteurs morphologiques nous a fourni des informations importantes concernant leur contribution sur les réponses d'intérêt. Les tests de signification ont permis de hiérarchiser les facteurs en fonction de leur importance relative sur l'amélioration du potentiel énergétique solaire sur les toitures et le contrôle solaire sur les façades verticales. En optimisant les facteurs les plus pertinents, il a été possible de générer des scénarios urbains plus efficaces que les existants. Un élargissement des possibilités de l'actuel code urbain a permis d'améliorer de 24 % le potentiel solaire des façades tout en gardant l'éclairage naturel à des niveaux satisfaisants.

Cette travail de recherche a étudié l'optimisation des principaux facteurs morphologiques faisant partie des premières décisions de conception où les choix seront déterminants pour l'efficacité énergétiques des bâtiments.

Une telle approche interdisciplinaire peut être très pertinente dans la définition efficace et objective d'un ensemble de paramètres qui puissent répondre à un compromis raisonnable entre les différentes mesures conflictuelles d'efficacité, tout en préservant un ensemble de critères importants et conjoncturels. Cette méthode conduit à un ensemble d'indicateurs relativement complet qui peut être appliqué d'une part, dans le cadre d'une révision des règlements d'urbanisme, et d'autre part en permettant des interventions ponctuelles sur un quartier notamment dans un contexte d'évolution urbaine rapide. Dans ce sens, la présente étude pourrait aussi être utilisée comme outil d'aide à la priorisation des actions dans l'élaboration des règles d'urbanisme, ainsi que dans la pratique de projets urbains. Face à la complexité urbaine et le défi lié à la conception de formes mieux adaptées aux contraintes urbaines et environnementales, l'utilisation des méthodes d'optimisation apparaît donc extrêmement prometteuse.

7. REFERENCES

ABNT. NBR15215-3/2004. Iluminação natural – Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos.. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro: ABNT, , p. 33. 2004.

ACHARYA, P. K. et al. **MODTRAN user's manual versions 3.7 and 4.0**. Air Force research Laboratory. [S.l.]. 1998.

ADENE. **Eficiência energética dos edifícios residenciais.** ADENE. Lisboa. 2008.

ADOLPHE, L. **L'intégration des contraintes techniques dans le processus de conception architecturale**. EMP. Paris. 1995.

ADOLPHE, L. A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 28, p. 183-200, 2001.

ADOLPHE, L. et al. **SAGACités Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines**. MENRT. Toulouse. 2002.

AIDA, M.; GOTOH, K. Urban albedo as a function of the urban structure - a two dimensional numerical simulation (Part II)'',. **Boundary Layer Meteorology**, v. 23, p. 415-423, 1982.

AIDA, M.; GOTOH, K. Urban albedo as a function of the urban structure – a two- dimensional numerical simulation. **Boundary-Layer Meteorology**, 23, n. 4, 1982. 415- 424.

AIT-AMEUR, K. **Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les esapces publics urbains: validation d'un système d'indicateurs «morpho-climatqiues et d'un indicateur de confort**. Tese (Doutorado em Arquitetura). Université de Nantes. Nantes. 2002.

AIT-AMEUR, K. **Vers une méthode multicritère de carcatérisation du microclimat dans les esapces publics urbains: validation d'un système d'indicateurs «morpho-climatqiues et d'un indicateur de confort**. Tese (Doutorado em Arquitetura). Université de Nantes. Nantes. 2002.

ALBERTI, M.; WADDELL, P. An integrated urban development and ecological simulation model.. **Integrated Assessment** , v. 3, n. 1, p. 215-227, 2000.

ALCOFORADO, M. J. . et al. **Orientações climáticas para o ordonamento em Lisboa.** Universidade de Lisboa.. [S.l.]. 2005.

ALENCAR, B. J. **A análise multivariada aplicada ao tratamento da informação espacial: uma abordagem matemático-computacional em análise de agrupamentos e análise de componentes principais**. Tese (Doutoradoem Geografia), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 200. 2009.

ALLARD, F.; SANTAMOURIS, M. **Natural ventilation in buildings:** a design handbook. Londres: James & James, 1998.

AMORIM, L.; BARROS FILHO, M. N.; CRUZ, D. **Urban Texture and Space Configuration Analysing Recife's Urban Fragments**. 7th International Space Syntax Symposium. Stockholm: KTH. 2009.

ANGSTROM, A. **A study of the radiation of the atmosphere**. [S.l.]: Smithsonian Int. Misc. Coll., v. 65, 1915. 1-159 p.

APUR. **Densités vécues et formes urbaines. Étude de quatre quartiers Parisiens**. Atelier Parisien d'Urbanisme. Paris. 2003.

APUR. **Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes.** Paris: Atelier Parisien d'Urbanisme, 2007.

ARANTES, L. **Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située**. Tese (Doutorado em matériaux, mécanique, génie civil et eletronique), Université de Grenoble. Grenoble, p. 456. 2012.

ARNFIELD, A. Two decades of urban climate research : a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, 1, n. 23, 2003. 1-26.

ARROYO, J. E. C. **Heuristicas e Metaheuristicas para Otimização Combinatória Multiobjetivo**. Tese (Doutorado em Computação). Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.

ARTIS, D. A.; CARNAHAN, W. H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. **Remote sensing of environment**, 12, 1982. 313-329.

ASAEDA, T.; CA, V. T.; WAKE, A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. **Atmospheric Environment,** 30, n. 3, 1996. 413-427.

AUGOYEARD, F. L'environnement sensible et les ambiances architecturales. **l'Espace Géographique**, v. 4, p. 302-318, 1995.

AYMONINO, C. **O significado das cidades**. Lisboa: Editorial Presença, 1984.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 1, 1996. 332 p.

BAKER, N. V.; STEEMERS, K. A. **LT Method Version 2.0**. Cambridge: Cambridge Architectural Research Ltd, v. 1, 1994.

BANDO, M. et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. **Physical Review**, v. 51, n. 2, p. 1035-1042, 1995.

BANOS, R. et al. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1753–1766, 2011.

BARBIRATO, G. M. **Aplicação do Modelo de Balanço de Energia para Análise do Ambiente Térmico Urbano de Maceió – AL**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 1998.

BARBOSA, A. M.; RIBEIRO, L. C.; ARANTES, J. M. O. **Algoritmo Genético Multiobjetivo:** Sistema Adaptativo Com Elitismo. 9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications. Serra Negra, São Paulo, Brasil.: [s.n.]. 2010.

BATTY, M.; LONGLEY, P. **Fractal Cities:** a Geometry of Form and Function. Londres: Academic Press, 1994.

BEHLING, S.; BEHLING, S. **Sol Power. The evolution of solar architecture**. Munique: Éditions Prestel, v. 1, 1996. 240 p.

BENENSON, I.; ARONOVICH, S.; NOAM, S. **OBEUS:** Object-Based Environment for Urban Simulation. 6th international conference on GeoComputation. Brisbane, Australie: [s.n.]. 2001. p. 1-10.

BENZERZOUR, M. **Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique"**. Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. Nantes. 2004.

BERARDI, U. Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable. **Sustainable cities and society**, v. 8, p. 72-28, 2013.

BERDAHL, P.; FROMBERG, R. The thermal radiance of clear skies. **Solar Energy**, 29, n. 4, 1982. 299-314.

BERDAHL, P.; MARTIN, M. Emissivity of clear skies. **Solar Energy**, 32, n. 5, 1984. 663-664.

BHIWAPURKAR, P.; MOSCHANDREAS, D. Street geometry and energy conservation of urban buildings in Chicago. **Intelligent Buildings International**, v. 2, p. 233-250, 2010.

BITTENCOURT, L. **Uso das cartas solares. Diretrizes para arquitetos**. Maceió: EDUFAL, v. 1, 2005.

BITTENCOURT, L. S. **Ventilation as a cooling resource for warm-humid climates:** An investigation on perforated block wall geometry to improve ventilation inside low-rise buildings. Londres: Architectural Association Graduate School, 1993. 314 p.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 2. ed. Maceió: EDUFAL, v. 1, 2005.

BJARKE INGELS GROUP. **Reciprocity, Réponse à l'appel à projets Low2No Competition by SITRA**. [S.l.], p. 72. 2009. (Entry no.76520).

BLENNOW, K. Sky View Factors from High-Resolution Scanned Fish-eye Lens Photographic Negatives. **Journal Atmospheric and Oceanic Technology**, p. 1357–1362, 1995.

BLOCKEN, B.; JANSSEN, W. D.; HOOFF, T. V. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. **Environmental Modelling & Software** , 30, 2012. 15-34.

BOAS, M. V. **Significado da arquitetura nos trópicos- um enfoque bioclimático**. Seminário Nacional sobre Arquitetura nos Trópicos. Recife: Fundação Joaquim Nabuco. 1985. p. 40.

BONHOMME, M. **Contribuition à la generation des bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'energétique urbaine**. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Toulosue, p. 540. 2013.

BONHOMME, M.; MASSON, V.; ADOLPHE, L. **The block generator:** A tool for classification and evolution of urban typologies to assess environmental performances at the city scale. PLEA - Passive and Low Energy Architecture. Lima, Peru: [s.n.]. 2012. p. 1-6.

BORDAS-ASTUDILLO, F. **Quelle forme urbaine pour quelle densité vécue ?** Atelier Parisien d'Urbanisme. [S.l.], p. 4. 2003. (10).

BOTTEMA, M. Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion, Atmos. Environ. 18, 3059-3075. **Atmospheric Environment**, v. 18, p. 3059-30175, 1997.

BOUDON, R.; BOURIAUD, F. **Dictionnaire critique de la sociologie**. 1. ed. Paris: PUF, v. 1, 1982.

BOUSSOUALIM, A. **Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur**. Université de Nantes. Nantes. 2002.

BOYEUR, J. **Modélisation et simulation des microclimats urbains. Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments**. [S.l.]: École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, 2009.

BRASIL. **Balanço Energético Nacional 2013: ano base 2012 - relatório síntese**. Empresa de Pesquisa Enegértica. Rio de Janeiro. 2013.

BRASIL. **Lei n. 10295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia.**. Lex: Diário Oficial da União. Brasília. 2001.

BRONIN, S. C. Solar rights. In: _____ **BOSTON UNIVERSITY LAW REVIEW**. [S.l.]: [s.n.], v. 89, 2009.

BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. **J. R. Met. Soc.**, 28, 1932. 389-418.

BUENO, F. **Métodos Heurísticos: Teoria e Implementações**. Tutorial. Instituto Federal de Santa Catarina. Araranguá,SC, Brasil. 2009.

BULHÕES, R. L. **Método de redução de perdas elétricas em sistema de distribuição**. Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2011.

BUREAU, P. R. **World Population Data Sheet**. [S.l.]. 2009.

BUREAU, P. R. **World Population Data Sheet**. [S.l.]. 2009.

BUTERA, F. Towards the renewable built environment. In: DROEGE, P. **Urban energy transistion:** from fossil fuels to renewable power. Amsterdam: Elsevier, 2008.

CABUS, R. **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil**. Sheffield University. Sheffield. 2002.

CALDAS, L. G.; NORFORD, L. K. A design optimization tool based on a genetic algorithm.. **Automation in Construction**, v. 11, n. 2, p. 173–184, 2002.

CALVINO, Í. **Cidades invisíveis**. 12. ed. Alfragide: Teorema, v. 1, 2008.

CAMPOS-ARRIAGA, L. **Wind Energy in the Built Environment: A Design Analysis Using CFD and Wind Tunnel Modelling Approach**. PhD thesis, University of Nottingham. [S.l.]. 2009.

CANAN, A. **Performative architecture as a guideline for transformation of the defence line of Amsterdam**. Middle East Technical University. Delft, p. 107. 2011.

CANEPARO, L.; GUERRA, F.; MASALA, E. **UrbanLab – Generative platform for urban and regional design**. 8th International DDSS Conference. Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning. Eindhoven, The Netherlands: [s.n.]. 2006. p. 235-251.

CANTAT, O. **Télédétection spatiale et microclimats – Le cas de la région Ile-de- France.** Paris: [s.n.], 1987. 190 p.

CAPULETO, I.; GUEDI, S. E. On the use of 'solar volume' for determining the urban fabric''. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 275-280, 2001.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 1: método prescritivo.. **Ambiente Construído (online)**, Porto Alegre, RS, Brasil, v. 10, n. 2, p. 7-26, 2010.

CARVALHO, A. Smart-grids: a luz que faltava ao mercado. **Ambiente Energia** , Janeiro 2014.

CASTRO, E. B. P. D. **Método de Auxílio à Concepção Arquitetônica Baseado na Análise Multicritério e em Dados Simulados dos Comportamentos da Edificação.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.

CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. **Recent Developments In Biologically Inspired Computing**. [S.l.]: Idea Group Publishing, 2004.

CATTELL, R. B. The screen test for the number of factors. **Multivariate Behavioral Research**, v. 1, p. 245-276, 1966.

CAVALCANTE, M. M. P. D. **Meio Ambiente Construído, Globalização e Sustentabilidade Cultural – Estudo de Caso: O Bairro de Ponta Verde (Maceió)**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil. 2000.

CELANI, G. An educational experiment with shape grammars and computer. **International Journal of Design Computing**, v. 3, 2002.

CHANGNON, S. A. Inadvertent weather modification in urban areas: Lessons for global climate change. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 73, n. 5, p. 619-627, 1992.

CHAPMAN, L. Sky-view factor approximation using GPS receivers. **International Journal of Climatology** , v. 22, n. 5, p. 615-621, 2002.

CHEN, H.; JIA, B.; LAU, S. S. Y. Sustainable urban form for chinese compact cities: challenges of a rapid urbanized economy. **Habitat Internationl**, v. 32, n. 1, p. 28-40, 2008.

CHENG, V. et al. **Urban form, density and solar**. The 23rd PLEA Conference. Geneva, Suiça, 2006: [s.n.]. 2006. p. 6.

CHIMKLAI, P.; HAGISHIMA, A.; TANIMOTO. A computer system to support Albedo Calculation in urban areas.. **Building and Environment**, 39, Jun 2004. 1213-1221.

CHIRKOV, V. Anthropogenic Heating of the Atmosphere. **Anthropogenic Heat**, 2003. http://www.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/heat/.

CIE. **Standardisation of luminous distribution on clear skies**. Commission Internacionale de lÉclairage. Vienna. 1973.

CIE. **Spatial distribution of daylight - CIE Standard Overcast Sky and clear sky**. Commission Internationale de l'Eclairage. Vienna. 1996.

CIE. **Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky**. Commission Internationale de lÉclairage. Vienna. 2002.

CLARKE, K. C.; GAYDOS, L. J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 7, p. 699-714., 1998.

CLOSE, J. The integration of photovoltaics within high-rise buildings in the dense urban environments of SE Asia, consideration of legislation to promote it and to maintain solar energy access. **Renewable Energy**, 8, n. 1, 1996. 471-474.

COELHO, G. A. G.; AFONSO, S. M. B.; HOROWITZ, B. **Estudos Iniciais para a Construção de uma Ferramenta de Seleção Automática de Parâmetros dos Algoritmos Genéticos.** Anais do XXXII CILAMCE. Ouro Preto, MG: [s.n.]. 2011. p. 1-11.

COELLO, C. A. C. Evolutionary Multi-Objective Optimization: A Historical View of the Field. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, v. 1, n. 1, p. 28–36, 2006.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B. L.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. [S.l.]: Springer, v. 1, 2007.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B. L.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2007.

COENEN-HUTHER, J. Compréhension sociologique et démarches typologiques. **Revue Europeenne des Sciences Sociales**, Géneve, v. Tome XLIV, n. 135, p. 195-205, 2006.

COHON, J. **Multiobjective Programming and Planning**. [S.l.]: Courier Dover Publications, 2004.

COLOMBERT, M. **Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville.** Université Paris-Est. Paris. 2008.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE. **Quatrieme rapport annuel au Parlement sur la mise en œuvre des engagements du Grenelle Environnement.** Ministere de l'Ecologie, du developpement durable et de l'energie. Paris. 2012a. Consultado na internet em: http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/4e_rapport_grenelle_finale_COMPLET-2.pdf.

COMPAGNON, R. **PRECis: Assessing the Potential for Renewable Energy in Cities, Annexe3: Solar and daylight availability in urban areas**. University of Applied Sciences of Western Switzerland (HES-SO). Fribourg. 2000.

COMPAGNON, R. Solar and daylight availability in the urban fabric. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 4, p. 321-328, 2004.

COMPAGNON, R.; RAYDAN, D. **Irradiance and illuminance distributions in urban areas.** PLEA - 17st International Conference on Passive and Low Energy Architecture. [S.l.]: [s.n.]. 2000.

COOPER, P. I. The absorption of solar radiation in solar stills. **Solar Energy**, 12, n. 3, 1969. 333-346.

CORBIN, A. **Le miasme et la jonquille**. Paris: Flamarion, 2008.

CORBUSIER, L. **Carta de Atenas**. São Paulo: Hucitec, 1933.

COUTARD, O.; RITHERFORD, J. Les réseaux transformés par leur marges: développement et ambivalence des techniques "descentralisées". **Flux**, v. 2, n. 76-77, p. 6-13, 2009.

CRUTZEN, P. J. New directions: The growing urban heat and pollution « island » effect – impact on chemistry and climate. **Atmospheric Environment**, 38, 2004. 3539-3540.

CRUZ, J. M. **Sustentabilidade do ambiente construído: Conservação de energia através do uso da ventilação natural como forma de refrigeração passiva do ambiente urbano**. Dissertação (mestrado em Arquitetura), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil, p. 220. 2001.

CURRELI, A.; COCH, H. **Solar acess in the compact city:** a study case. PALENC 2010: Passive and Low Energy Cooloing of Built Environment. Rhodes Island, Greece: [s.n.]. 2010. p. 1-10.

DE JONG, K. **Evolutionary Computation - a Unified Approach.** Cambridge: MIT Press, v. 4, 2006.

DEB, K. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**. New Jersey: John Willey and Sons, 2001.

DEB, K. **Optimization for Engineering Design:** Algorithms and Examples. 8. ed. New Delhi: Prentice Hall of India Private Limited, 2005.

DEB, K. et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.

DEL RIO, V. **Introdução ao desenho urbano no processo de planejamento**. 5. ed. São Paulo: Pini, v. 1, 2000.

DEMAZIERE, D.; DUBAR, C. **Analyser les entretiens biographiques. L'exemple de récits d'insertion.** 1. ed. Paris: Nathan, v. 7, 1997.

DENÈGRE, J.; SALGÉ, F. **Les systèmes d'information géographiques**. Paris: PUF, 1997.

DETTWILLER, J. L'évolution séculaire de la température à Paris. **La Météorologie**, 13, 1978. 95-130.

DIDAY, E. et al. **Eléments d'analyse de données**. Paris: Editions Dunod-Bordas, v. 1, 1982.

DORIGO, M. **Optimization, Learning and Natural Algorithms**. Tese de Doutorado. Politecnico di Milano. Milano, Italie. 1992.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents Colony of Cooperating Agents. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B**, v. 26, n. 1, p. 29–41, 1996.

DUARTE, J. et al. **Alberti Digital – Tradição e inovação na teoria e prática da arquitectura em Portugal**. SIGRADI 2012 | FORMA (IN) FORMAÇÃO. Fortaleza - Brasil: [s.n.]. 2012. p. 212-215.

DUBOIS, C.; BERGERON, O. **Adapting cities to climate change:** heat and urban form. ICUC8. Dublin: [s.n.]. 2012.

DUFFIE, J. A.; BECKMANN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: Wiley, 1980. 792 p.

EERE. **Building energy software tools directory,**. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. [S.l.]. 2008.

ELIASSON, I. The use of climate knowledge in urban planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 48, p. 31-44, 2000.

ELLERKAMP, P. **Simulation de dynamiques spatiales, Exemple de la densification de la population autour d'Avignon**. V rencontre de Théo Quant. Besanço: [s.n.]. 2001.

ESCOURROU, G. **Climat et environnement, les facteurs locaux du climat.** Masson: [s.n.], 1981. 168 p.

ESCOURROU, G. **Le climat et la ville.** Paris: Presses universitaires Nathan , 1991.

ESTOURNEL, C. et al. Observations and modeling of downward radiative fluxes (solar and infrared) in urban/rural areas. **Journal of climate and applied meteorology,** 22, 1983. 134-142.

EWING, R.; PENDALL, R.; CHEN, D. Measuring Sprawl and Its Impact. **Sprawl and Health**, 2002.

FERRARI, C. **Curso de planejamento municipal integrado**. São Paulo: Pioneira Editora, 1979.

FILHO, N. G. R. **Quadro da arquitetura no Brasil**. São Paulo: Perspectiva, v. 1, 1970.

FISHBURN, P. C. Methods for estimating additive utilities. **Management Science**, v. 1, n. 7, p. 435-453, 1967.

FISHER, R. A. **The Design of Experiments**. 9 Ed.. ed. [S.l.]: Macmillan, 1971.

FLÉTY, Y. et al. **étiquettes énergétiques de mobilité:** un indicateur pour la ville durable. Actes du Congrès Mondial de l'Énergie. [S.l.]: [s.n.]. 2010.

FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. **Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization:** Formulation, Discussion and Generalization. International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo, EUA: [s.n.]. 1993.

FONTENELLE, M. **A abordagem multicritério na concepção arquitetônica: um estudo sobre as aberturas laterais em edifício de escritórios no Rio de Janeiro**. Dissertação (mestrado em Arquitetura). Programa de Pós-graduação em Arquitetura. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.

FOSTER, N. Foster and Partners. **Foster and Partners**, 1998. Disponivel em: <http://www.fosterandpartners.com/>. Acesso em: setembro 2013.

FOUAD, A. O. **Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec.**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Université du Laval. Quebec. 2009.

FOUCHIER, V. **Les densités urbaines et le développement durable:** le cas de l'île-de-France et des villes nouvelles. Paris: Éditions du SGVN, 1998.

FREYRE, G. **Novo mundo nos trópicos**. São Paulo: Nacional/EDUSP, v. 1, 1969.

GÜRSEL DİNO, İ. CREATIVE DESIGN EXPLORATION BY PARAMETRIC GENERATIVE SYSTEMS IN ARCHITECTURE. **METU Journal of the Faculty of Architecture**, v. 29, n. 1, p. 207-224, 2012.

GALSTER, G. . H. R. . R. M. R. **Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept**. Housing Policy Debate. [S.l.], p. 681–717. 2001. (12).

GICQUEL, R. **Approche systémique et thermique instationnaire**. Actes du colloque SFT92 de thermique Systèmes thermiques instationnaires. Paris: École des Mines de Paris. 1992. p. 337-355.

GIVONI, B. **Climate considerations in building an Urban Design.** Londres: John Wiley & Sons, v. 1, 1998. 480 p.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. 1. ed. Boston, EUA.: Addison-Wesley LongmanPublishing, 1989.

GORAL, C. M. et al. "Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces." **Computer Graphics**, 18, n. 3, 1984.

GRAZZIOTIN, P. **Visualization Techniques in a Building Potential Simulator Using Sunlight Access Control.** SIACG – Ibero-American Symposium in Computer Graphics. Guimaraes, Portugal: [s.n.]. 2002.

GRIMMOND, C.; OKE, T. R. Heat storage in urban areas, local-scale observations and evaluation of a simple model. **Applied Meteorology**, v. 38, p. 922-940, 1999.

GROLEAU, D. **Analyse de la variation de l'albédo effectif urbain en fonction de la densité construite et de la forme urbaine**. CERMA. Nantes, França. 2008.

GROLEAU, D.; MARENNE, C. **Environnemental specifities of the urban built forme**. Rebuildrebuilding the European city, Integration renewable energies in established urban structure. Corfou: [s.n.]. 1995. p. 8.

GROSSO, M. Urban form and renewable energy potential. **Renewable Energy**, 1998. 331-336.

HASTINGS, R. S. **The Evolution of solar architecture**. [S.l.]: Swiss Federal Office of Energy, 2002.

HAUGHTON, G.; HUNTER, C. **Sustainable cities**. Londres: Jessica Kingsley, 1994.

HAY, J. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. **Solar Energy**, 23, n. 3, 1979. 301-307.

HELBING, D.; MOLNAR, P.; MINGOTAUD, M.-J. **Modélisation et simulation des flux de piétons**. Congrès Modélisation du trafic, Groupe de travail, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité,. Arcueil: [s.n.]. 1997. p. 53-79.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. [S.l.]: University of Michigan Press, 1992.

HOPKINSON, R. G.; KAY, J. D. **The lighting of buildings**. Londres: Faber and Faber, v. 2, 1972.

HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Daylighting**. Londres: Heinemann, v. 1, 1966.

HORN, J.; NAFPLIOTIS, N. **Multiobjective Optimization Using the Niched Pareto Genetic Algorithm.**. IlliGAL Report No. 93005, Illinois Genetic Algorithms Laboratory, University of Illinois. Urbana, Champaign. 1993.

HUANG, J.; LUB, X. X.; SELLERS, J. M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. **Landscape and Urban Planning** , v. 82, p. 184–197, 2007.

HUI, S. C. Low energy building design in high density urban cities. **Renewable Energy**, v. 24, p. 627-640, 2001.

IBGE. **Censo Demográfico 2010: Características da População e dos Domicílios - Resultados do Universo.** Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Rio de Janeiro, p. 270. 2010.

IEA. **Cities, towns and Renewable energy - Yes in my front yard**. International Energy Agence. [S.l.]. 2009.

IRANZO, M. M. et al. Applied Pareto Multi-Objective Optimization by Stochastic Solvers. **Engineering Applications of Artificial Intelligence",** v. 22, p. 455–465, 2009.

JACOBS, J. **Morte e vida nas grandes cidades**. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

JANTZ, C. A. et al. Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, p. 1-16, 2010.

JARRETT, H. R. **Tropical geography. "Aspect" geographies.** Plymouth: MacDonald & Evans, 1977.

JIANG, Y. **Does Energy follows urban form? an examination of neighborhood and transport energy use in Jinan, China**. Massachusetts Institute of tecnhnology. Massachusetts, p. 163. 2010.

JORMAKKA, K.; SCHÜRER, O.; KUHLMANN, D. **La Recherche de la forme**. Berlim: Birkhäuser, v. Coll. Basics, 2008.

JUDET DE LA COMBE, A. et al. **Principes de l'Aéraulique Appliqués au Génie Climatique. Principles of air movement applied to thermal analysis of buildings.** Paris: PYC Editions, 1991.

KÖPPEN, W. **Das Geographische System der Klimate**. Berlin: Kraus-Thomson, 1936.

KAMPF, J. **On the modelling and optimization of urban energy fluxes**. Tese (Doutorado em Meio Ambiente). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, Suisse. 2009.

KEENY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives:** preferences and value tradeoffs. Nova Iorque: Wiley and Sons, 1976.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. **Particle Swarm Optimization**. IEEE, IV Conference on Neural Networks. [S.l.]: [s.n.]. 1995. p. 1942-1948.

KITTLER, R. **Standardisation of the outdoor conditions for the calculation of the Daylight Factor with clear sky**. Conf. Sunlight in Buildings. Rotterdam: Bouwcentrum. 1967. p. 273-286.

KLUCHER, T. M. Evaluation of models to preict insolation on tilt surfaces. **Solar Energy**, 23, n. 2, 1979. 111-114.

KNIGHT, T. W. **Shape grammar in education and practice: history and prospects**. MIT. Massachusetts. 1999. (MIT Workshop on Shape Computation).

KNOWLES, R. L. **Energy and Form:** An Ecological Approach to Urban Growth. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 1974.

KNOWLES, R. L. **Sun Rhythm Form**. Cambridge, Massachusetts: Éditions MIT Press, 1981.

KNOWLES, R. L. The Solar envelope: its meaning for energy and buildings. **Energy and Buildings**, v. 35, p. 15.25, 2003.

KOENIGSBERGER, O. H. et al. **Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales**. Madrid: Paraninfo, v. 1, 1977.

KONDO, A. et al. The influence of the urban canopy configuration on urban albedo. **Boundary Layer Meteorology**, v. 100, n. 2, p. 225-242, 2001.

KRETZ, T. **Pedestrian Traffic, Simulation and experiments**. Tese (Doutorado) Universidade Duisburg-Esssen. [S.l.], p. 231. 2007.

LAARIBI, A. **SIG et analyse multicritères**. Paris: Hermes, 2000.

LAM, K. P. et al. **COMPARATIVE STUDY OF SKY LUMINANCE MODELS IN THE TROPICAL CONTEXT**. IBPSA. Praga: [s.n.]. 1997.

LAMAS, J. M. G. **Morfologia urbana e desenho da cidade**. 12. ed. Lisboa: [s.n.], v. 1, 2009.

LAMM, L. O. A new analytic expression for the equation of time. **Sola Energy**, 26, 1981.

LANDSBERG, H. E. **The urban climate.** New York,: Academic Press, v. 28, 1981.

LECHETA, E. M. **Algoritmos Genéticos para Planejamento em Inteligência Artificial**. Tese (Doutorado em Informática). Curso de Pós-Graduação em Informática. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2004.

LECHNER, N. **Heating, Cooling, Lighting – Design Methods for Architects**. New York: John Wiley & Sons, 1990.

LECLERCQ, L. **Modélisation dynamique du trafic et applications à l'estimation du bruit routier**. Tese (Doutorado em Engenharia), LICIT. [S.l.], p. 310. 2002.

LEIRAS, A. Otimização de Parâmetros de um Algoritmo Genético. **RICA - Revista de Inteligência Computacional Aplicada**, v. 6, p. 1-7, 2010.

LEVY, A. **La qualité de la forme urbaine problématique et enjeux I**. Ministère de l'Équipement et des Transport - Sécretariat Permanent du Plan Urbain. Paris, p. 157. 1992.

LIMA, H. G.; ASSIS, E. A. **Building mass calculation using GIS software for climate responsible urban planning applications**. The 20th Conference on Passive Low Energy Architecture - PLEA. Santiago: [s.n.]. 2003.

LINS, R. D. B. et al. **Vazios urbanos:** entendendo as especificidades territoriais e ambientais das terras sem ocupação do litoral norte da cidade de Maceió, Alagoas, Brasil. IV Congresso Luso Brasileiro para o Planeamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável - PLURIS 2010. Faro, Portugal: [s.n.]. 2010.

LINS, R. D.; ZACARIAS, P.; SCOTT, C. **A UTILIZAÇÃO DE SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NO MAPEAMENTO DOS VAZIOS URBANOS DO "LITORAL NORTE" DA CIDADE DE MACEIÓ, ALAGOAS**. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, PE, Brasil: [s.n.]. 2008. p. 1-4.

LOBACCARO, G. et al. District geometry simulation: a study for the optimization of solar façades in urban canopy layers. **Energy Procedia**, v. 30, p. 1163 – 1172, 2012.

LONG, N.; KERGOMARD, C. Classification morphologique du tissu urbain pour des applications climatologiques, Cas de Marseille. **Revue Internationale de Géomatique**, v. X, p. 1-27, 2005.

LOUAIL, T. **Comparer les morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis par la simulation à base d'agents – Approches multi-niveaux et environnements de simulation spatiale**. Tese (Doutorado em Sciences Fondamentales et Appliquées), Université d'Évry-Val-d'Essonne, U.F.R.. Evry, França, p. 233. 2010.

LOWRY, W. P. Empirical estimation of the urban effects on climate: A problem analysis. **J. Appl. Meteorol.**, 16, 1977. 129–135.

LUCAS, D. C. **Algoritmos Genéticos: uma Introdução**. Apostila de curso Ferramentas de Inteligência Artificial. [S.l.]. 2002.

LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J. **The atmosphere**. 7. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1998.

LUZ, B. et al. **Céu Artificial Retilíneo a FAU-USP:** Desenvolvimento e Construção de Equipamento para Aplicação Didática. NUTAU - 7º Seminário Internacional Espaço Sustentável Inovações e Edifícios e Cidades. São Paulo: USP. 2008.

MAÏZIA, M. et al. **Energy requirements of characteristic urban blocks.** CISBAT 2009-Renewables in a changing climate-From Nano to urban scale. [S.l.]: [s.n.]. 2009.

MAÏZIA, M. L. U. E. L. M. D. V. **Les annales de la recherche urbaine, n°103, septembre 2007, pp.79-85.**, n. n°103, septembre 2007, pp.79-85., p. 79-85, 2007.

MAGNIER, L.; HAGHIGHAT, F. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network.. **Building and Environment** , v. 45, p. 739–746, 2010.

MAITELLI, G. T.; SOUZA, S. C.; PINHO, J. G. **THE MAGNITUDE OF URBAN HEAT ISLAND IN THE TROPICAL CONTINENTAL AREAS IN BRAZIL**. ICUC5. Lodz: [s.n.]. 2005.

MAITELLI, G. T.; WRIGHT, I. R. The climate of a riverside city in the Amazon Basin: urban-rural differences in temperature and humidity. **Amazonian deforestation and climate**, 1996. 1-14.

MAIZIA, M. et al. **Energy requirements of characteristic urban blocks**. Proceedings of CISBAT 2009 - Renewables in a changing climate-From Nano to urban scale. Lausanne, Suisse: EPFL. 2009. p. 1-6.

MARDALJEVIC, J. Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. **Lighting Research and Tecnology**, 27, n. 4, 1995. 181-188.

MARIOLLE, B. L'espace anthropologique D comme Densité. **Les Cahiers de la recherche architecturale et urbaine,** v. 1, p. 64-67, 2007.

MARIQUE, A. F. Ç.; REITER, S. A method for evaluating transport energy consumption in suburban areas. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 1, n. 33, p. 1-6, 2012.

MARKS, W. Multicriteria optmisation of shape of energy-saving buildings. **Buildings and Environment**, v. 4, p. 331-339, 1997.

MARLER, R. T.; ARORA, J. S. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 41, n. 6, p. 853–862, 2010.

MARRY, S. **Densité urbaine et qualité de vie. En quoi la compréhension des représentations de la densité urbaine est-elle prépondérante dans l'analyse et la conception de formes urbaines propices à une certaine qualité de vie ?** Prix Étudiant EpE-Metro 2009, Densité urbaine et qualité de vie : comment mieux faire ?. Grenoble, p. 28. 2009.

MARSH, A. **Non-uniformity in incident solar radiation over the facades of high-rise buildings**. PLEA - Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven: [s.n.]. 2004. p. 1-6.

MARTIN CENTRE, F. S. G. R. T. V. R. **Towards zero emissions urban development**. University of Cambridge. Cambridge. 1997.

MARTIN, L.; MARCH, L. **Urban Space and Structures**. 1. ed. Cambridge: University Press, v. 1, 1972.

MARTINS, T. A. L.; ADOLPHE, L.; KRAUSE, C. B. **Microclimate Effects of Urban Geometry on Outdoor Thermal Comfort in the Brazilian Tropical Semi-arid Climate**. PLEA - 28th Passive Low Energy Architecture Conference. Lima: PUC-Lima. 2012.

MASSON, V. et al. Modélisation urbaine et stratégies d'adaptation au changement climatique pour anticiper la demande et la production énergétique (MUSCADE). **RéférenceS**, v. 1, n. La modélisation intégrée de la ville, p. 174-184, Setembro 2012.

MAUGARD, A. **Regards sur le bâtiment:** Le futur en construction. Paris: Editions Le Moniteur, 2007.

MENDLER, S.; ODELL, W. **The HOK Guidebook to Sustainable Design**. New York: Éditions John Wiley & Sons, 2001.

MENDONÇA, R. S. R.; ASSIS, E. S. Conforto térmico urbano: estudo de caso do bairro Floresta de Belo Horizonte. **Ambiente Construído (online)**, v. 3, n. 3, 2003.

MESSAOUD, B. O. **Approche physico-morphologique de l'albédo effectif. Vers une stratégie de formes et de matériaux urbains**. Dissertação (Mestrado em Sciences et Techniques des Environnements), École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. Nantes, França, p. 205. 2009.

MESTAYER, P. G.; ANQUETIN, S. **climatology of cities**. In 3 on Air Pollution, Air Pollution 95. [S.l.]: [s.n.]. 1994.

MESTAYER, P. G.; DURAND, P.; AUGUSTIN, P. The urban boundary-layer field campaign in marseille (ubl/clu-escompte): set-up and first results. **Boundary-Layer Meteorology**, 114, n. 2, 2005. 315-365.

METEOFRANCE. **Comprendre la météo - glossaire.** Metofrance. Toulouse. 2011.

MICHALSKY, J. J. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050). **Solar Energy**, 40, n. 3, 1988. 227-235.

MICHELE. nh. **zsdfasf**, p. asd, ad.

MILES, J. C.; SISK, G. M.; MOORE, C. J. The conceptual design of commercial buildings using a genetic algorithm. **Computer and Structures**, v. 79, n. 17, p. 1583-1592, 2001.

MINDLIN, H. E. **Arquitetura moderna no Brasil**. Rio de Janeiro: Aeroplano, v. 1, 1999.

MODEFRONTIER. **The Multi-objective Optimization and Design Environment. Versão 4.4.1.** ESSS / ESTECO. [S.l.]. 2013.

MOLION, L. C. B. Considerações sobre o aquecimento global antropogênico. **Instituto de Ciências Atmosféricas, Departamento de Meteorologia.**, Maceió, v. 1, 2008.

MOLLE, N. **Étude Théorique et Expérimentale du Comportement Thermique de l'Habitat en Milieu Tropical Humide,**. Thèse de doctorat, École Central des Arts et Manufactures. Paris. 1984.

MONTAVON, M. **Optimisation of Urban Form by the Evaluation of the Solar Potential**. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. 2010.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiment**. 5. Ed. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2001.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4 Ed. ed. Rio de Janeiro,: LTC, 2009.

MOON, P.; SPENCER, D. E. Illumination from a non-uniform sky. **Illuminating Engineering**, 37, n. 10, 1942. 707-726.

MORELLO, E.; RATTI, C. Sunscapes: 'Solar envelopes' and the analysis of urban DEM. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 33, p. 26-34, 2009.

MOUDON, A. V. Urban morphology as an emerging disciplinary field. **Urban Morphology Review**, 1997.

MOULINIÉ, C.; NAUDIN-ADAM, M. **Appréhender la densité 2 - Les indicateurs de densité (Understanding density 2 - Indicators of density). Note rapide sur l'occupation du sol.** Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France. Paris. 2005.

NAJJAR, G. et al. **Bilans radiatif et 331 International version 1 - 6 Apr 2010 d'énergie dans un canyon urbain.** Association Internationale de Climatologie. [S.l.]: [s.n.]. 2005.

NAKAMURA, Y.; OKE, T. R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. **Atmospheric Environment**, 22, n. 12, 1988. 2691-2700.

NEWMAN, P.; KENWORTHY, J. **Cities and automobile dependence, an international sourcebook**. Aldershot, Reino Unido: Gower Technical Editions, 1989.

NIEMASZ, J.; SARGENT, J.; REINHART, C. F. **Solar zoning and energy in detached residential dwellings", in Attar Ramtin**. SimAUD 2010 - Simulation for Architecture and Urban Design. Boston, MA, USA: [s.n.]. 2011. p. 105-113.

NIEUWOLT, S. The urban microclimate of Singapore.. **Journal of Tropical Geography** , 22, 1966. 30–37.

NIJKAMP, P.; RIETVELD, P.; VOODG, H. **Multicriteria evaluation in physical planning**. North-Holland: [s.n.], 1990.

NORDPIL. Nordpil. **World database of large urban areas, 1950-2050**, 2007. Disponivel em: <http://nordpil.com/go/resources/world-database-of-large-cities/>. Acesso em: 15 dezembro 2013.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. The energy balance of an urban canyon. **Journal of Applied climatology**, 16, n. 1, 1977.

OKE, T. R. **Overview of interactions between settlements and their environments**. WMO experts meeting on Urban and building climatology. Genève: WMO. 1982.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 1. ed. Londres: Routledge, 1987.

OKE, T. R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103-113, 1988.

OKE, T. R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and Observing Methods**. WMO/TD. [S.l.]. 2006. (81).

OLIVEIRA, L. S. **Uma Contribuição ao Estudo dos Métodos de Otimização Multi-objetivo**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecância). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG. 2005.

PAIO, A.; TURKIENICZ, B. An Urban Grammar Study: A Geometric Method for Generating Planimetric Proportional and Symmetrical Systems. **Nexus Network Journal**, Turin, v. 13, n. 1, p. 151–169, 2011.

PANAO, M. J. N. O.; GONÇALVES, H. J. P.; FERRÃO, P. M. C. Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach. **Renewable Energy**, v. 33, p. 887–896, 2008.

PANERAI, P.; DEPAULE, J.-C.; DEMORGON, M. **Analyse urbaine**. 4. ed. Marseille: Parantheses, v. 1, 2009.

PARKER, D. C.; EVANS, T. P.; MERETSKY, V. M. **easuring emergent properties of agent-based landuse/ landcover models using spatial metrics.** Seventh annual conference of the international society for computational economics. [S.l.]: [s.n.]. 2001.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Update world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2007. 1633-1644.

PEREIRA, F. . N. C. **Proposta sistemática de uso em planejamento urbano do envelope solar como forma de controle da ocupação do solo urbano em função da**. ENCAC - ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Salvador, Bahia, Brasil: [s.n.]. 1997. p. 1-10.

PEREZ, D. R. C. **O envelope solar e o direito ao sol.**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas.. Campinas, São Paulo. 2007.

PEREZ, R. et al. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. **Solar Energy**, 39, n. 3, 1987. 221-231.

PEREZ, R. et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, 44, n. 5, 1990. 271-289.

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution - preliminary configuration and validation. **Solar Energy**, 50, n. 3, 1993. 235-243.

PERRIN DE BRICHAMBAUT, C. **Estimation des ressources énergétiques solaires en France**. Paris: Edition Européennes Thermique et Industrie, v. 1, 1996.

PICCOLI, B.; TOSIN, A. Time-evolving measures and macroscoopic modeling of pedestrian flow'. **Archive for rational mechanics and analysis**, v. 199, n. 3, p. 707-738, 2011.

PINHO, A. F.; MONTEVECHI, J. A. B.; MARINS, F. A. S. Análise da Aplicação de Projeto de Experimentos nos Parâmetros dos Algoritmos Genéticos. **Sistema e Gestão**, v. 2, n. 3, p. 319-331, 2007.

PMM. **Zoneamento de uso do solo urbano de Maceió**. Prefeitura Municipal de Maceió-AL. Maceió. 2007.

POMEROL, J. C.; BARBA-ROMERO, S. **Choix multicritère dans l'entreprise - principe et pratique**. Paris: Hermes, 1993.

RAMOS, G.; GHISI, E. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. **Ambiente Construído**, 10, n. 2, jun 2010. 157-169.

RAO, S. S. **Engineering Optimization:** Theory and Practice. 1. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2009.

RAPOPORT, A. **House form and culture (Foundations of Cultural Geography Series)**. New Jersey: Éditions Prentice Hall, v. 1, 1969. 150 p.

RAPOPORT, A. **Pour une anthropologie de la maison**. Paris: Éditions Dunod, v. 1, 1972. 207 p.

RASHEED, A. **Multiscale Modelling of Urban Climate.** École Polytéchnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. 2009.

RATTI, C. A. R. P. Urban texture analysis with image processing techniques. In: AUGENBROE, G.; EASTMAN, C. **Computers in Building:** Proceedings of CAAD Futures 99. Boston: Kluwer Academic, v. 1, 1999. p. 49-64.

RATTI, C.; BAKER, N.; STEEMERS, K. Energy consumption and urban texture. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 7, p. 762-776, 2005.

RATTI, C.; RAYDAN, D.; STEEMERS, K. "Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. **Energy and Buildings**, v. 35, p. 49-59, 2003.

RATTI, C.; RICHENS, P. Raster Analysis of Urban Form.. **Environment and Planning B: Planning and Design**, 31, 2004. 297-309.

RAYNAUD, D. **Forme urbaine:** une notion exemplaire du point de vue de l'épistémologie des sciences sociales. Actes du Colloque LOUEST. Paris: [s.n.]. 1999. p. 1-23.

REINDL, D. T.; BECKMANN, W. A.; DUFFIE, J. A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. **Solar Energy**, 45, n. 1, 1990. 9-17.

REINHART, C. F.; HERKEL, S. The simulation of annual daylight illuminance distributions - a state-of-the-art comparison of six Radiance-based methods. **Energy and Buildings,** 32, 2000. 167-187.

RICHENS, P. **Image processing for urban scale environmental modelling**. IBPSA. Praga: [s.n.]. 1997.

RINGENBACH, N. **Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg.** Strasbourg I. [S.l.], p. 167. 2004.

ROBINSON, D. Urban Morphology and indicators of radiation availability.. **International Journal of Solar Energy**, 80, n. 12, 2006. 1643-1648.

ROBINSON, D. **Computer modelling for sustainable urban design**. Londres: Earthscan, v. 1, 2011.

ROBINSON, D.; STONE, A. Solar radiation modeling in the urban context. **Solar Energy**, 77, n. 3, 2004. 295-309.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 2a Ed. ed. Campinas: Cárita editora, v. 1, 2009.

RODRIGUES, M. R. B. **A Forma Urbana em Portugal Continental: Aplicação de Índices Quantitativos na Caracterização Morfológica das Cidades. Dissertação**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamento). Universidade de Lisboa. Lisboa. 2009.

ROGERS, R. **Des villes pour une petite planete**. Paris: Le moniteur Editions, 2000.

ROSENFELD, A. H.; AKBARI, H.; BRETZ, S. Mitigation of urban heat island : materials, utility programs, updates. **Energy and Buildings**, 22 , 1995. 255-265.

ROSSI, A. **Arquitetura da cidade**. 2. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.

ROULET, C. A. et al. A multicriteria rating methodology for buildings. **Buildinga and Environment**, v. 37, p. 579-586, 2002.

ROUSSEAUX, F.; LONG, N.; RENOUARD, A. Vers une simulation de l'évolution des structures urbaines à partir d'une modélisation multi-agents.. **Vertigo**, v. 11, n. 3, 2011.

SAATY, S. A scaling method for priorities in hoerarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, 1977.

SACRE, C. **Le confort dans les espaces extérieurs:** analyse microclimatique. Nantes: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, division climatologie, 1983. 138 p.

SALAT, S. **Les et les formes. Sur L'urbanisme durable.** 1. ed. Paris: CSTB, v. 1, 2011.

SALLEZ, A. **Urbaphobie et désir d'urbain, au péril de la ville**. La ville mal aimée, Colloque au château de Cerisy-la-Salle. [S.l.]: [s.n.]. 2007. p. 12.

SAMPAIO, P. R. **Teoria, Métodos e Aplicações de Otimização Multiobjetivo**. Tese (Doutorado em Matemática). Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

SANTAMOURIS, M. **Energy and climate in the urban built environment.** Londres: James and James, 2001. 402 p.

SANTAMOURIS, M. **Passive cooling of buildings**. London: James and James Science Publishers, 2005.

SCHAFFER, J. D. **Multiple Objective Optimization with Vector EvaluatedGenetic Algorithms**. Dissertação. Vanderbilt University. [S.l.]. 1984.

SCHAFFLER, S.; SCHULTZ, R.; WEINZIERL, K. Stochastic method for the solution of unconstrained vector optimization problems. **Journal of Optimization Theory and Application**, v. 114, n. 1, p. 209–220, 2002.

SCUESSEL, M. C. B.; SATTLER, M. A. Cidades em (trans)formação: impacto da verticalização e densificação na qualidade do espaço residencial. **Ambiente Construído (online)**, Porto Alegre, RS, Brasil, v. 10, n. 3, p. 137-150, Jul/Set 2010.

SHARLIG, A. **Décider sur plusieurs critères:** panorama de l'aide à la décision multicritère. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes , 1995.

SHELTON, T. **Reconciling housing density and housing diversity in inner ring neighbourhoods**. PLEA 2008 Proceedings, 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Dublin: [s.n.]. 2008. p. 6.

SKARTVEIT, A. et al. On the estimation of atmospheric radiation from surface meteorological data. **Solar Energy**, 56, n. 4, 1996. 349-359.

SOARES, J. P.; TRAMONTANO, M. Arquitetura emergente, design paramétricos e o representar através de modelos de informação. **Virus (online)**, São Carlos, v. 8, Dezembro 2012.

SOGA, K.; AKASA, H.; NIMIYA, H. **A COMPARISON OF METHODS TO ESTIMATE HOURLY TOTAL IRRADIATION ON TILTED SURFACES FROM HOURLY GLOBAL IRRADIATION ON A HORIZONTAL SURFACE**. IBPSA. Kyoto: [s.n.]. 1999.

SOUAMI, T. Conceptions et répresentations du territoire énergétique dans les quartiers durables. **Flux**, v. 2, n. 76-77, p. 71-81, 2009.

SOUZA, L. C. L. et al. Fator de visão so céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. **Ambiente Construído (online)**, v. 10, n. 4, 2010.

SPENCER, J. W. Fourier series representation of the position of the sun. **Search**, 2, n. 5, 1971. 172.

SRINIVAS, N.; DEB, K. Multi-objective Function Optimization Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm. **Evolutionary Computation**, v. 2, n. 3, p. 221-248, 1994.

STANHILL, G.; KALMA, J. D. Solar dimming and urban heating at Hong Kong. **International Journal of Climatology**, 15, n. 8, 1995. 933-941.

STEEMERS, K. Energy and the city: density, buildings and transport. **Energy and Buildings**, 35, 2003. 3-14.

STEEMERS, K. et al. City Texture and Microclimate. **Urban Design Studies**, v. 3, p. 25-50, 1997.

STEINø, N. **PARAMETRIC THINKING IN URBAN DESIGN:** a geometrical approach. eCAADe 28: Future Cities. Zurich: [s.n.]. 2010. p. 1-8.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. **Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitidue in the canopy layer.** Symposium Eighth Symposium on Urban Environment. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 1-6.

STEWART, I.; OKE, T. Classifying Urban Climate Field Sites by « Local Climate Zones ». **International Association for Urban Climate**, v. 1, p. 1-10, 2009.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, 25, n. 2, 1997(a). 99-103.

TAN, K. C.; LEE, T. H.; KHOR, E. F. Evolutionary Algorithms for Multi-Objective Optimization: Performance Assessments and Comparisons.. **Artificial Intelligence Review** , v. 17, p. 253–290, 2002.

TELLER, J. **Spherical instrumentation for the urban morphology analysis**. 21st Urban Data Management Symposium. Venice-Italy: [s.n.]. 1999.

TELLER, J.; AZAR, S. Townscope II - a computer rendering system to support solar access decision making. **Solar Energy**, 70, n. 3, 2001. 187-200.

THIBERGE, C. **La ville en creux**. Paris: Editions du Linteau, 2002.

TIMMIS, J. **Artificial Immune Systems: a Novel Data Analysis Technique Inspired by the Immune Network Theory**. Tese de Doutorado. University of Wales. Aberystwyth, Reino Unido. 2000.

TIWARI, P.; PARIKH, J. Cost of CO 2 reduction in building construction. **J. Energy**, n. 20, 1994. 531-547.

TORRENS, P. M.; ALBERTI, M. **Measuring Sprawl**. Center for Advanced Spatial Analysis. University College. Londres. 2000. (27).

TORRES, S. **Arranjos Construtivos Urbanos: Um Estudo sobre a Influência da Configuração de Conjuntos Habitacionais Verticais na Qualidade Térmica de Edificações em Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil, p. 180. 2006.

TRAISNEL, J.-P. **Cours Urbanisme et énergie - quartiers durable**. Institut Français d'Urbanisme. Paris. 2006.

TREGENZA, P. R. Subdivision of sky hemisphere for luminance measurements. **Lighting Research and Technology**, 19, 1987. 13-14.

TREGENZA, P.; SHARPLES, S. **Daylighting algorithms**. ETSU. [S.l.]. 1993.

UN. **World Urbanization Prospects: The 2003 Revision**. United Nations. [S.l.]. 2004.

UNSWORTH, H. M.; MONTEIGH, J. L. Longwave radiation at the ground - I. Angular distribution of incoming radiation. **Q. J. R. Met. Soc.**, 101, 1975. 13-24.

VETTORATO, D.; GENELETTI, D.; ZAMBELLI, P. Spatial comparison of renewable energy supply and energy demand for low-carbon settlements. **Cities**, 28, n. 6, 2011. 557-566.

VIANNA, H. D.; POUEY, M. T. F. **Montagem e teste de um simulador físico de insolação - Heliodon - a ser usado como recurso diático no ensino de conforto térmico para edificações agrícolas**. CIC - XV Congresso de Iniciação Científica. Pelotas: UFPEL. 2006.

VINCKE, P. **l'Aide multicritère à la décision**. Bruxelles: Editions de l'Université de Bruxelles, 1989.

VITRUVE. **Les dix livres d'Architecture**. Paris: Errance, v. 1, 2006. 159 p.

WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Our Ecological Footprint:** Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island, BC: New Society Publishers, 1996.

WADDELL, P.; ULFARSSON, G. Introduction to Urban Simulation: Design and Development of Operational Models. In: STOPHER, P. R.; BUTTON, K. J.; KINGSLEY **Handbook in Transport, Volume 5:** Transport Geography and Spatial Systems. [S.l.]: Éditions Pergamon Press, 2004. p. 203-236.

WALRAVEN, R. Calculation the position of the sun. **Solar Energy**, 20, n. 5, 1978. 393-397.

WANG, B. Estimation of wind energy over roof of two perpendicular buildings. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics (trabalho em processo de avaliação)**, 2013.

WARD, L. G.; SHAKESPEARE, R. **Rendering with Radiance - The Art and Science of Lighting Visualisation**. San Francisco: Morgan Kauffmann, v. 1, 1997.

WASSERMAN, P. **Neural Computing Theory and Practice**. Nova York, EUA: Van Nostrand Rheinhold, 1989.

WETTER, M.; WRIGHT, J. A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization. **Building and Environment**, v. 39, p. 989-999, 2004.

WHILLIER, A. Calculating the position of the sun. **Solar Energy**, 20, n. 5, 1978. 393-397.

WRIGHT, J. A.; LOOSEMORE, H. A.; FARMANI, R. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 9, p. 959–972, 2002.

WRIGHT, J.; PEREZ, R.; MICHALSKY, J. J. Luminous efficacy of direct irradiance variations with insolation and moisture conditions.. **Solar Energy,** 42, n. 5, 1989. 387- 394.

YU, H. S. **Parametric architecture: performative/responsive assembly compon**. Massachusetts Institute of Technology. Boston, p. 126. 2009.

ZELLNER, P. **Hybrid space:** New forms in digital architecture. Londres: Thames and Hudson, 1999.

ZITZLER, E.; DEB, K.; THIELER, L. Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: empirical results.. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation** , v. 8, p. 173–95, 2000.

ZITZLER, E.; THIELE, L. Multi-Objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 3, n. 4, p. 257-271, 1999.

ZUNINO, G. et al. **Densité :opérations de logements et quartiers urbains,**. Rapport d'études, IAURIF. Paris, p. 94. 2009.

ANNEXE 1 – Liste des Publications

Publications dans des revues internationales

1. MARTINS, T. A. L ; ADOLPHE, L. ; BASTOS, L.E.G. From solar constraints to urban design opportunities : optimization of urban typologies in a tropical city in Brazil. *Energy and Buildings*. V. 76, p. 43-56, Junho de 2014.

2. MARTINS, T. A. L., BONHOMME, M., ADOLPHE, L. Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL. *Ambiente Construído* (Online). v.13, p.213 - 233, Dezembro de 2013.

Publications dans des conférences internationales

1. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BONHOMME, M. Building energy demand based on urban morphology analysis. Case study in Maceió, Brazil In: Passive and Low Energy Architecture, 2013, Munich. Sustainable Architecture for renewable future. , 2013. v.1. p.1-6.

2. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BASTOS, L. E. G. Avaliação preliminar do potencial solar em classes morfológicas urbanas de referência de Maceió-AL. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído., 2013, Brasília. Conforto e Projeto. ANTAC, 2013. v.1. p.1 – 10.

3. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Análise de sensibilidade sobre o impacto da geometria urbana no conforto térmico exterior em clima tropical In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído., 2013, Brasília. Conforto e Projeto. ANTAC, 2013. v.1. p.1-10.

4. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Efeitos do uso de galerias urbanas no conforto térmico exterior em clima tropical semiárido In: ENTAC, 2012, Juiz de Fora - MG. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Juiz de Fora: UFJF, 2012. v.1. p.1- 10.

5. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Microclimate Effects of Urban Geometry on Outdoor Thermal Comfort in the Brazilian Tropical Semi-arid Climate In: PLEA - Passive and Low Energy Architecture, 2012, Lima. Opportunities, limits and needs. Lima: PUC Lima, 2012. v.1. p.1 – 6.

6. NIEMEYER, M. L. A., MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L. Towards Sustainable Urban Planning for Brazilian Cities: A Knowledge-base to Integrate Environmental Predictive Data into a DSS In: INCOM, 2012, Bucarest. Information Control Problems in Manufacturing. Bucarest: ELSEVIER, 2012. v.1. p.1 – 6.

7. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Influence of Urban Geometry on Outdoor Thermal Comfort in Tropical Climate In: Climate and Construction, 2011, Karlshure. Climate and Construction. Karlshure: KIT, 2011. v.1. p.1- 6.