

DE CONDICIONANTES

SOLARES

À OPORTUNIDADES DE

DESENHO URBANO

OTIMIZAÇÃO DE TIPO-MORFOLOGIAS URBANAS
EM CONTEXTO DE CLIMA TROPICAL

Tathiane Agra de Lemos Martins



PROARQ UFRJ
PROGRAMA DE 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



A Lou, luz da minha vida.

1ª Edição, 2020

Coordenação Editorial /
Denise Corrêa / Daverson Guimarães

Capa
Ana Rolo – Coletânea Design & Comunicação

Diagramação
Maristela Carneiro

Revisão ortográfica
Algo Mais Soluções

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Martins, Tathiane Agra de Lemos

De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano-
Otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical.
1ª ed. Rio de Janeiro: Rio Books, Proarq – FAU -UFRJ. 2020
255 p., 16 x 23 cm

ISBN 978-65-87913-18-6
ISBN 978-65-88335-04-8

1. Morfologia urbana 2. Energia nas cidades 3. Potencial solar 4. Otimização 5. Algoritmos genéricos 7. Clima tropical

I. Título CDD: 720

Índices para catálogo sistemático

Todos os direitos desta edição são reservados a: Editora Grupo Rio Books e Proarq Fau-UFRJ
Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida ou transmitida por qualquer forma e/ou quaisquer meios (eletrônicos ou mecânicos, incluindo fotocópias e gravação) ou arquivada em qualquer sistema de banco de dados sem permissão escrita do titular do editor. Os artigos e as imagens reproduzidas nos textos são de inteira responsabilidade de seus autores.

Todos os esforços foram feitos no sentido de se encontrar a fonte dos direitos autorais de todo o material contido nesse livro.

Rio Books
Rua Valentin da Fonseca 21 / 504 – Sampaio
Rio de Janeiro – RJ
WhatsApp (21) 99312-7220 CEP 20950-220
Rio de Janeiro – RJ
contato@riobooks.com.br
www.riobooks.com.br

EDITORIA PROARQ
editoria.proarq@fau.ufrj.br
Programa de Pós Graduação em arquitetura da FAU-UFRJ (PROARQ)
Av. Pedro Calmon, 550, Sala. 433
Prédio da Reitoria, Ilha do Fundão
Rio de Janeiro - RJ 21941-590
Telefone: +55 (21) 3938-0288

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	7
CAPÍTULO I A ENERGIA SOLAR NO AMBIENTE URBANO	21
I.1 . A ENERGIA SOLAR NA BASE DOS PROCESSOS E DA FORMAÇÃO DOS CLIMAS.....	22
I.2 . AVALIAÇÃO DA INSOLAÇÃO NA ENVOLTÓRIA DE EDIFÍCIOS URBANOS	31
I.3 . DA PROBLEMÁTICA SOLAR NAS CIDADES À PARAMETRIZAÇÃO DA FORMA URBANA	62
CAPÍTULO II ESTUDO MORFOSOLAR DA CIDADE	66
II.1 . O ESTUDO DA FORMA E DO TIPO URBANO PARA INTEGRAÇÃO DE ASPECTOS AMBIENTAIS À CONCEPÇÃO DOS ESPAÇOS .	67
II.2 . MÉTODOS E MÉTRICAS DE ANÁLISE AMBIENTAL E ENERGÉTICA PARA A MORFOLOGIA URBANA	70
II.3 . MODELAGEM URBANA: PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA ANÁLISE TIPO-MORFOLÓGICA	92
II.4 . APLICAÇÃO DO ESTUDO À MACEIÓ –AL.....	96
II.5 . ESTUDO DO DESEMPENHO SOLAR DAS ESTRUTURAS URBANAS DE MACEIÓ	119
CAPÍTULO III ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS FATORES TIPO-MORFOLÓGICOS	146
III.1 . METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS MULTIFATORIAL	146
III.2 . ESTUDO DOS FATORES TIPO-MORFOLÓGICOS INFLUENTES.....	154
III.2.1.5 . RESOLUÇÃO ESPACIAL	156
CAPÍTULO IV OTIMIZAÇÃO DO POTENCIAL SOLAR DE TIPOLOGIAS URBANAS	178
IV.1 . AUXÍLIO À DECISÃO MULTIFATORIAL E MULTIOBJETIVO NA CONCEPÇÃO DOS ESPAÇOS CONSTRUÍDOS.....	178
IV.2 . METODOLOGIA DE PROJETO POR OTIMIZAÇÃO	187
IV.3 . OTIMIZAÇÃO DA FORMA URBANA PARA INTEGRAÇÃO DOS CONDICIONANTES SOLARES EM MACEIÓ.....	196
CAPÍTULO V ANÁLISE PROSPECTIVA DOS RESULTADOS PARA MACEIÓ	219
V.1 . CONTRIBUIÇÃO À ABORDAGEM INTERTEMÁTICA E INTERDISCIPLINAR PARA ENERGIA URBANA.....	220
V.2 . AUXÍLIO À DECISÃO URBANA.....	227
V.3 . DISPOSITIVOS NO CONTEXTO DA INTERVENÇÃO URBANA	227
CONCLUSÕES	239
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	245

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo apoio fundamental e pelos recursos provenientes do programa Proex (Programa de Excelência Acadêmica) que possibilitaram a publicação desse livro.

À minha família, em especial a minha irmã Michele e minha guerreira e amada mãe pelo incondicional estímulo à educação e à qualificação profissional.

Ao Luc, pelo companherismo e otimismo em todos os momentos.

Ao querido professor Leopoldo, pelo apoio constante e pelos conhecimentos generosamente transmitidos ao longo da realização dessa pesquisa.

Aos colegas da ENSA Toulouse e do laboratório LRA pelos conhecimentos compartilhados e pela amizade.

Ao PROARQ/UFRJ pela confiança ao longo de todos esses anos e pelo estímulo à produção científica.

À equipe da ESSS, pela concessão da licença do programa modeFRONTIER®.

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

INTRODUÇÃO

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 ecológica¹ 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 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 1). 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.

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.

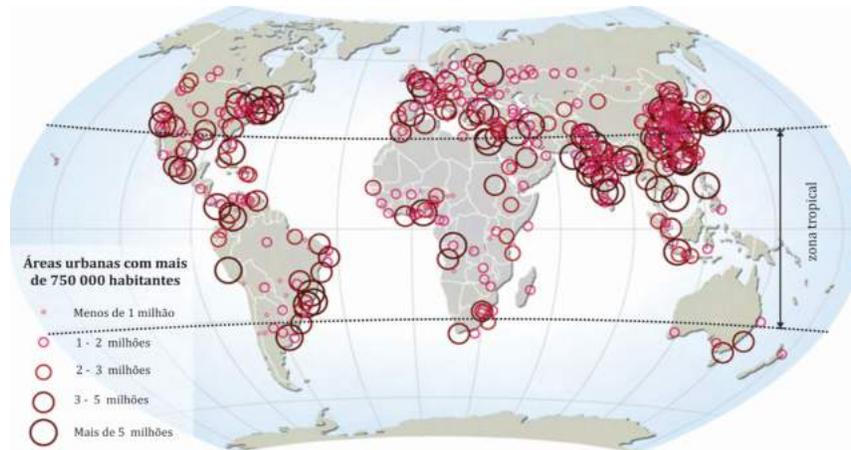


Figura 1: processo da metropolização no mundo. Fonte: Nordpil (2007).

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 2).

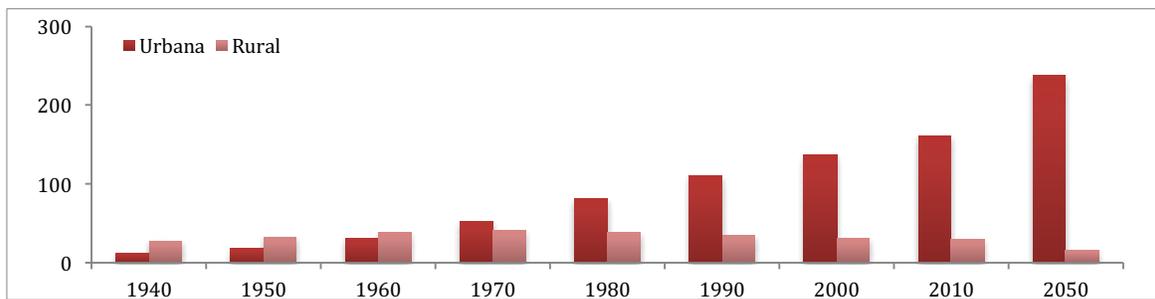


Figura 2: crescimento da população urbana brasileira ao longo dos últimos 70 anos e a projeção para 2050. Fonte: IBGE(2010) e ONU(2010).

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 3).

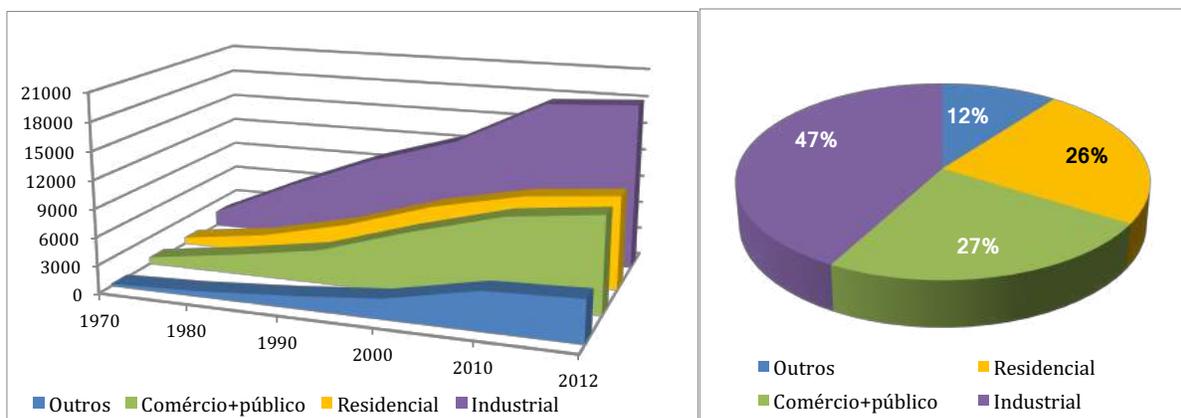


Figura 3: (a) evolução do consumo de energia elétrica por setor no Brasil, em toneladas equivalentes de petróleo e (b) proporção da distribuição. Fonte: BRASIL, 2013.

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, termelétricas 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 4, 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).

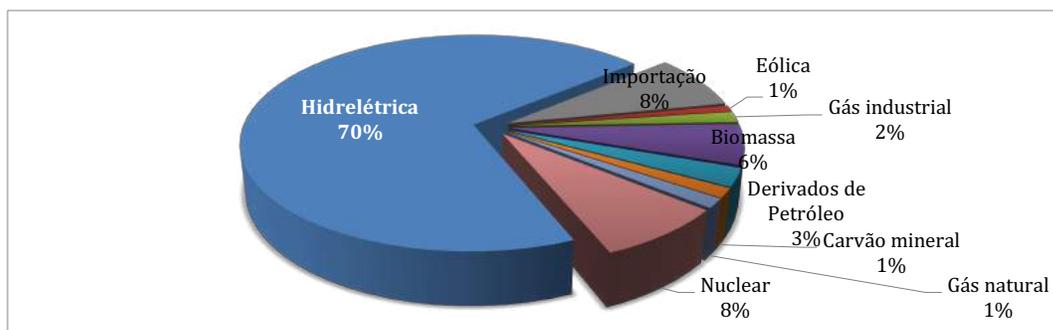


Figura 4 : matriz energética no Brasil. Fonte: BRASIL, 2013.

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) (MAÍZIA, 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 5). 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 por edifício por edifício torna-se difícil ou mesmo impossível”, dada a importante influência exercida de um edifício sobre o outro.

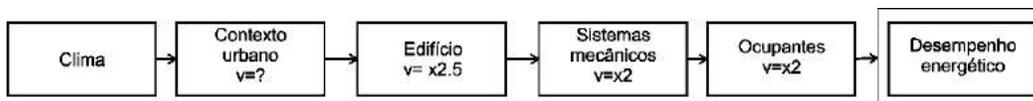


Figura 5: fatores que influenciam o desempenho energético dos edifícios. Fonte: Ratti, Baker e Steemers (2005).

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 morfologia² 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 cidade³. 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 consequência, 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.

Exemplificando, para uma mesma área urbana de 1 hectare de solo, é possível estabelecer diversas densidades de ocupação (Figura 6), 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.

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.



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 às 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 médio⁴ 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 muitas 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, compactidade/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 europeias 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 reduziram 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

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

quando os edifícios são mais compactos (menor coeficiente de forma⁵). 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 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 cobertura, 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

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.

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 tipomorfologia 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 transmissão⁶ 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, 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 inteligentes⁸. 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,

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.

essa tecnologia se pagaria de maneira relativamente rápida. Outrossim, os benefícios das microrredes 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 7 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 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.

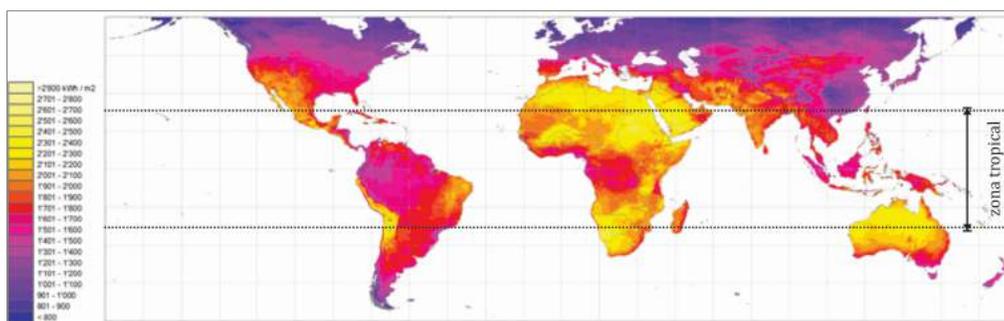


Figura 7 : distribuição da irradiação global direta nas diferentes regiões do mundo. Fonte: Meteonorm 7.0 (2012).

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 8). 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 8 : 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 8). 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 fenómenos 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.

A partir 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 infraestrutura 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 a 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 Macció 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 9).

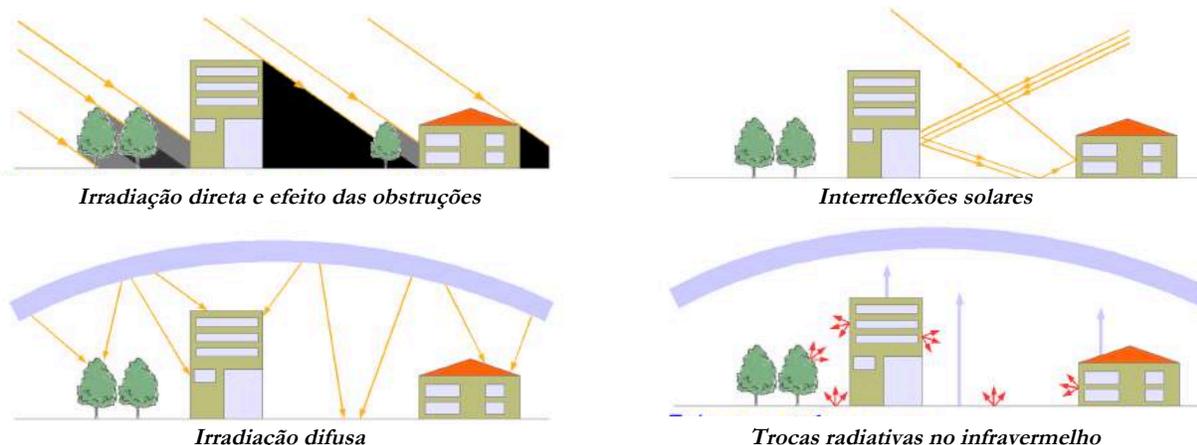


Figura 9: fenômenos radiativos considerados no modelo de análise utilizado no método do trabalho.

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 10).

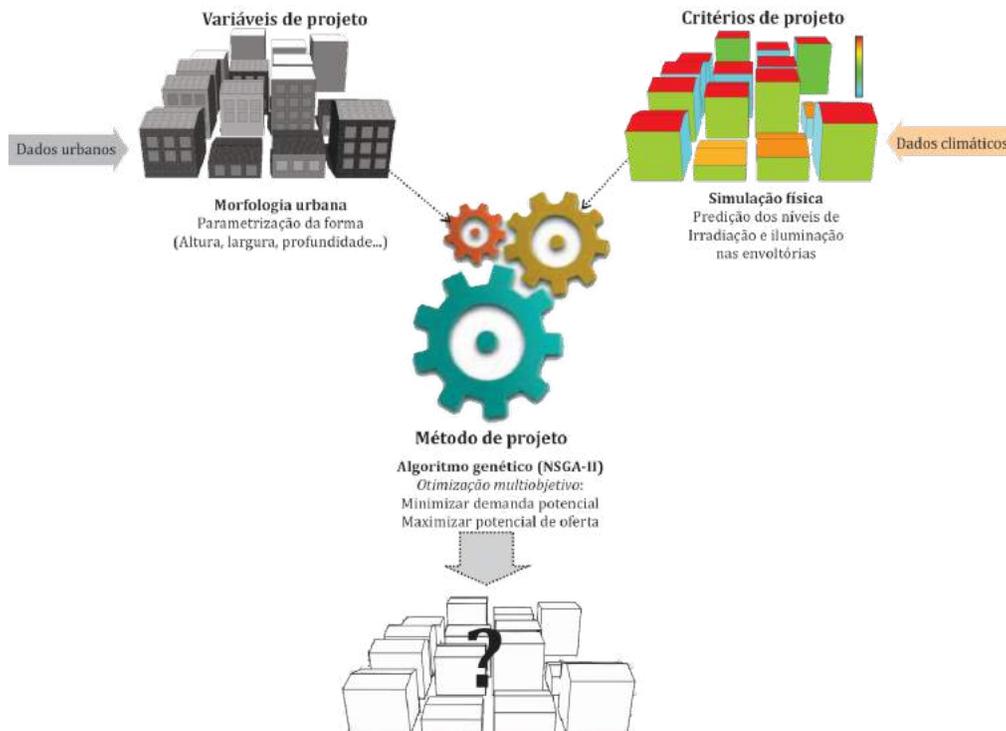


Figura 10: abordagem metodológica da pesquisa.

A presente pesquisa apresenta-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

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 11.



Figura 11 : 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 (METEOFRENCE, 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 12).

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 13). 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.

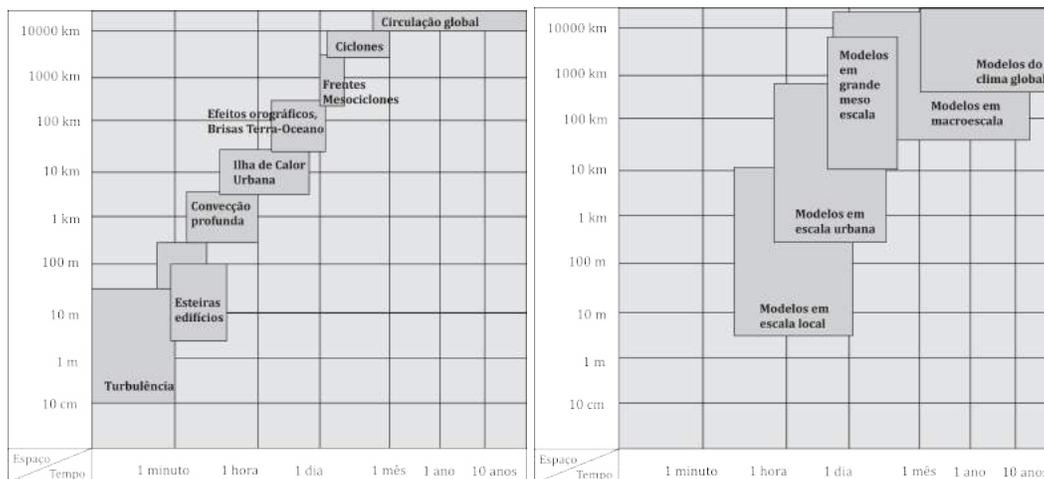


Figura 12: (a) relação tempo e escala horizontal dos fenômenos atmosféricos comuns (esquerda); (b) relação tempo e escala de diversos modelos atmosféricos. Fonte: Moussiopoulos (2003).

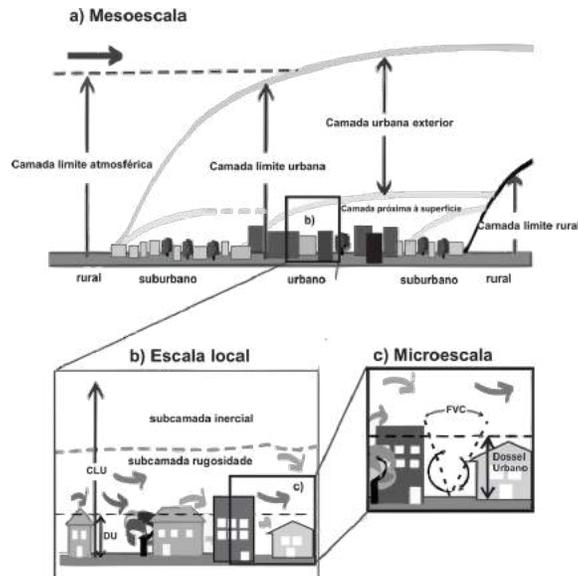


Figura 13: esquema da interrelação das principais escalas climáticas. Fonte: adaptado de Oke (2006).

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 intervêm, 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.

1.1.4. 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 local⁹.

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 14). A definição da real extensão dentro dessa escala, será discutida

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

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 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.

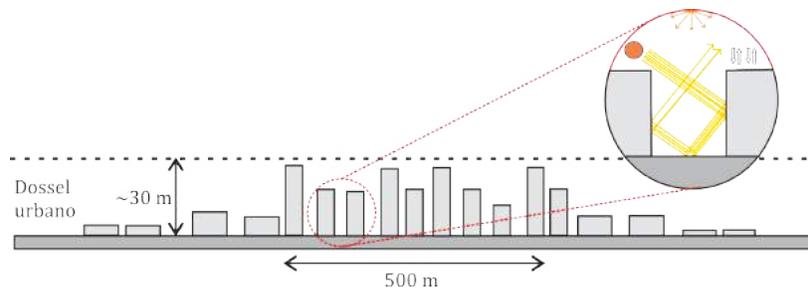


Figura 14: esquema ilustrativo da escala horizontal e vertical de estudo dos fenômenos radiativos. Fonte: ilustração do autor.

1.1.5. Clima nos trópicos

A zona geográfica tropical é aquela compreendida entre os Trópicos de Câncer ($23^{\circ}27'N$) e de Capricórnio ($23^{\circ}27'S$) 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 15: (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 16); (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.

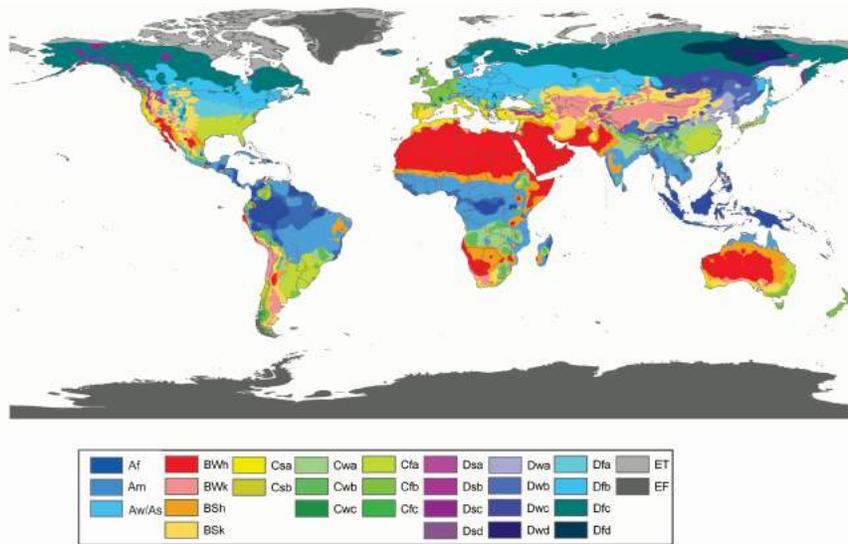


Figura 15: classificação climática de Köppen. Fonte: Peel, Finlayson e McMahon (2007).

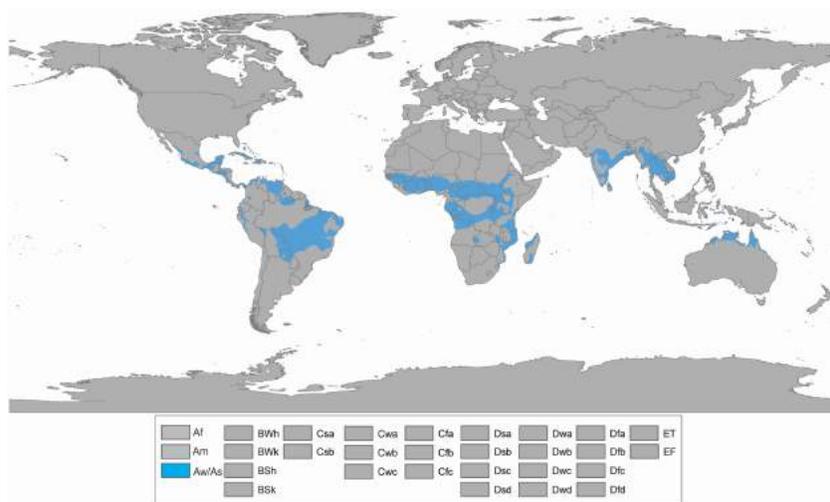


Figura 16: regiões no globo de clima tropical úmido com estação seca (Aw/As). Fonte: Peel, Finlayson e McMahon (2007).

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 subtropicais. 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 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

¹⁰ Ver glossário.

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 17).

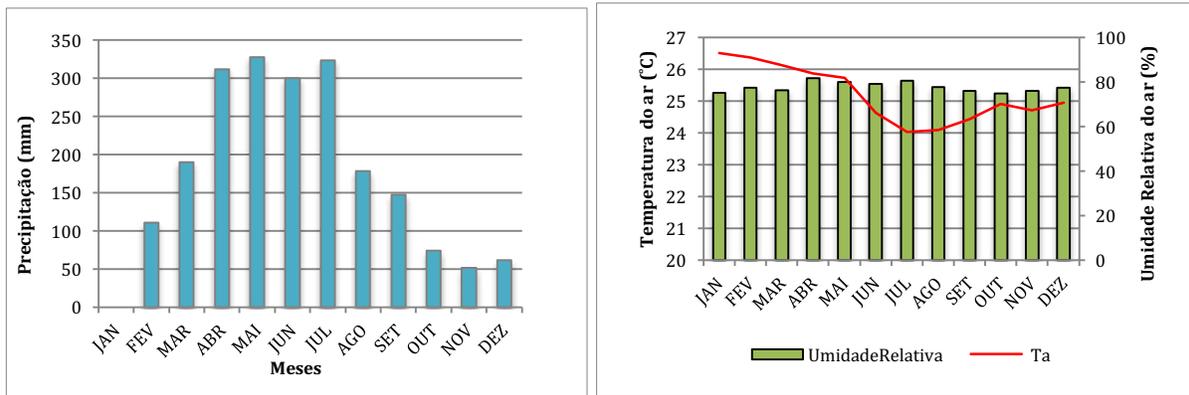


Figura 17: temperatura, umidade relativa do ar e precipitação ao longo do ano para Maceió. Fonte : Ano climático Metonorm (2012).

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 18). Observa-se que as localidades que apresentam maiores níveis de irradiação, sobretudo no verão (Figura 18b), 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).

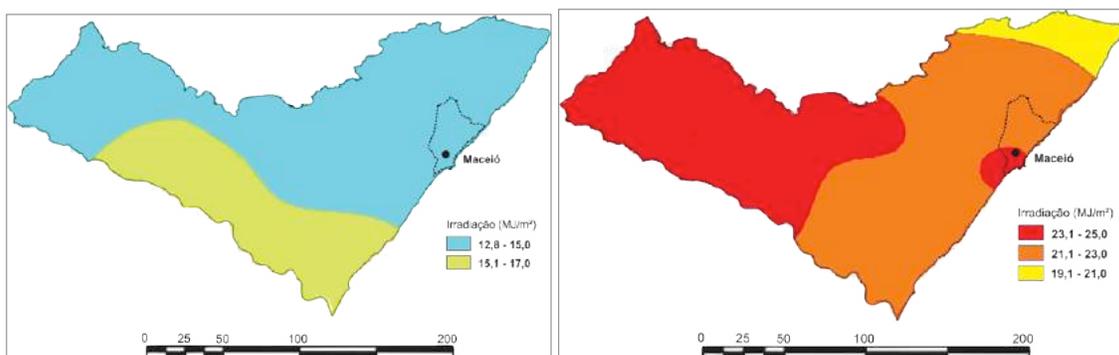


Figura 18: irradiação para o mês de Julho (a) e para o mês de Janeiro (b). Fonte : Atlas solarimétrico de Alagoas ; Eletrobrás (2008).

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 19a). 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.

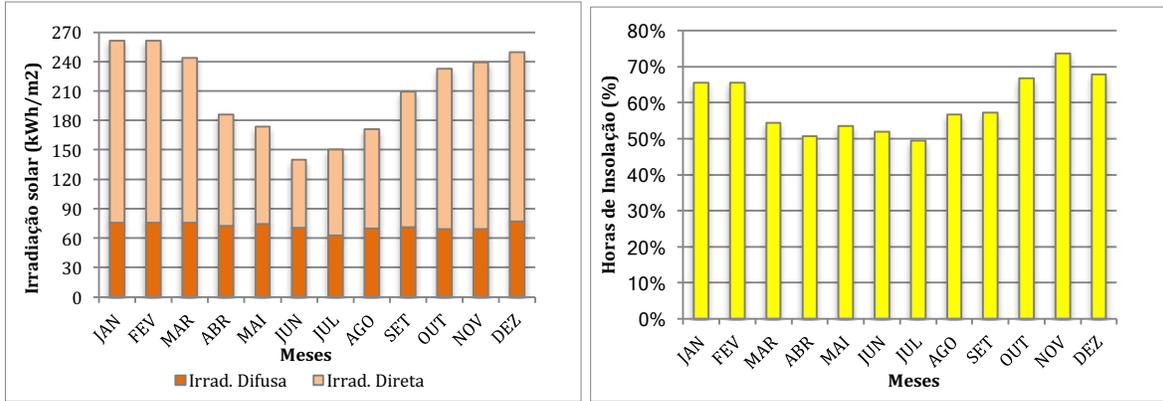


Figura 19: irradiação solar (a) e probabilidade de insolação (b) mensal para Maceió. Fonte : Ano climático Metonorm (2012).

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 19b).

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 20a, 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 19), 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.

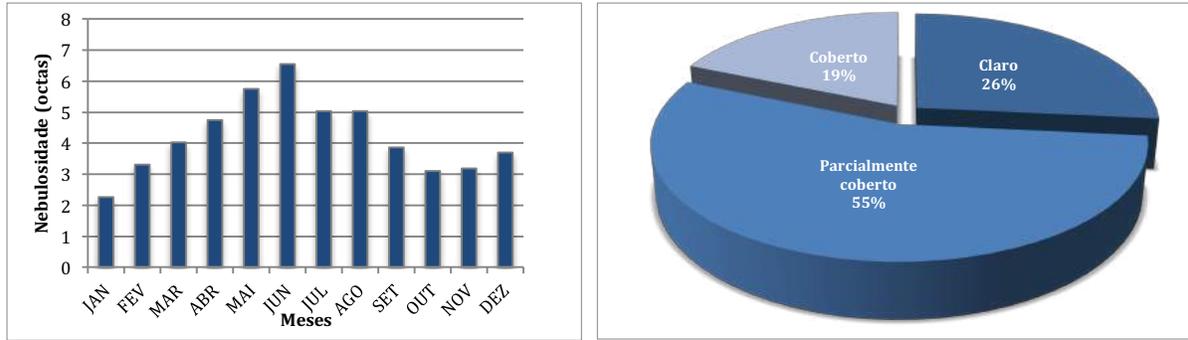


Figura 20: nebulosidade (a) e probabilidade do tipo de céu (b) para Maceió. Fonte : Ano climático Metonorm (2012).

A probabilidade de ocorrência de tipos de céu para Maceió, conforme Tabela 1, são apresentados na Figura 21. 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.

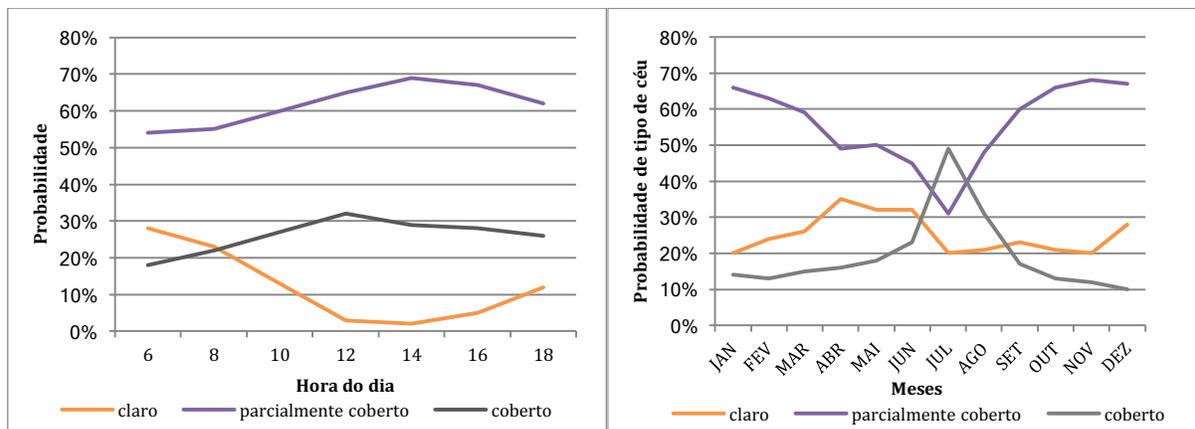


Figura 21: probabilidade de tipo de céu ao longo das horas do dia e ao longo dos meses do ano para Maceió. Fonte: Cabus (2002).

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 22).

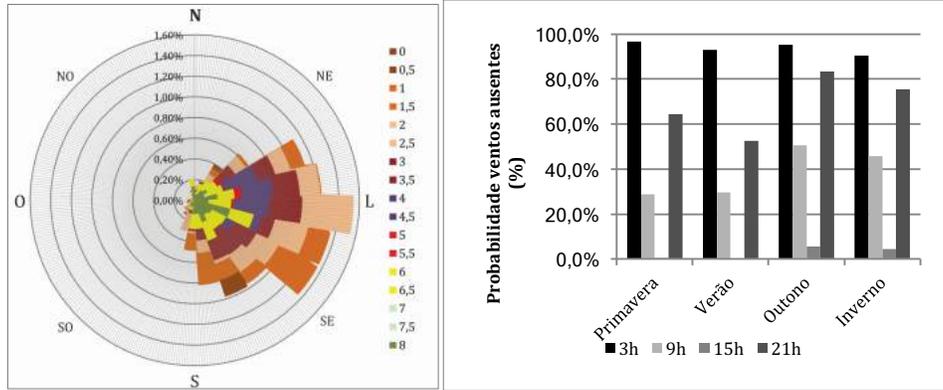


Figura 22: frequência da velocidade do vento por direção ao longo do ano, dada pela estação meteorológica de Macció-AL. Fonte : Ano climático Metonorm (2012).

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 23 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.

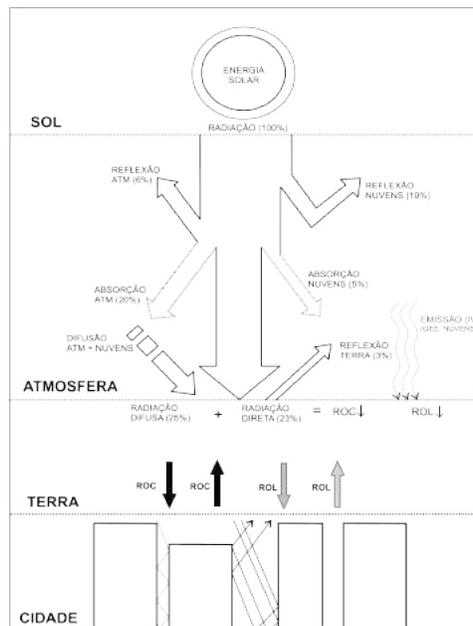


Figura 23: ilustração esquemática da abordagem adotada nessa seção do capítulo. Fonte: ilustração do autor.

1.2.1. 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 eletromagnéticas¹² 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/m² (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 ($\lambda \leq 0,4 \mu\text{m}$), 45% estaria na faixa do visível ($0,4\mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,74 \mu\text{m}$), enquanto que os 46% restantes são do domínio infravermelho ($\lambda > 0,74 \mu\text{m}$) (Figura 24).

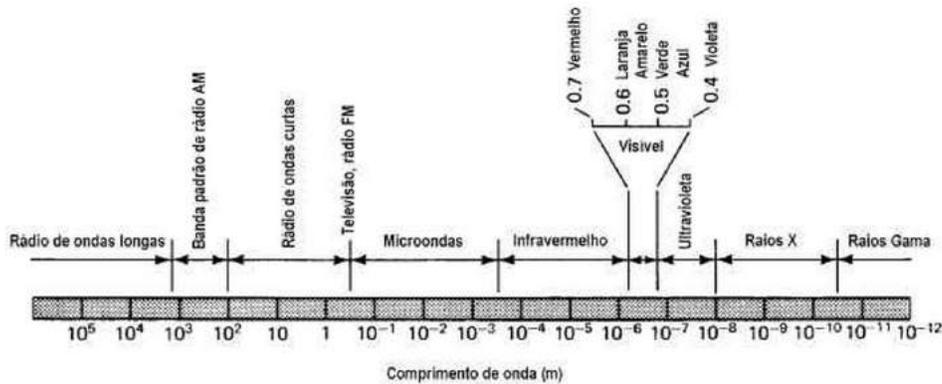


Figura 24: espectro eletromagnético da energia solar. Fonte: Ayoade (1996).

1.2.2. 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):

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

onde: $G = 1367 \text{ W.m}^{-2}$ 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.

1.2.3. Trocas radiativas na atmosfera

1.2.3.1. 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 25, 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).

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

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 sucintamente (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.

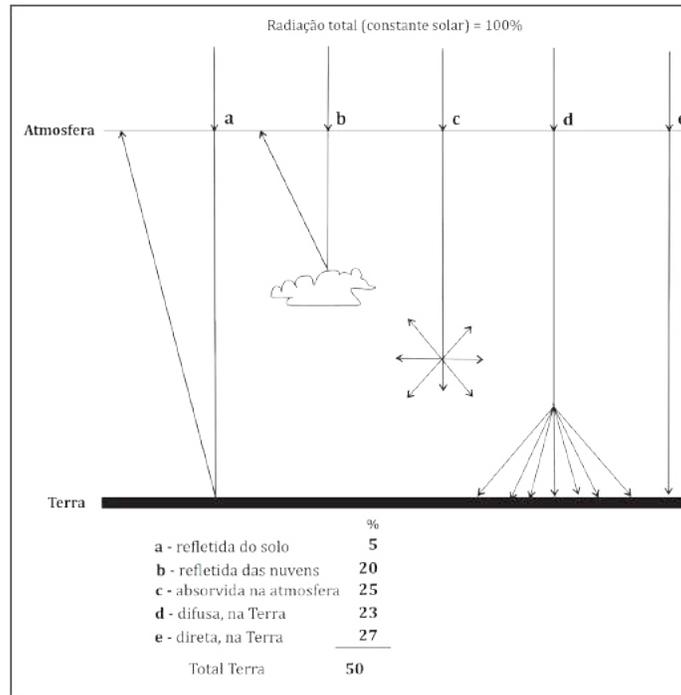


Figura 25: distribuição percentual da radiação solar incidente. Adaptado de Koenigsberger *et al.*, 1977.

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, absorvidade, 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 operacionalidade¹³. 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 principais¹⁴ 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 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$) em todas as direções (Figura 26). Assim, a irradiância solar difusa, $I_{d\beta}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), incidente numa superfície de inclinação β , pode ser estimada em função da irradiância difusa no plano horizontal, I_{dH} :

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.

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

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):

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

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-espalhamento¹⁵ 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 26) ou modelos de três componentes (circumsolar + plano + horizonte) (KLUCHER, 1979) (REINDL, BECKMANN e DUFFIE, 1990).

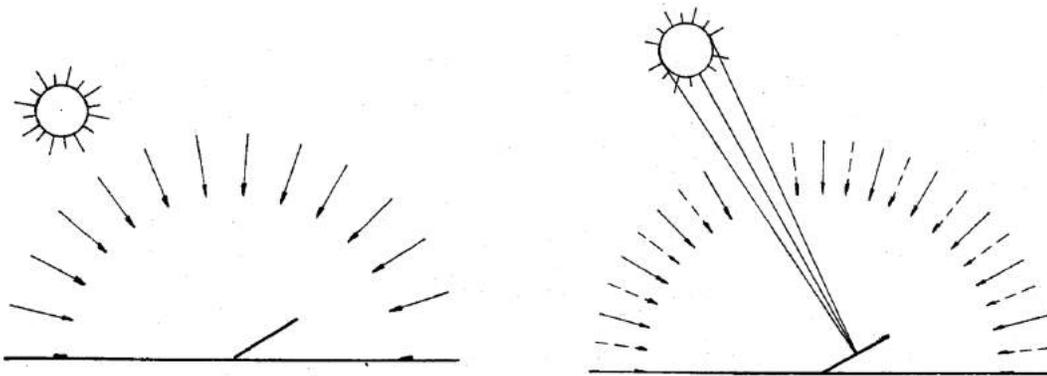


Figura 26: modelo de céu isotrópico (esquerda) e modelo anisotrópico (circumsolar + plano) proposto por Hay (1979).

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 27.

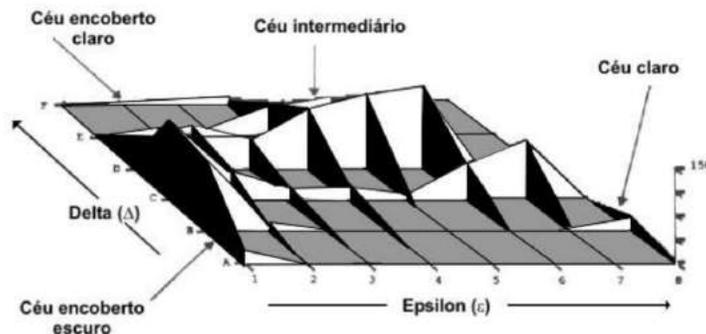


Figura 27: exemplo de parametrização das condições de céu. Fonte: Perez *et al.* (1987).

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

¹⁵ Ver Glossário.

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

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

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 **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.**).

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

$$F_2 = f_{21} + f_{22}\Delta + f_{23}Z \quad [/\] \quad [\text{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 = m I_{dh}/I_{eh} \quad [/\] \quad [\text{Eq. 7}]$$

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

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

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} \quad [/\] \quad [\text{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 28). 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.

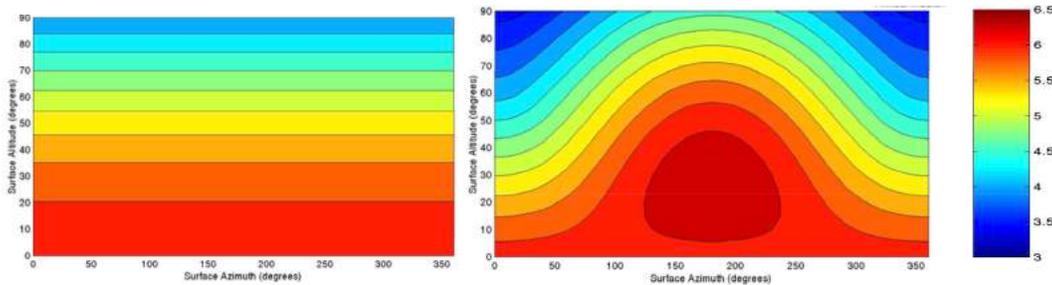


Figura 28: distribuição da radiância em céu isotrópico (esquerda) e anisotrópico direita. Fonte: Robinson (2011).

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 29, 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.

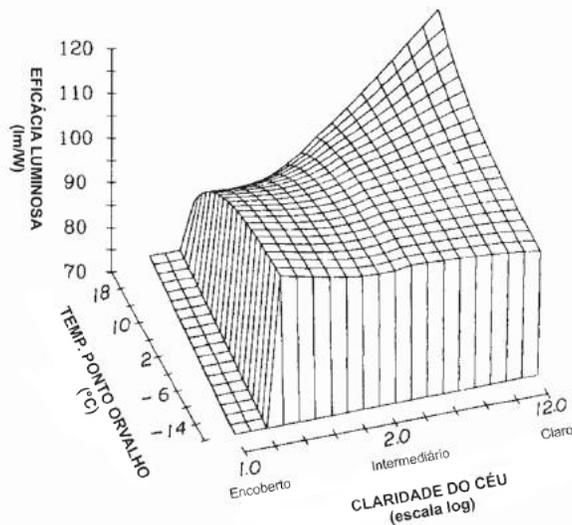


Figura 29 : Superfície Polinomial com variação da eficácia luminosa direta (K_B) em função da claridade do céu (ϵ) e brilho do céu (Δ), para ângulo zenital e temperatura constantes. Fonte: Perez (1990).

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, Perraudau 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 Perraudau) 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 30). 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).

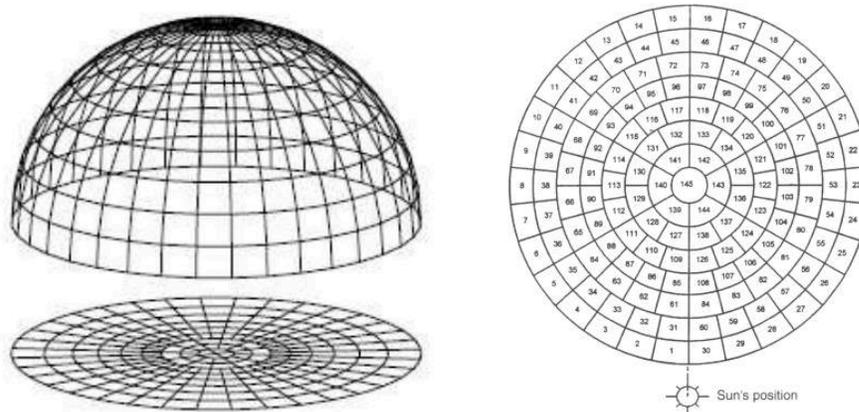


Figura 30: esquema de subdivisão do céu em parcelas. Fonte: Cabus (2002).

(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 absorvidade 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):

$$I_L = \epsilon\sigma(T_{amb}^4 - T_s^4) \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad [\text{Eq. 10}]$$

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 solar¹⁶ (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):

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

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 MODTRAN¹⁷. 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):

$$\epsilon_0 = 0.741 + 0.00062 T_d \quad [K] \quad [Eq. 12]$$

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: $(\epsilon - \epsilon_0)/(1 - \epsilon_0) \approx n^{2.5}$, com n sendo a fração de nuvens no céu ($n = C/8$, onde C seria a nebulosidade¹⁸ em octas), de modo que: $\epsilon_{céu} = \epsilon_0 + (1 - \epsilon_0) n^{2.5}$ e:

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

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: $T_{céu} = T_a \epsilon_{céu}^{0.25}$, 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.

1.2.4. 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 31):

$$Q^* = OL \downarrow - OL \uparrow + (1 - \rho) OC \downarrow \quad [Eq. 14]$$

Onde,

Q^* , a radiação resultante (W.m⁻²);

$OL \downarrow$, a radiação atmosférica descendente;

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.

¹⁷ MODTRAN (*MOD*erate resolution *atmospheric TRAN*smission) 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.

$OL\uparrow$, a radiação de onda longa, emitida pelo meio;
 $OC\downarrow$, a radiação solar global recebida sobre uma superfície horizontal;
 ρ é o albedo da superfície.

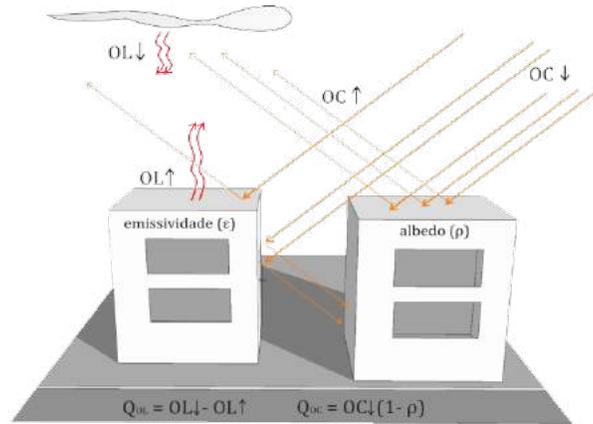


Figura 31: esquema ilustrativo das trocas radiativas na cidade. Fonte: ilustração do autor (2013).

I.2.4.1. Radiação solar incidente ($OC\downarrow$)

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 extrínsecos, 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 ($\alpha OC\downarrow$)

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

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

No balanço radiativo, a radiação solar refletida ($\alpha OC\downarrow$) 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 tipomorfológico 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 urbanos¹⁹ 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 32 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”.

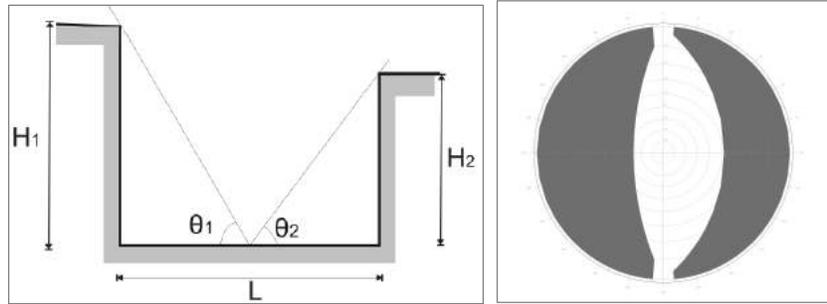


Figura 32: ângulos de obstrução e as dimensões para cálculo do fator de visão do céu e prospecto médio em cânions urbanos. Fonte: ilustração do autor, adaptado de Oke (1987).

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

$$P_m = (H_1 + H_2/2)/L \quad [1] \quad [\text{Eq. 17}]$$

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 ($\alpha_{\text{solar}} = 1 - \rho$) 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 emissividade²⁰ 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 térmica²¹, a condutividade térmica²², 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 al.* (1996) analisaram o comportamento térmico do concreto (albedo de 0,45 e 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 33 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

²⁰ A emissividade (ϵ) 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.

albedo e que, portanto, absorvem fortemente a radiação solar, a diferença de temperaturas entre a superfície e o ar ambiental, ΔT_{s-a} , pode atingir 50°C. Para superfícies menos absorventes (de elevado albedo), como a pintura branca, $\Delta T_{s-a} = 10^\circ\text{C}$. 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.

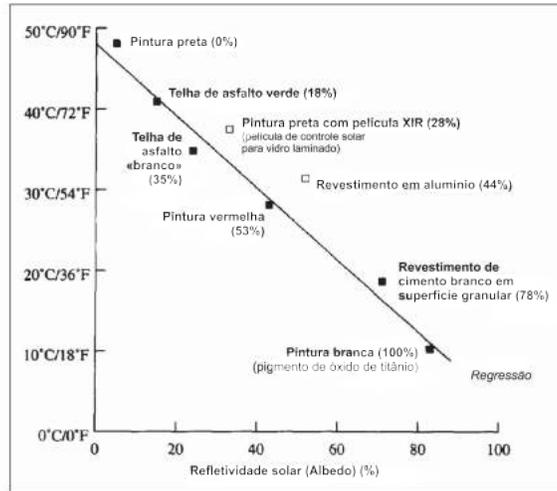


Figura 33: diferença entre a temperatura da superfície e do ar, em função do albedo de diferentes revestimentos. Fonte: adaptado de Rosenfeld *et al.* (1995).

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 34). 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.

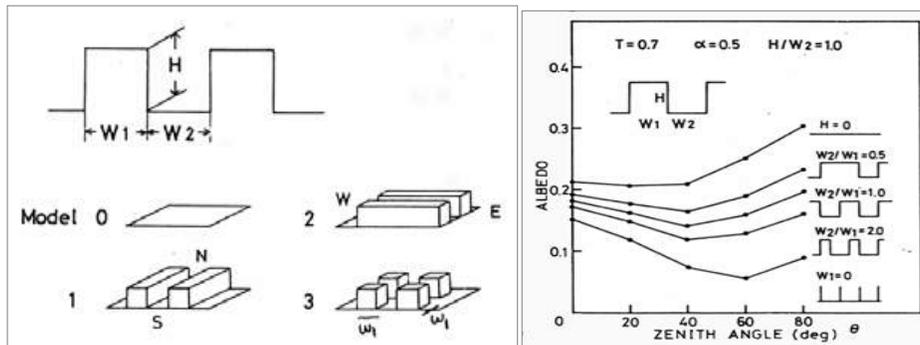


Figura 34: modelos de experimentação para análise do albedo, em função da variação do zênite solar e perfis de ruas. Fonte: Aida e Gotoh (1982).

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.

1.2.5.1. 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 calma, 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, H_m/L) ou do fator de visão do céu ($\psi_{céu}$), como discutido anteriormente (Eq.18 e 19).

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

$$\Delta T_{(u-r)} = 15,27 - 13,88 \psi_{céu} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad [\text{Eq. 19}]$$

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 vegetizadas 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/m² 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/m² num dia, ou seja pouco mais do dobro do calor resultante das atividades humanas no verão (DETTWILLER, 1978).

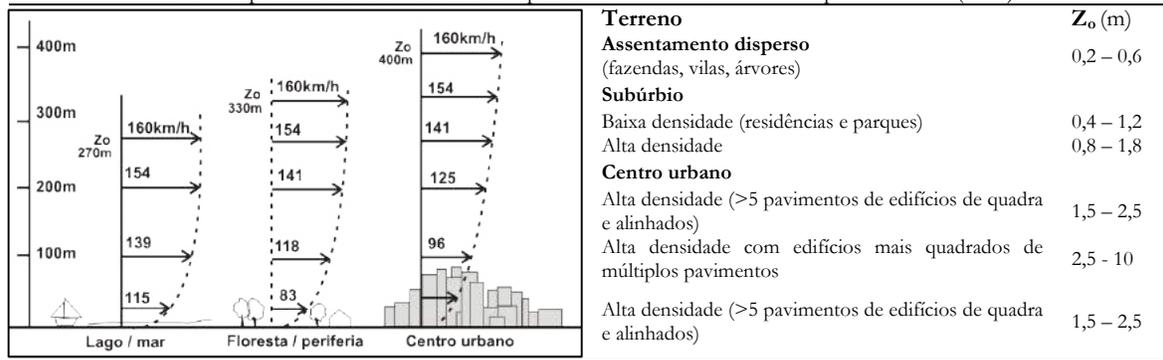
(b) Modificação no escoamento do ar

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 envolturas 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. Conseqüentemente, 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).



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 turbulência²³ (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 0,025W.m⁻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).

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.

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).

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 35) igual à aproximadamente 66°. Ou seja, nesse caso, cerca de 2/3 da abóbada celeste está obstruída pelo edifício em frente.

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

Se compararmos com um edifício cujas fachadas verticais possuem 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 35). O que pode ter implicações consideráveis no consumo energético do edifício.

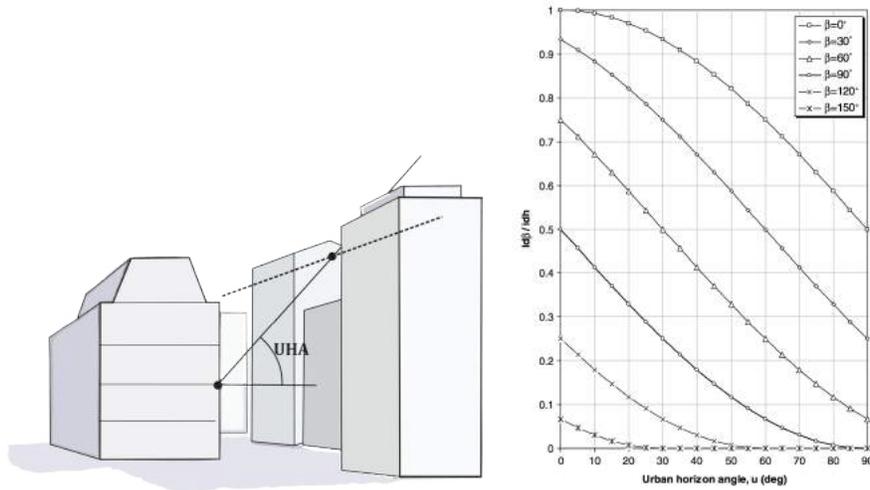


Figura 35: ângulo do horizonte urbano equivalente (UHA). E a razão da irradiação difusa incidente e horizontal como função do UHA e da inclinação do plano de análise. Fonte: Robinson e Stone (2004).

(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 36). 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 36: 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 MDE 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 37. 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 37: (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 sombreado 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 37c) (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 radiação 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 38).

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

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

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:

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

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

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

E, da energia recebida pela reflexão com o solo:

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

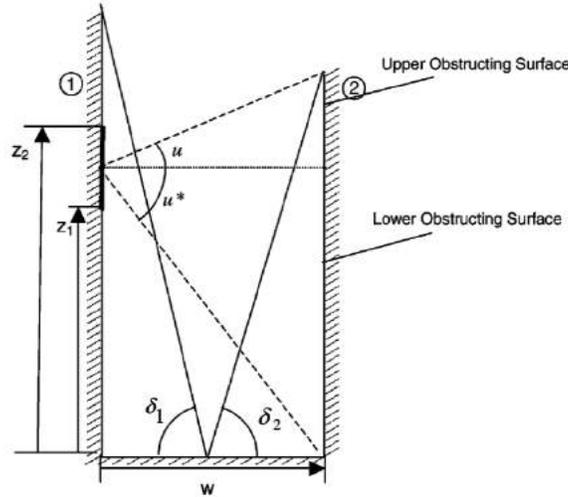


Figura 38: cânion urbano equivalente. Fonte: Robinson e Stone (2004).

(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 Radiosidade²⁵. 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 39. 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.

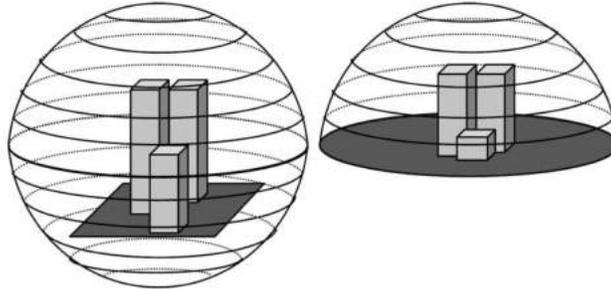


Figura 39: reflexões a partir de um meio-hemisfério superior e meio-hemisfério inferior. Fonte: Robinson e Stone (2004).

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:

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

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 40). De modo que assim esta radiância pode ser definida (ROBINSON e STONE, 2004):

$$R_i = \ell v_i I_{ah} \sum_{j=1}^{145} (\ell v_j \phi_j \sin \gamma_j) \quad [W.m^{-2}.sr] \quad [Eq. 25]$$

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

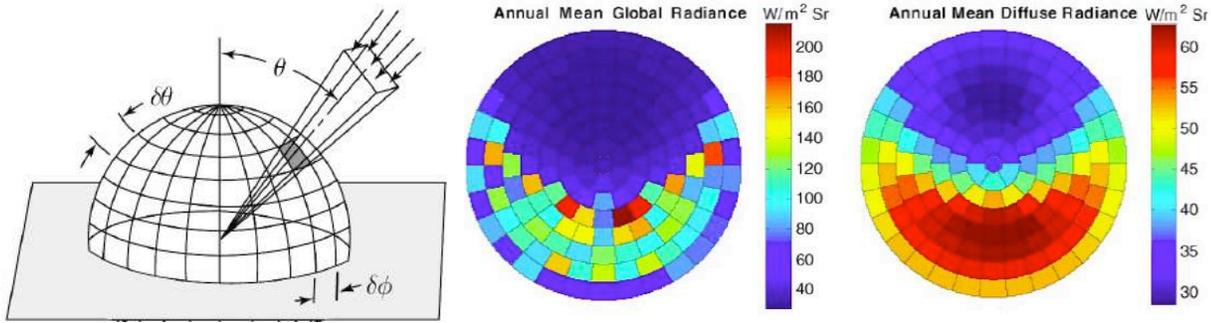


Figura 40: definição do ângulo sólido e da radiância para cada parcela da abóbada celeste. Fonte: Robinson e Stone (2004). Em função da geometria urbana e do edifício estudado, calcula-se para cada uma das parcelas (i):

- 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:

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

Na qual:

- $\bar{\gamma}_i$ é a altitude do centro da parte visível da parcela do céu i .
- $\bar{\alpha}'_i$ é o azimuth 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:

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

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

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

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, $\sigma_{\text{aproximativo}}$.

O algoritmo reparte, em seguida, a fachada em zonas de $\sigma_{\text{aproximativo}}$ homogêneo (Figura 41). E calcula a radiação recebida no centro de cada nova zona.

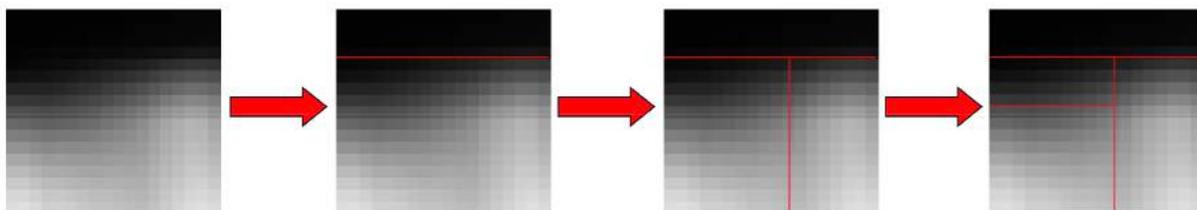


Figura 41: repartição da fachada conforme valores do fator de visão, $\sigma_{\text{aproximativo}}$. Em escala de cinza, os níveis de σ_i por cada célula da malha da fachada e, em vermelho, repartição de zonas homogêneas. Fonte: Robinson e Stone (2004).

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

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

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

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 difusamente²⁶. Esse processo é repetido, mas na seqüência, (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 39), de modo a computar reflexões que vêm dos planos inferiores, inclusive do solo, para a superfície estudada. Sendo expressa da seguinte forma:

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

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 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

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.

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 42).

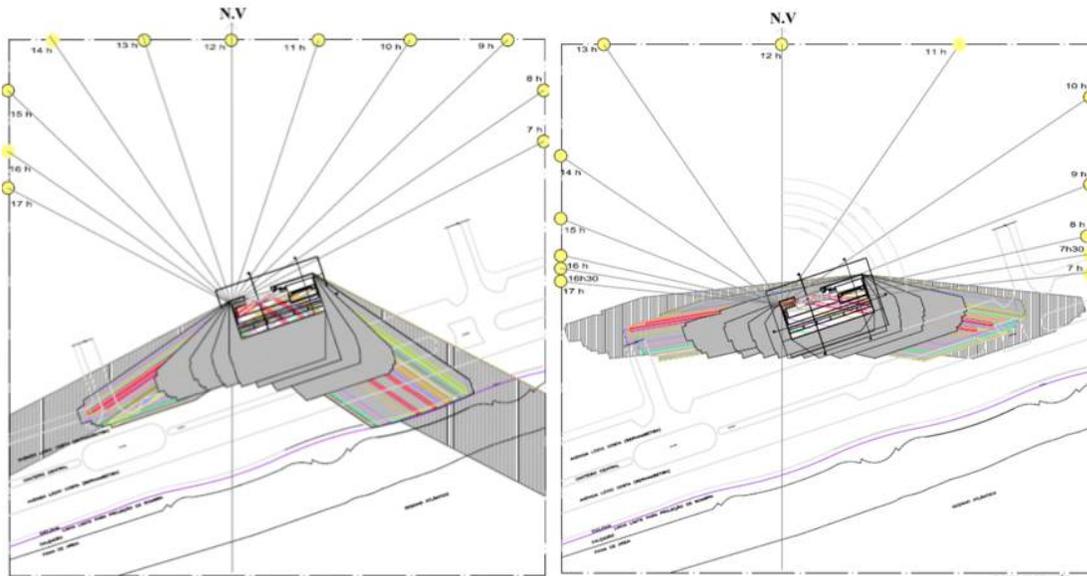


Figura 42: Estudo gráfico de projeção de sombras. Fonte: ilustração do autor (2011).

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 43).

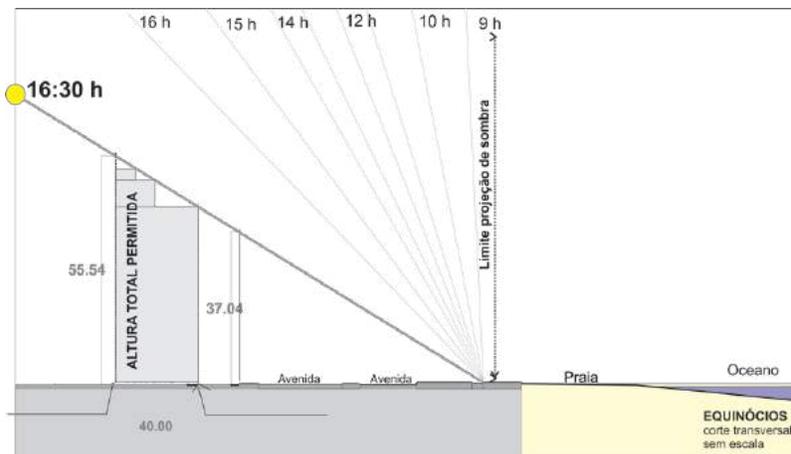


Figura 43: Estudo gráfico para conhecer altura limite permitida para construir sem projetar sombra em determinados espaços coletivos. Fonte: ilustração do autor (2011).

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 44), 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 44).

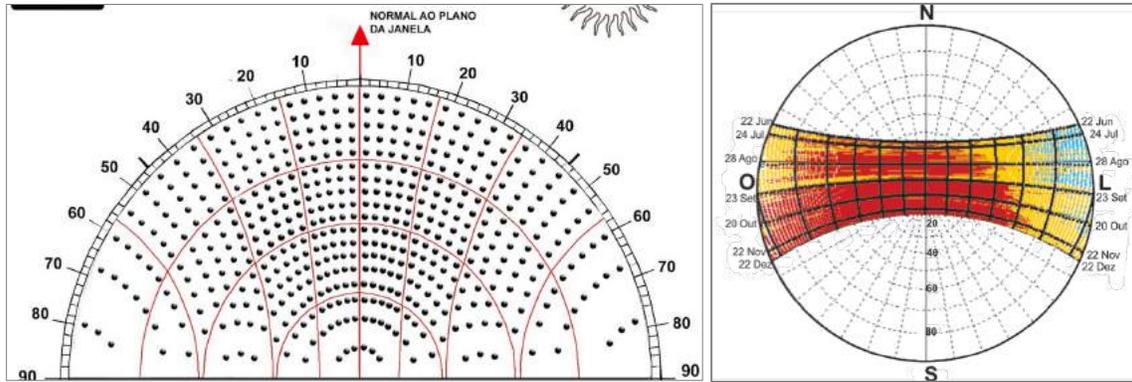


Figura 44: Diagrama de Pleyel com dados de iluminância externa e diagrama solar com sobreposição de dados de temperatura do ar externa para Maceió. Fonte: LABESEE, UFSC (2013).

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 45.

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).

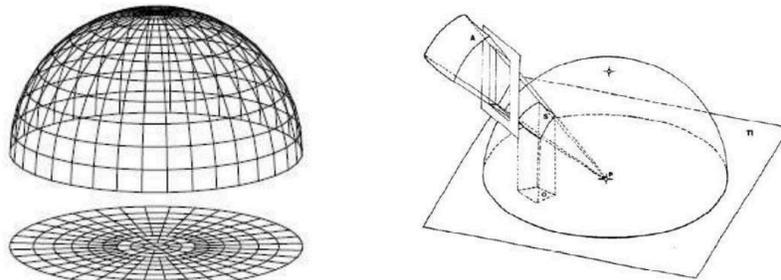


Figura 45 : hemisfera de raio unitário (a) ; Princípio do ângulo sólido projetado (b). Fonte : ABNT (2004).

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 46). 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.

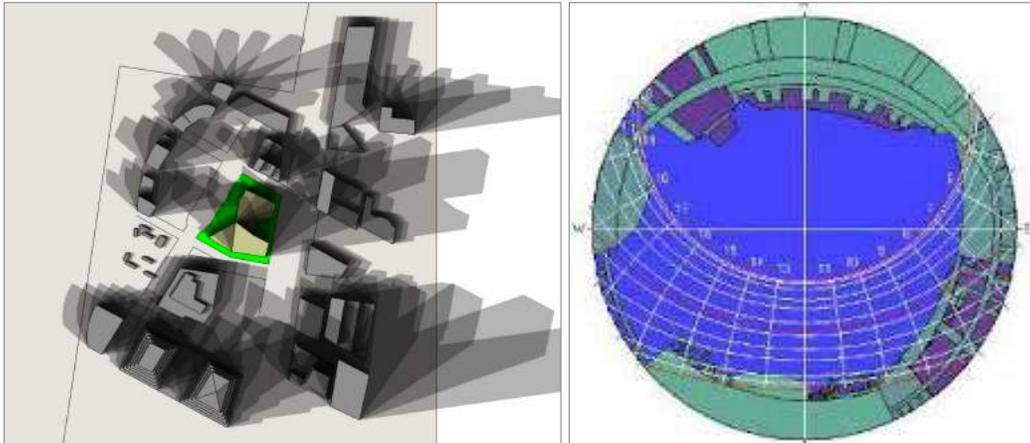


Figura 46: exemplo de simulação da projeção de sombras e insolação no programa Ecotect; e máscara de sombra de cena urbana com projeção do diagrama solar, com Townscope. Fonte : Townscope (2010).

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 POUHEY, 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 47 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.

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



Figura 47: 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 48), 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 48: 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 49). 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 Tropix (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.

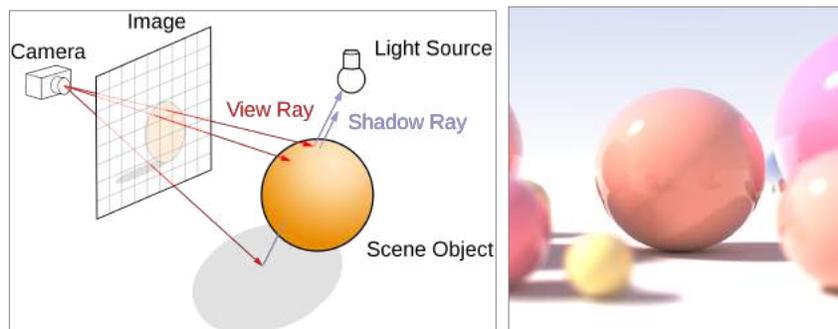


Figura 49: esquema ilustrativo da técnica do raio traçado invertido. Fonte: Wikipedia (2013).

(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 50). 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).

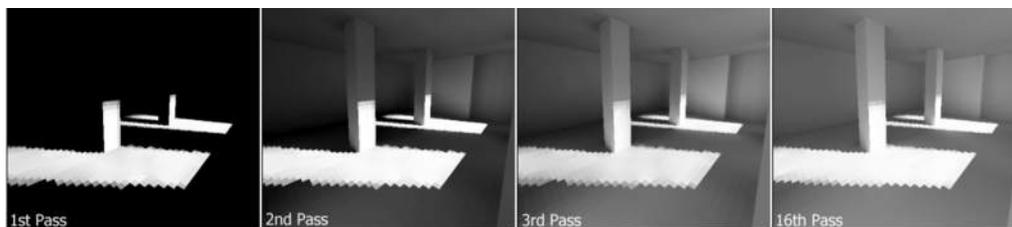


Figura 50: solução resultante de um ou vários rebatimentos da luz no espaço pelo método progressivo da radiosidade. Fonte: Wikipédia (2013).

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 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.

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).

(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):

$$I_{b\theta} = (I_{gh} - I_{ah}) \cos \theta / \sin \gamma \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad [\text{Eq. 32}]$$

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 luminância 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 51.

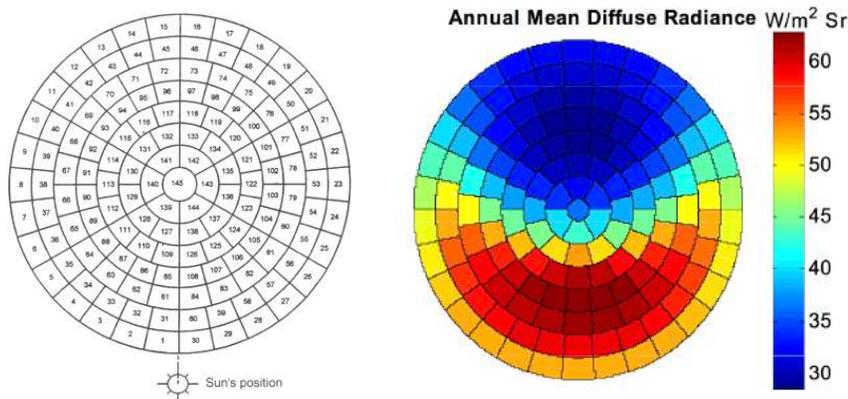


Figura 51: esquema de discretização da abóbada celeste em 145 parcelas dado por Tregenza. Fonte: Robinson (2011).

(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):

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

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).

$T_{c\acute{e}u}$ = 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: $\epsilon_o = 0.741 + 0.00062T_d$ (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): $(\epsilon - \epsilon_o)/(1 - \epsilon_o) \approx n^{2.5}$, onde n é a fração de nebulosidade ($n=C/8$, onde C é a nebulosidade em octas); assim resulta para a emitância com nuvens:

$$\epsilon_{c\acute{e}u} = \epsilon_o + (1 - \epsilon_o)n^{2.5},$$

O que permite ao algoritmo definir a temperatura do céu que é, então, dada por: $T_{c\acute{e}u}^4 = T_a^4 \epsilon_{c\acute{e}u}$. (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).

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

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 irradiação 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 previsões do SRA com as do programa RADIANCE²⁹ (Monte Carlo + Raio traçado). Os resultados obtidos apresentaram boa aceitação (Figura 52), 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 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.

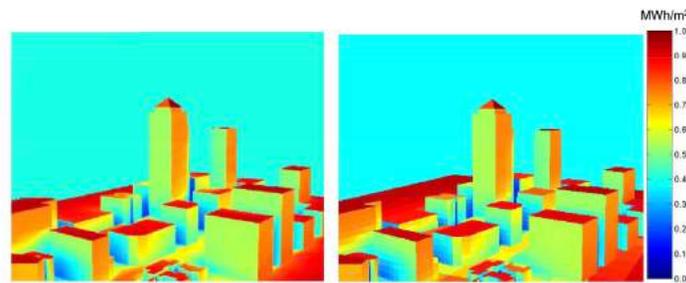


Figura 52: comparação dos resultados obtidos por cálculo no modelo SRA (esquerda) e RADIANCE (direita) para resolução da mesma cena urbana. Fonte: Robinson (2011).

(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 convívil) 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 54).

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 **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.**), foi utilizada 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 53).

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.

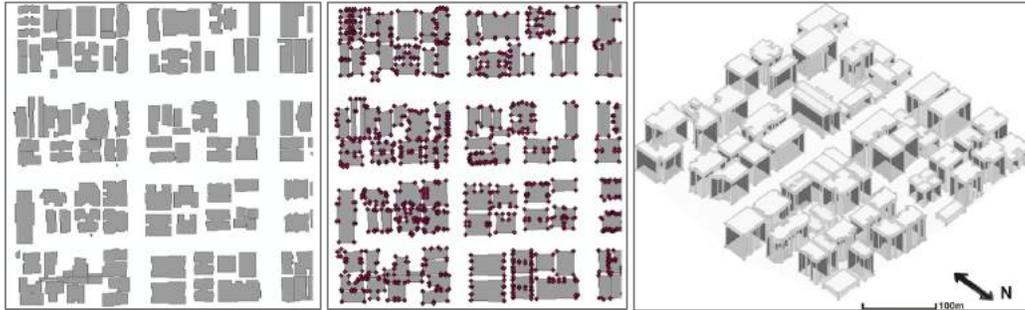


Figura 53: Esquema ilustrativo da transferência de dados da geometria da plataforma ArcGIS para o arquivo de entrada do programa CitySim. Fonte: imagens geradas pelo programa ArcGIS e Citysim, da esquerda para direita, respectivamente.

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 Meteonorm³⁰. 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 $W \cdot m^{-2}$) 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 [$Wh/(m^2 \cdot ano)$] ou médias mensais de iluminância (lux).

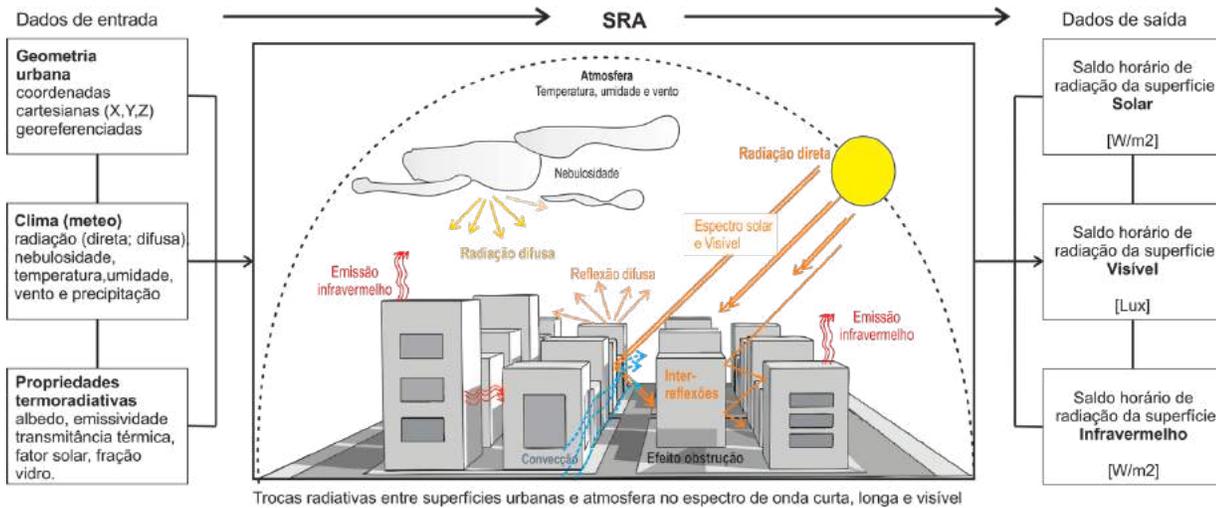


Figura 54: ilustração esquemática das entradas e saídas do modelo SRA. Fonte: ilustração do autor.

Em síntese, o algoritmo SRA que será empregado nas análises preditivas e prospectivas do presente estudo inclui os modelos conforme ilustra a Figura 55 abaixo.

³⁰ Banco de dados meteorológicos global. Disponível em: <http://meteonorm.com/>

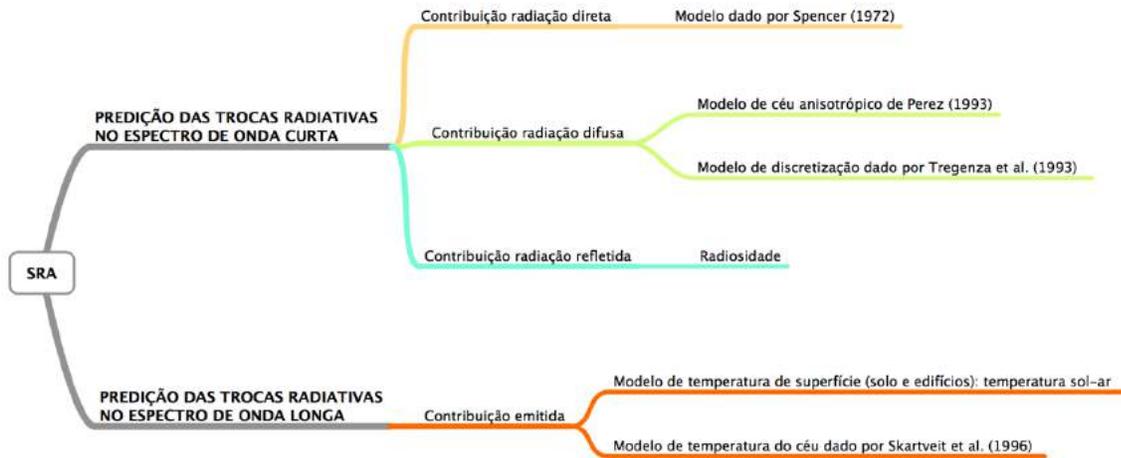


Figura 55 : conjunto de modelos empregados no algoritmo escolhido para análises preditivas do estudo. Fonte: ilustração do autor.

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

I.3. 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.

1.3.1. 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 cobertura 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 *Sinusidade/Direcionalidade* (ADOLPHE, 2001) (BENZERZOUR, 2004).

1.3.2. 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 à 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.

1.3.3. 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.

1.3.4. 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 56.

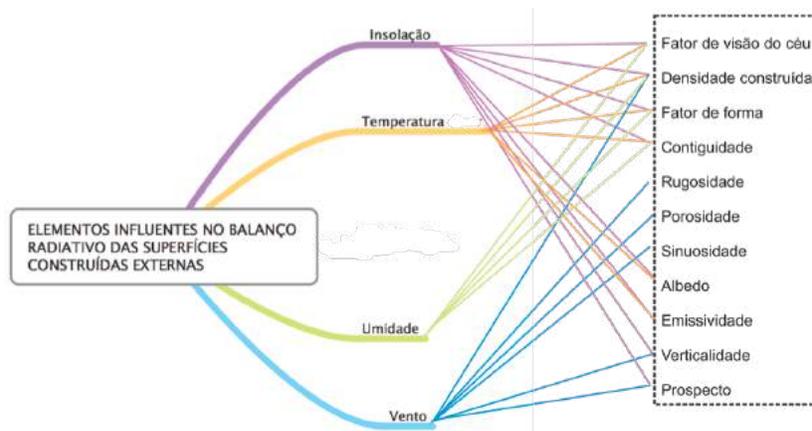


Figura 56 : síntese dos principais parâmetros descritivos da forma urbana implicados na definição dos elementos climáticos influentes no balanço radiativo das superfícies construídas. Fonte: ilustração do autor, 2013.

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 permitir 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 capítulos 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.

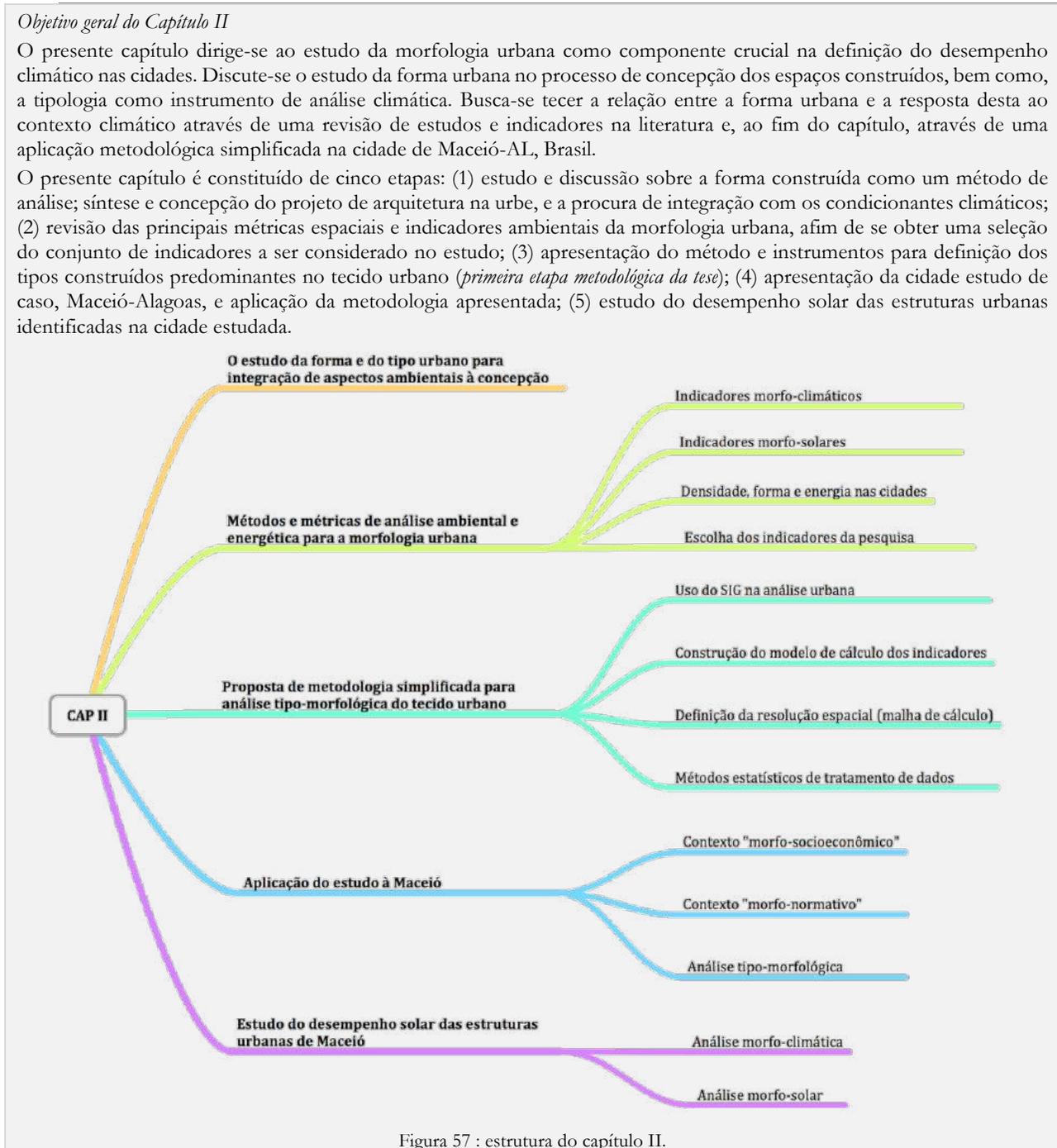


Figura 57 : estrutura do capítulo II.

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 resiliência³¹.

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).

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,

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.

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 morfológicos³² 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 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 58) (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 produziram melhores condições em termos de iluminação natural nos espaços (ver Steemers *et al.* (1997)).



Figura 58: 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 59), em um mosaico de ilhas de calor.

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.

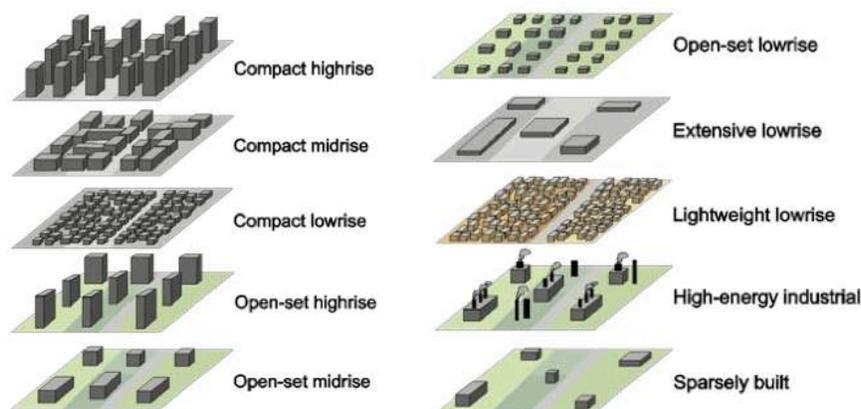


Figura 59: Zonas do Clima Local » propostas por Stewart e Oke (2009).

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 KERGMARD, 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 60). 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).

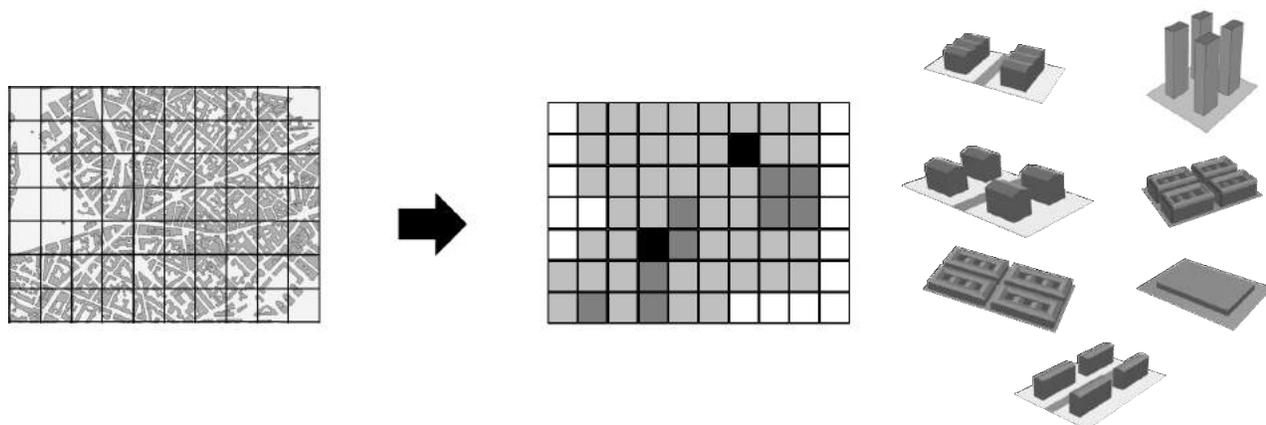


Figura 60: princípio da geração do mapa de tipologias de quadras urbanas (BONHOMME, MASSON e ADOLPHE, 2012).

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 61). 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 61 : 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 62).



Figura 62: 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 seqüência, 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	<p>Morfoclimático</p> <p>Tratam de identificar no contexto construído, o que poderia influenciar um conjunto de fenômenos climáticos. Traduzindo-se, portanto, em grande número de indicadores.</p> <p>Físico-morfológico</p> <p>Caracterizam apenas a influência sobre os fenômenos físicos e climatológicos, muitas vezes, em grande escala.</p> <p>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.</p>	<p>(GROLEAU e MARENNE, 1995) (AIT-AMEUR, 2002) (ADOLPHE, 2001)</p> <p>(BOTTEMA, 1997); (GRIMMOND e OKE, 1999)</p> <p>(SALAT, 2011) (ADOLPHE, CHÂTELET, <i>et al.</i>, 2002)</p>
Morfo-físico-sensíveis	<p>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).</p>	<p>(AUGOYEARD, 1995) (BOUSSOUALIM, 2002) (LEVY, 1992)</p>
Morfológicos- gráficos	<p>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 – <i>Digital Elevation Model</i>).</p>	<p>(TELLER, 1999) (BENZERZOUR, 2004)</p>

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 deseja 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) objetivo(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, compactidade, 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 (Se) 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).

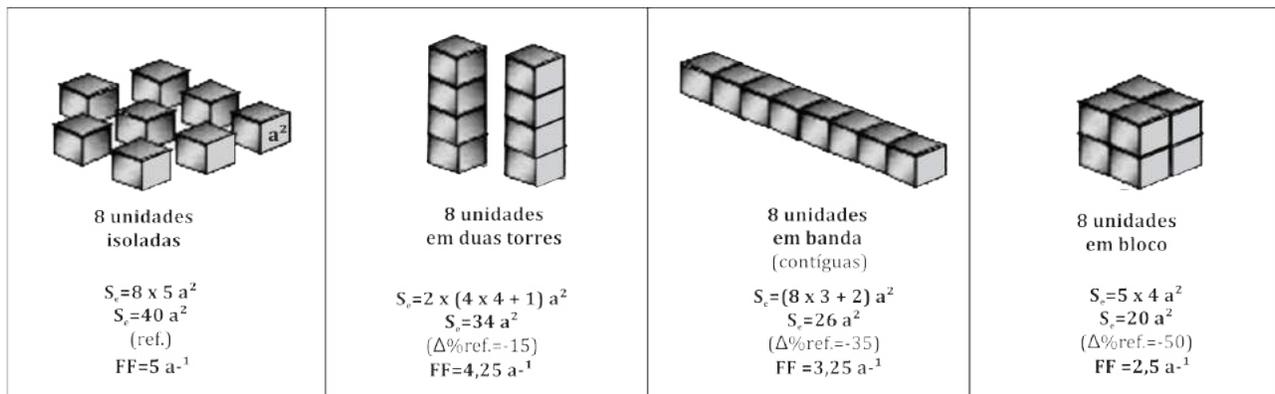


Figura 63 : comparação da superfície exterior e coeficiente de forma de vários tipos de agrupamento de módulos cúbicos (“a”=lado do cubo de referência). Fonte: adaptado de Traisnel (2006).

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).

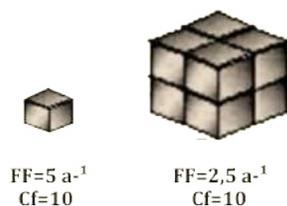


Figura 64 : comparação do coeficiente de forma e coeficiente de forma reduzido (ou indicador de compacidade) entre uma mesma forma de duas dimensões.

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 (**Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.**), 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. Interessanos, 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 “morfossolares”.

II.2.2. Indicadores “morfossolar”

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 cobertura 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 66).

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 65). 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 66).

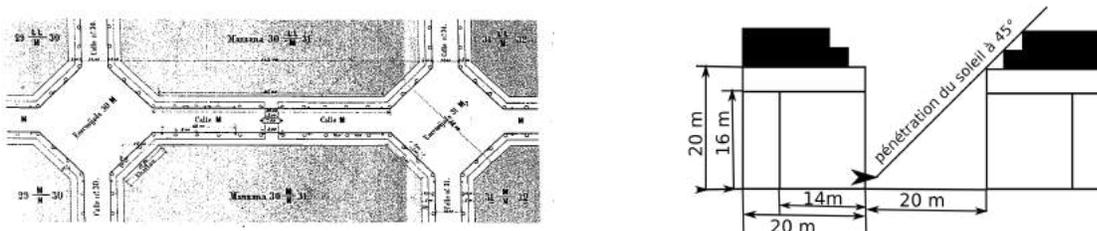


Figura 65: plano do arruamento, quadras chanfradas e prospecto de Idelfonso Cerdá para Barcelona (Wikipedia, website).

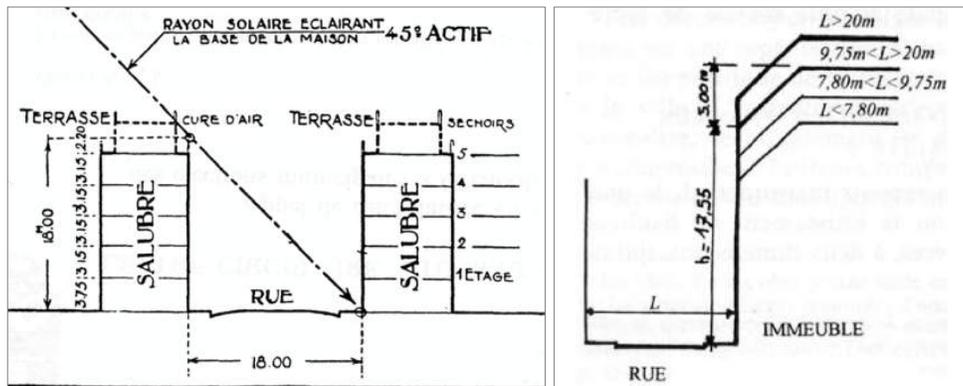


Figura 66: gabarito das ruas do projeto de Haussmann (THIBERGE, 2002)

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 67).

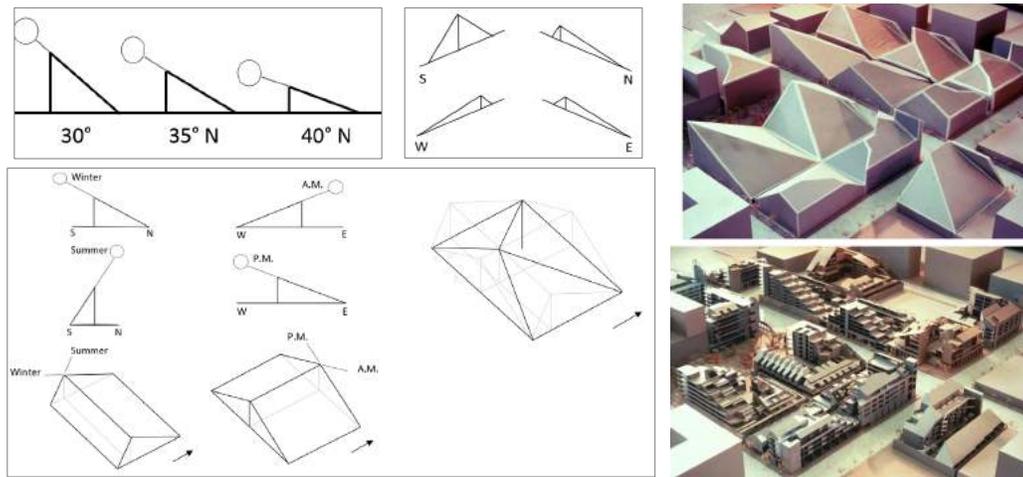


Figura 67: construção da envoltória solar de Knowles. Acima-esquerda: influência da latitude e da orientação do sítio; Abaixo-esquerda: face norte e sul geradas em função dos limites anuais; Abaixo-centro: faces leste e oeste em função dos limites diários; Abaixo-direita: envelope solar resultante. Direita: 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 68) (BJARKE INGELS GROUP, 2009).

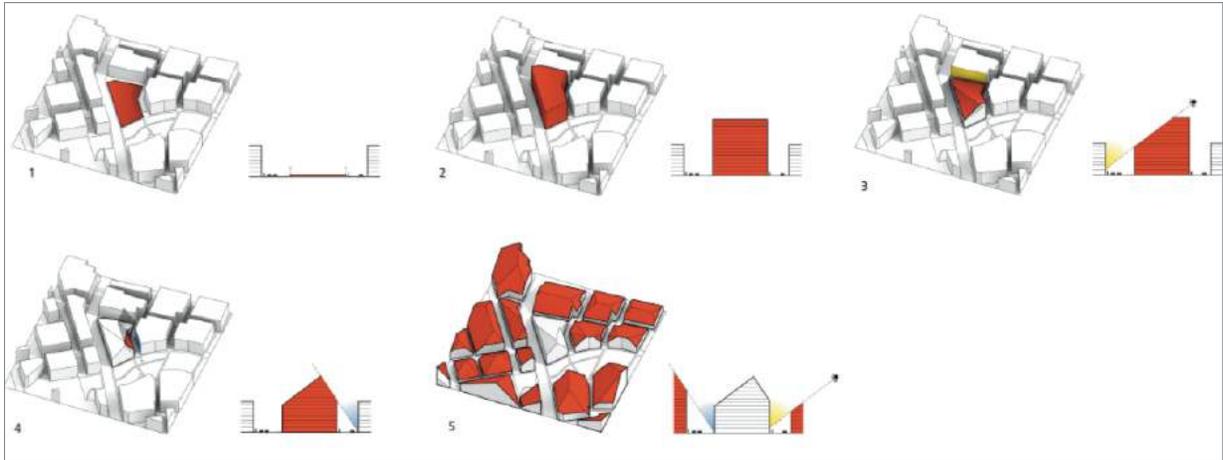


Figura 68: projeto *Reciprocity*, em resposta ao concurso *Low2No: A sustainable development design competition*.

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 passivas³³ 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.

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.

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 69): (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.

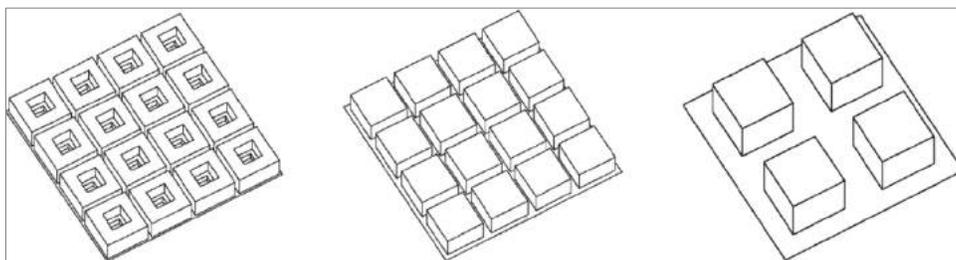


Figura 69: as três formas urbanas estudadas pela equipe de Carlo Ratti [Ratti, 2003, p.55] (RATTI, RAYDAN e STEEMERS, 2003).

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 albedo³⁴ (MESSAOUD, 2009). Nas pesquisas descritas anteriormente, 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

³⁴ Grandeza adimensional. Albedo calcula a relação entre a energia 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.

seguintes indicadores: densidade construída bruta, taxa de ocupação do solo, regularidade da altura e regularidade na implantação dos edifícios (Figura 70).

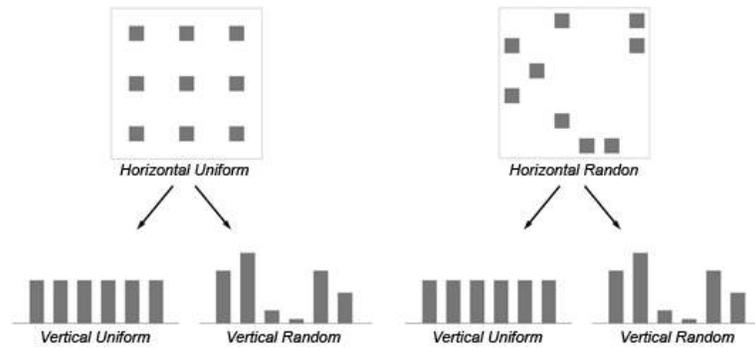


Figura 70 : seis formas urbanas definidas no estudo de Cheng et al. (2006).

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 71).

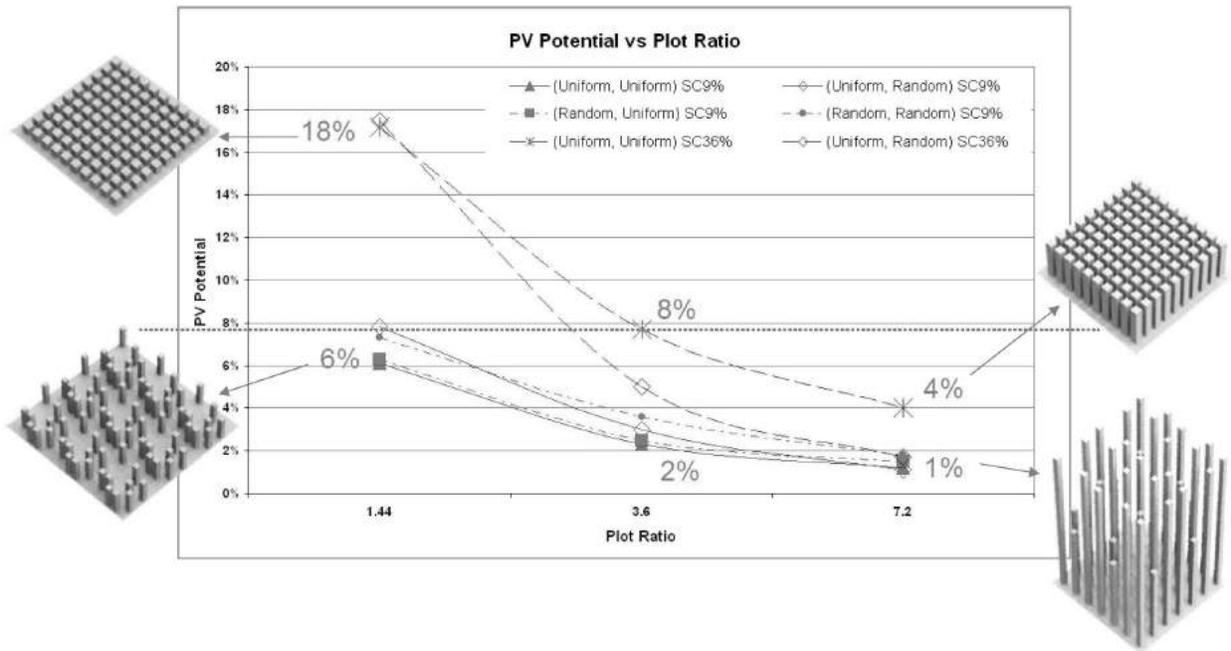


Figura 71: potencial solar (em cobertas e fachadas) para as seis formas genéricas de Cheng et al. (2006).

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 72).



Figura 72: 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 73) e do TO, por não corresponder a densidade real habitada e construída, impactando de formas diferentes na densidade real e percebida (Figura 73).

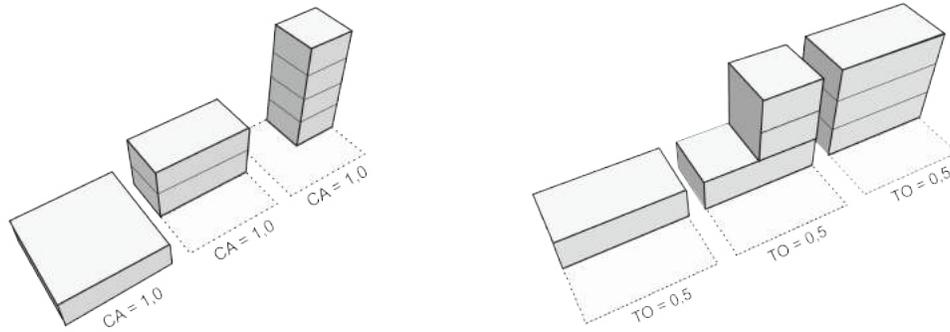


Figura 73: três formas e densidades urbanas distintas para o mesmo Coeficiente de aproveitamento =1,0 e mesma taxa de ocupação do solo=0,5, respectivamente. Fonte: ilustração do autor (2013).

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, Guangzhou 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 subúrbio, 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 74).

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 74: 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 75).

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 75), 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 75: exemplos de cidades compactas e densas. Da esquerda para direita: a. extensão de Barcelona e b e c. renovação de Paris. Fonte: Alhzeia, 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 76). 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 Radiense* 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 76: 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 77.

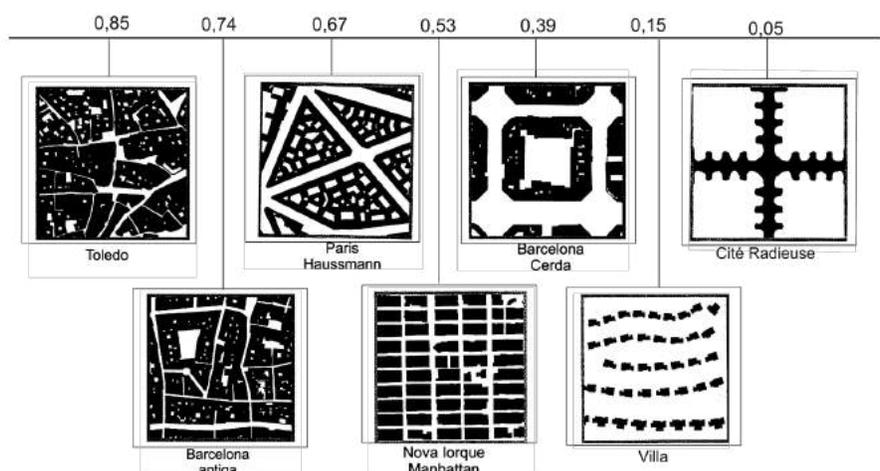


Figura 77: distintas densidades urbanas. Fonte: Adaptado de Salat (2011).

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 indicador 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 infraestrutura 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 78).

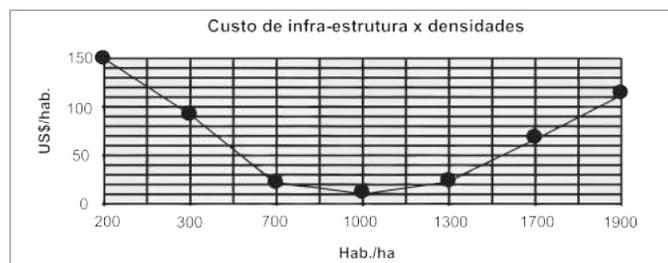


Figura 78: custo de infraestrutura *versus* densidades.

O crescimento exponencial da população urbana no mundo, somado às dificuldades encontradas dos governos em suprir as suas cidades com infraestrutura 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 79).

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 79 e na descrição sintética na **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.**

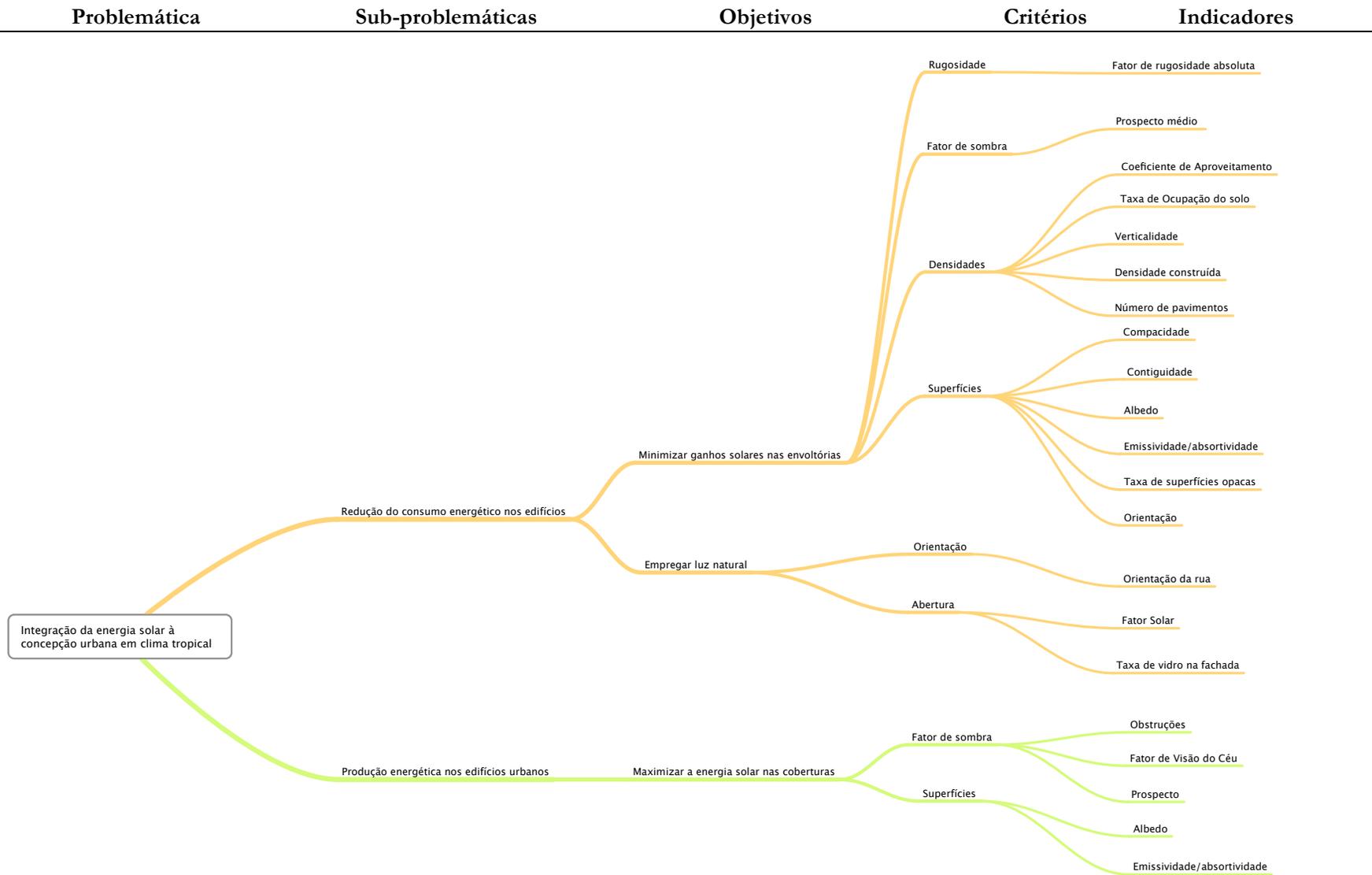


Figura 79: abordagem hierárquica de definição e escolha dos indicadores ambientais da morfologia urbana para estudo de caso.

Indicador/parâmetro	Definição / cálculo	Eq.	Exemplos/ referências (SALAT, 2011)		
			Disperso	Compacto	Vertical
					
Altura média ponderada	$H_{med} = \frac{\sum_i (h_{edf_i} \times S_{sol_i})}{S_{sol_{tot}}}$ <p>Onde, h_{edf_i} = altura do edifício i; S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício i; $S_{sol_{tot}}$ = Área total construída no solo da malha;</p>	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.	$S_{tot} = \sum_i \left(\frac{h_{edf_i}}{3} \cdot S_{sol_i} \right)$ <p>Onde, h_{edf_i} = altura do edifício i; S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício i.</p>	Eq. 36	2,0x10 ⁵	2,0x10 ⁶	4,0x10 ⁶
Coefficiente de Aproveitamento (CA) A densidade do edifício é definida como sua área útil total construída dividida pela área construída no solo.	$CA = \frac{S_{tot_i}}{S_{sol_i}}$ <p>Onde, S_{tot} é a Área útil total construída do edifício i; S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício i.</p>	Eq. 37	1,0	5,0	12,0
Área envoltória exterior - Determina a superfície de envoltória vertical exterior, representado por S_{env} .					
Coefficiente 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.	$C_f = \frac{S_{env_{ext}}}{(V_{edf_i})^{2/3}}$ <p>Onde, $S_{env_{ext}}$ = Área da envoltória exterior; V_{edf_i} = Volume do edifício i.</p>	Eq. 38	0,86	0,64	1,50

<p>Contiguidade A contiguidade de um edifício é calculada como a área das paredes geminadas sobre a área total da envoltória.</p> $Cont_i = \frac{S_{env\ tot} - S_{env\ ext}}{S_{env\ tot}}$ <p>$S_{env\ tot}$ = Área total da envoltória do edifício; $S_{env\ ext}$ = Área da envoltória exterior.</p>	Eq. 39	0,02	0,29	0,003
<p>Número de edificações por hectare no interior da malha.</p>				
<p>Rugosidade absoluta Consiste na razão da soma das alturas ponderadas pela sua superfície pela superfície total do tecido urbano considerado (construído e não construído).</p> $R_g = \frac{\sum_{const} S_i * H_i}{\sum_{const} S_i + \sum_{vazio} S_j}$ <p>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.</p>	Eq. 40	0,8	7,1	14,3
<p>Porosidade É relação dos volumes úteis abertos ao conjunto de volumes do tecido urbano considerado.</p> $P_o = \frac{\sum_{esp.abertos} \pi \cdot r_{hi}^2 \cdot P_i}{\sum_{esp.abertos} V_i + \sum_{constr.} V_j}$ <p>Onde, P_i é a profundidade do espaço aberto i; r_{hi} é o raio hidráulico equivalente do espaço aberto i; V_j é o volume médio do volume construído j; e V_i é o volume médio da camada limite urbana acima do espaço aberto i.</p> $r_h = \frac{l \cdot h}{l+h}$ <p>Onde, r_h =raio hidráulico equivalente (JUDET DE LA COMBE, SESOLIS, <i>et al.</i>, 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.</p>	Eq. 41	0,33	0,08	0,49
<p>Densidade Construída (Ds) Corresponde à soma das áreas úteis construídas, dividido pela área total da malha.</p> $D_s = \frac{\sum_i S_{toti}}{S}$ <p>Onde, S_{tot} é a Área útil total construída do edifício i; S =Área total na malha;</p>	Eq. 43	0,5	3,0	5,0

<p>Taxa de ocupação do solo (TO) Corresponde à soma das áreas construídas no solo, dividido pela área total da malha.</p> $TO = \frac{\sum_i S_{sol_i}}{S}$ <p>Onde, S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício i; S = Área total na malha;</p>	Eq. 44	0,15	0,65	0,53
<p>Verticalidade</p> $V = h_{edf}^2/S$ <p>Onde, h_{edf_i} = altura do edifício i; S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício i; $S_{sol_{tot}}$ = Área total construída no solo da malha;</p>	Eq. 45			
<p>Prospecto médio Relação da altura média ponderada pela largura da rua.</p> $P_M = H_{med}/l$ <p>Onde, H_{med} = Altura média ponderada dos edifícios na malha; l = Largura da rua.</p>	Eq. 46	0,55	3,9	3,2

Tabela 7: descrição dos principais indicadores da forma urbana utilizados nesse estudo.

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 celulares³⁵ 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.

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 80), 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.

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.

(iii) possui saídas gráficas como mapas temáticos e dados numéricos que podem ser exportados ou reintegrados em outras análises facilitando a manipulação dos resultados.

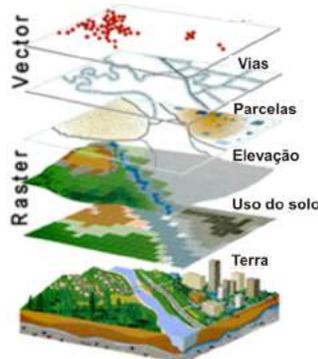


Figura 80: Esquema da representação gráfica das principais estruturas urbanas em SIG (Fonte: ESRI-ARCGIS®).

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 81 abaixo.

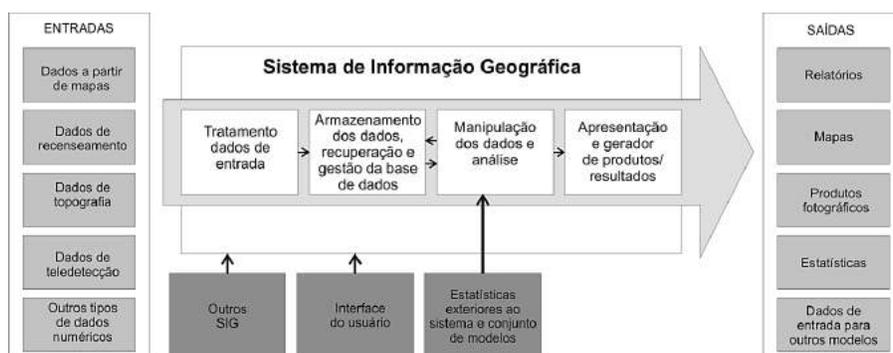


Figura 81: esquema dos componentes principais do SIG (Fonte: adaptado de Laaribi, 2000).

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. 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 D⁴³. 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).

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 82). 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.

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 82: 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 83), 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 se encontra 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.

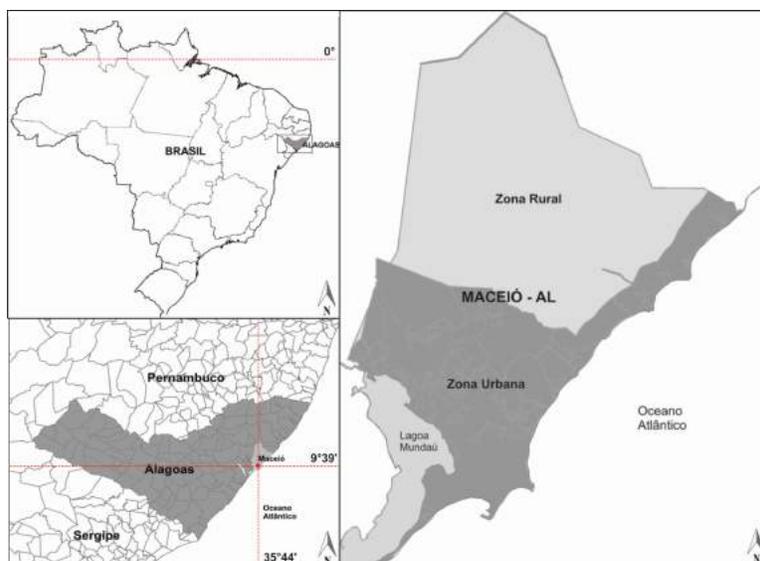


Figura 83: posição geográfica da capital alagoana Maceió e o detalhe da área urbana do município (Fonte: SEPLANDE, 2012).

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 alagoana 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 imobiliária⁴⁴ 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 86).

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

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.

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 centralidades, observa-se hoje uma dinâmica urbana de verticalização gradual de extensas áreas ocupadas por edificações horizontais individuais (Figura 84). 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 84: 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 85).



Figura 85: 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.

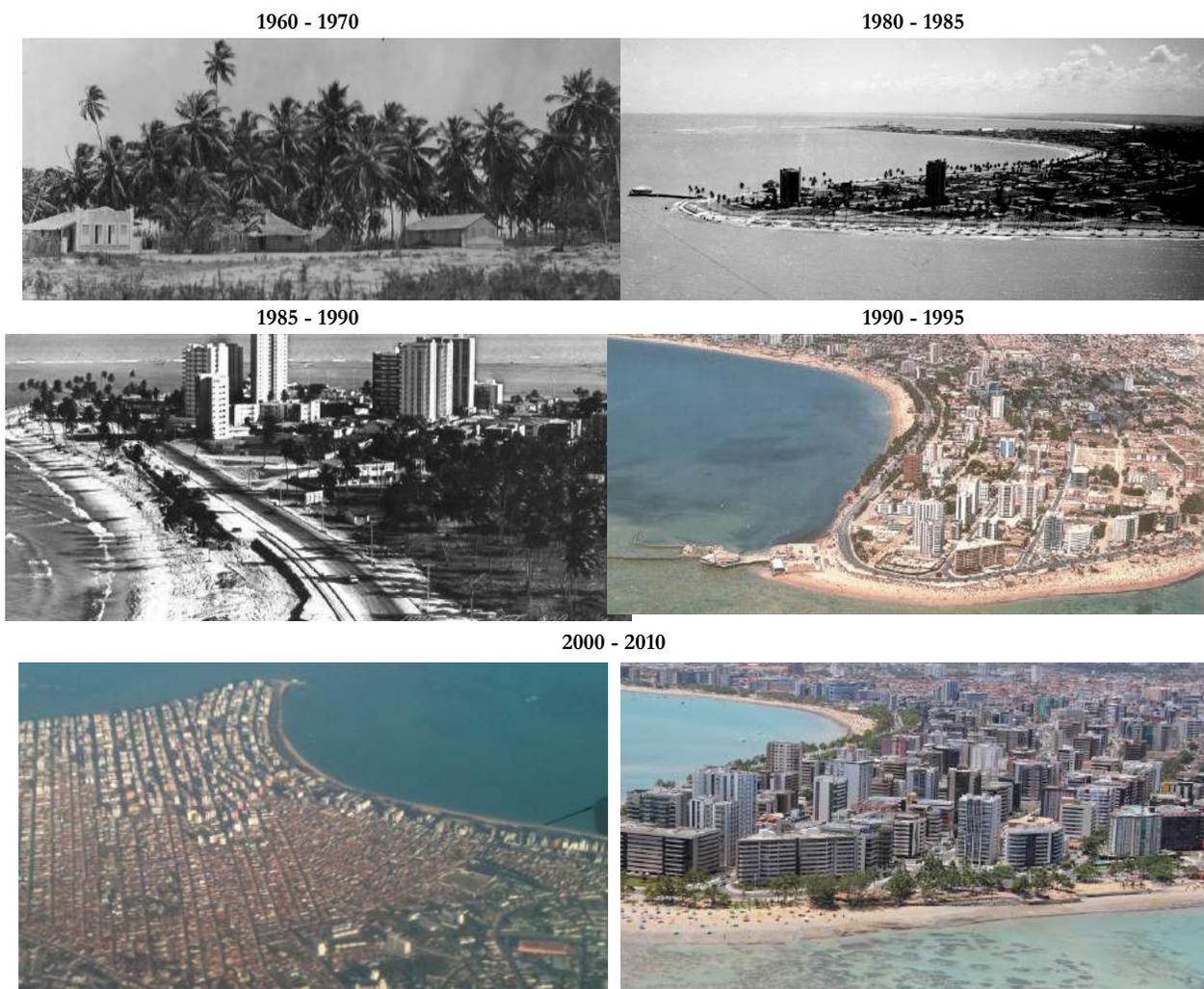


Figura 86: verticalização da planície litorânea de Maceió-AL (em destaque o bairro da Ponta verde).

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 86) 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 87).

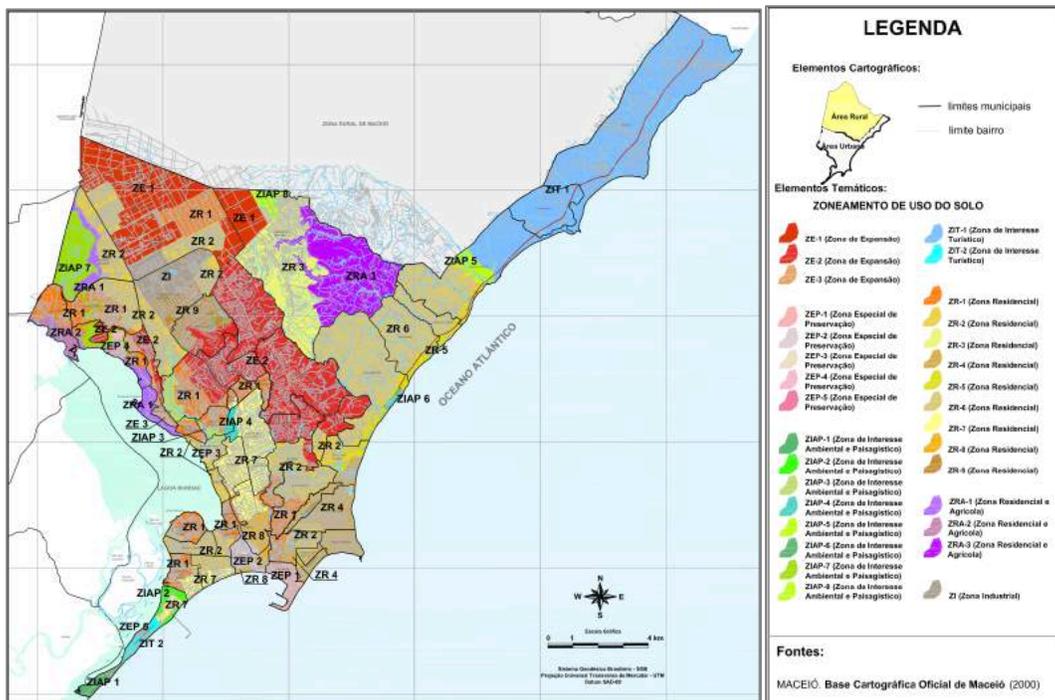


Figura 87: zoneamento de uso do solo urbano de Maceió. Fonte: PMM (2007).

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 marinha⁴⁵. O farol de auxílio à navegação localiza-se em território militar, no bairro do Jacintinho, a uma cota de 55m

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 87).

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 88

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 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).

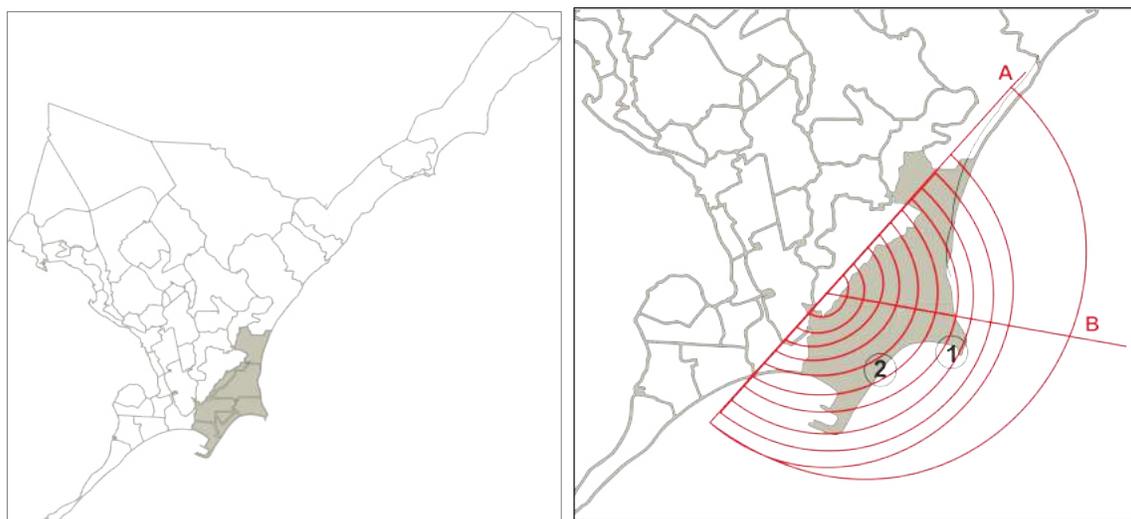


Figura 88: desenho esquemático do cone do farol de auxílio à navegação. Fonte: ilustração do autor.

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 89) 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).

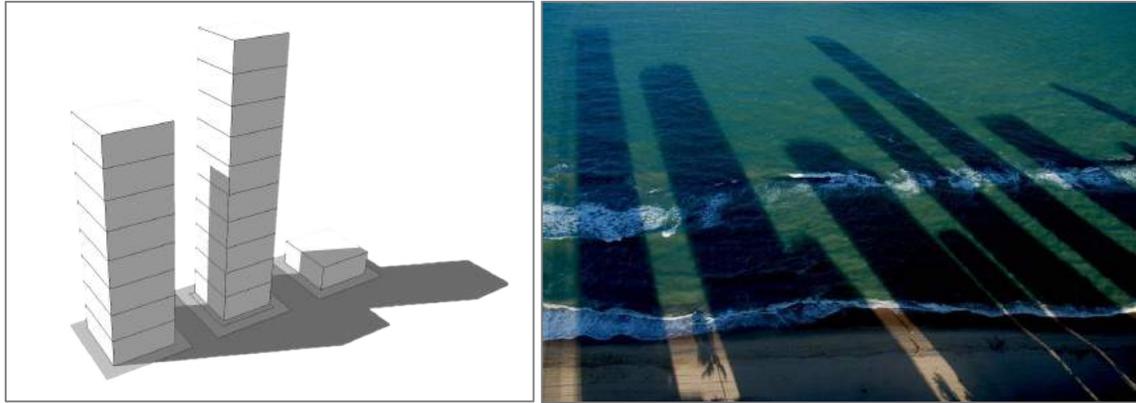


Figura 89: sombreamento dos edifícios e logradouros (Autor) e sombras dos edifícios verticais projetadas na praia de Boa Viagem, ena cidade de Recife. Fonte: Gabriel Mascaró (2010).

- 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 92), 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 90). 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.

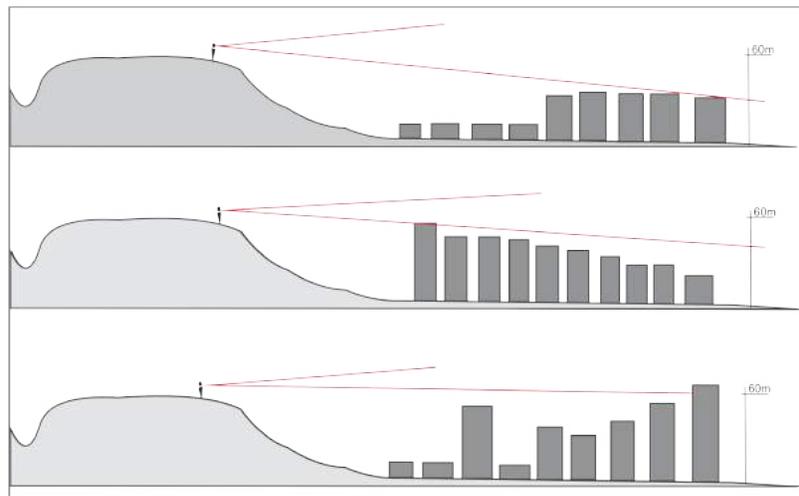


Figura 90: Diferencial de nível x altura das edificações. Fonte: adaptado de CRUZ (2001).

- 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, conseqüentemente 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 91), 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.

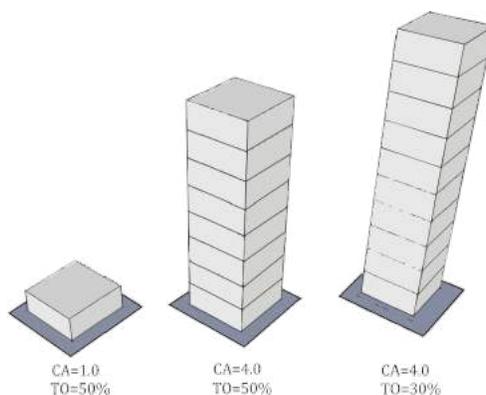


Figura 91: croqui esquemático mostrando a definição do parâmetro taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento. Fonte: ilustração do autor.

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 sítio 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 92 e Figura 93):

- (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 92) e no mapa (Figura 93), 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.

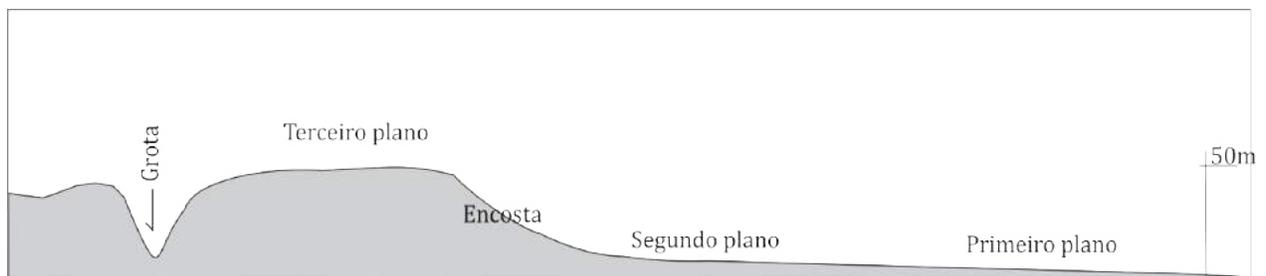


Figura 92: esquema dos três planos de relevo de Maceió. Fonte: ilustração do autor.



Figura 93: 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).

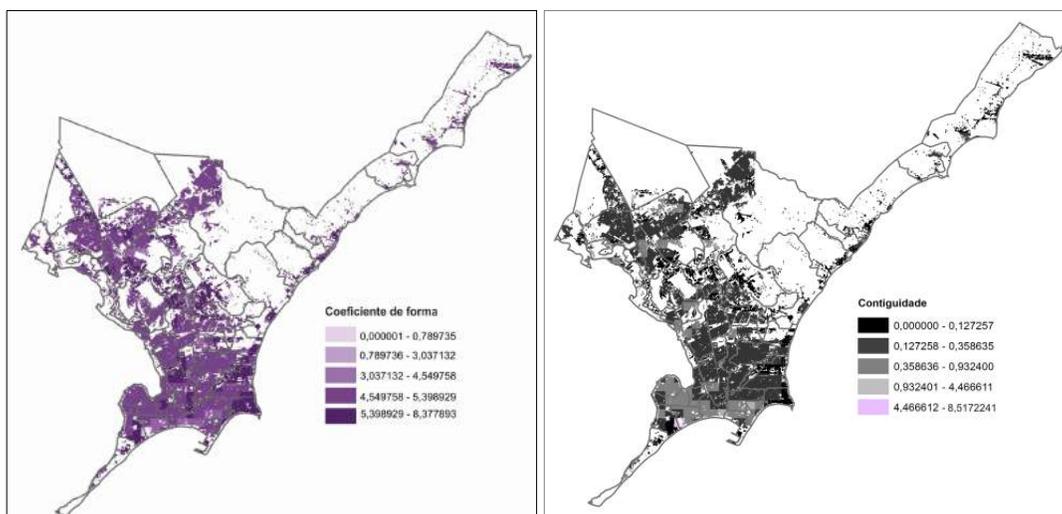
Como pode ser verificado (ver **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.**), a análise e a classificação morfológica do tecido urbano de Maceió pela repartição atual de bairros, pode apresentar-se inadequada, visto a diversidade tipológica verificada ao longo destes últimos oito anos em 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 94). 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 94).



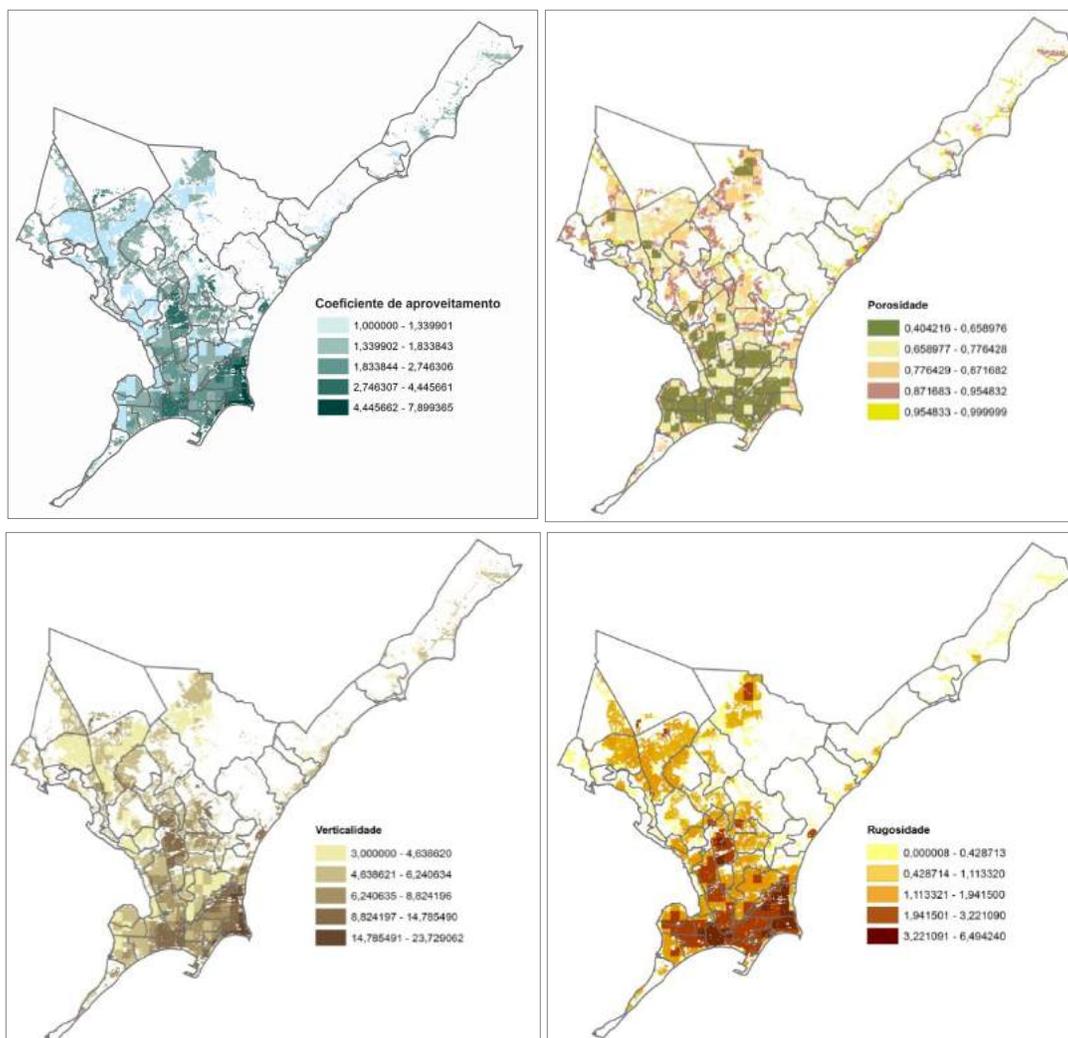


Figura 94: mapeamento da forma urbana de Maceió segundo alguns parâmetros morfológicos estudados.

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 (**Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.**). 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 seqüência 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 95 e Figura 97.

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).

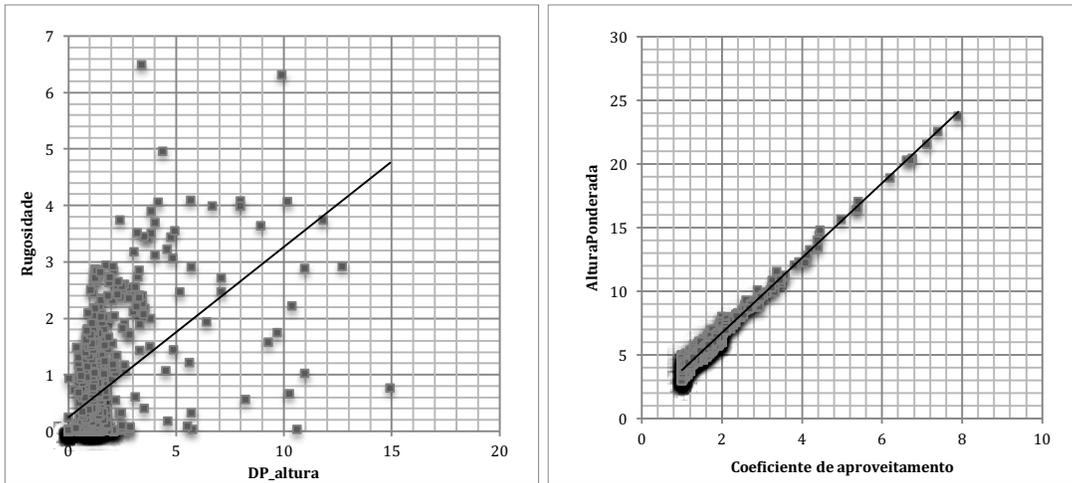


Figura 95: correlação linear entre os indicadores de: desvio padrão da altura e rugosidade ($r=0,52$); e coeficiente de aproveitamento e altura ponderada ($r=0,98$).

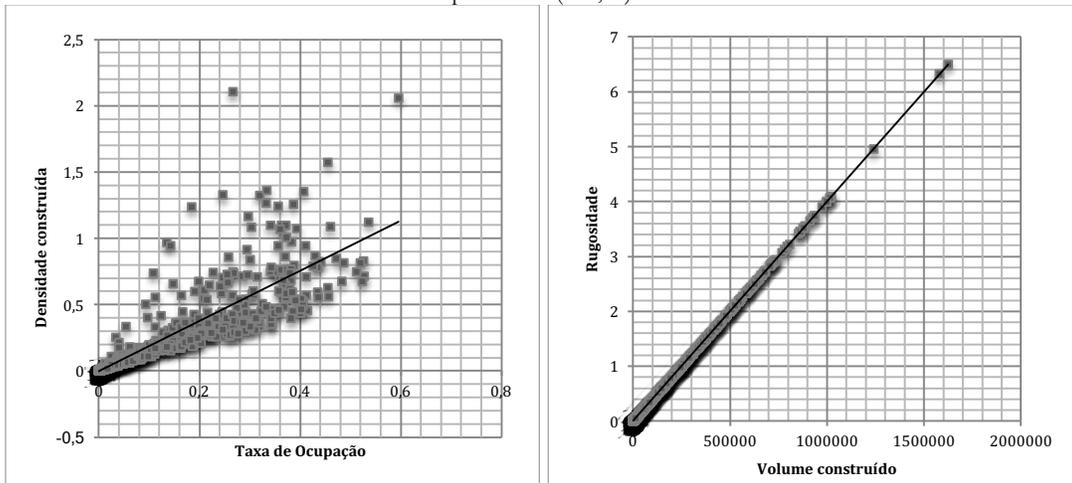


Figura 96: correlação linear entre os indicadores de: densidade total construída e taxa de ocupação ($r=0,85$); e rugosidade e volume construído ($r=0,99$).

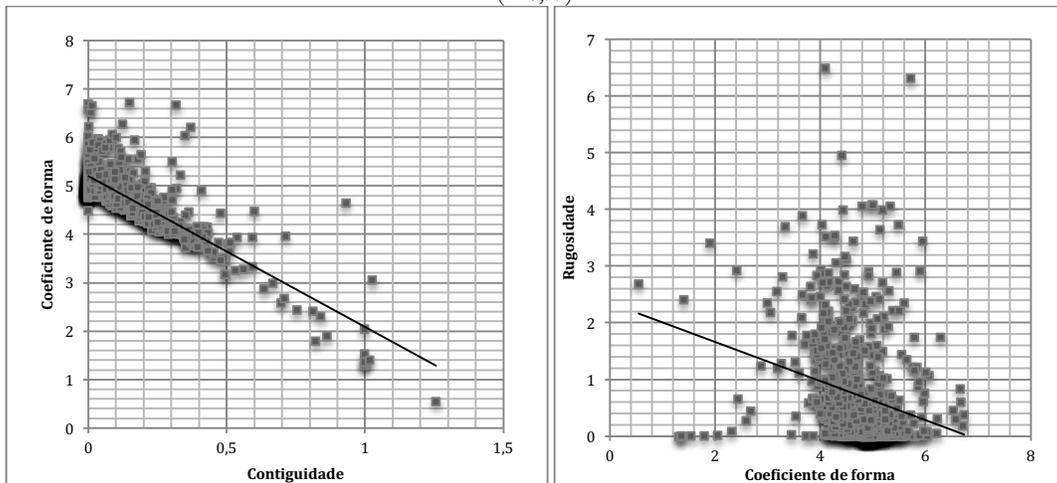


Figura 97: correlação linear entre os indicadores de: coeficiente de forma e contiguidade ($r=-0,85$); e rugosidade e coeficiente de forma ($r=-0,23$).

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	Contigüidade	Coefficiente 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				
Contigüidade	0,11	0,11	0,01	0,10	0,13	-0,13	-0,13	0,10	0,11	0,01	1,00			
Coefficiente 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 98, onde é possível observar o autovalor⁴⁶ 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.

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 *contigüidade*. Como essas variáveis são as mais elevadas, 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

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.

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.

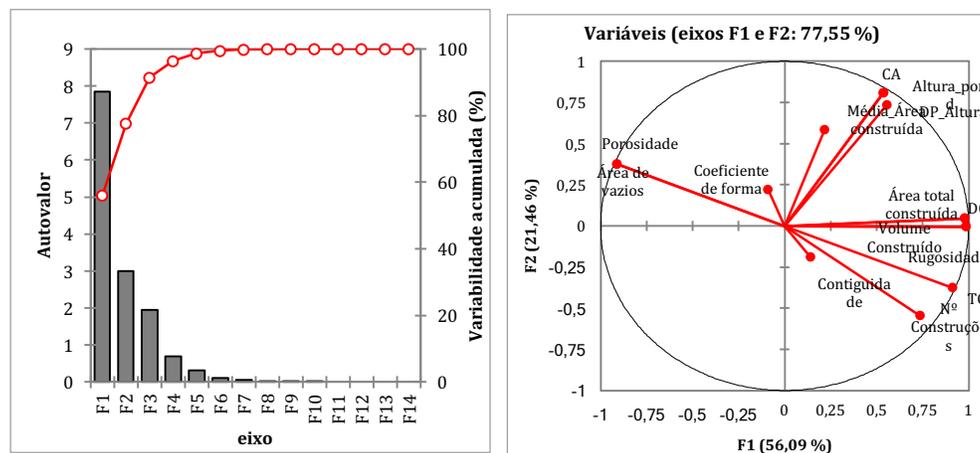


Figura 98 : representações gráficas da primeira ACP.

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
Coefficiente 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
Coefficiente de aproveitamento	0,201	0,471	0,063	-0,148	0,126
Altura ponderada	0,202	0,470	0,064	0,016	-0,002
Desvio Padrão_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 99).

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 99). 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*.

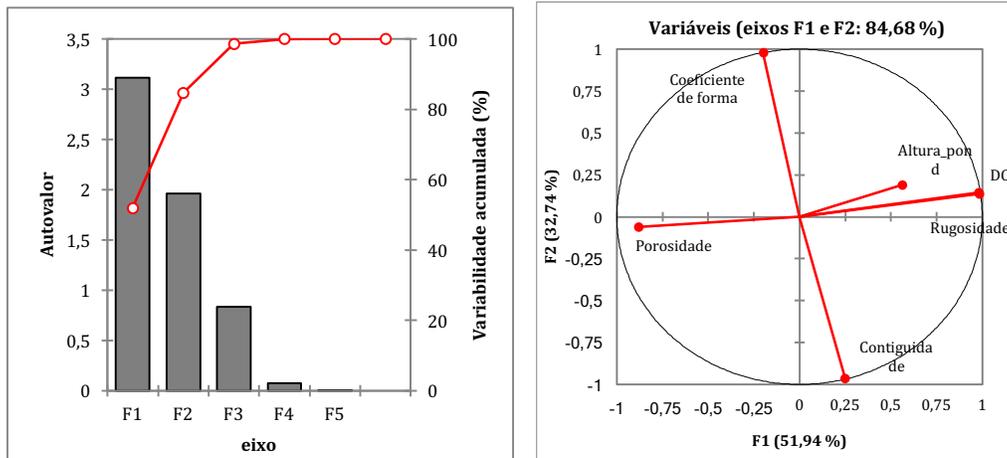


Figura 99: representações gráficas da segunda ACP.

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	Coefficiente 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 100), 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 morfológicas na malha urbana de Maceió, conforme mostra a Figura 101. Nessa mesma figura ilustra-se também recortes da malha representativos de cada classe.

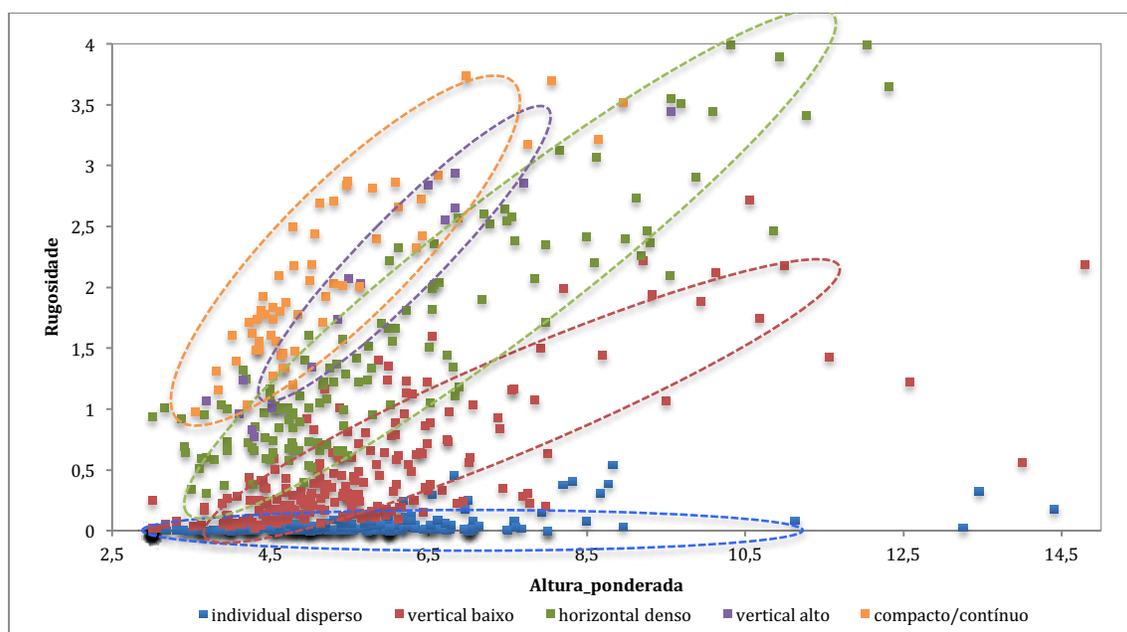


Figura 100: agrupamento estatístico em classes (morfológicas de referencia) em função dos indicadores da altura ponderada e da rugosidade.

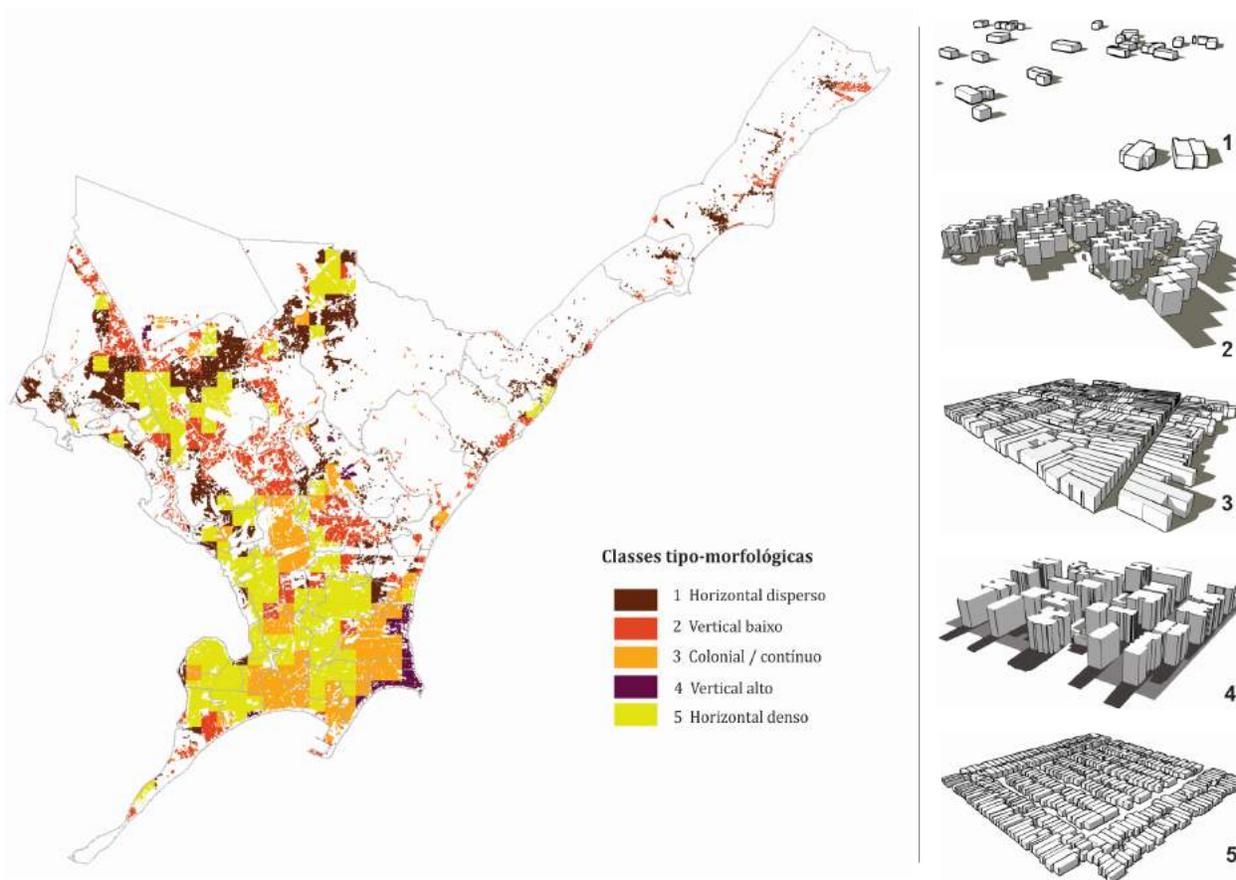


Figura 101: cartografia das classes tipológicas mais representativas da forma urbana de Maceió.

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 morfológicamente, 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 102). 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 102: 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 m²), 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 103). 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 103).

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 cobertas. O exame mais acurado desses aspectos será melhor abordado mais adiante.



Figura 103: 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 104: 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 105). 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 105: Ilustração da classe tipológica 3.

A maioria dos exemplares com as características dessa tipologia urbana são herdadas da arquitetura colonial portuguesa na cidade (Figura 106), 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 106: 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 107).

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 101).

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 107: 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 108).

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 108: 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.

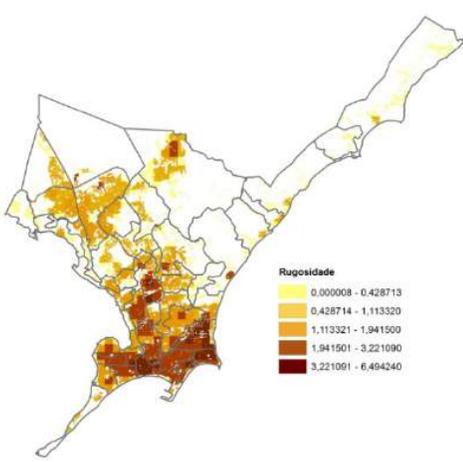
A morfologia construída nas cidades modifica a distribuição e a magnitude do escoamento do ar na malha urbana. Conforme visto ao fim do Capítulo I e no presente capítulo, os indicadores morfológicos mais relevantes identificados na literatura para qualificar e quantificar essa relação é, portanto, a 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 94 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	Coefficiente $\lambda(z_o)\lambda(z_o)$ 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 inicialmente 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):

$$\bar{v} = \frac{v^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad [\text{m/s}] \quad [\text{Eq. 47}]$$

Onde K = constante de Von Karman ($k=0,38$).

E onde v^* e z_0 são obtidos experimentalmente.

v^* = velocidade de atrito.

z_0 = 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 zona 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).

$$\bar{v}(z) = \lambda(z_0) \bar{v}_{ref} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad [\text{Eq. 48}]$$

Onde $\lambda(z_0)$ 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 109), 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 logarítmico (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 109.

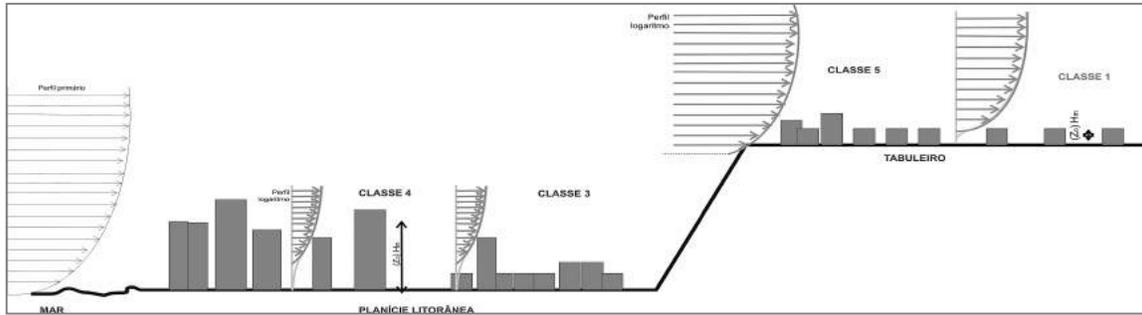


Figura 109: desenho esquemático dos perfis logarítmicos do vento para classes morfológicas de referência e influência da topografia e urbanização.

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.

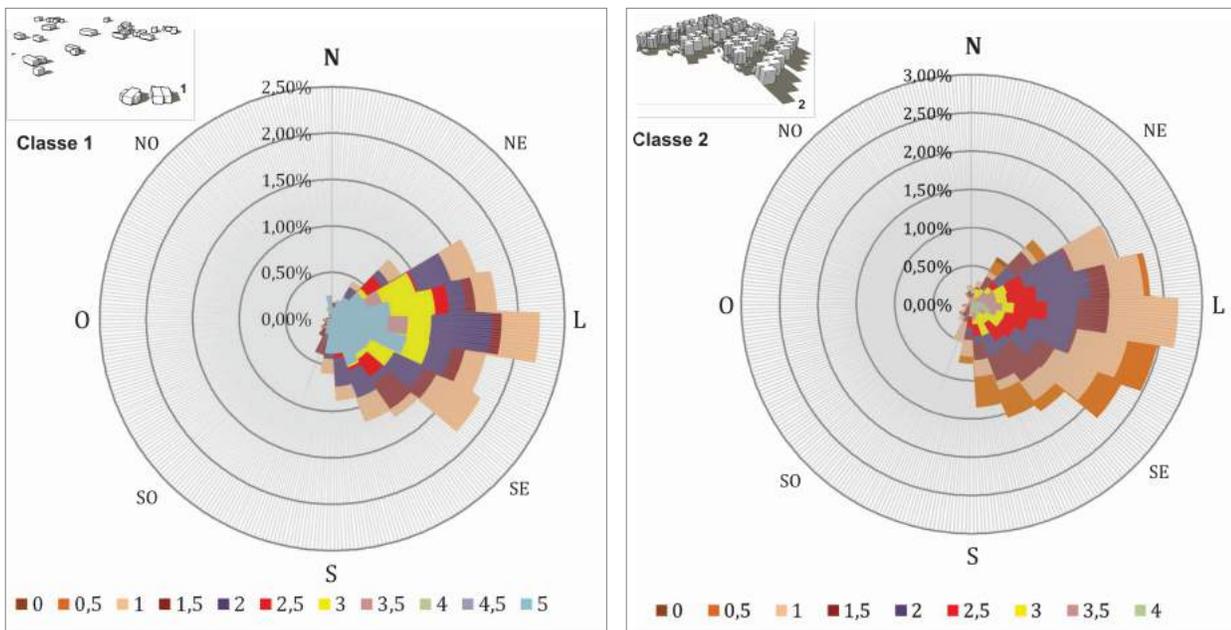


Figura 110: frequência da velocidade do vento por direção para classe 1 e 2.

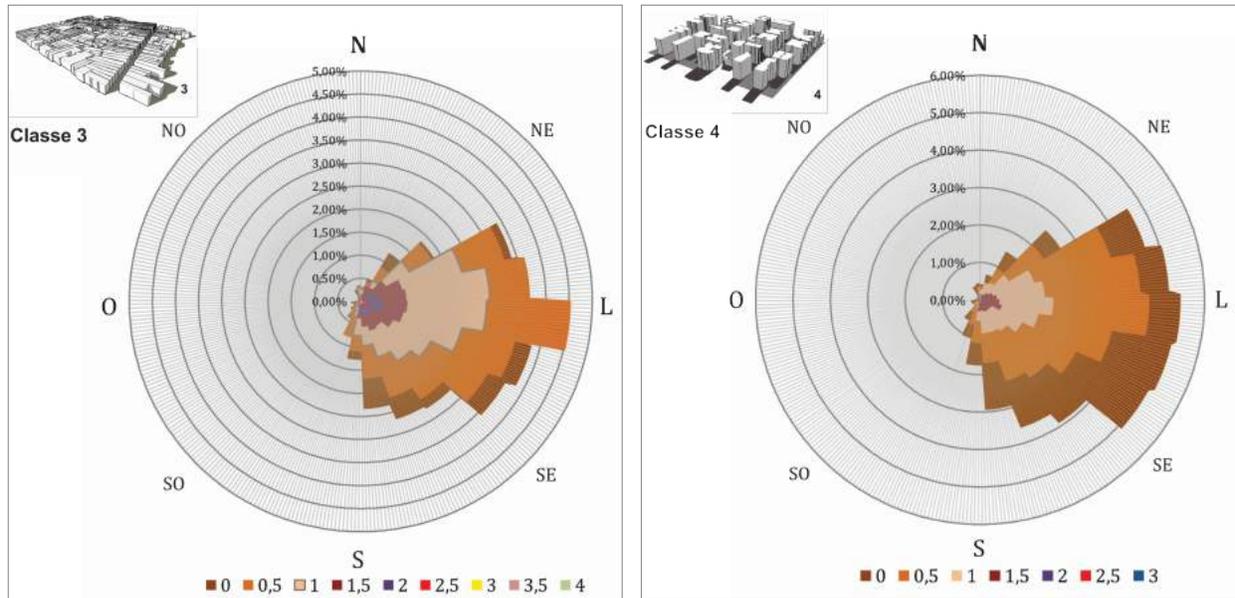


Figura 111: velocidade do vento corrigida para classe de rugosidade 3 e 4.

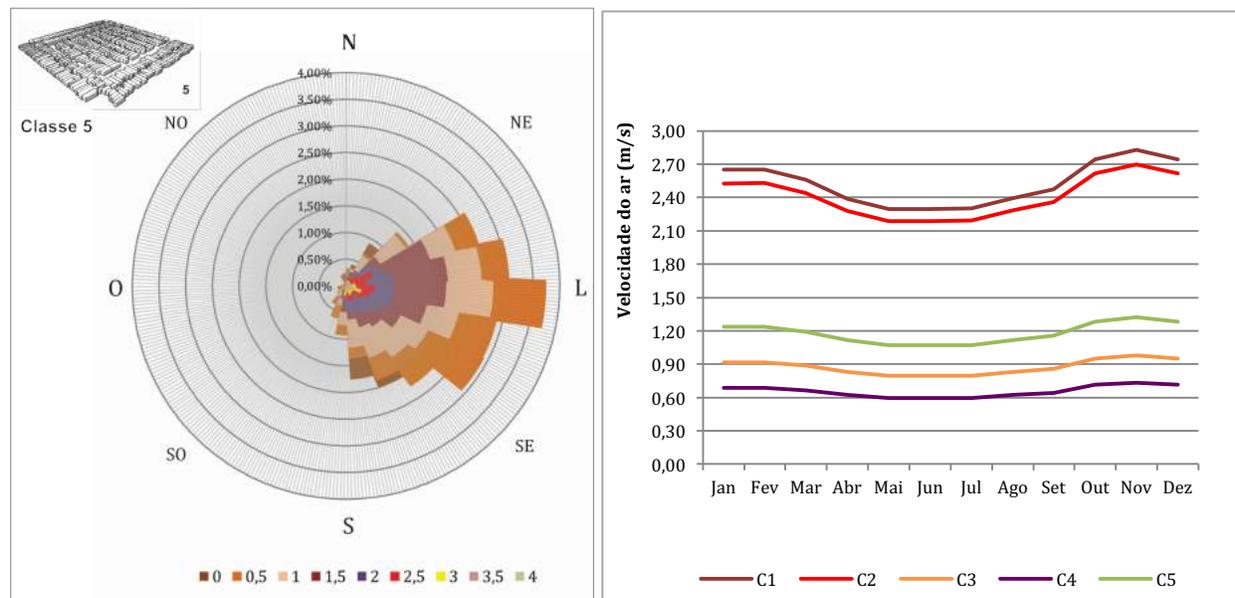


Figura 112: velocidade do vento corrigida para classe de rugosidade 5 e médias mensais de velocidade para as 5 classes.

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 cobertura 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

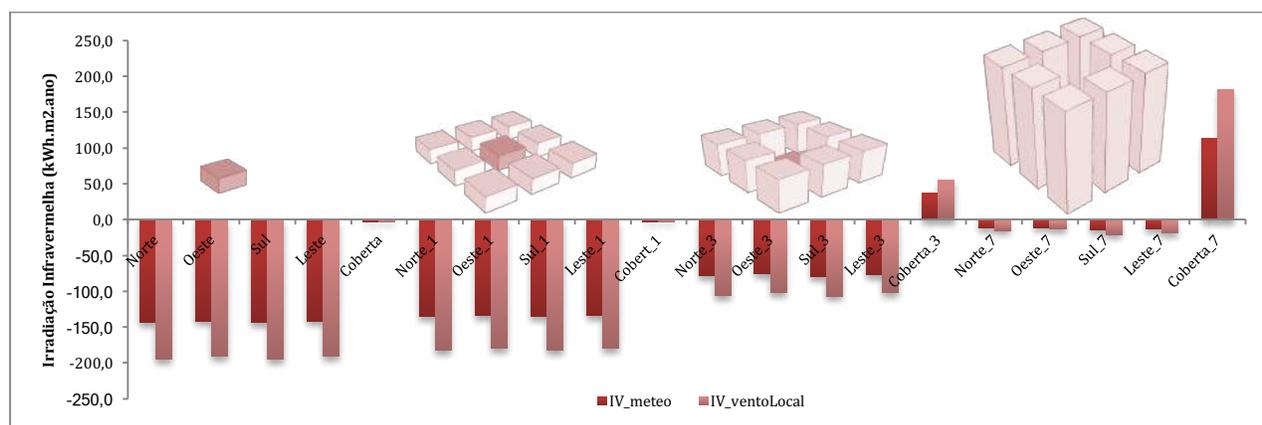


Figura 113: Saldo anual de irradiação infravermelha para taxas de velocidade do ar e prospectos diferentes.

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 113). 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 “morfológica” 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 “morfológicas” 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:

- para coletores solares térmicos, os valores mínimos de 400 e 600 kWh/(m².ano) são adotados por Montavon (2011) para fachadas e cobertas, respectivamente.
- 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);
- 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/(m ² .ano)	1000-1100 kWh/(m ² .ano)
Energia solar térmica	400 kWh/(m ² .ano)	600 kWh/(m ² .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 absorvibilidade 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).

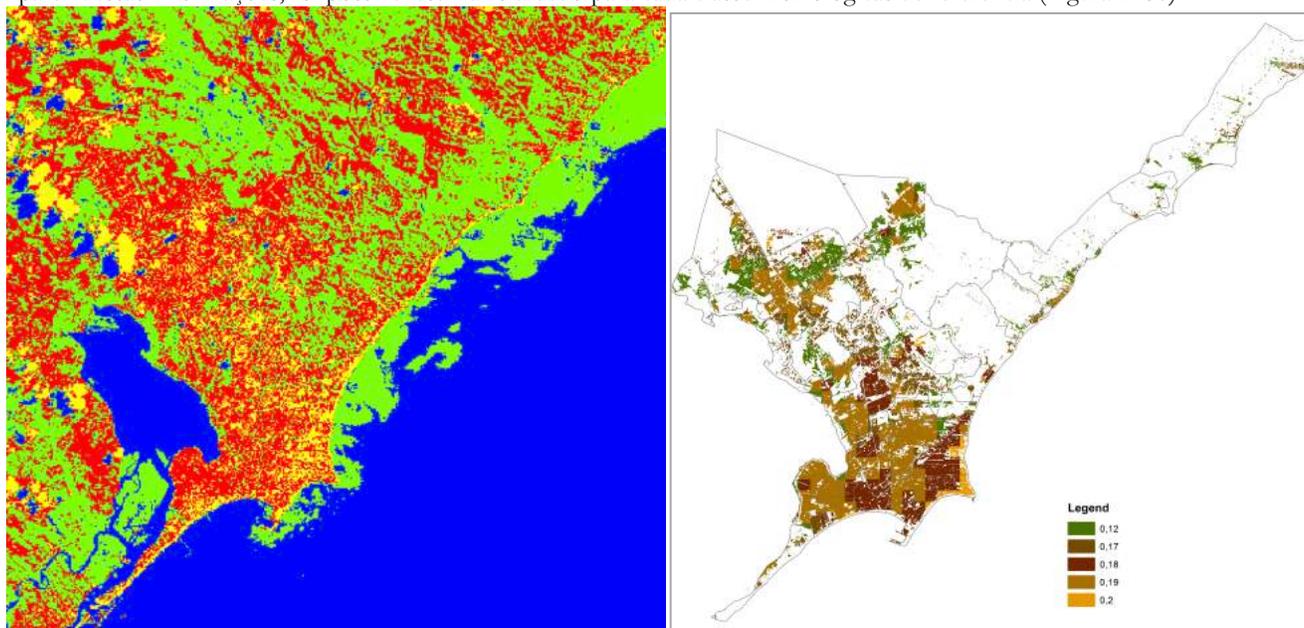


Figura 114: (a) albedo medido para a cidade de Maceió (em 2003) e (b) cartografia do albedo médio estimado para cada classe morfológica.

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 metálicas⁴⁷ pode ser adotada como sendo de aproximadamente 0,9 (GIVONI, 2008).

⁴⁷ Superfícies metálicas, especialmente metais polidos, possuem uma emissividade bastante baixa e, conseqüentemente absorve e emite muito pouco a irradiação de ondas longas (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
Caiçação	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.

Tabela 20 : propriedades termo-físicas consideradas nas simulações.

Principais variáveis	Unid.	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4		Classe 5	
		Cob	Par								
Transmitância térmica	W/m²K	2,00	1,85	2,25	1,85	4,55	1,85	2,2	1,85	4,55	1,85
Capacidade térmica	kJ/m².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/m²K	-	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 referência 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 115) e, assim, apresentam importante potencial de aproveitamento da energia solar por metro quadrado de superfície de cobertura, 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.

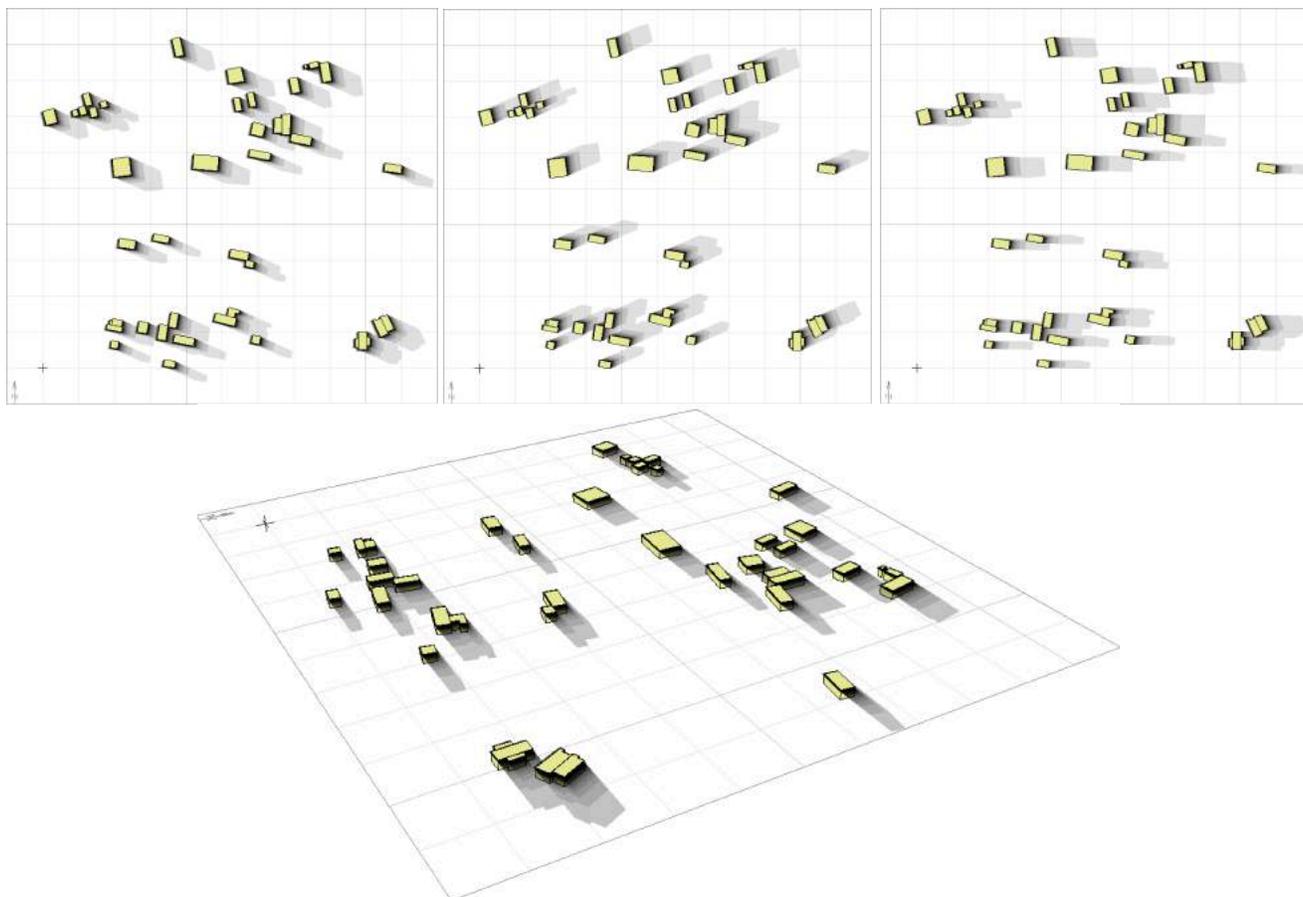
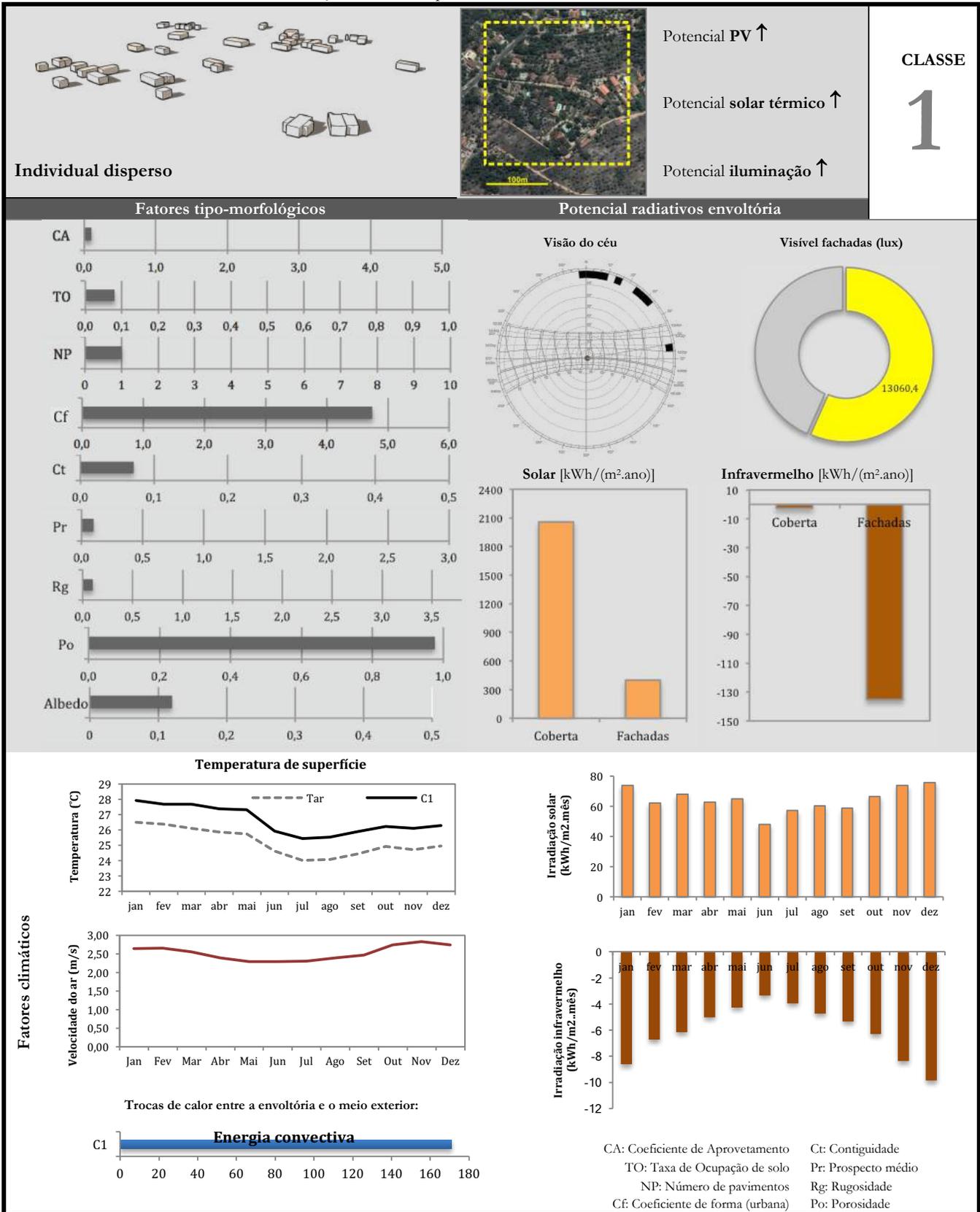


Figura 115: estudo da projeção de sombra para a classe 1, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30.

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)/pisos), 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 116), 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)).

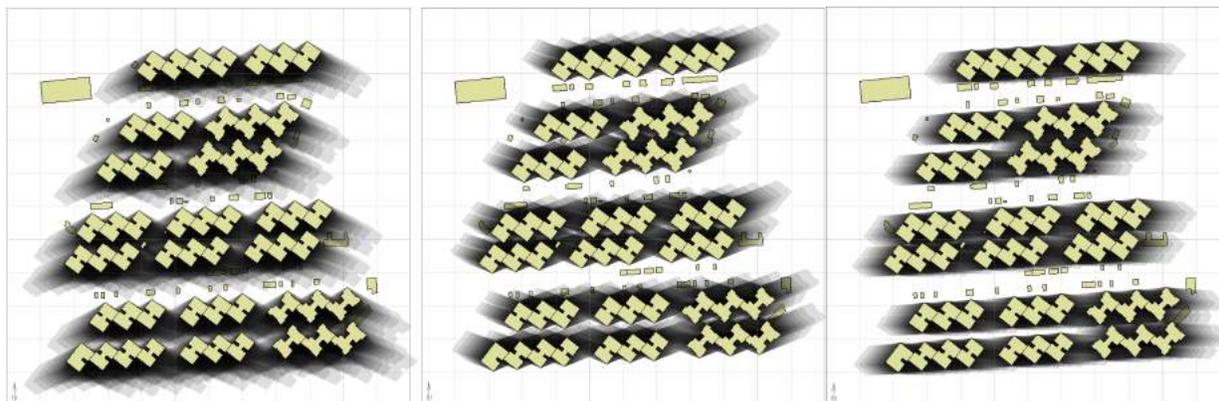
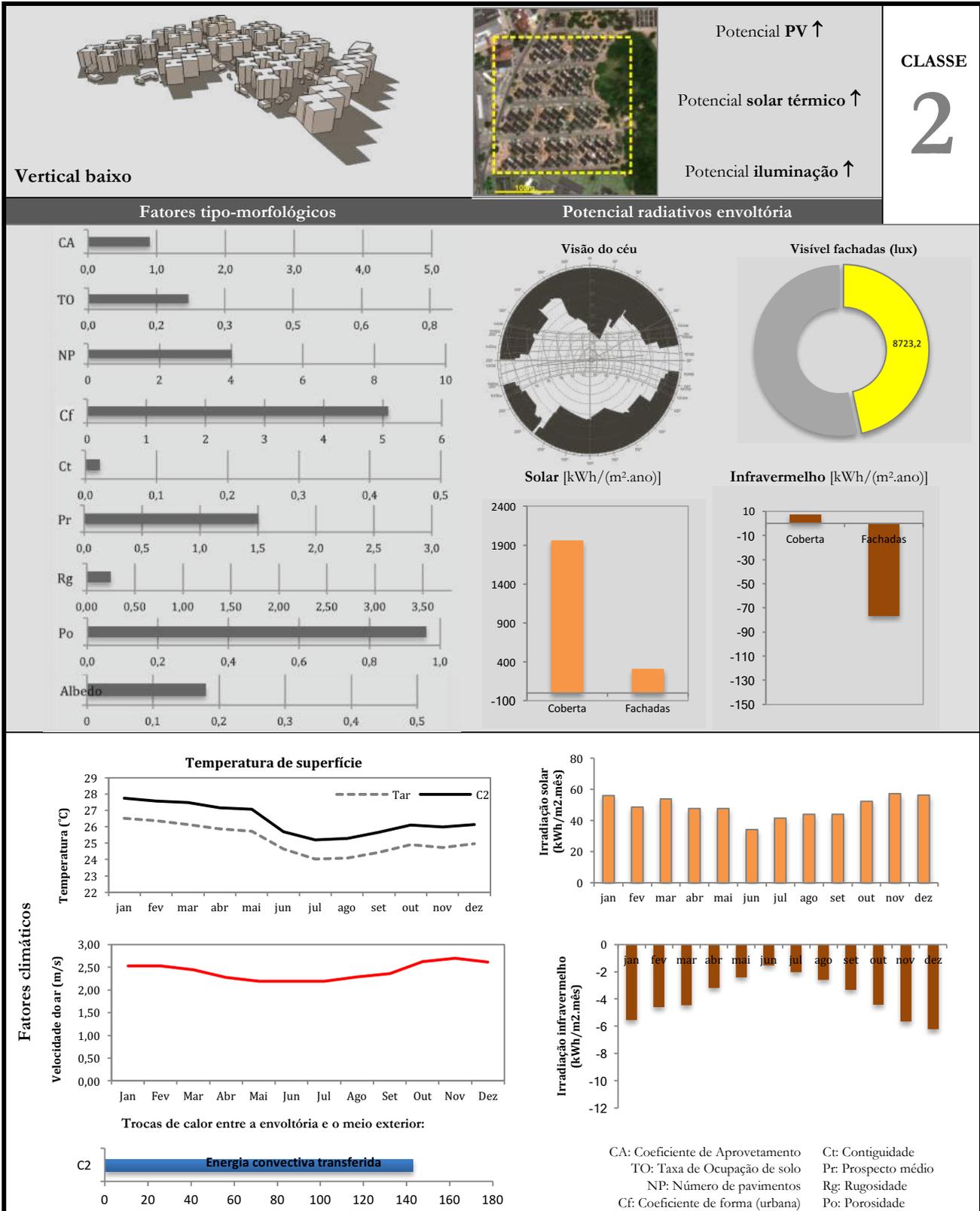


Figura 116: estudo da projeção de sombra para a classe 2, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30.

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.

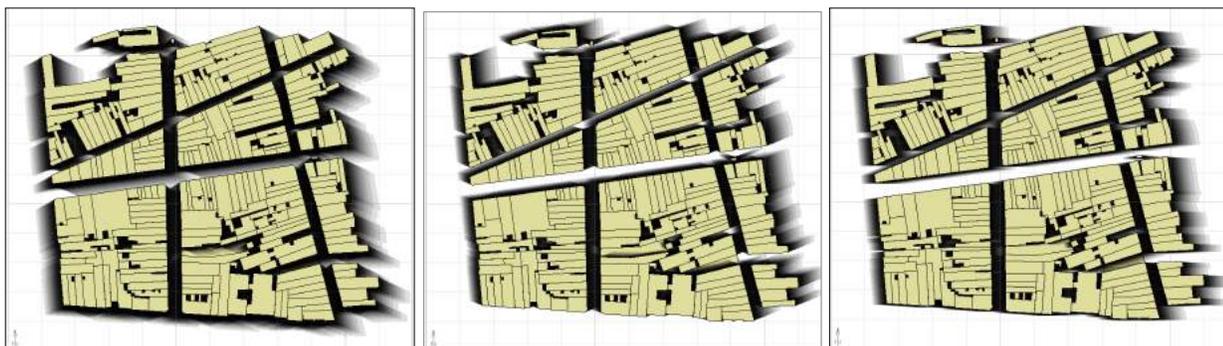


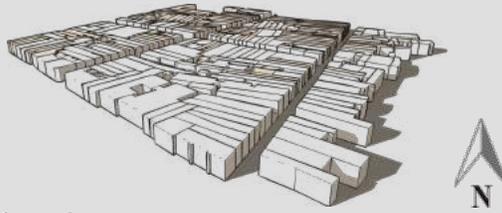
Figura 117: estudo da projeção de sombra para a classe 3, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30.

Tabela 23: resumo do resultado das simulações e análises para classe 3.

CLASSE

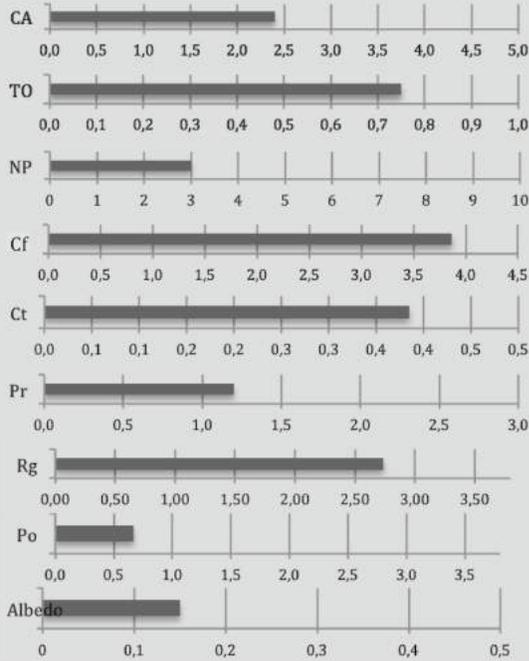
3

Colonial contínuo



Potencial PV ↑
(Parcial)
Potencial solar térmico ↑
Potencial iluminação ↓

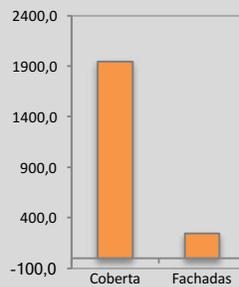
Fatores tipo-morfológicos



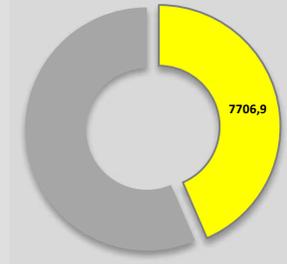
Potencial radiativo da envoltória



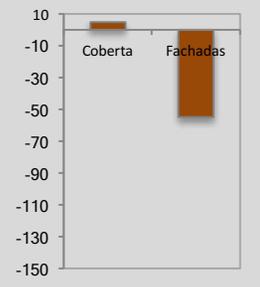
Solar [kWh/(m².ano)]



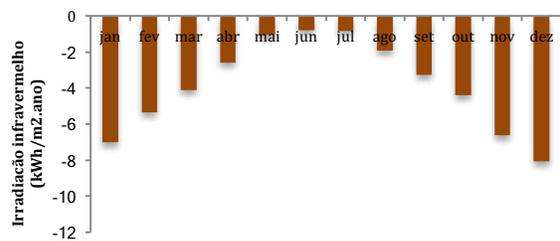
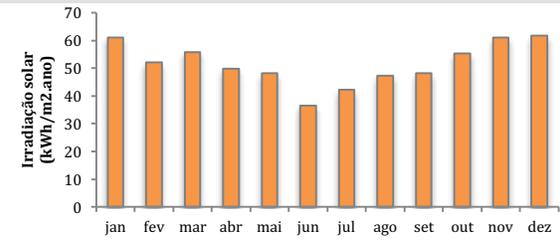
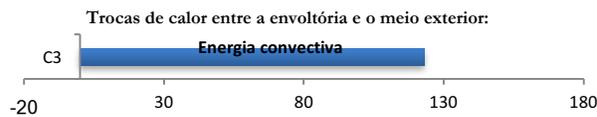
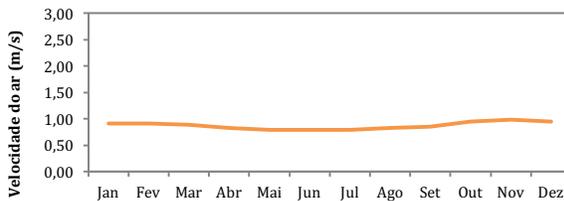
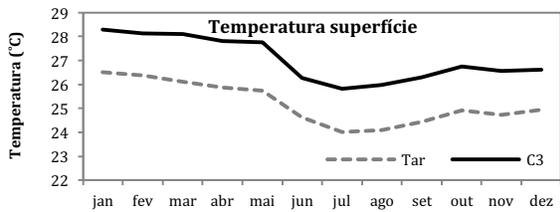
Visível fachadas (lux)



Infravermelho [kWh/(m².ano)]



Fatores climáticos



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.

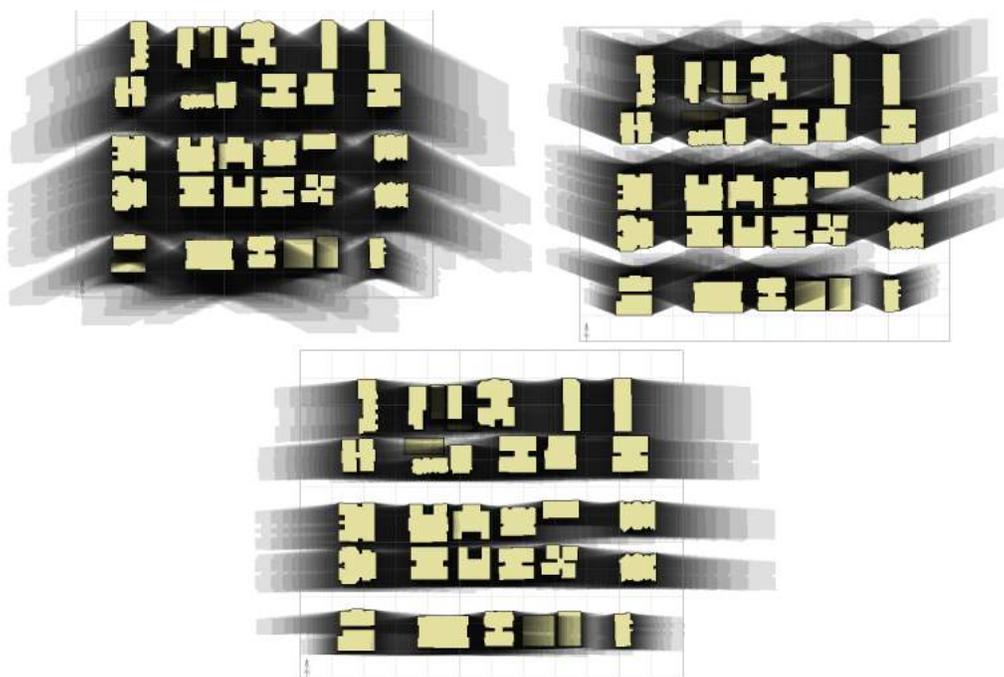
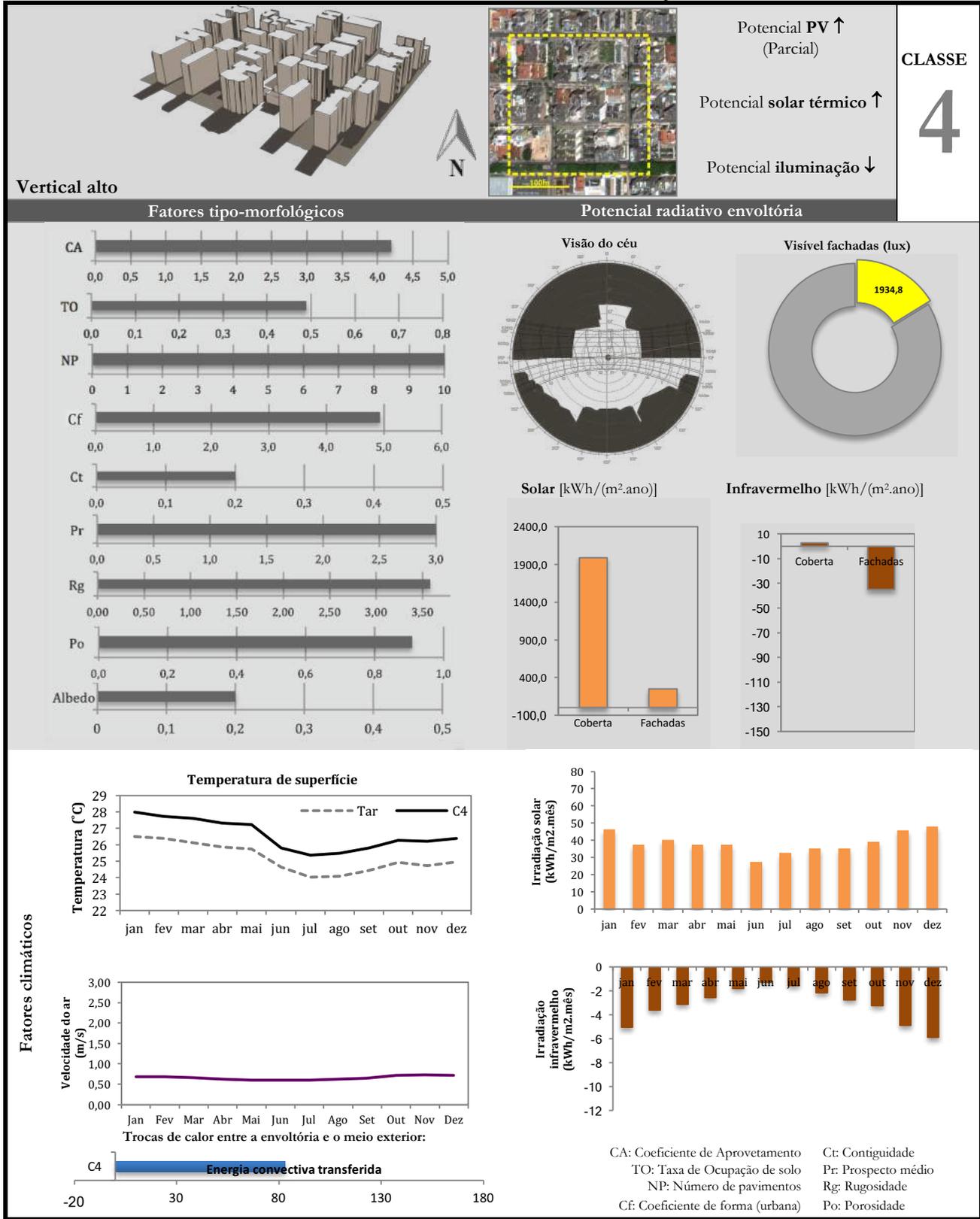


Figura 118: estudo da projeção de sombra para a classe 4, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um intervalo horário de 8h as 16h30.

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 119), podendo apresentar um forte potencial de aproveitamento da energia solar disponível nessas superfícies. O saldo de radiação solar encontrado na cobertura 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 cobertura 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).

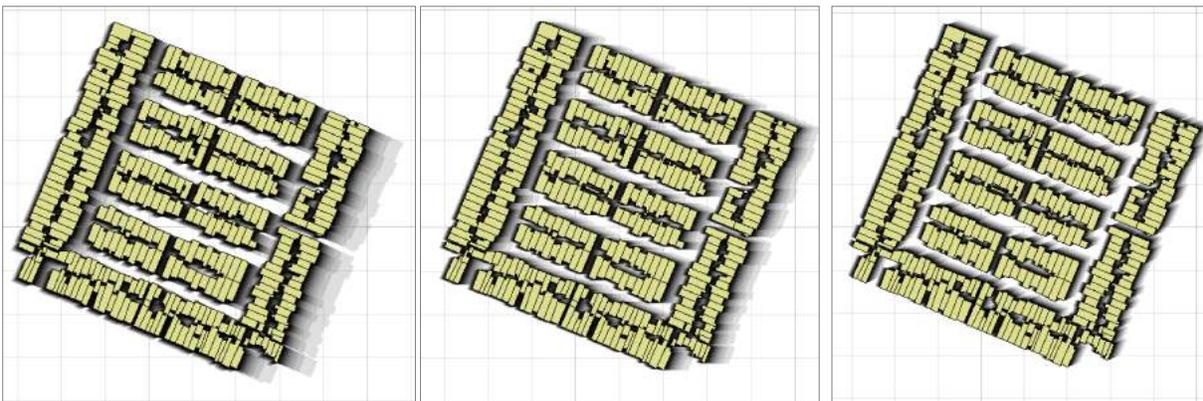
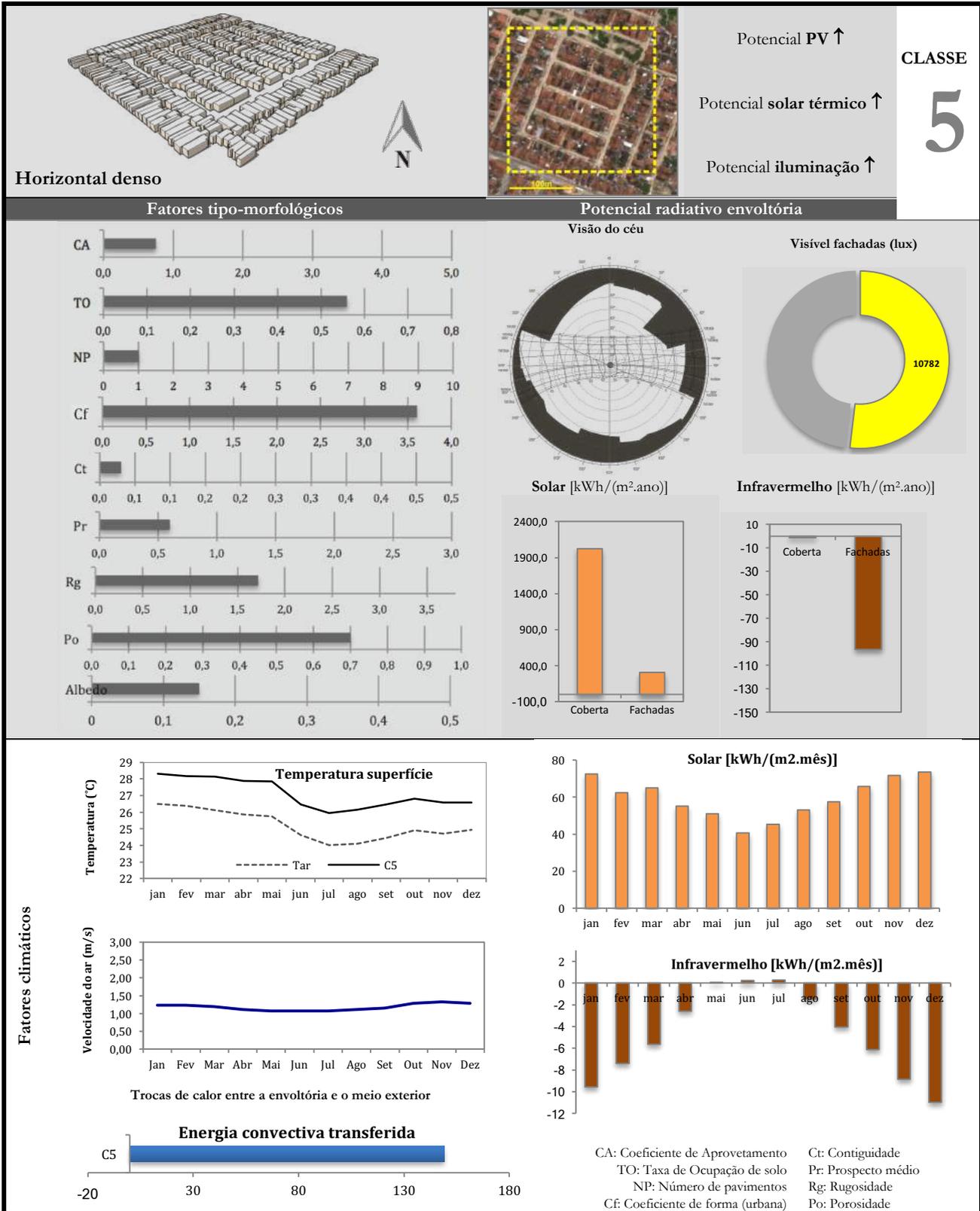


Figura 119: estudo da projeção de sombra para a classe 5, para solstício de inverno, solstício de verão e equinócios, respectivamente, para um

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.

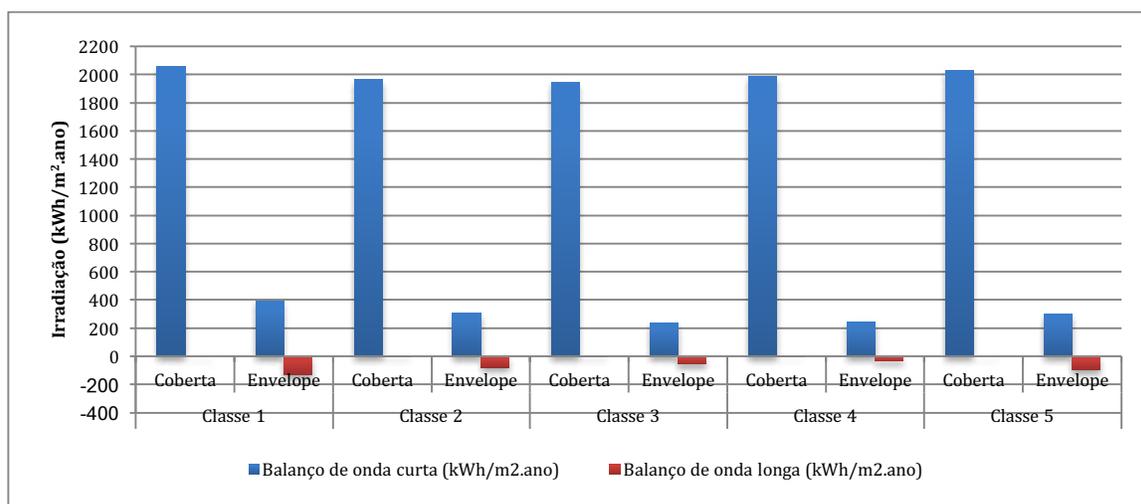
No que diz respeito à disponibilidade da energia radiante nas superfícies verticais (fachadas), em todos os espectros examinados, importantes distinções podem ser feitas entre as classes. Como pode ser observado, devido ao impacto do sombreamento das estruturas verticais, quando a altura solar é menor, 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 120 e Figura 123, 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 cobertura e das fachadas⁴⁸ 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								
Saldo de radiação de onda curta (kWh/m ² .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/m ² .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 120 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 cobertura, a Figura 121 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 120: irradiação anual nos dois espectros (onda curta e onda longa) e o saldo radiativo na superfície da cobertura para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió.

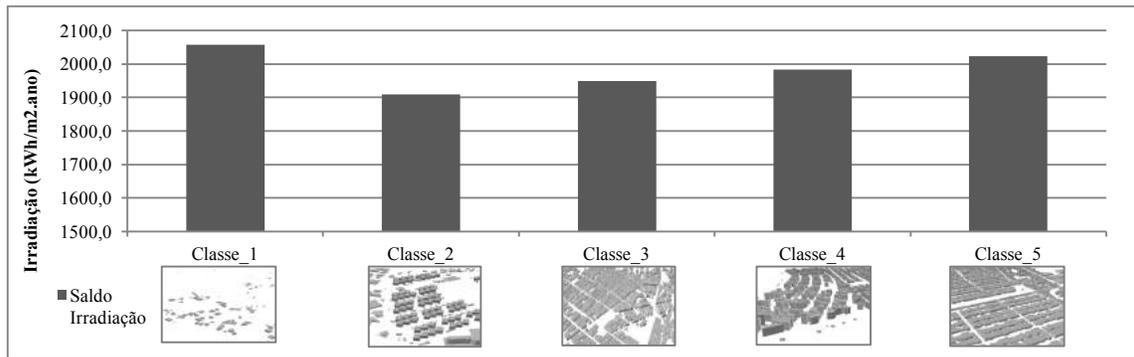


Figura 121: irradiação solar anual na superfície da cobertura para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió.

A Figura 122 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.

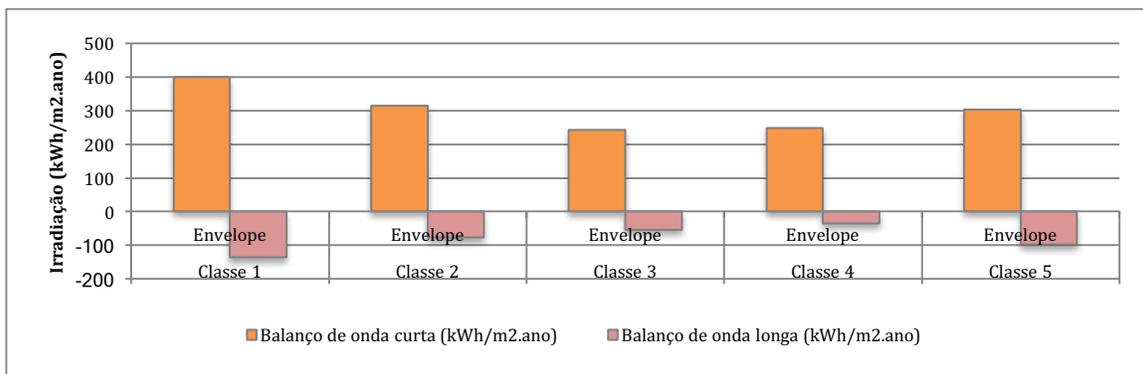


Figura 122: irradiação anual nos dois espectros (onda curta e onda longa) e o saldo radiativo na superfície das fachadas para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió.

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 123. 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.

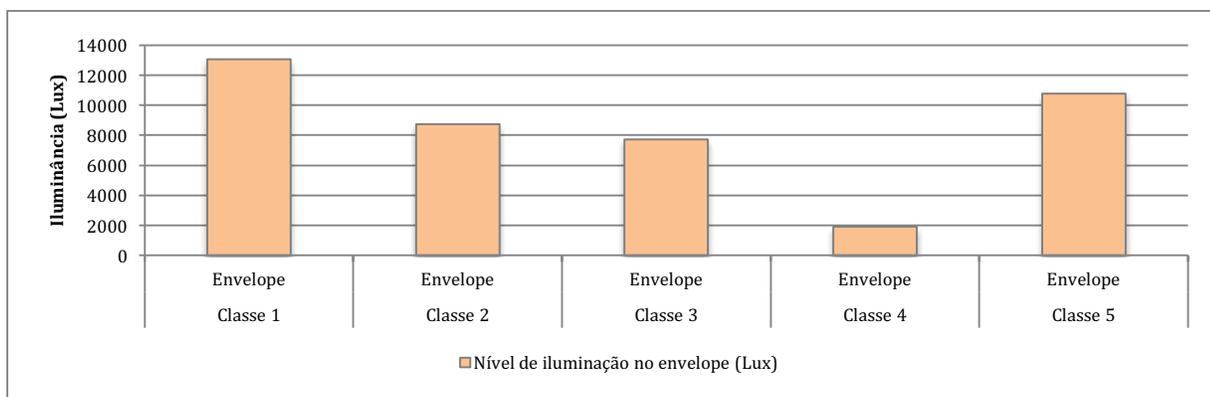


Figura 123: iluminância média anual na superfície das fachadas para as cinco classes tipo-morfológicas de Maceió.

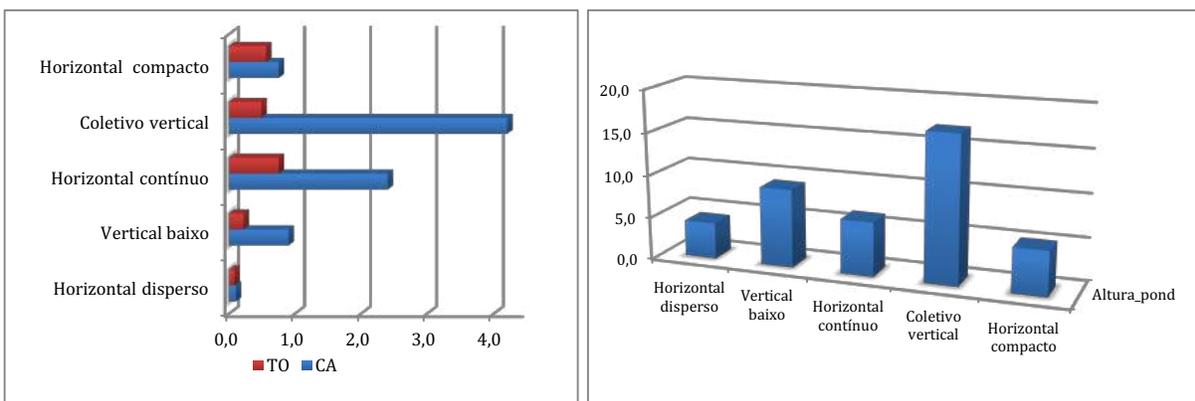


Figura 124 : comparativo para a taxa de ocupação (TO), coeficiente de aproveitamento (CA) e altura média ponderada entre as classes tipo-morfológicas de Maceió.

Se considerarmos que cada pavimento de um edifício vertical corresponde uma unidade de ocupação e cuja cobertura 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 125), respectivamente.

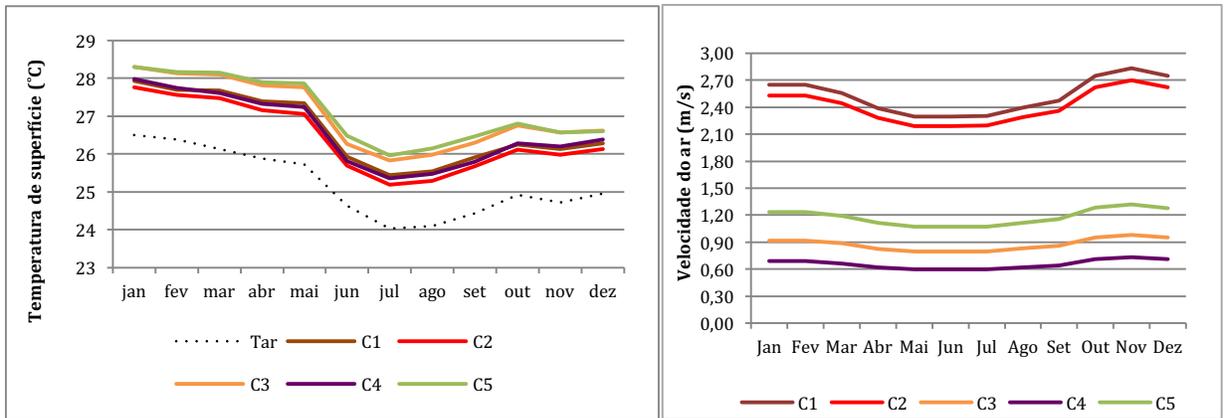


Figura 125: temperatura média ponderada das superfícies dos edifícios para as cinco classes morfológicas de referência de Macció e em linha tracejada, a temperatura média do ar, por mês.

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 envoltórias. 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 “morfológicas” das cinco tipologias de Macció.

Indicadores					
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Área construída no solo (m ²) ou área da cobertura	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
Coefficiente 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
Coefficiente 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 cobertura (kWh/m ²)	2056,8	1970,2	1949,7	1994, 2	2025,1
Irradiação disponível / pavimento (kWh/m ² .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. Esses 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. Essa 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 126 apresenta esquematicamente a estrutura do Capítulo III.



Figura 126: estrutura do capítulo III.

Palavras-chaves: análise de sensibilidade; planejamento de experimentos; método fatorial fracionado.

III.1. Metodologia de planejamento de experimentos multifatorial

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 a 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 número 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 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* (Hiper cubo 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:

$$n = 1 + \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \quad [\text{Eq. 49}]$$

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:

$$n = \prod_{i=1}^k n_i \quad [\text{Eq. 50}]$$

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).

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 127.

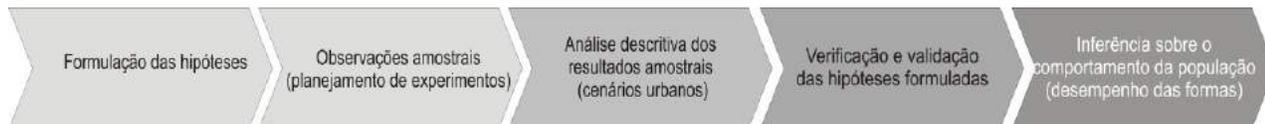


Figura 127: esquema sequencial do método científico estatisticamente planejado. Fonte: ilustração do autor.

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:

$$\mu = \bar{X} = \frac{\sum \bar{X}}{n} \tag{Eq. 51}$$

E a variância das médias amostrais é proporcional à variância populacional:

$$V(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n} \tag{Eq. 52}$$

Onde, μ e σ^2 são, 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.

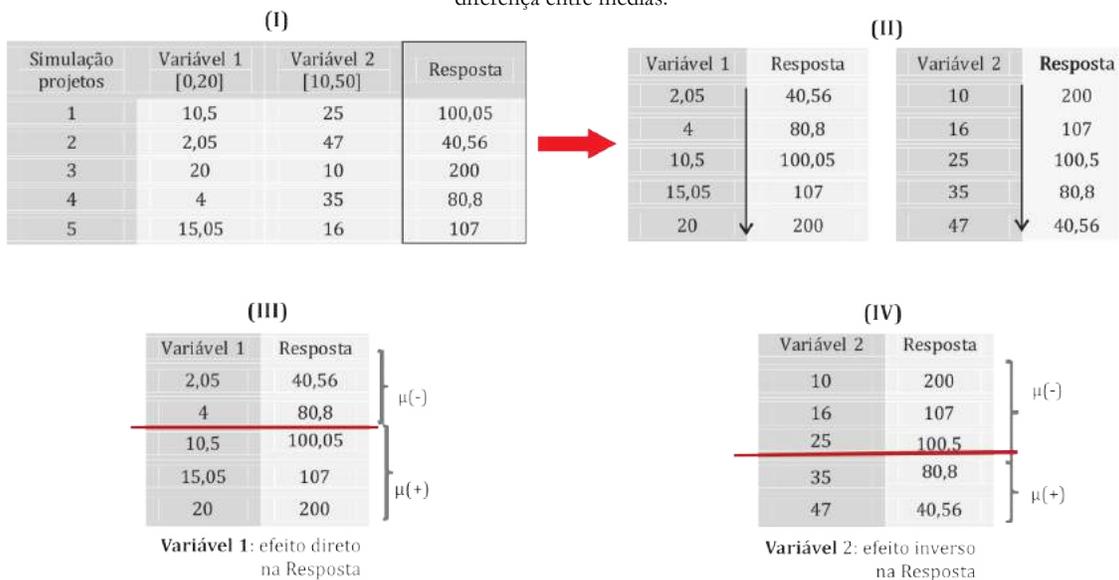


Figura 128: etapas da estratégia adotada de análise estatística. Fonte: ilustração do Autor, 2012

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 teste *t* de *student* para comparação de médias, define-se a estatística de teste como segue:

$$t = \frac{|\bar{X}_+ - \bar{X}_-| - \Delta}{S_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_+} + \frac{1}{n_-}\right)}} \quad [\text{Eq. 60}]$$

Como na hipótese nula deseja-se afirmar a igualdade entre as médias, sendo essa hipótese a ser tratada, assume-se $\Delta=0$ e a estatística de teste torna-se:

$$t = \frac{|\bar{X}_+ - \bar{X}_-|}{S_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_+} + \frac{1}{n_-}\right)}} \quad [\text{Eq. 61}]$$

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 129) 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.

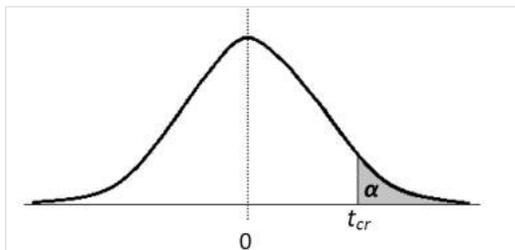


Figura 129: esquema ilustrativo da região crítica do teste de hipótese.

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 29.

Tabela 29: 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 30 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 significativo 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 130 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.

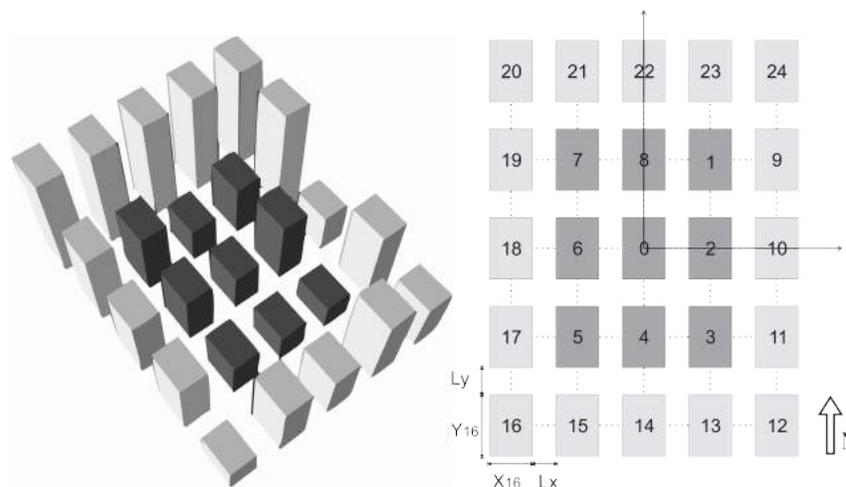


Figura 130: modelo simplificado utilizado de base no estudo estatístico. Fonte: ilustração do autor (2012).

Tabela 30: 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	Coefficiente de aproveitamento (CA)	Taxa de ocupação (TO)	Coefficiente 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 20), 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 131). 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 31).

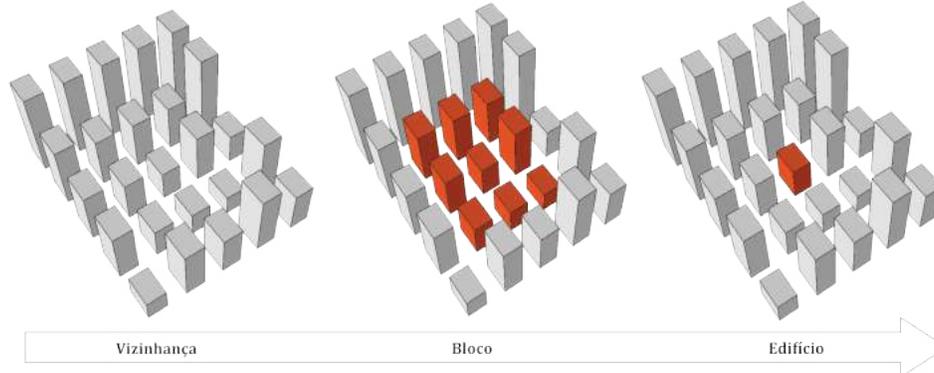


Figura 131 : ilustração das escalas consideradas na abordagem. Fonte : ilustração do autor. Fonte: ilustração do autor (2013).

Tabela 31: irradiação solar média anual (kWh/m².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 2¹⁴⁻¹ 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 132 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.

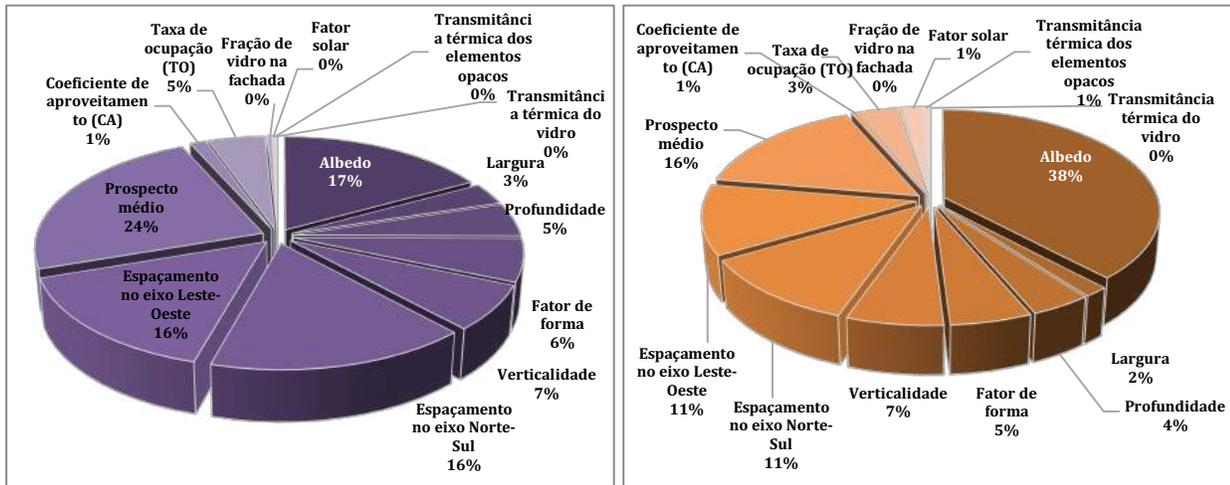


Figura 132: contribuição dos fatores morfológicos em relação ao balanço de radiação de onda curta e onda longa nas cobertas, respectivamente (overall student test).

(b) Magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas no balanço radiativo na superfície da Coberta

A partir dos gráficos apresentados a seguir nas Figura 133 Figura 134, 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 cobertura (Figura 133), enquanto a contribuição no saldo infravermelho para esta mesma variação será de cerca de 10 kWh/m².ano (Figura 134), 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 tabelas Tabela 32 e

Tabela 33 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 cobertura, 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.

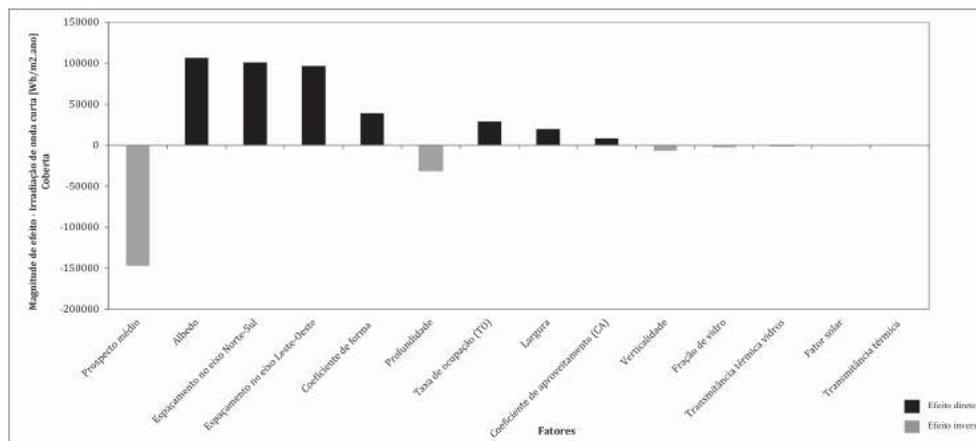


Figura 133: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas em relação ao saldo de energia radiativa de onda curta na superfície da cobertura.

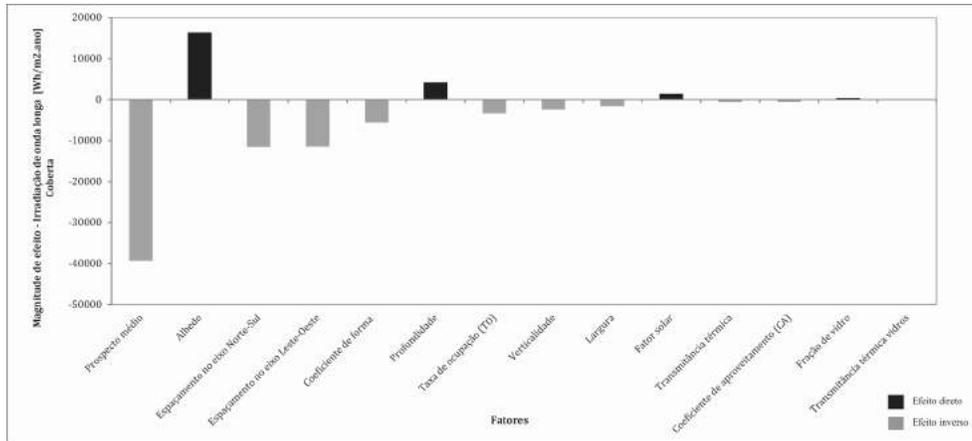


Figura 134: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas em relação ao balanço de radiação no espectro infravermelho na superfície da cobertura.

Tabela 32: resultados do teste de significância para o balanço de radiação de onda curta na superfície da cobertura.

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
Coefficiente 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
Coefficiente 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 33: resultados do teste de significância quanto ao resultado na radiação de onda longa na superfície da cobertura.

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
Coefficiente 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
Coefficiente 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 135 e Figura 137 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 médio* 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

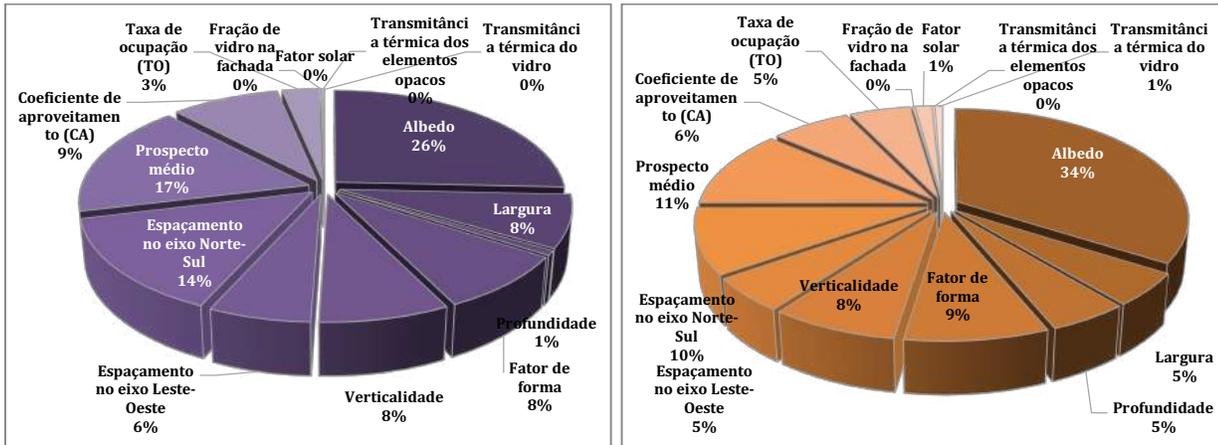


Figura 135: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas respostas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada Leste (overall student test).

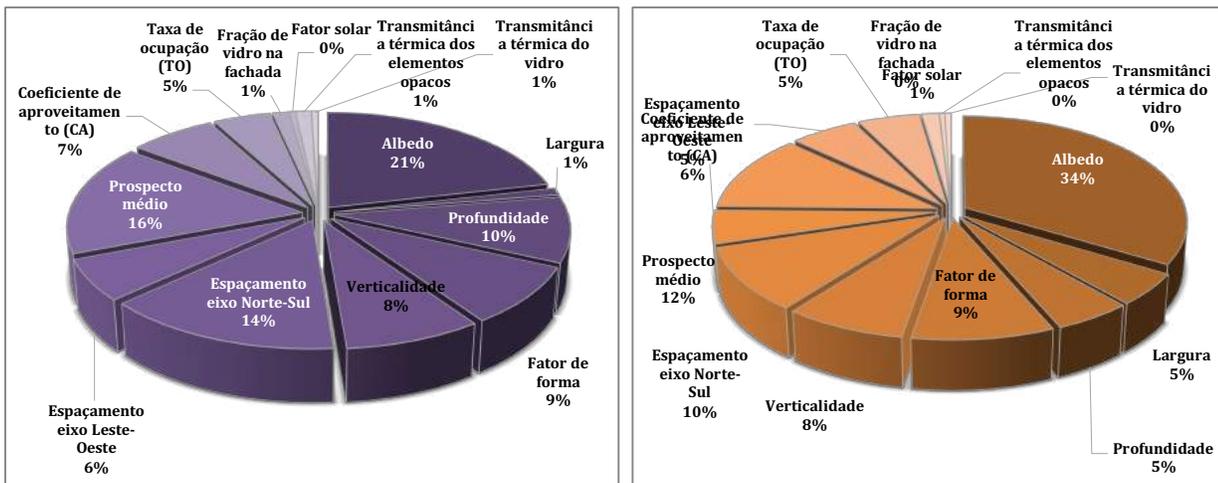


Figura 136: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas respostas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada oeste (overall student test).

(b) Magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas no balanço radiativo na Fachada leste e oeste

De acordo com as informações obtidas na Figura 137 e Figura 138, 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.

DE CONDICIONANTES SOLARES À OPORTUNIDADES DE DESENHO URBANO

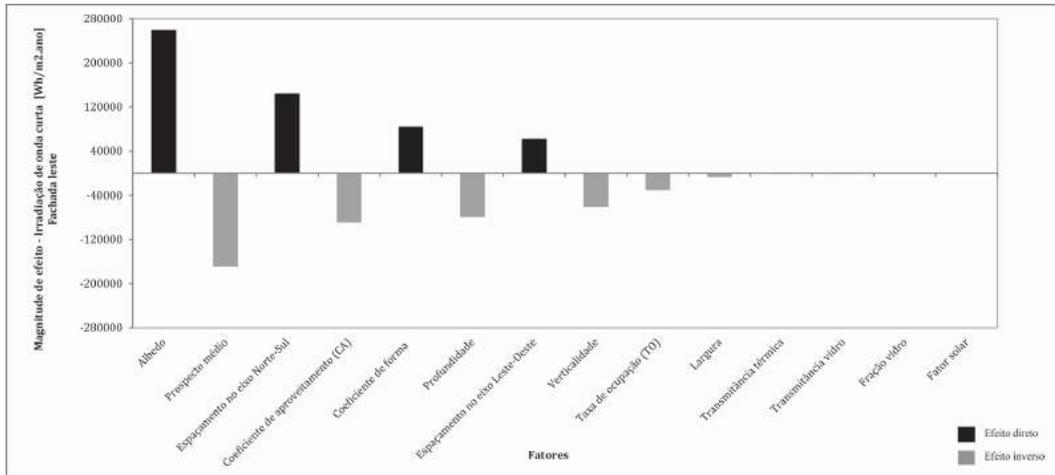


Figura 137: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de energia radiante de onda curta na superfície vertical leste.

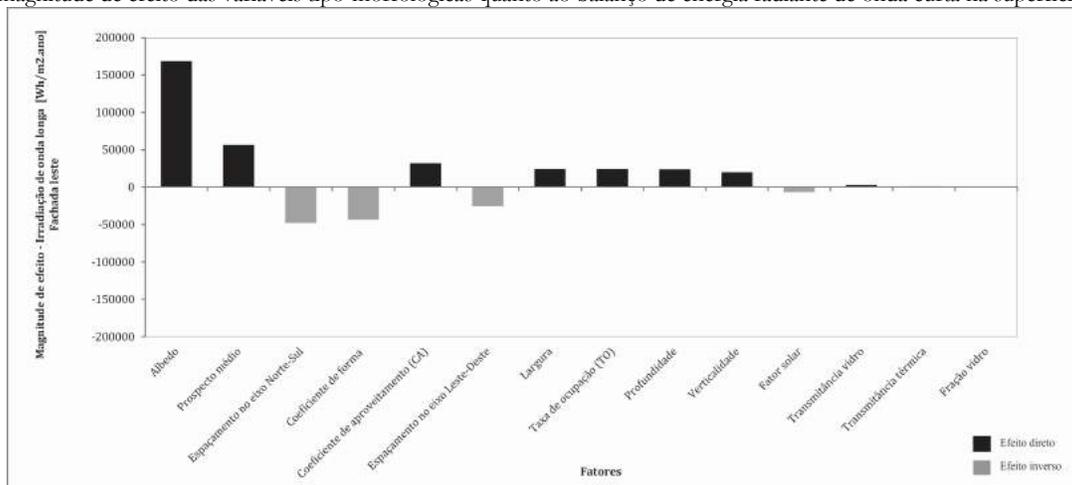


Figura 138: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de radiação infravermelha na superfície vertical leste.

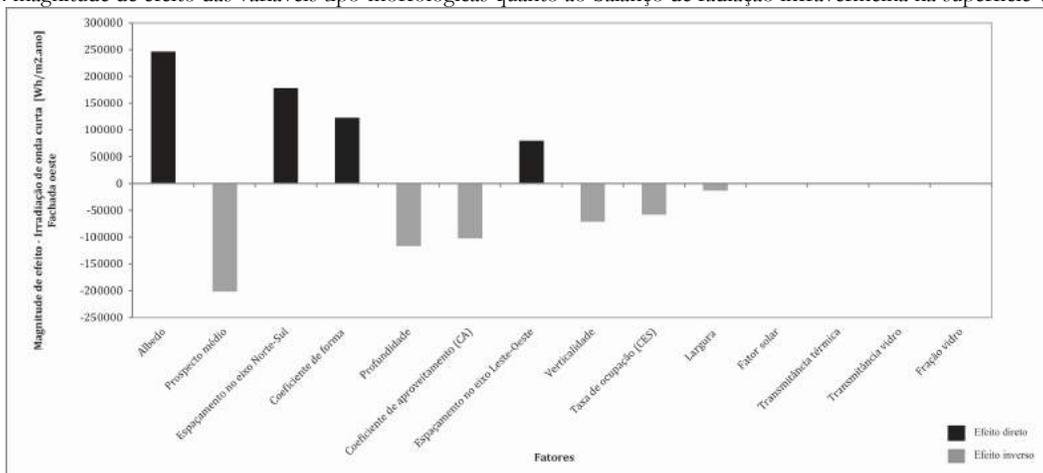


Figura 139: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de energia radiante de onda curta na superfície vertical oeste.

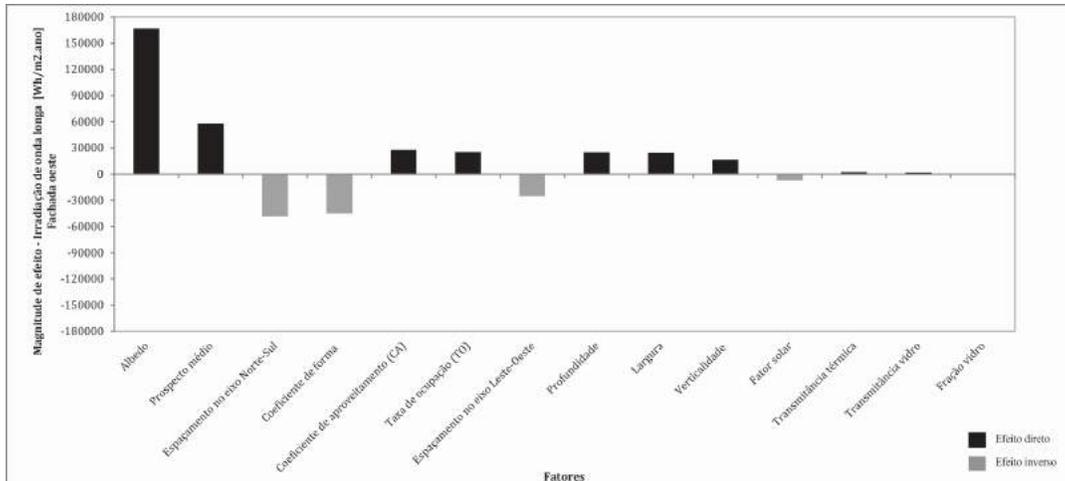


Figura 140: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a radiação infravermelha na superfície vertical oeste.

(c) Teste de hipótese estatística

Da Tabela 34

Tabela 37 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/m².ano, respectivamente. Enquanto a largura representaria uma redução de apenas 7 kWh/m².ano e 13 kWh/m².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 34: 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
Coefficiente de aproveitamento (CA)	-89,2	0,00	2,66
Coefficiente 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 35: resultados do teste de significância no balanço de radiação infravermelha na superfície leste.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	Magnitude do efeito [kWh/m ² .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
Coefficiente de forma	-43,3	0,00	2,79
Coefficiente 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 (IO)	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 36: resultados do teste de significância para o balanço de radiação de onda curta na superfície oeste.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	Magnitude do efeito [kWh/m ² .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
Coefficiente de forma	122,6	0,00	5,47
Profundidade	-117,1	0,00	4,97
Coefficiente 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 (IO)	-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	0,49	0,02
Transmitância vidro	-0,3	0,49	0,01
Fração vidro	-0,1	0,50	0,00

Tabela 37: resultados do teste de significância na radiação infravermelha na superfície oeste.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	Magnitude do efeito [kWh/m ² .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
Coefficiente de forma	-45,0	0,00	2,89
Coefficiente de aproveitamento (CA)	28,0	0,03	1,77
Taxa de ocupação (IO)	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 141 e Figura 142 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 médio* 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.

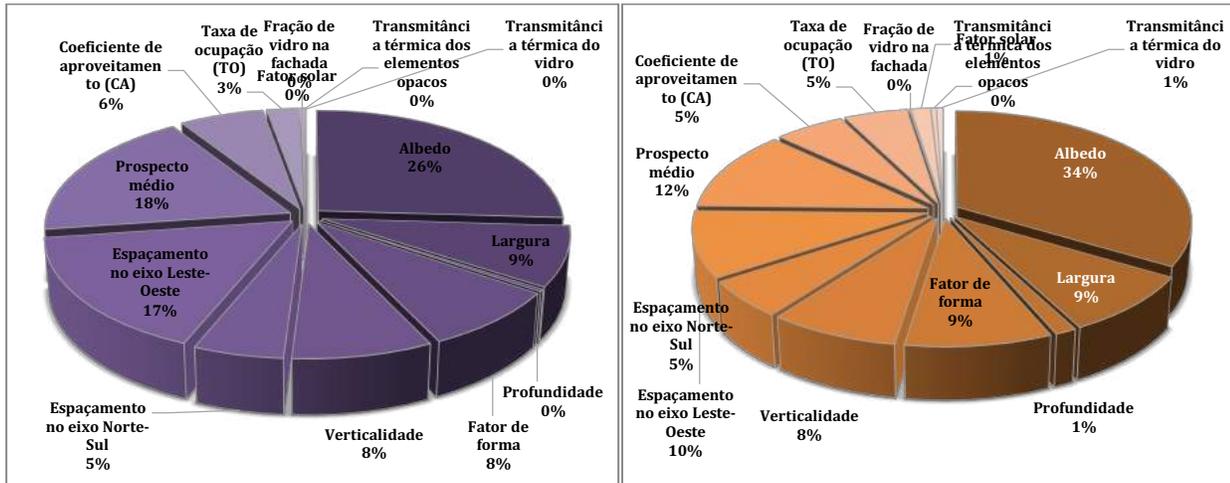


Figura 141: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas respostas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada norte (*overall student test*).

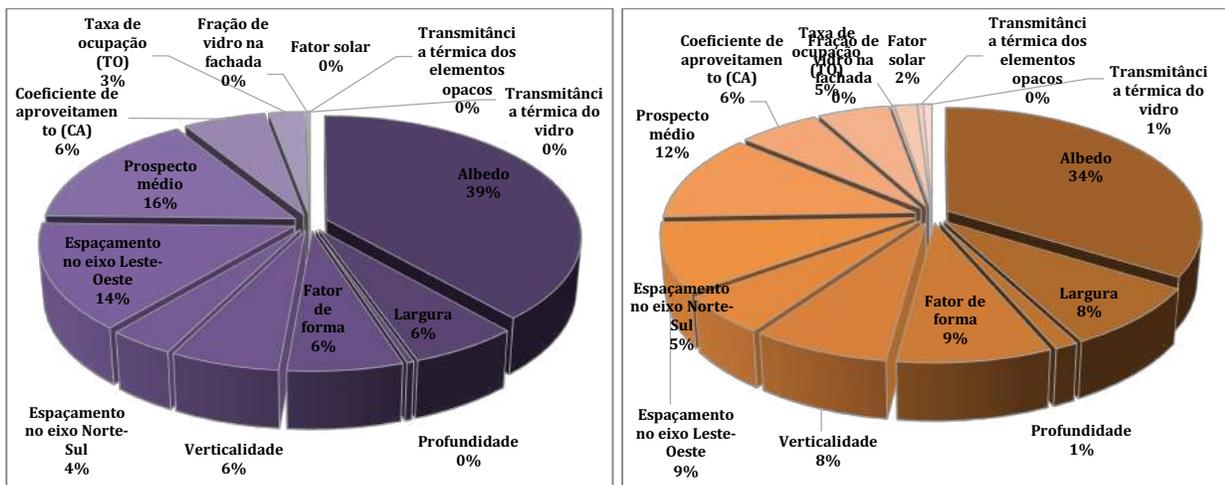


Figura 142: gráficos com os resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos nas do balanço de radiação de onda curta e longa, respectivamente, na superfície da fachada sul (*overall student test*).

(b) Magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas no balanço radiativo na Fachada norte e sul

Conforme os resultados obtidos e ilustrados na **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.** e **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.**, 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 130). 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.

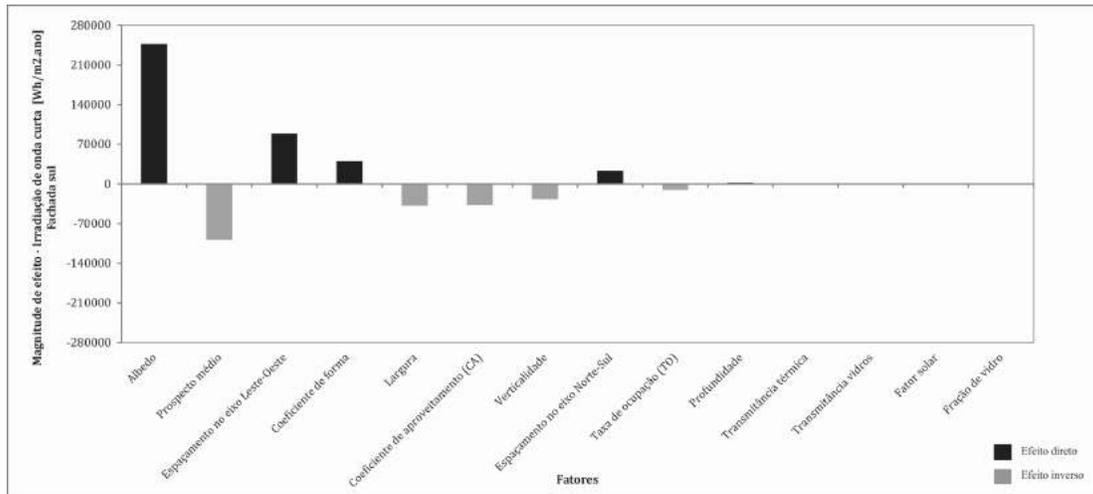


Figura 143: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto ao balanço de radiação solar na superfície vertical sul.

(c) Teste de hipótese estatística

Da Tabela 38 a Tabela 41, 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 38: 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
Coefficiente de forma	73,4	0,00	4,11
Coefficiente 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 39: resultados do teste de significância na radiação infravermelha na superfície vertical norte.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	Magnitude do efeito [kWh/m ² .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
Coefficiente de forma	-44,5	0,00	2,86
Largura	43,4	0,00	3,56
Coefficiente de aproveitamento (CA)	27,6	0,04	1,72
Espaçamento no eixo Norte-Sul	-27,0	0,01	2,18
Taxa de ocupação (IO)	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 40: resultados do teste de significância no balanço de radiação de onda curta na superfície vertical sul.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	Magnitude do efeito [kWh/m ² .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
Coefficiente de forma	40,0	0,00	2,37
Largura	-38,4	0,02	2,12
Coefficiente 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 (IO)	-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 41: resultados do teste de significância na radiação infravermelha na superfície vertical sul.

Fatores tipo-morfológicos urbanos	Magnitude do efeito [kWh/m ² .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
Coefficiente de forma	-43,2	0,00	2,76
Largura	42,4	0,00	3,48
Coefficiente de aproveitamento (CA)	29,7	0,03	1,85
Espaçamento no eixo Norte-Sul	-26,7	0,01	2,16
Taxa de ocupação (IO)	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 42 e Tabela 43, são apresentados os resultados sobre a magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos para a irradiação solar e infravermelha em cada superfície.

Tabela 42: magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos na irradiação solar de todas as superfícies examinadas.

Fatores tipo-morfológicos	Magnitude de efeito [kWh/m ² .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 43: magnitude de efeito dos fatores tipo-morfológicos na irradiação infravermelha de todas as superfícies examinadas.

Fatores tipo-morfológicos	Magnitude de efeito [kWh/m ² .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 42). 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 44 – 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 43). 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 42). Porém, se compararmos o impacto que é produzido nessas superfícies verticais ao produzido na superfície horizontal da cobertura, 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 cobertura.

A superfície horizontal da cobertura 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 cobertura em relação às diferentes fachadas verticais. A magnitude de efeito do albedo nas fachadas é da ordem de dez vezes maior que para as coberturas (Tabela 43). 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 cobertura, 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 cobertura, 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 cobertura, 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 coberturas 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 cobertura, 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 significativo 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.

Coefficiente 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 cobertura. 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, conseqüentemente, 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 raiotrazado, 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 importante⁴⁹.

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 absorvidade) 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 temperatura (calcula-se uma temperatura superficial média por fachada).

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.

Não sendo consideradas, portanto, as variações de emissividade e absorvidade em cada componente, inclusive o percentual de vidro, de cada fachada.

Tabela 44: 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
Coefficiente 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
Coefficiente 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 45: 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
Coefficiente 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
Coefficiente 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 44 e

Tabela 45). 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 cobertura. 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 cobertura.

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 144 e **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.** 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).

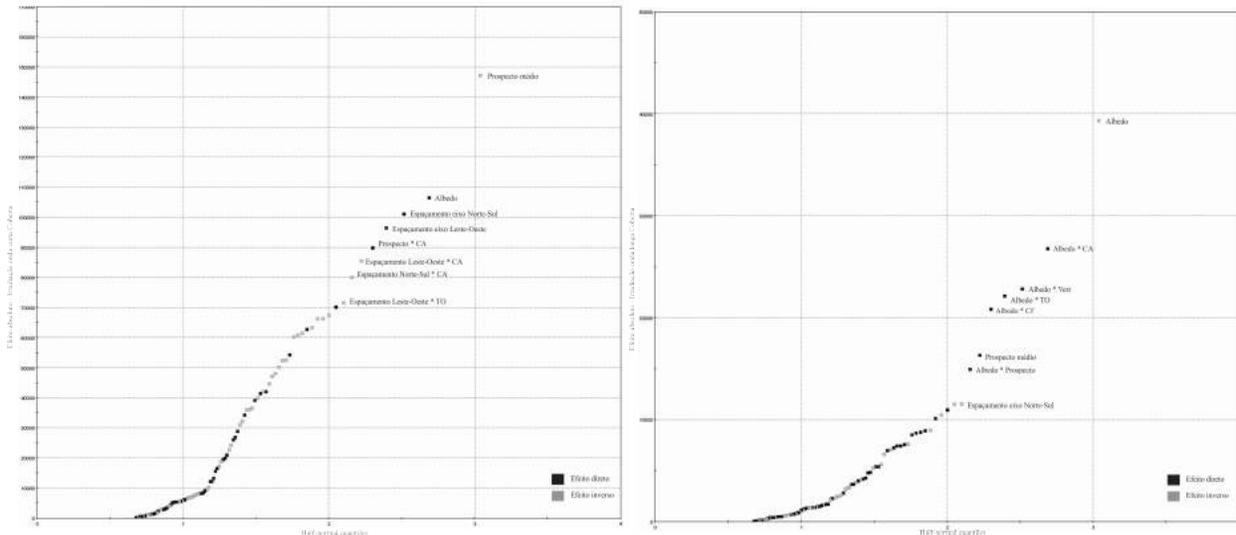


Figura 144: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta e longa resultante na superfície da cobertura.

O gráfico da Figura 144 representa os efeitos principais e de interação dos fatores para a resposta do balanço radiativo de onda curta na superfície da cobertura. 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 cobertura, da ordem de apenas 8 kWh/m².ano (Tabela 44). 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 cobertura 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.

Os gráficos da Figura 144 e Figura 145 apresentam os efeitos principais e de interação dos mesmos fatores para a resposta do balanço radiativo de onda longa 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 34),

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.

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). 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.

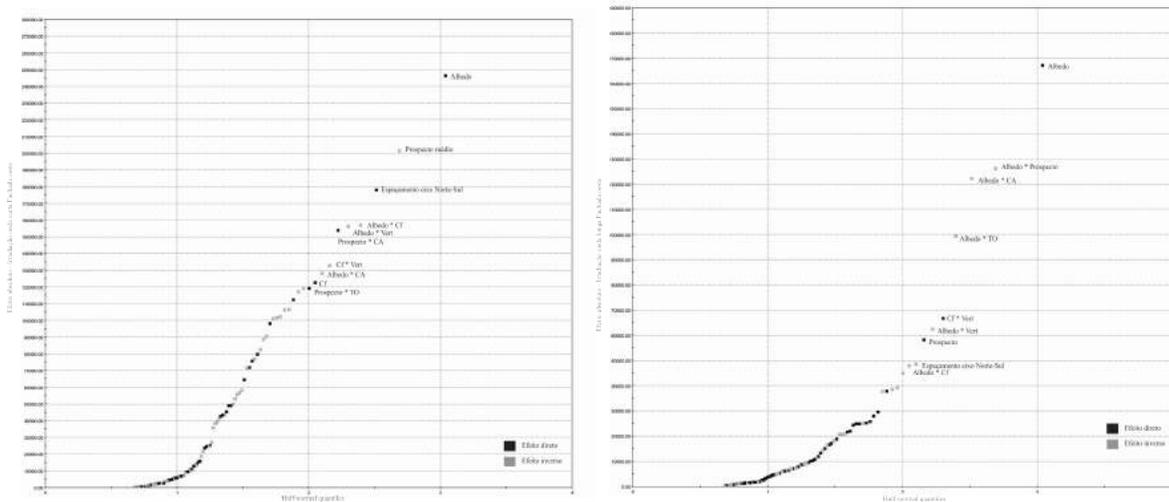


Figura 145: gráfico de probabilidade normal para a irradiação de onda curta e longa resultante na superfície da fachada oeste.

Quanto aos 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 significativo, 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 **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.** 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) (**Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.** a **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.**). Estes fatores já representavam um efeito significativo 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.

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 146).

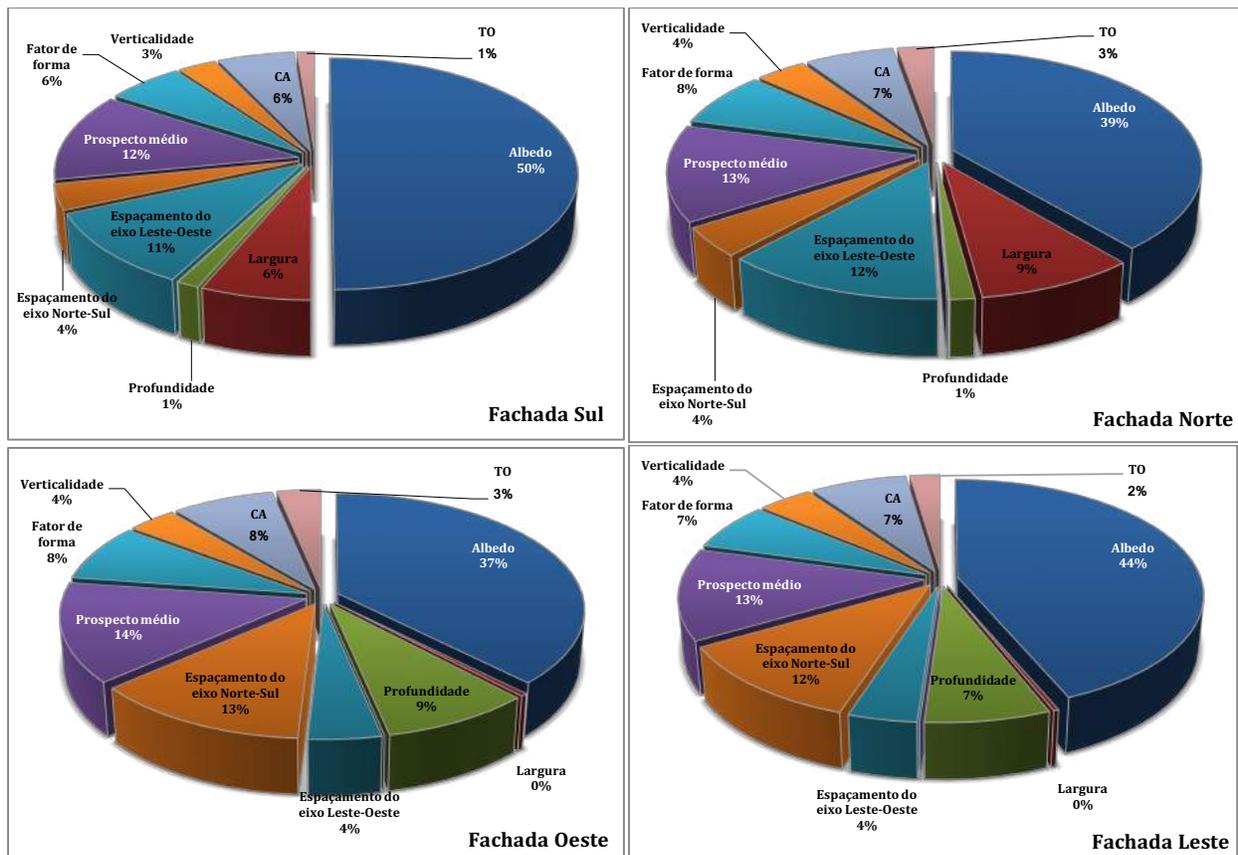


Figura 146: resultados da análise de sensibilidade dos fatores morfológicos na resposta de iluminância na fachada Sul, norte, oeste e leste, respectivamente (*overall student test*).

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 147 a Figura 148, 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.

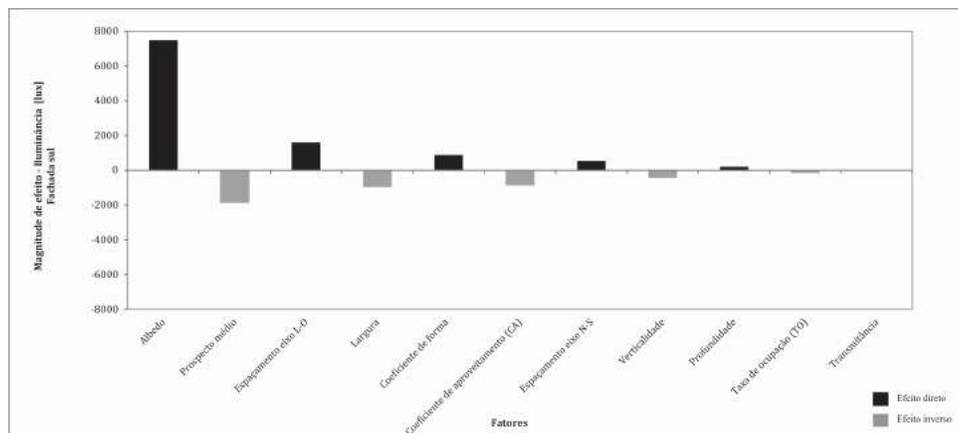


Figura 147: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a resposta de iluminância na superfície da fachada Sul.

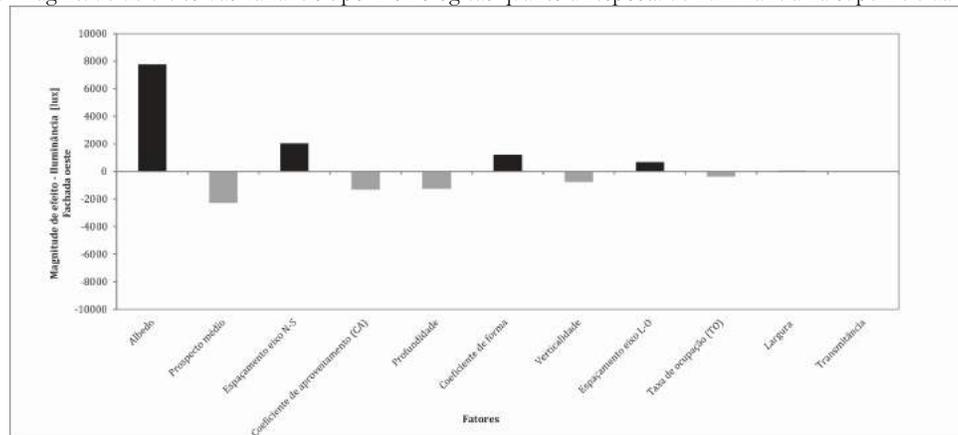


Figura 148: magnitude de efeito das variáveis tipo-morfológicas quanto a resposta de iluminância na superfície da fachada oeste.

III.2.3.3. Teste de hipótese estatística

A Tabela 46 a Tabela 49 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, conseqüentemente, 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 46 : 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
Coefficiente de forma	877,6	0,03	1,82
Coefficiente 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 47 : 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
Coefficiente de forma	1337,9	0,00	2,96
Coefficiente 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 48 : 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
Coefficiente de forma	1565,6	0,00	3,12
Coefficiente 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 49 : 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
Coefficiente de aproveitamento (CA)	-1321,4	0,07	1,48
Profundidade	-1262,1	0,01	2,29
Coefficiente 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 **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.** a **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.**). 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.

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 cobertura em 101 kWh/m².ano, esse mesmo fator isolado implicará uma emissão de apenas 11 kWh/m².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 126 apresenta esquematicamente a estrutura do Capítulo IV.

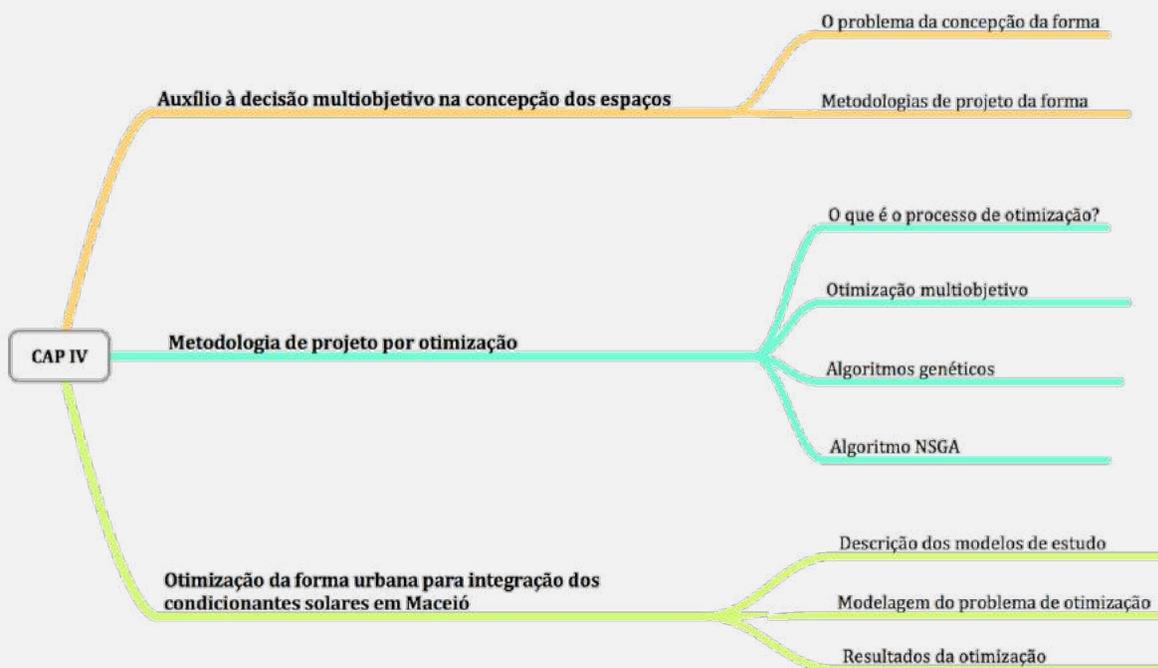


Figura 149: estrutura do capítulo IV.

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 almeçados 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 150).

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 150: 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 151). 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).

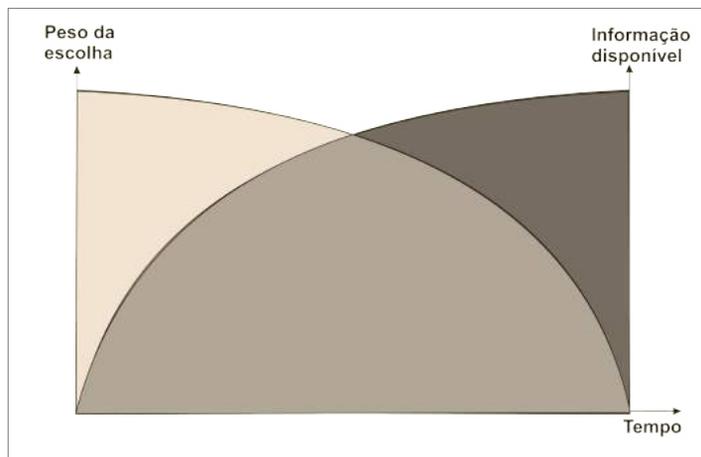


Figura 151: paradoxo da concepção arquitetônica e urbana (ADOLPHE, 1995).

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 deste 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 153, Figura 154 e Figura 155).

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 153). 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:

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & \dots & e_{1m} \\ \vdots & e_{ij} & \vdots \\ e_{n1} & \dots & e_{nm} \end{bmatrix} \dots \text{ para um número } n \text{ de ações: } i=1, \dots, n \text{ e critérios: } j=1, \dots, m.$$

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: $p = (p_1, \dots, p_m)$.

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 previsão do consumo energético em edificações), ora mais sofisticados (por meio do uso de modelos matemáticos mais precisos, como a técnica do Raio-traçado para previsão 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-linearidade 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 parametrização⁵⁰ 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. CAD⁵¹, BIM⁵², SIG⁵³, 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 152), ou ainda

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.

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 performativa⁵⁴ possível diante de certos critérios, parâmetros e leis de acoplamento definidas pelo projetista, resultando numa integração importante entre Arquitetura e técnica (ZELLNER, 1999).

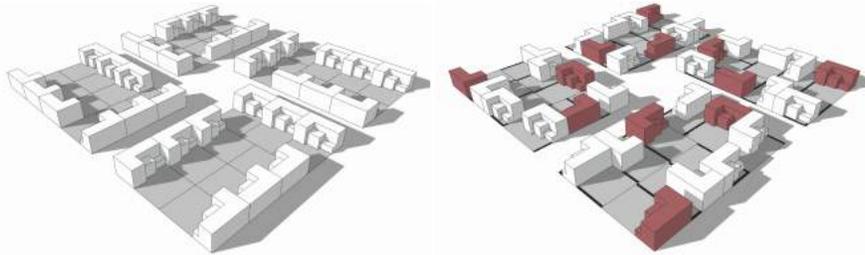


Figura 152: variações puramente formais parametrizando orientação e implantação no lote urbano, utilizando técnicas de rotação e reflexão em ambiente computacional do Google Sketchup (STEINØ, 2010).

Atualmente, uma série de programas destinados à parametrizar projetos podem ser encontrados, tais como: *Digital project* (YU, 2009), *Grasshopper*® (módulo do Rhinoceros® 3D) *Generative Components*, *Revit* ou ainda *Solidworks*. E, para escala urbana, pode-se citar o *CityEngine*® (da ESRI⁵⁵), 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).

⁵⁴ A arquitetura paramétrica é também chamada de arquitetura « performativa » (YU, 2009).

⁵⁵ *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) e inventor do conceito dos programas SIG (Sistema de Informação Geográfica).

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 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 operacional⁵⁶ 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, conseqüentemente, 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 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

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.

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 50 permite comparar as duas abordagens alternativas à metodologia tradicional de projeto, segundo alguns aspectos principais. A Figura 153, Figura 154 e Figura 155, 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 50: comparação entre métodos de projeto e decisão .

	AUXÍLIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO	OTIMIZAÇÃO CLÁSSICA
Princípio	Racionalização do bom senso	Pesquisa operacional
Cálculos	Simple	Complexos
Variáveis	Intervalo estreito de variáveis discretas	Intervalo amplo de variáveis contínuas
Hipóteses	Complexas	Simple
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 fronteira 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 radiossidade. 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 153 : metodologia tradicional de projeto.

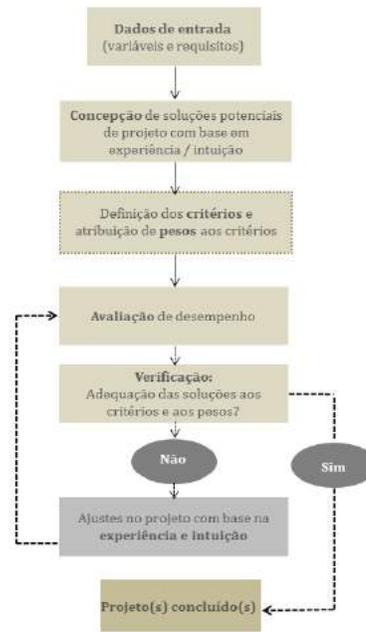


Figura 154 : abordagem multicritério.

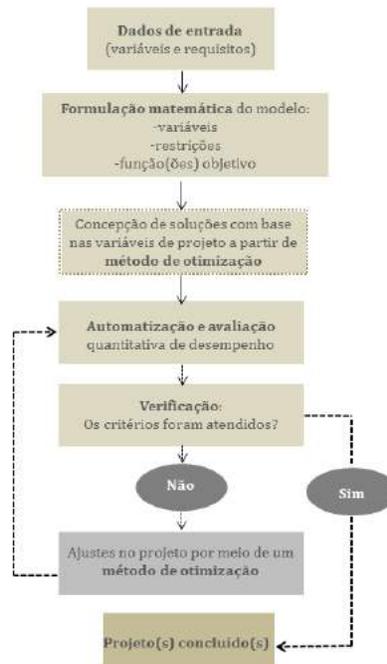


Figura 155 : metodologia de projeto por otimização.

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 $\text{argmin } f_{\text{obj}}(x)$

tal que

$$g_i(x) \geq 0 \text{ para } i = 1, \dots, n_g$$

$$h_j(x) = 0 \text{ para } j = 1, \dots, n_h$$

$$lb_k \leq x_k \leq ub_k \text{ para } k = 1, \dots, n_x$$

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 -ésima 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:

$$\text{encontrar } \arg \min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)],$$

onde $f(x)$ é o vetor objetivo e $f_i(x)$ 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:

o *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 156 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.

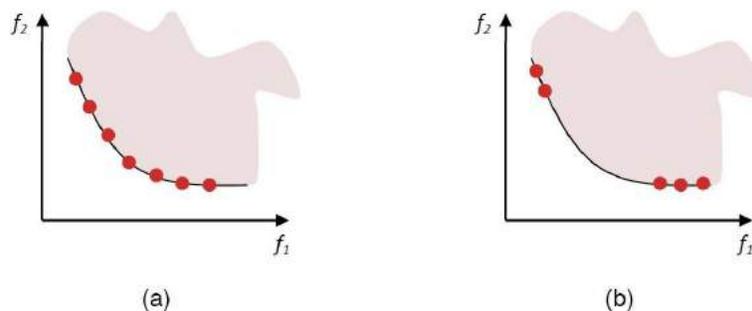


Figura 156 : Distribuição das soluções ótimas encontradas.

o *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 157 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.

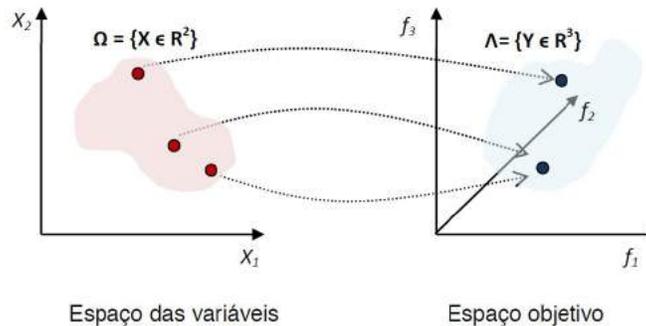


Figura 157 : Mapeamento do espaço de variáveis de decisão no espaço objetivo.

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.

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-

⁵⁷ Ver Glossário.

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.

o 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 simplifica 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.

o 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, conseqüentemente, 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. Pano, 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. Goldberg (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 51):

Tabela 51 : 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	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:

$$x_1, x_2, x_3 = 10, 3, 9 = 1010, 0011, 1001, \text{ formando o cromossomo: } 101000111001.$$

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 158):

[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).

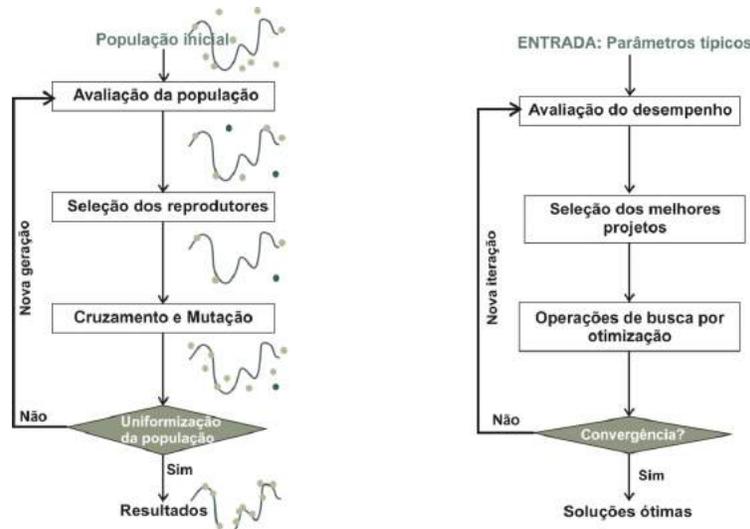


Figura 158: fluxograma do funcionamento geral de um algoritmo genético tradicional – analogia à biologia. Fonte: ilustração do autor.

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, conseqüentemente, 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, 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 159). 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.

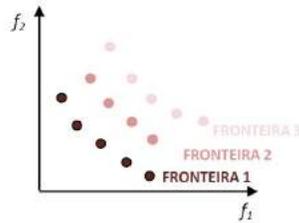


Figura 159 : representação da classificação dos indivíduos no NSGA (fronteiras).

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 160 mostra o fluxograma geral do método NSGA.

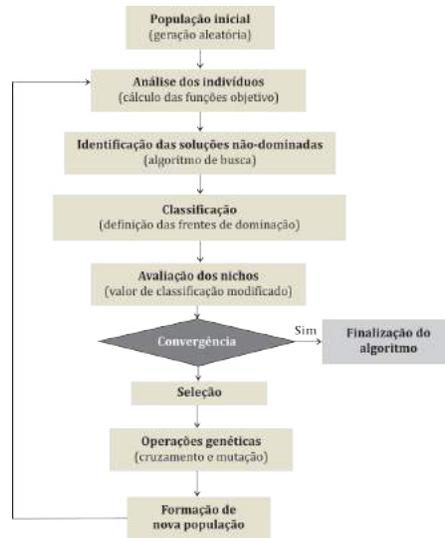


Figura 160 : fluxograma do método NSGA.

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 $2n$; 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 161).



Figura 161 : 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 52 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 52: 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 radiação 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 tipomorfológicas). 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 162 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.

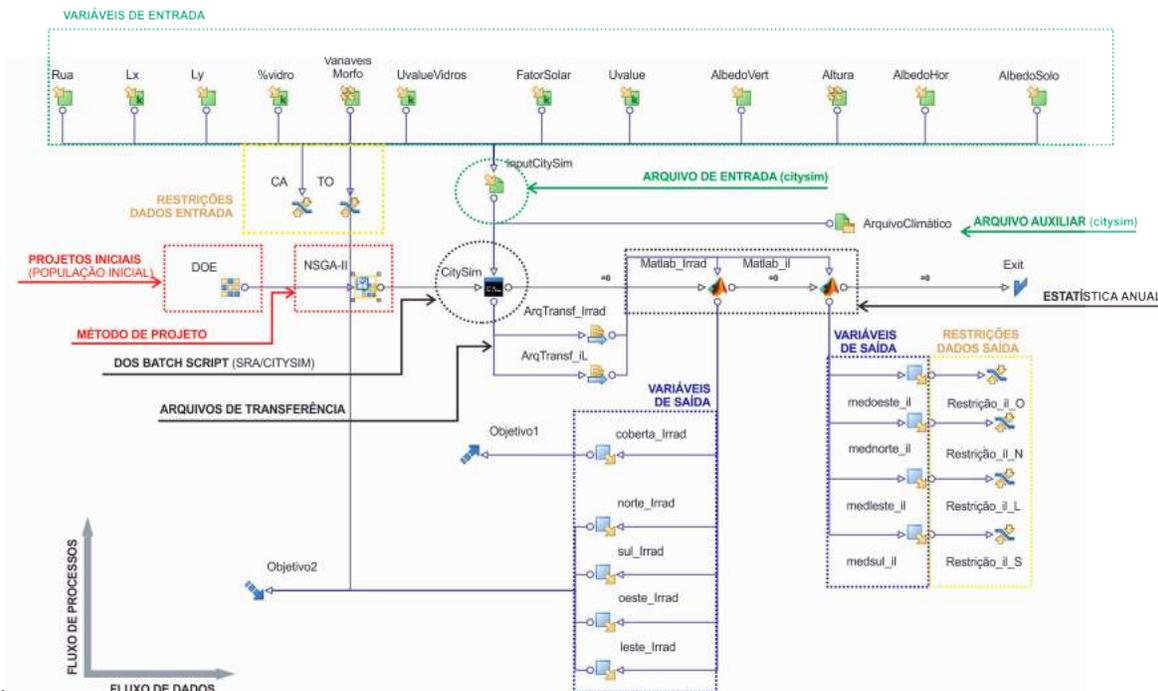


Figura 162: fluxo de otimização - organograma dos processos, acoplamentos e dados de entrada e saída no programa modeFRONTIER®. Fonte: ilustração do autor, 2013.

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 53 e Tabela 54.

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 163). Os intervalos das variáveis para esse modelo estão indicados na Tabela 53.

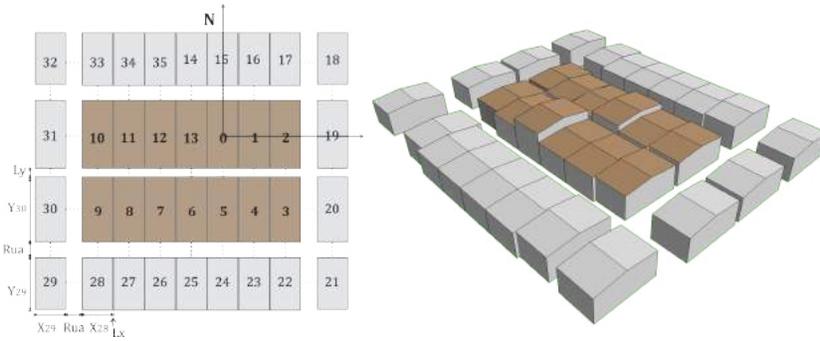


Figura 163: modelo geométrico simplificado utilizado de base para o estudo de otimização da classe 3.

Tabela 53: 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 (Ly)	Largura da rua	Coefficiente de aproveitamento (CA)	Taxa de ocupação (TO)	Coefficiente 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	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 164). Os intervalos das variáveis para esse modelo estão indicados na Tabela 54.

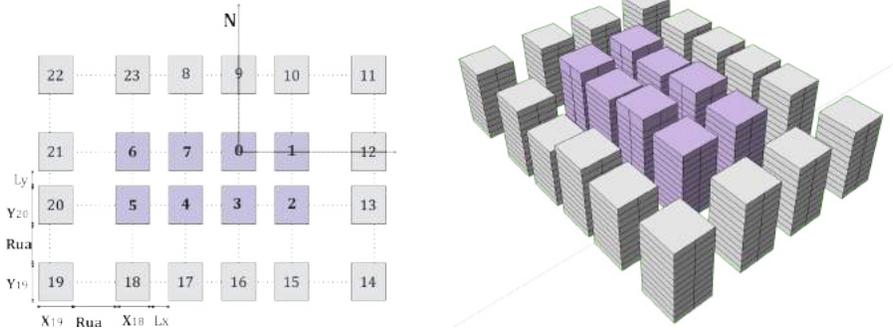


Figura 164: modelo geométrico simplificado utilizado de base para o estudo de otimização da classe 4.

Tabela 54: 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	Coefficiente de aproveitamento (CA)	Taxa de ocupação (TO)	Coefficiente 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 165.

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.

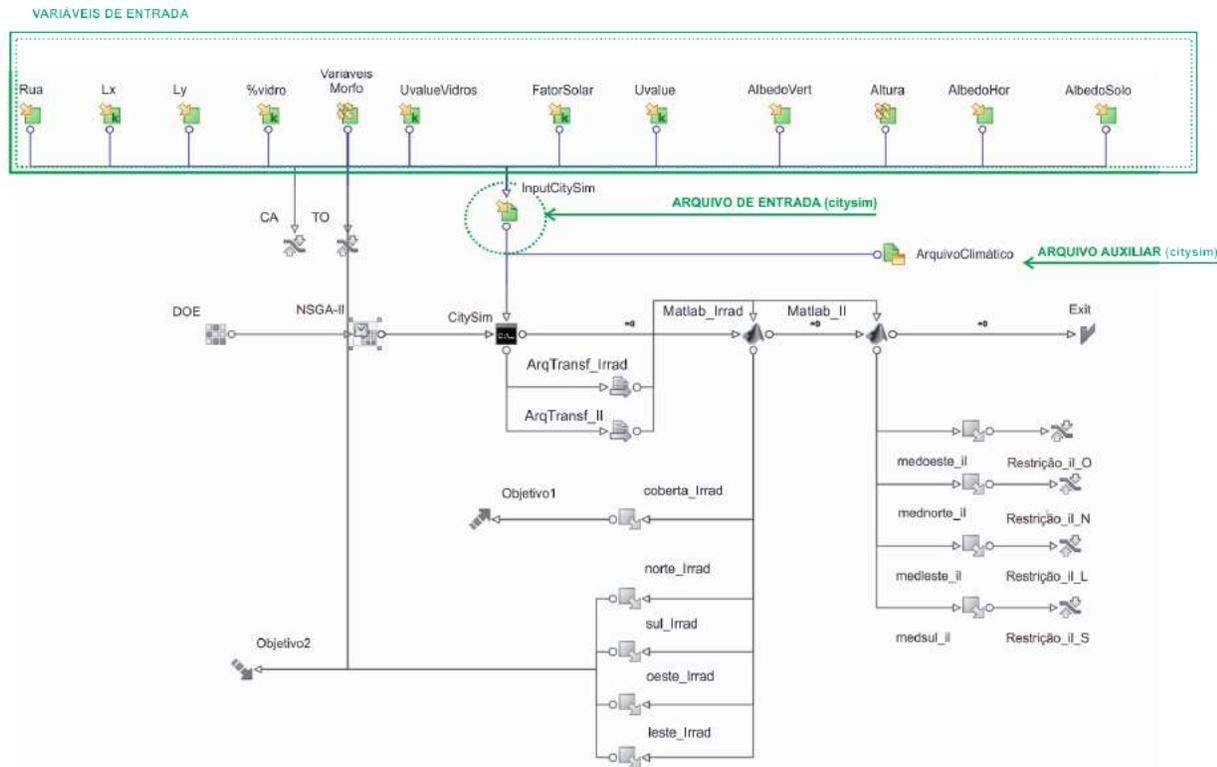


Figura 165 : definição das variáveis e arquivos de entrada do modelo no processo de otimização. Fonte: ilustração do autor, 2013.

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 Dia⁵⁸ - 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%).

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).

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.

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 = $150 \text{ (lux)} / 0,016 = 9.375 \text{ lux}$;
- Iluminância para fachada Norte = $150 \text{ (lux)} / 0,013 = 11.538 \text{ lux}$;
- Iluminância para fachada Leste = $150 \text{ (lux)} / 0,015 = 10.000 \text{ lux}$;
- Iluminância para fachada oeste = $150 \text{ (lux)} / 0,014 = 10.714 \text{ lux}$;

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 iluminação 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 166.

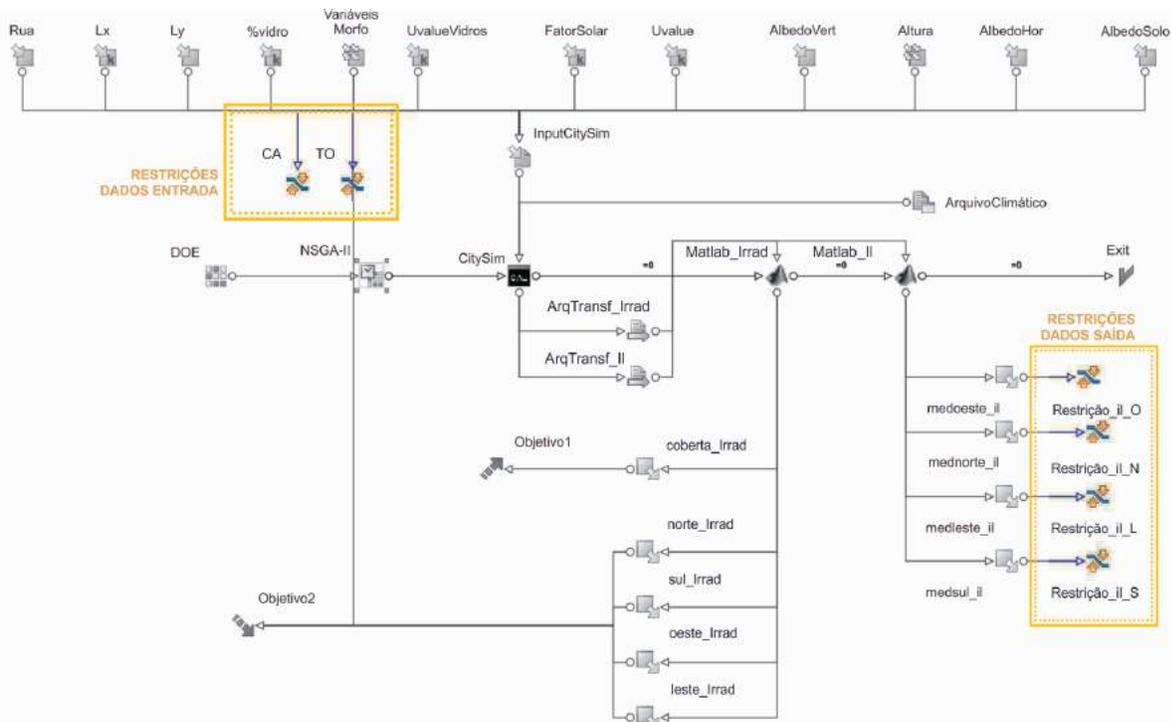


Figura 166 : definição das restrições de projeto no processo de otimização. Fonte: ilustração do autor, 2013.

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 167 ilustra esquematicamente o fluxo desses processos.

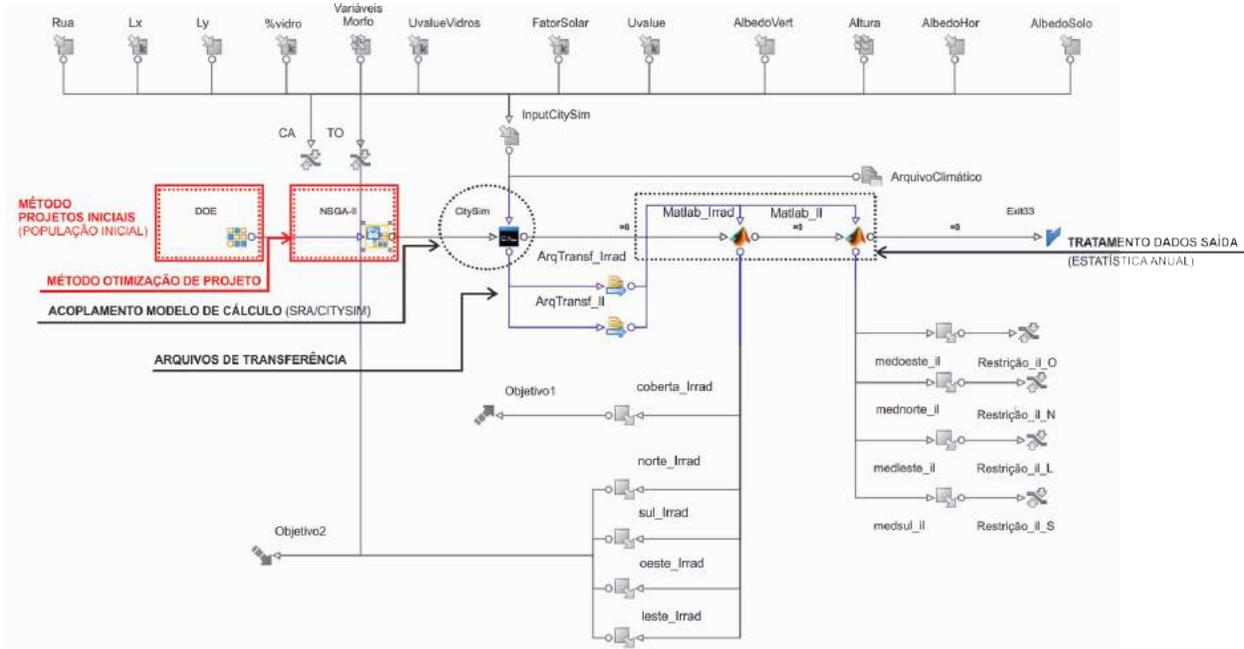


Figura 167 : definição do método de projeto/otimização, acoplamento e tratamento de dados de saída. Fonte: ilustração do autor, 2013.

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 168.

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.

$$\text{Achar arg min } f_{obj1} = [\max(I_{bc}), \min(I_{bf})]$$

submetido às seguintes restrições:

$$E_s \geq 9375 \text{ lux}$$

$$E_N \geq 11538 \text{ lux}$$

$$E_o \geq 10714 \text{ lux}$$

$$E_L \geq 10000 \text{ lux}$$

$$TO \leq 0.70$$

$$CA \leq 4.0$$

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=Coefficiente de aproveitamento.

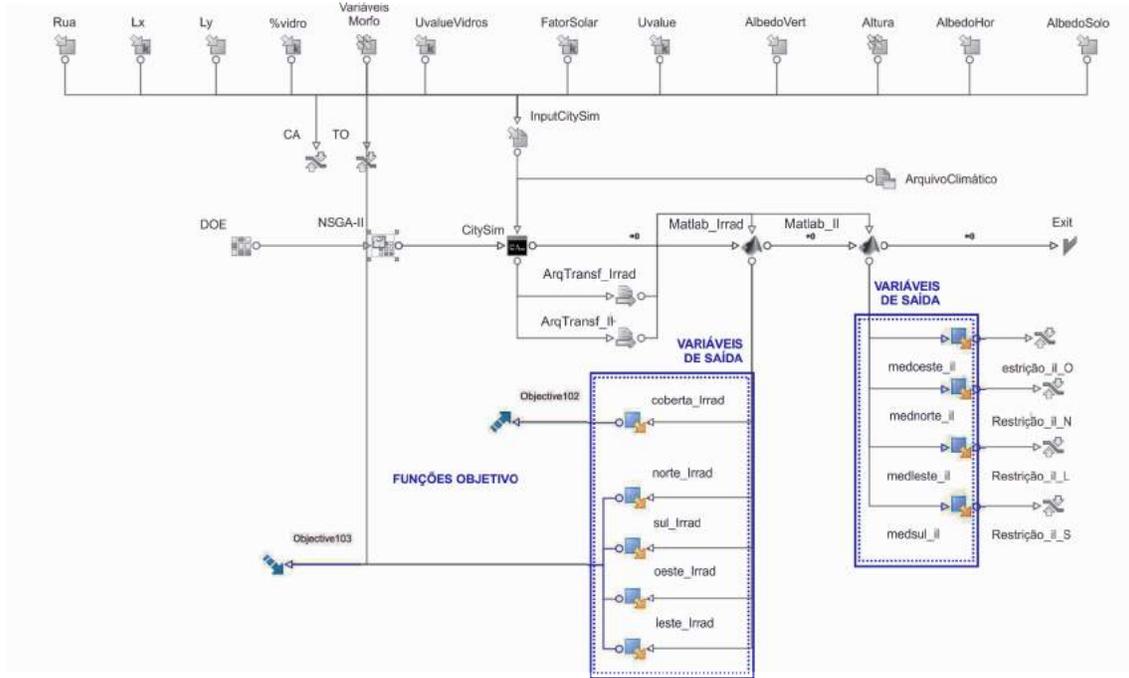


Figura 168 : definição das variáveis de saída e funções objetivos no processo de otimização. Fonte: ilustração do autor, 2013.

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 55).

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 55: cenários de otimização avaliados.

Restrições do código de obras	Otimização CLASSE 3 – CIDADE COMPACTA	Otimização CLASSE 4 – CIDADE VERTICAL
	Multiobjetivo	Multiobjetivo
Restrito	<i>C3(1)</i>	<i>C4(1)</i>
Irrestrito	<i>C3(2)</i>	<i>C4(2)</i>

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 169 apresenta o resumo das simulações realizadas, indicando proporcionalmente a ocorrência de configurações viáveis e inviáveis. Para as configurações inviáveis, a Figura 170 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.

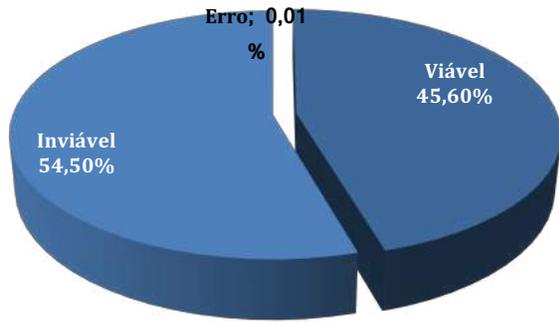


Figura 169: resumo das simulações da primeira otimização.

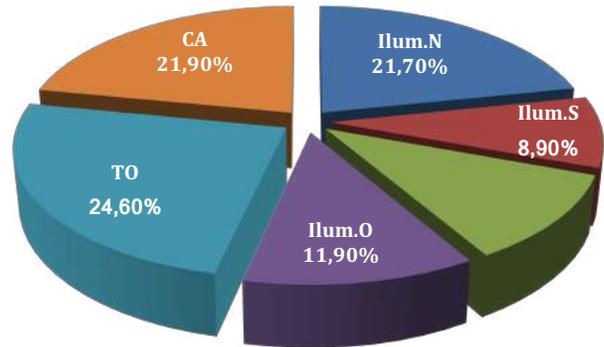


Figura 170: restrições violadas da primeira otimização.

Os resultados dessa primeira otimização estão apresentados na Figura 171 a seguir. Verifica-se que o processo se iniciou em áreas do espaço de busca que apresentam menores valores de irradiação na cobertura e maiores na fachada, de forma aleatória. E, que ao longo do processo foram identificados projetos com níveis superiores de irradiação na cobertura 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 171). 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 ($CA(1)1Min$) com 1993 kWh/m².ano de irradiação em cobertas e 338kWh/m².ano em fachadas, e o outro extremo ($CA(1)3Max$) 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 172 passa a ilustrar uma solução ótima intermediária ($CA(1)2$). 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 172 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%.

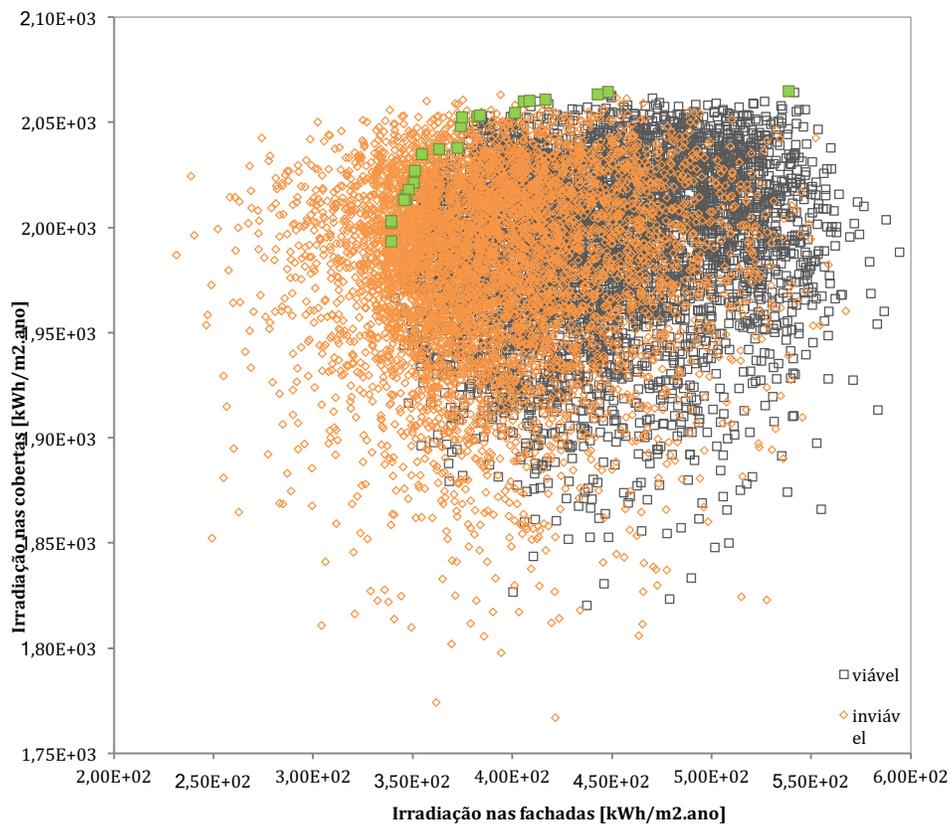
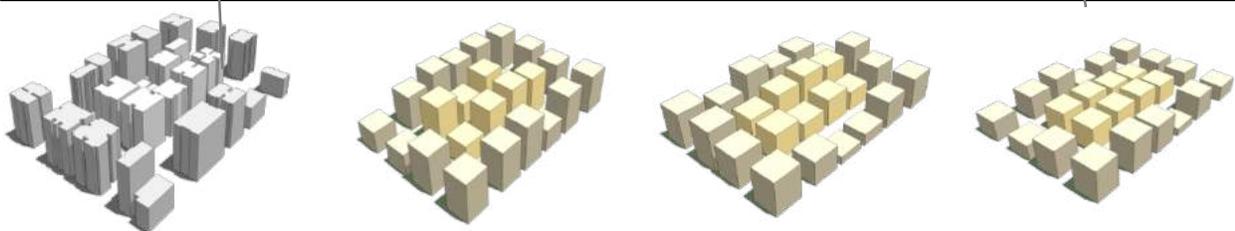
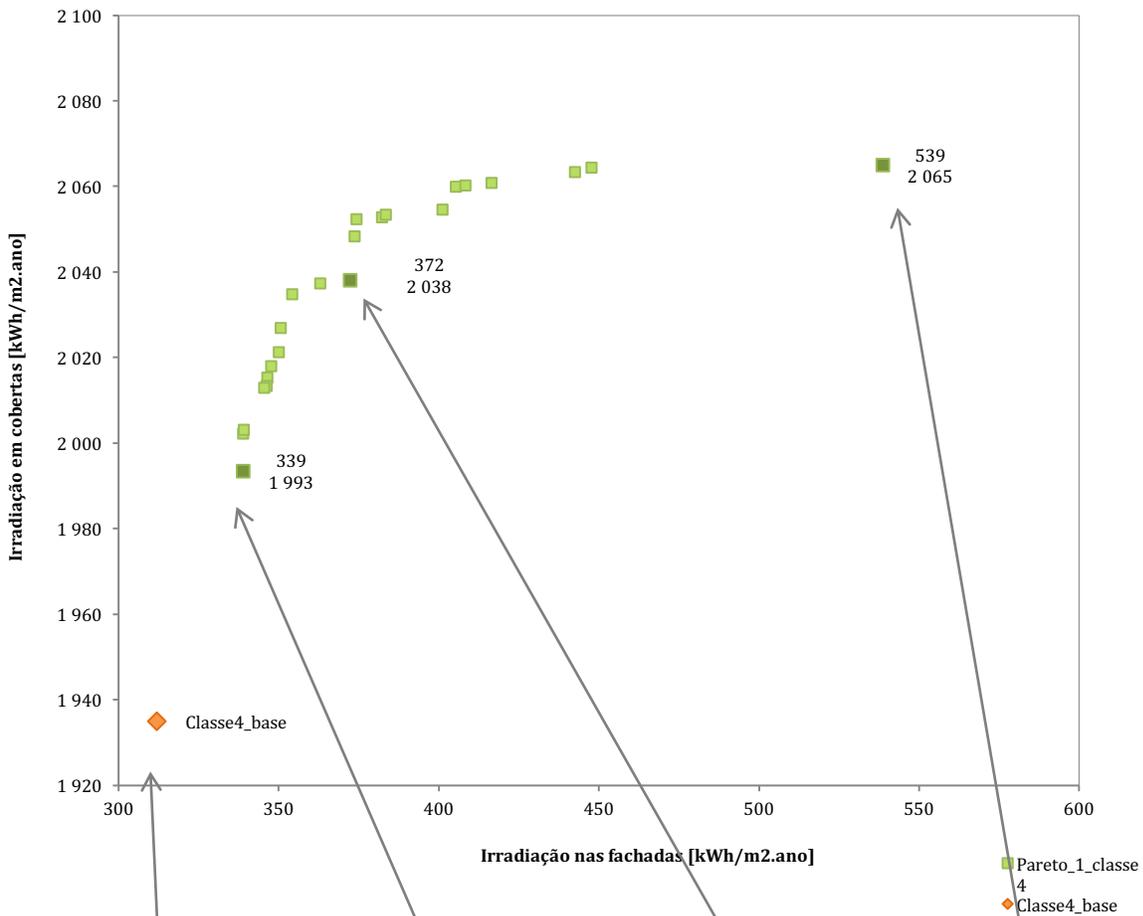


Figura 171: resultados da otimização multiobjetivo restrita pelo código de edificações.



Classe4_base	C4(l)1 Min	C4(l)2	C4(l)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 172: resultados da otimização multiobjetivo restrita pelos parâmetros do código de edificações.

A solução de maior potencial solar para produção de energia em coberturas, 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 coberturas, aumentando o potencial solar nas mesmas (Figura 173). O prospecto mais reduzido e um aumento nos afastamentos entre os edifícios, se de um lado, melhora o desempenho nas coberturas, 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 uma 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.

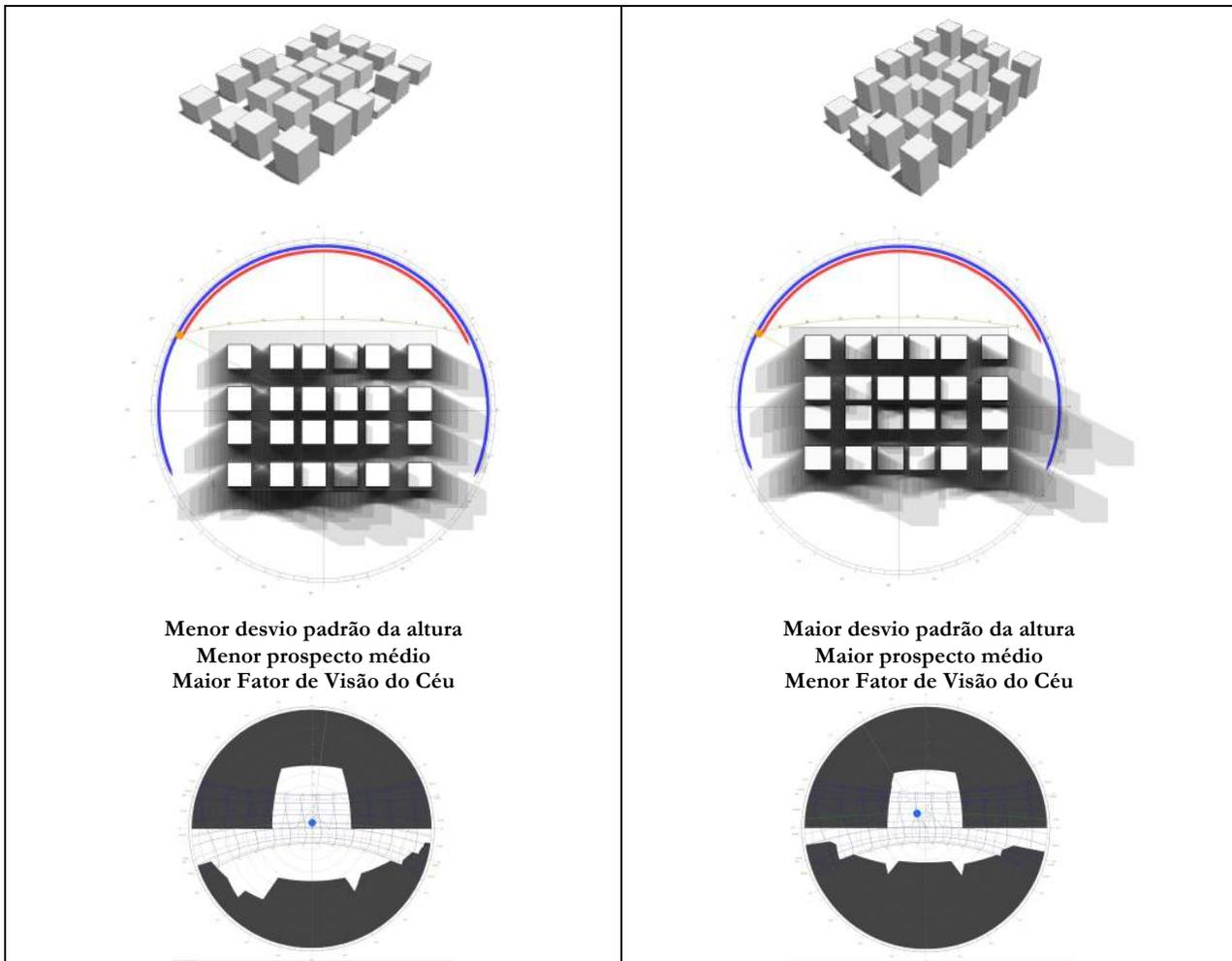


Figura 173 : projeção de sombras sobrepostas do horário das 8h as 17h, para o solstício de inverno .e máscara de obstrução para fachadas dos projetos de maior e menor potencial solar do primeiro Pareto de soluções da classe 4, respectivamente.

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 174 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 175 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.

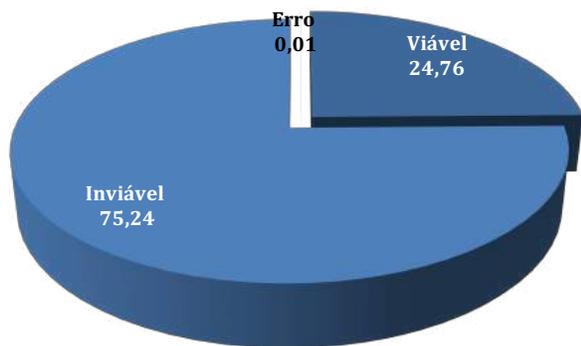


Figura 174: resumo das simulações: otimização multiobjetivo sem restrição do código de edificações.

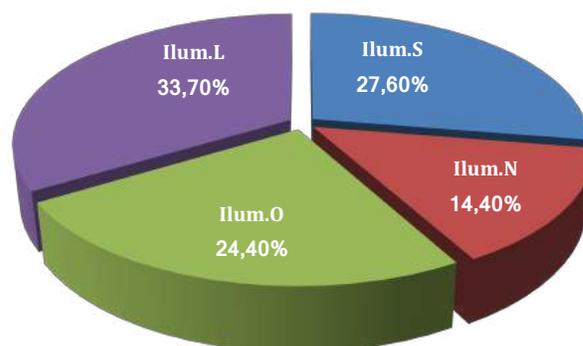
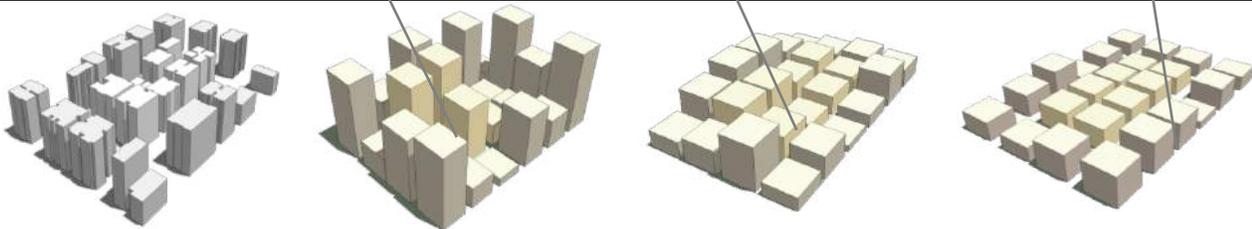
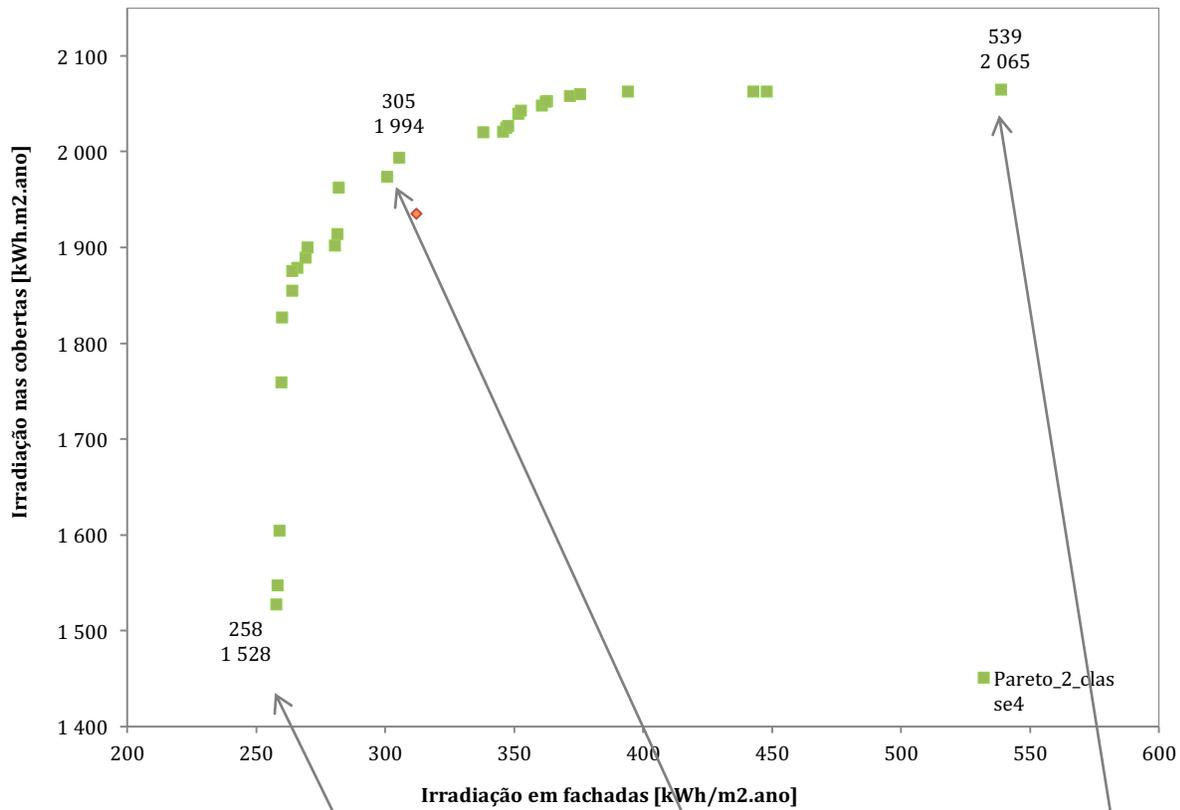


Figura 175: restrições violadas: otimização multiobjetivo sem restrição do código de edificações.

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 176 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 176: 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 177). 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).

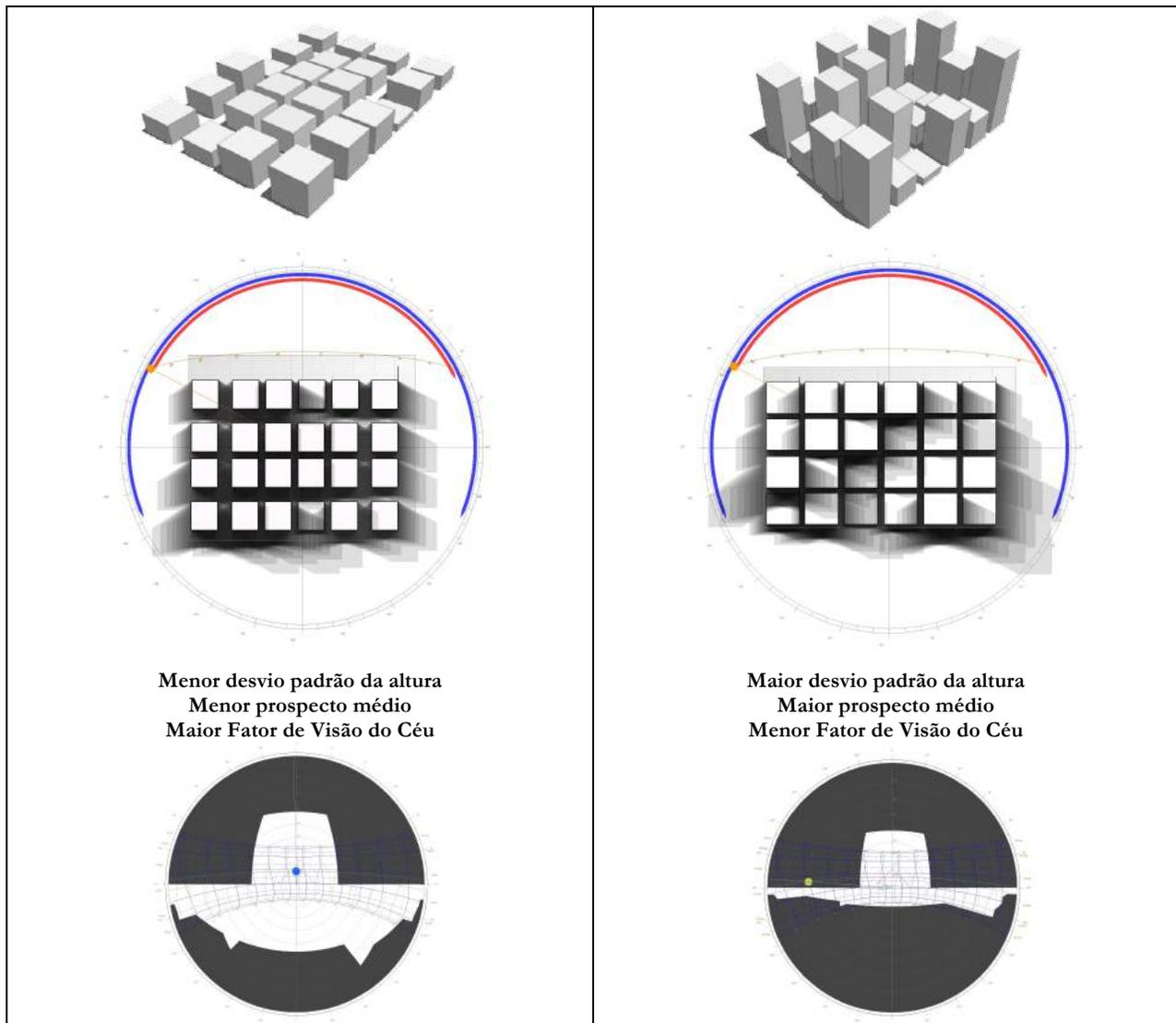


Figura 177 : projeção de sombras sobrepostas do horário das 8h às 17h, para o solstício de inverno .e máscara de obstrução para fachadas dos projetos de maior e menor potencial solar do segundo Pareto de soluções da classe 4, respectivamente.

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 178 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, conseqüentemente 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.

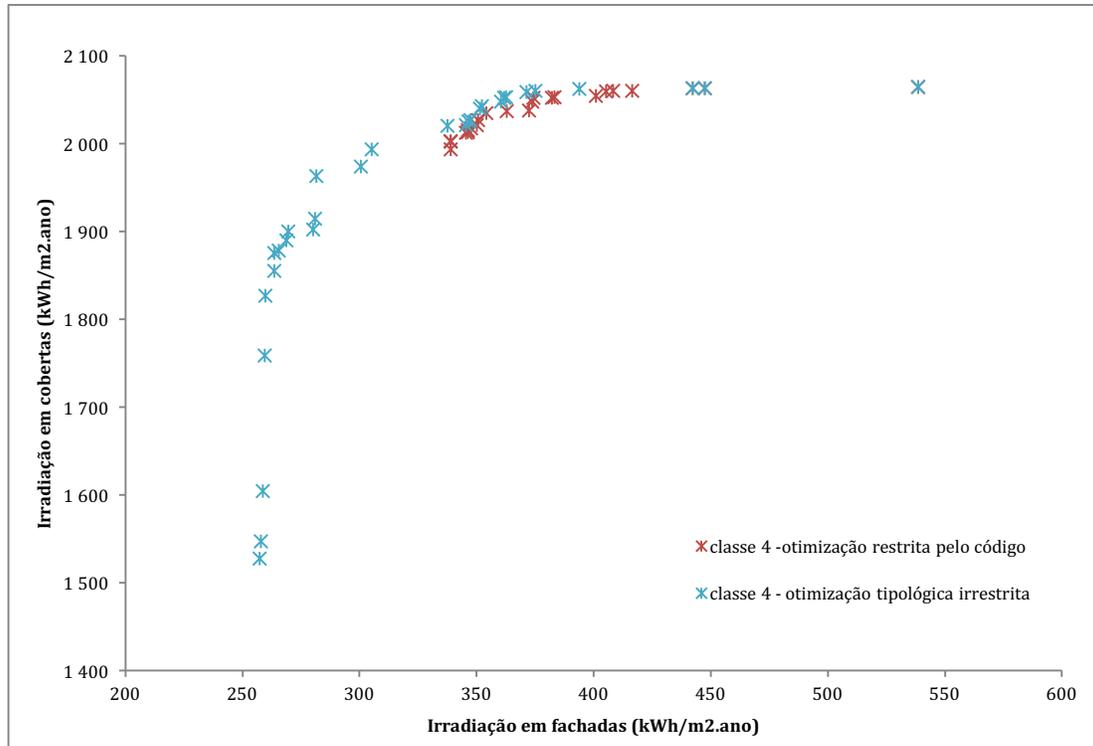


Figura 178 : Projetos da frente de Pareto para os dois cenários de otimização multiobjetivo da classe 4.

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 179 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 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.

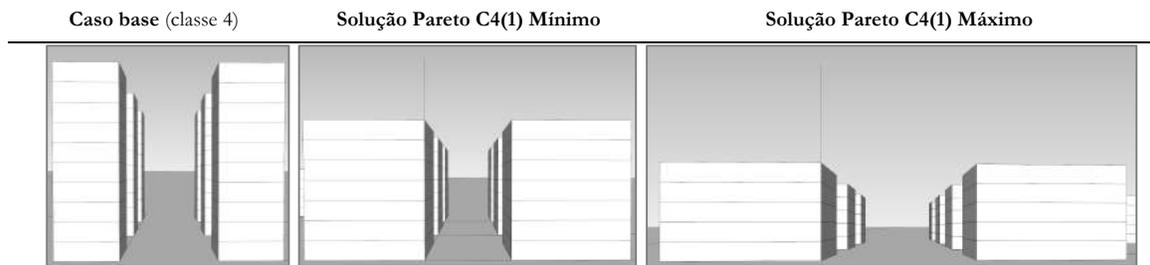


Figura 179 : esquema das três tipologias evidenciando diferentes prospectos para possíveis diferentes estratégias.

A Tabela 56 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 56: 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/m ² .ano)	-	1935			1993	2065	1528	2065
Irrad. solar fachadas (kWh/m ² .ano)	-	312			339	538	258	539
Irrad. IV fachadas (kWh/m ² .ano)	-	5,0			12,4	-1,0	69,9	-2,0
Irrad. IV cobertas (kWh/m ² .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 180 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 181. 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 iluminação requeridos.

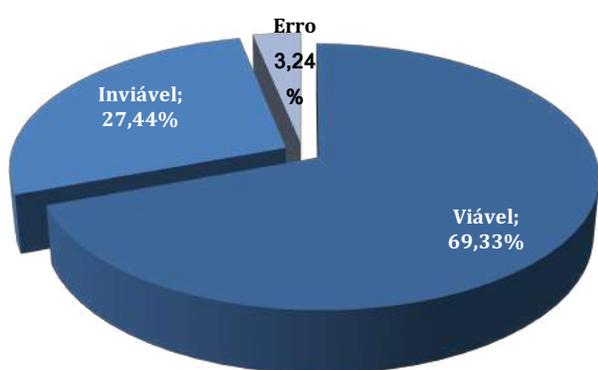


Figura 180: resumo das simulações: otimização multiobjetivo para a classe 3, restrita pelo código de edificações.

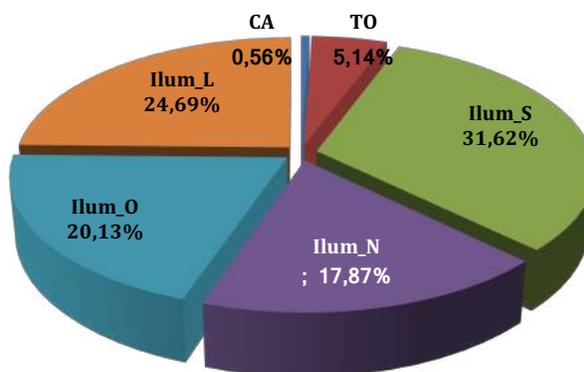
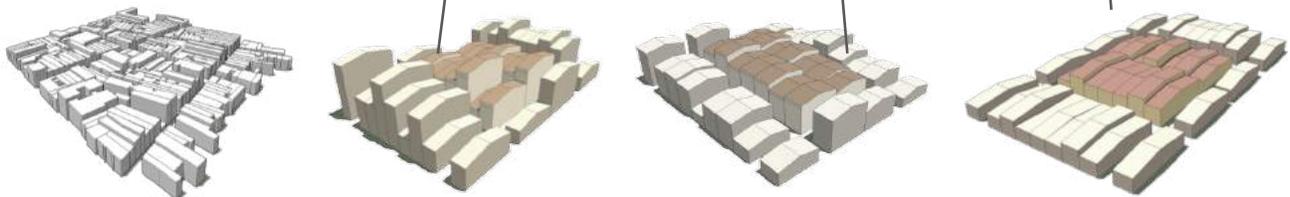
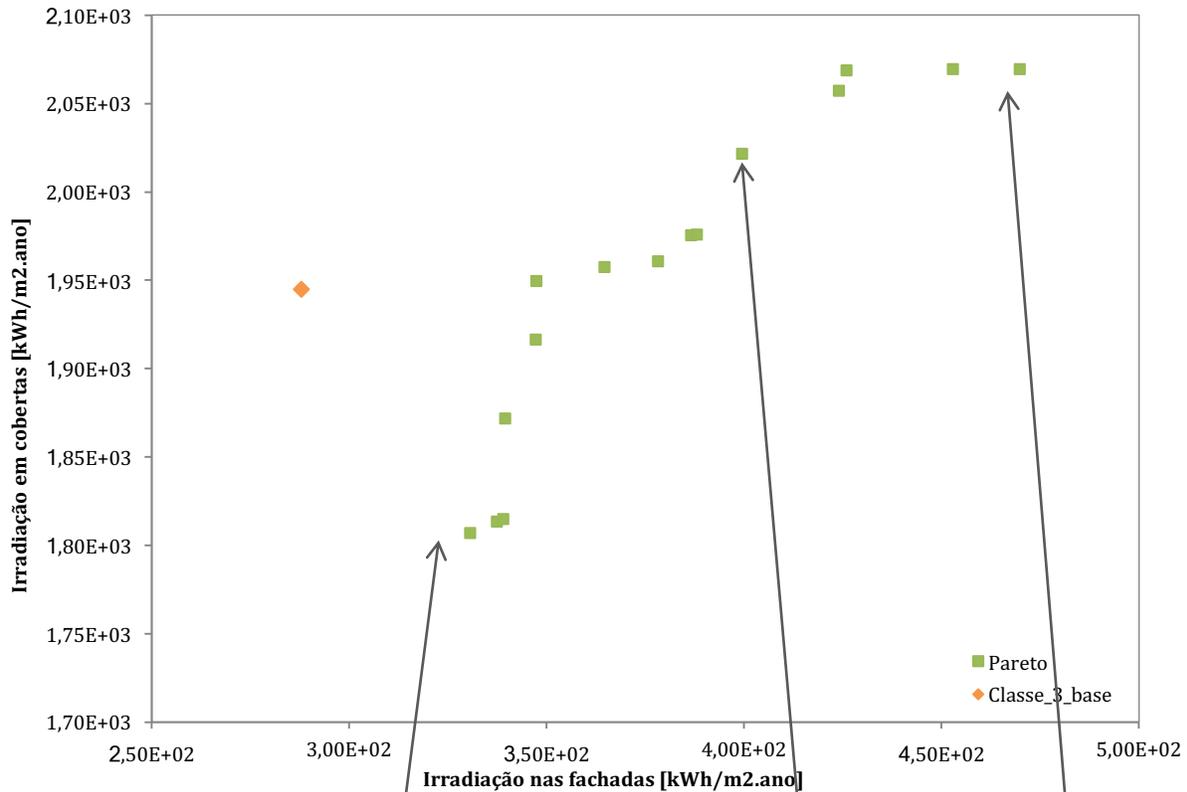


Figura 181: restrições violadas: otimização multiobjetivo para a classe 3, restrita pelo código de edificações.

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 182 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 184), 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 182.



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 182: 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 182.

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 estratégica 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 183), 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 inicial, poderíamos, talvez, encontrar outro conjunto de soluções não-dominadas com desempenho melhor ou não.

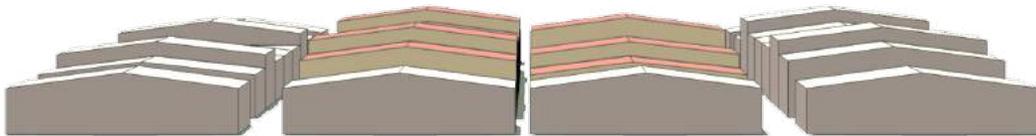


Figura 183 : vista da tipologia *C3(1)Max* gerada pelo processo de otimização, mostrando a variação obtida na altura média.



Figura 184 : 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 185 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 186 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.

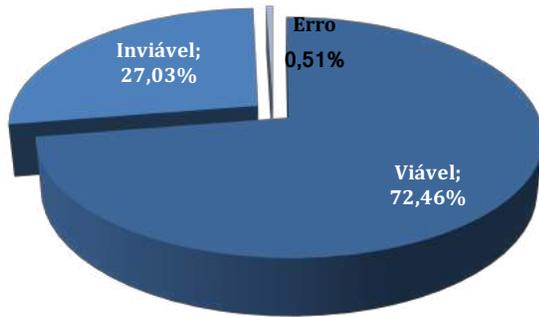


Figura 185: resumo das simulações: otimização multiobjetivo restrita pelo código de edificações.

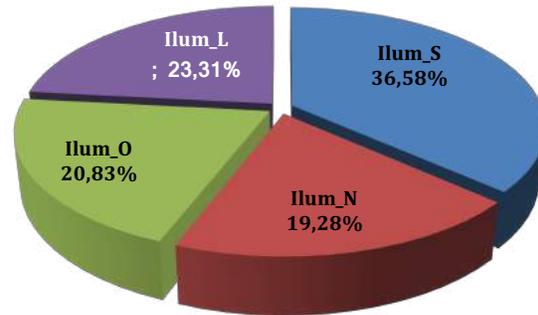


Figura 186: restrições violadas: otimização multiobjetivo restrita pelo código de edificações.

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.

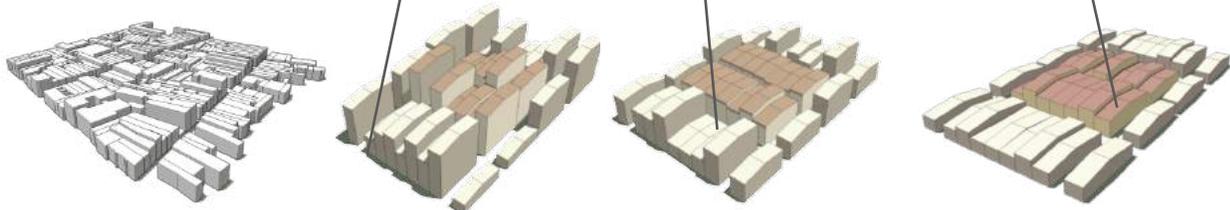
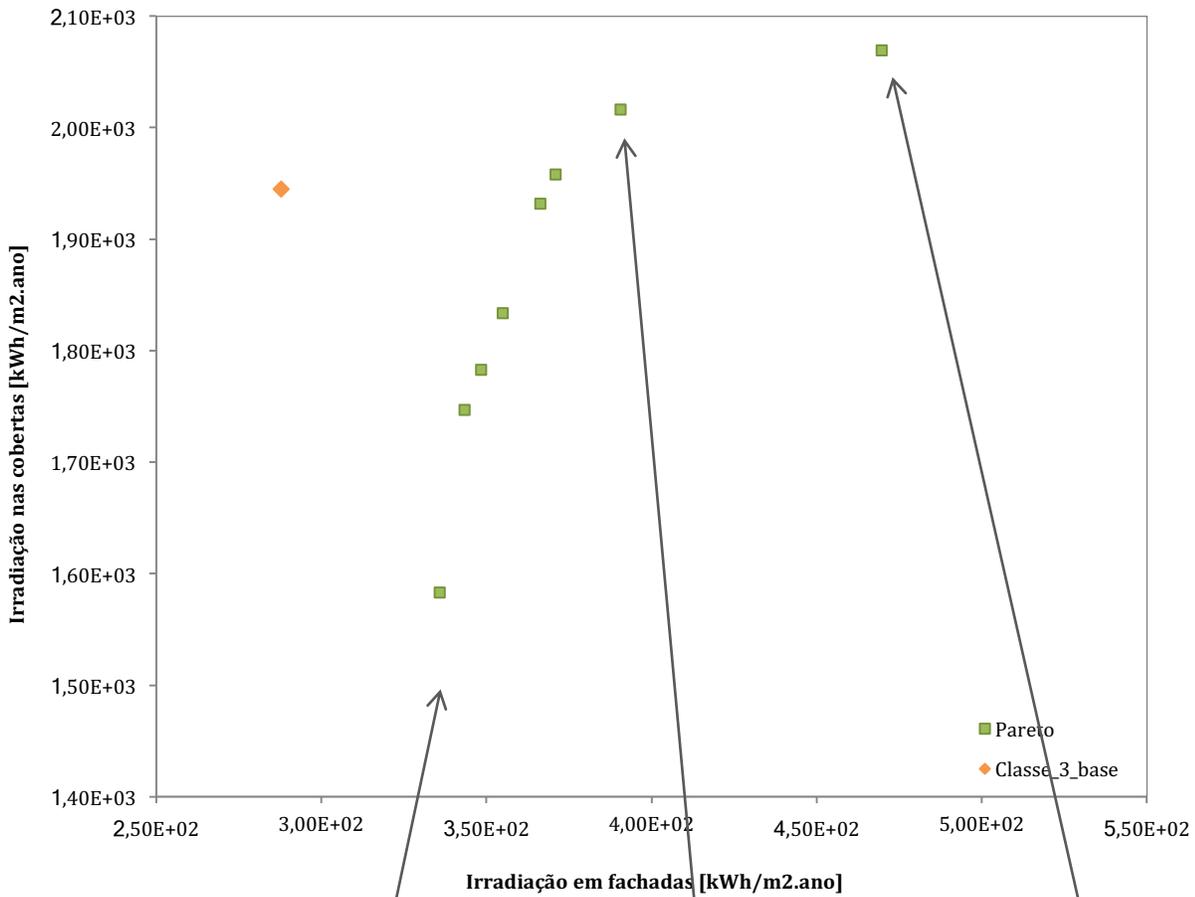
Na Figura 187 é possível visualizar apenas as configurações da fronteira de Pareto junto à tipologia existente. Comparando o caso base com os resultados dessa otimização multiobjetivo, encontramos um ganho de 6% para irradiação em cobertas, e uma perda de apenas 13% de redução da irradiação solar nas 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 187), 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 187.



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 187: resultados da otimização multiobjetivo sem restrição do código de obras. Fonte: ilustração do autor.

O gráfico da Figura 188 sobrepe 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 descon sideração 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 186, onde se verifica uma menor influência na limitação dos projetos pelos parâmetros restritivos do código.

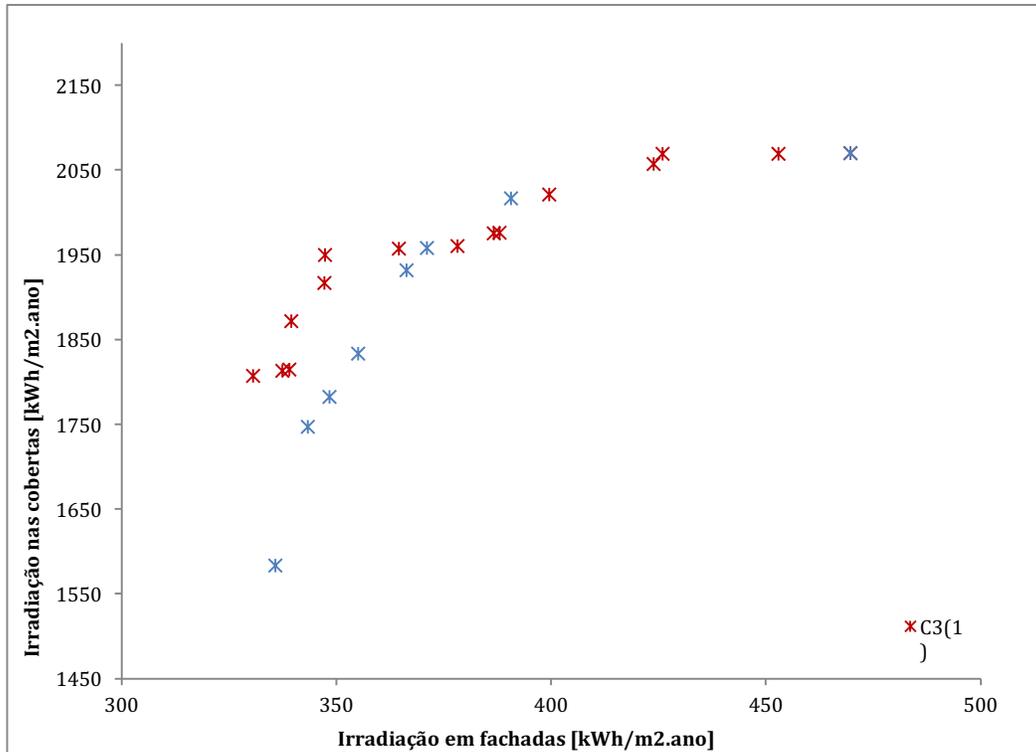


Figura 188 : projetos da frente de Pareto para os dois cenários de otimização multiobjetivo da classe 3.

A Tabela 57 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 57: 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	0,05; 0,5	0,15	-	-	0,2	0,2	0,2	0,2
Albedo fachadas	0,05; 0,5	0,15	-	-	0,45	0,2	0,46	0,2
Profundidade (m)	16;30	20	-	-	16	16	16	16
Largura (m)	4;8	6	-	-	4	4	4	4
Altura (m)	3;15	9	-	-	11	4	11	4
Afastamentos eixo X e Y (m)	0;4,0	0	-	-	0;1	0;1	0;1	0;1
Rua (m)	3,8	4	-	-	4	3	3,7	3
NP	1;5	3	-	-	4	1	4	1
CA	1,5;4,0	2,4	-	-	2,7	1	2,5	1
TO	0,7;0,95	0,75	-	-	0,74	0,8	0,74	0,8
Cf	1,5;3,5	3,9	-	-	0,7	0,9	0,73	0,96
Pm	0,3;3,5	2	-	-	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/m ² .ano)	-	1940,7	-	-	1806	2070	1583	2070
Irrad. solar fachadas (kWh/m ² .ano)	-	287,9	-	-	331	470	336	470
Irrad. IV fachadas (kWh/m ² .ano)	-	-54,7	-	-	-37,2	-92,4	-40,5	-92,4
Irrad. IV cobertas (kWh/m ² .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 infraestrutura: 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):

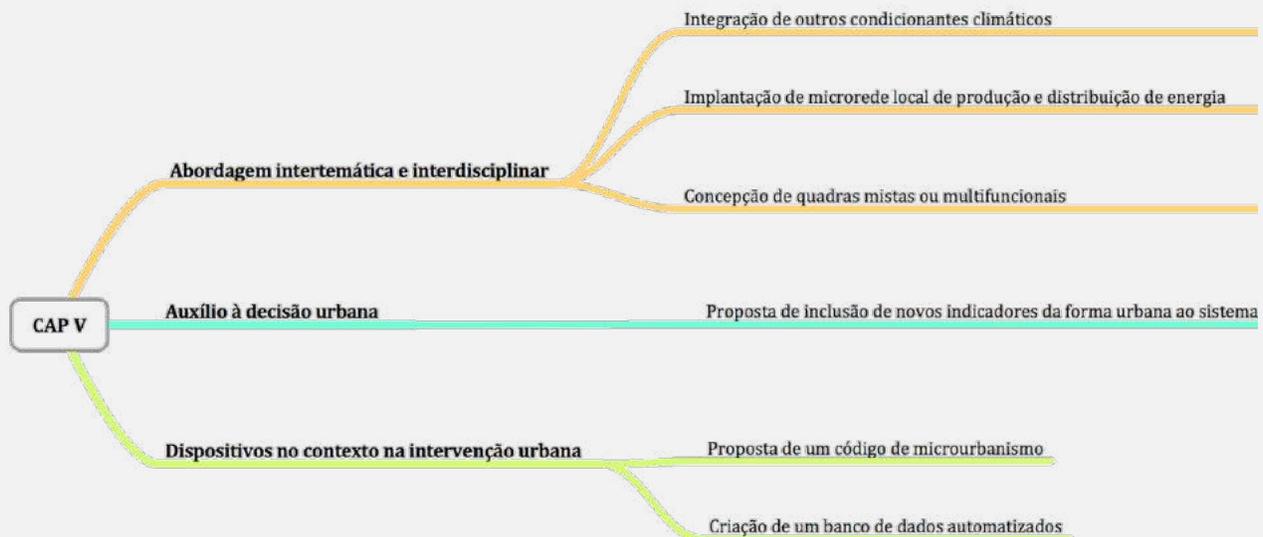


Figura 189: estrutura do capítulo V.

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 172), 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 microrredes 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, seção II.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 urbana⁵⁹.

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).

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).

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 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 possuíssem 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 190). 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 pirâmide⁶⁰ 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.

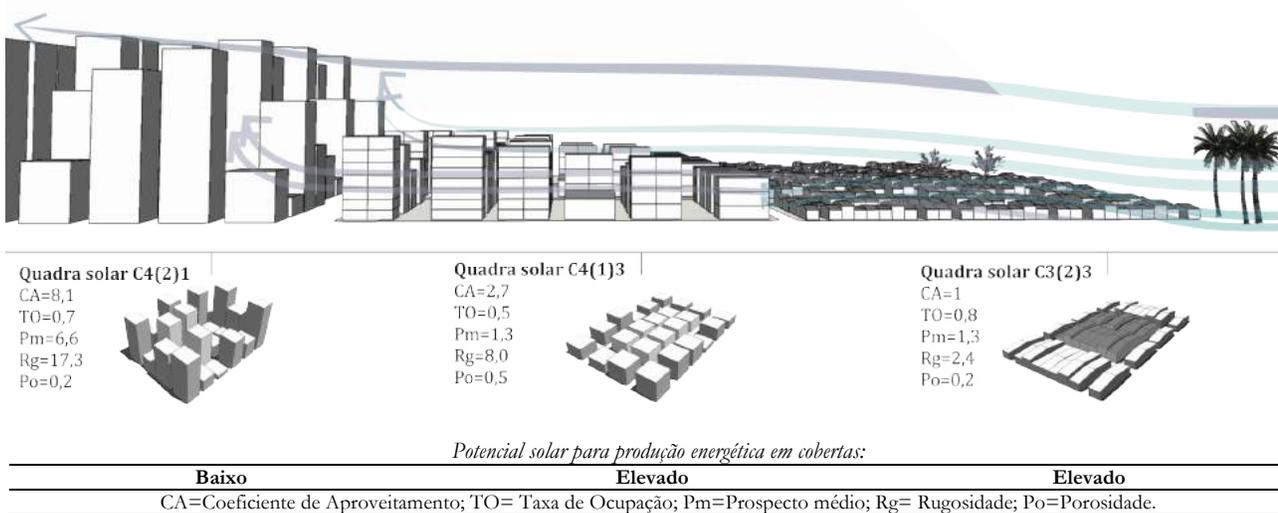
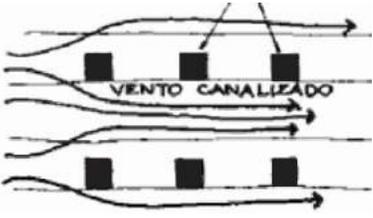
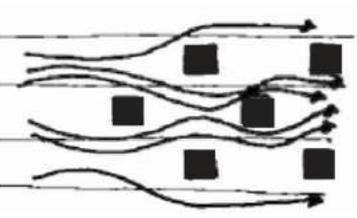


Figura 190: proposição de vizinhança a partir das quadras solares propostas com densidade progressiva, gerando o efeito pirâmide e favorecendo a circulação do ar na malha urbana. Fonte: ilustração do autor.

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).

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 58 e Figura 191).

Tabela 58 : 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
 <p>VENTO CANALIZADO</p>	
<p>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.</p>	<p>O fluxo desloca-se para os lados, aumentando a permeabilidade da malha urbana</p>

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.

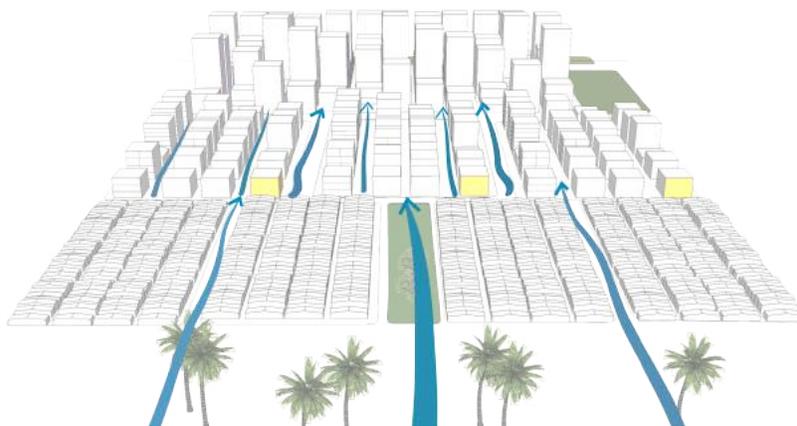


Figura 191 :ilustração esquemática da orientação das quadras (com ruas perpendiculares aos ventos dominantes) e arranjo escalonado. Fonte: ilustração do autor.

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 192).

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 193). 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 microrredes 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 a 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 192. 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 172 e Figura 182 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.

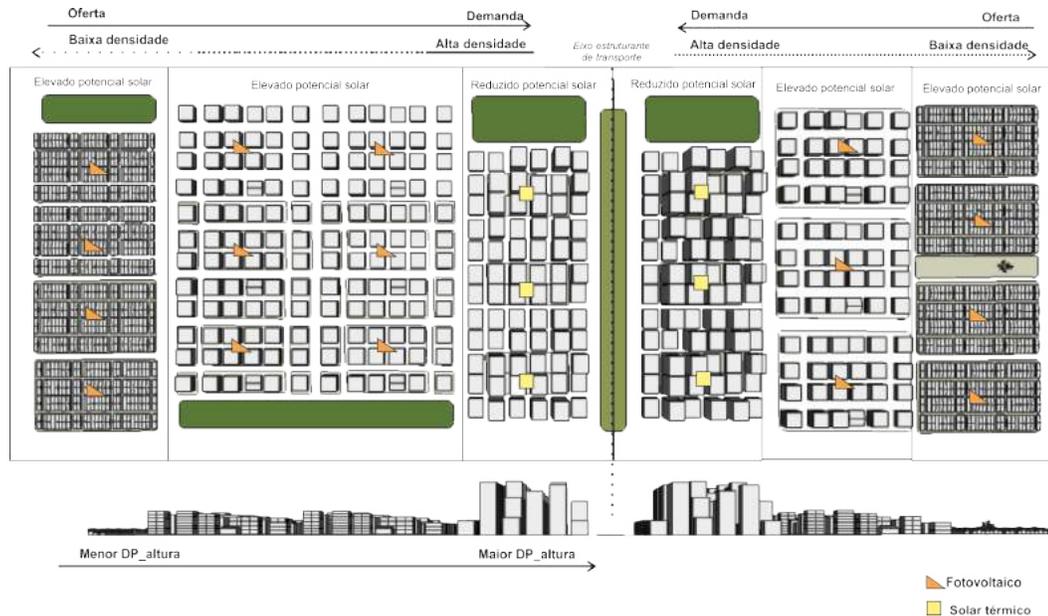


Figura 192 : exemplo de projeto de unidades de vizinhança a partir das quadras solares propostas, associando-se potencial de oferta e demanda das mesmas.

A Figura 193 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 192.



Figura 193 : 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 194 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 cobertura 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 194).

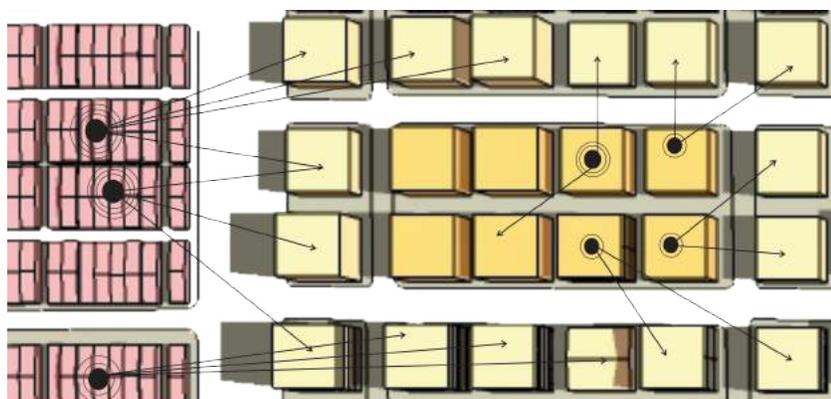


Ilustração esquemática em planta



Ilustração esquemática em corte

Figura 194 : 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 195).

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.

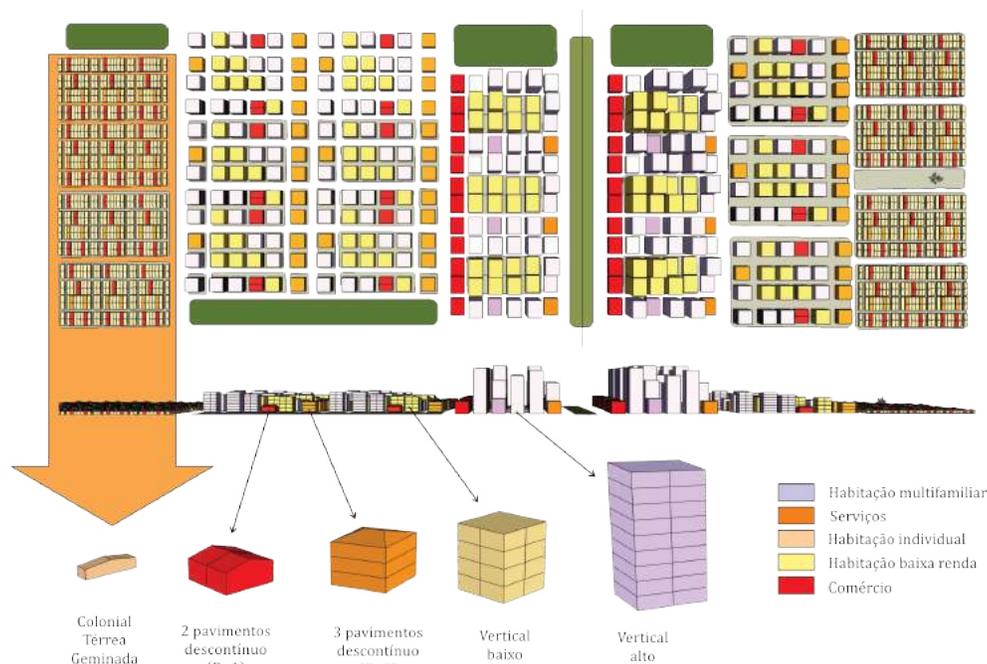


Figura 195 : proposta de integração de mistura do uso e ocupação do solo às diferentes formas de quadras urbanas obtidas.

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 “granulometria” 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, 2011^a). 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 microubanismo

Os códigos de urbanismo e edificações possuem uma participação crucial nos processos de transformação da morfologia construída nas cidades e, conseqüentemente, 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 microubanismo 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

a Tabela 62 e Figura 196 a Figura 199. 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 microubanismo solar

Propõe-se a adoção de parâmetros restritivos estabelecidos por tipo de quadra (ver

a Tabela 62). 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 (*Access.*), 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.

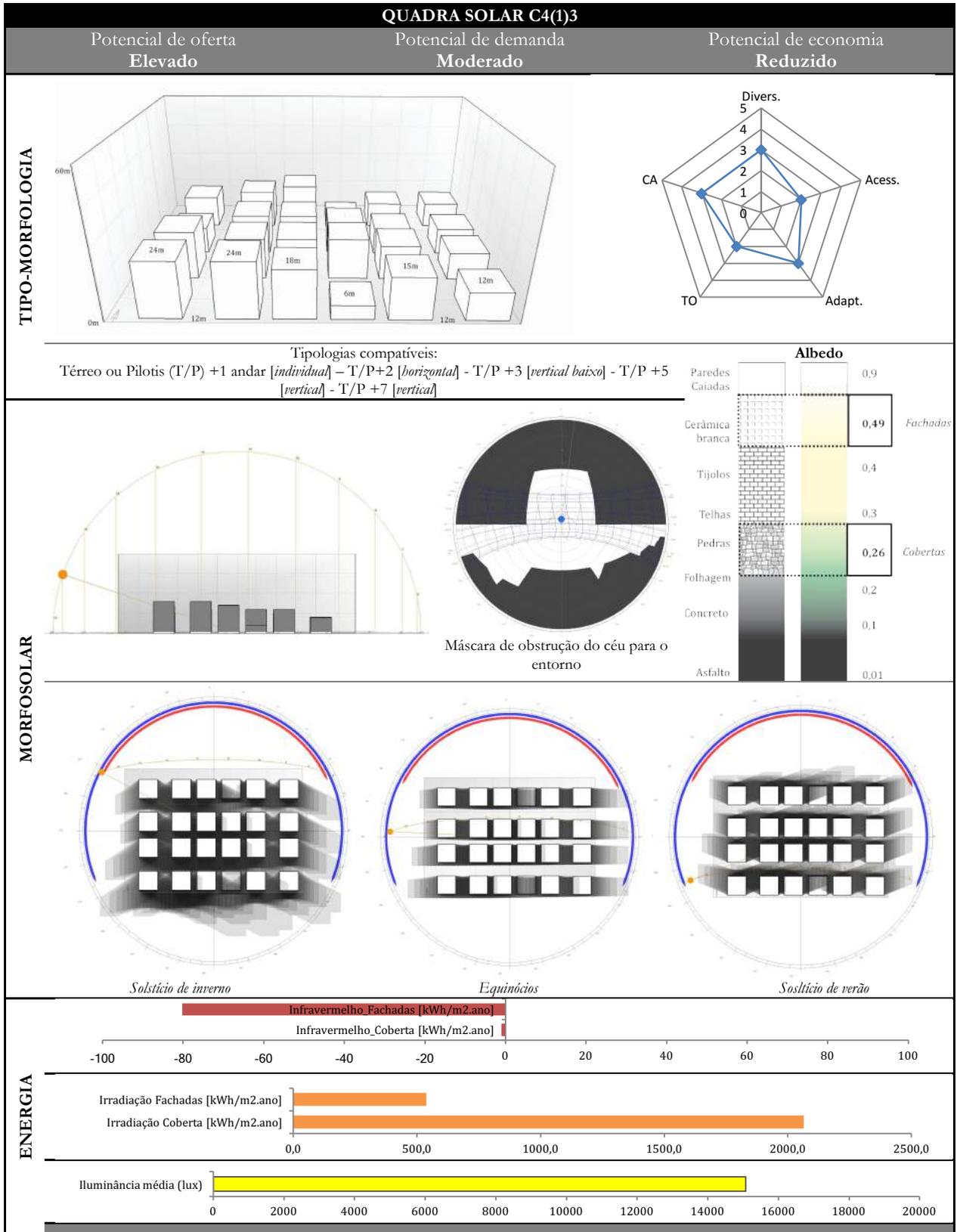


Tabela 59 : quadro síntese de diretrizes do código de microubanismo solar: exemplo de quadra tipo C4(1)6.

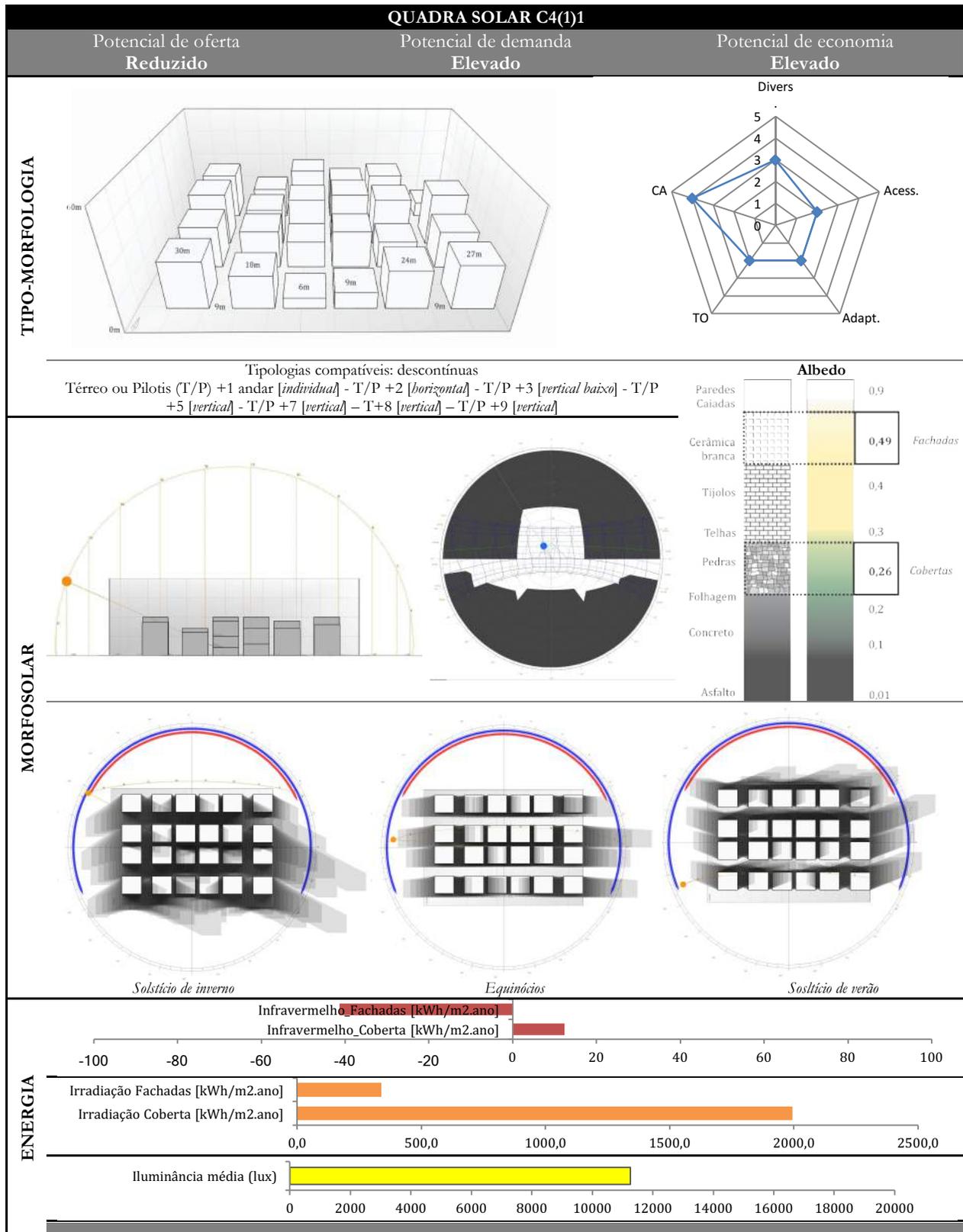


Tabela 60 : quadro síntese de diretrizes do código de microubanismo solar: exemplo de quadra tipo C4(1)8.

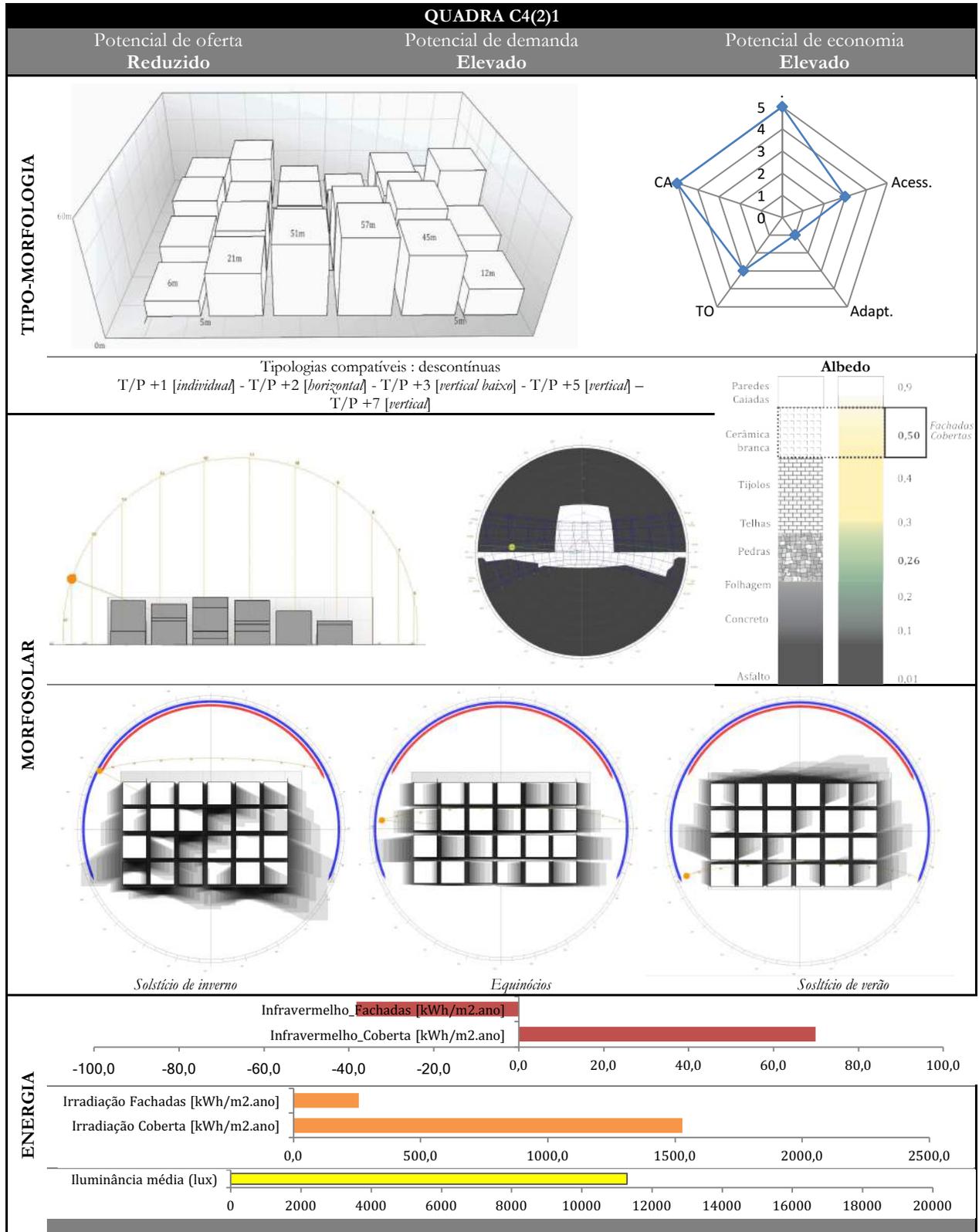


Tabela 61 : quadro síntese de diretrizes do código de microubanismo solar: exemplo de quadra tipo C4(2)9.

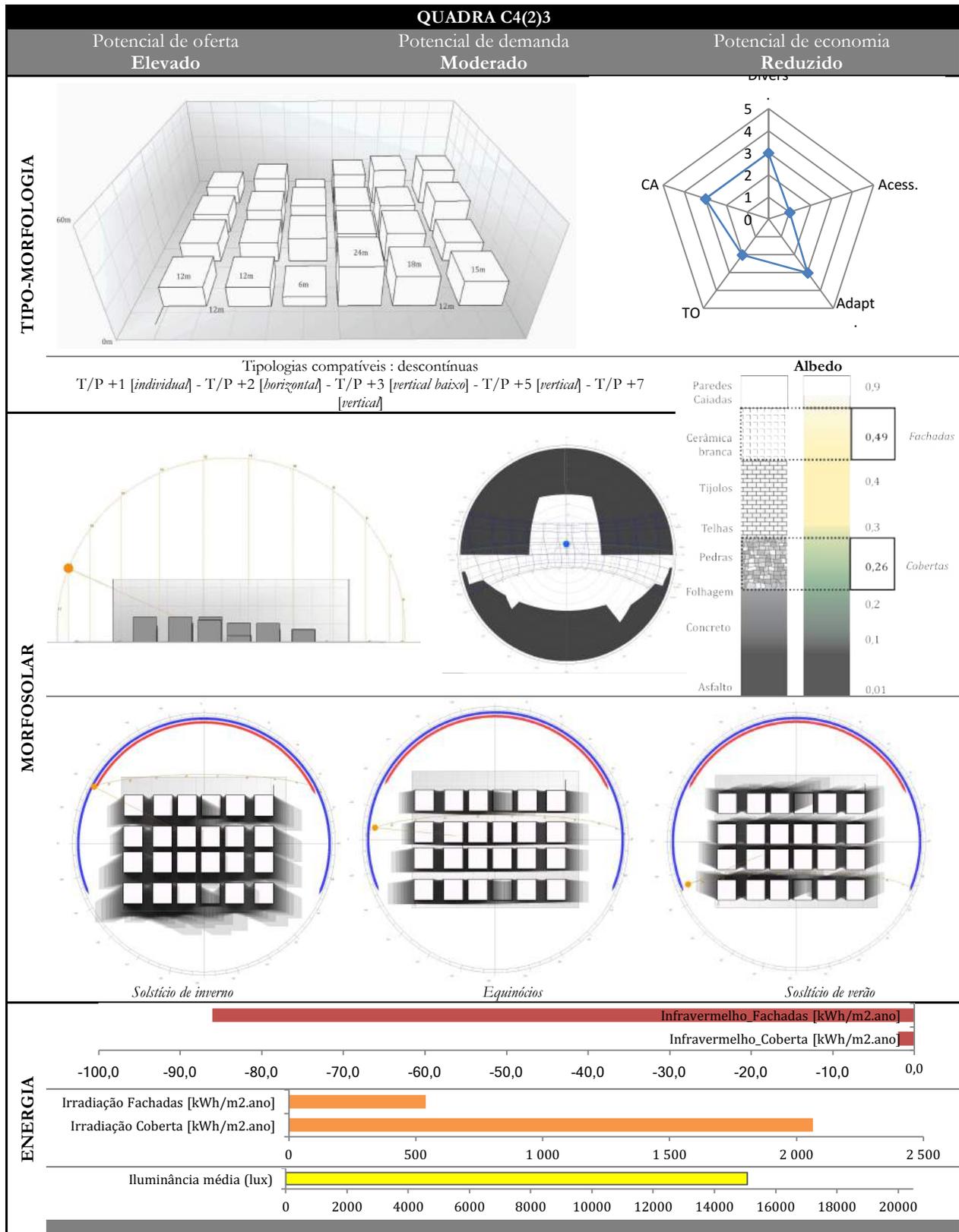


Tabela 62: quadro síntese de diretrizes do código de microubanismo: exemplo de quadra tipo C4(2)3452.

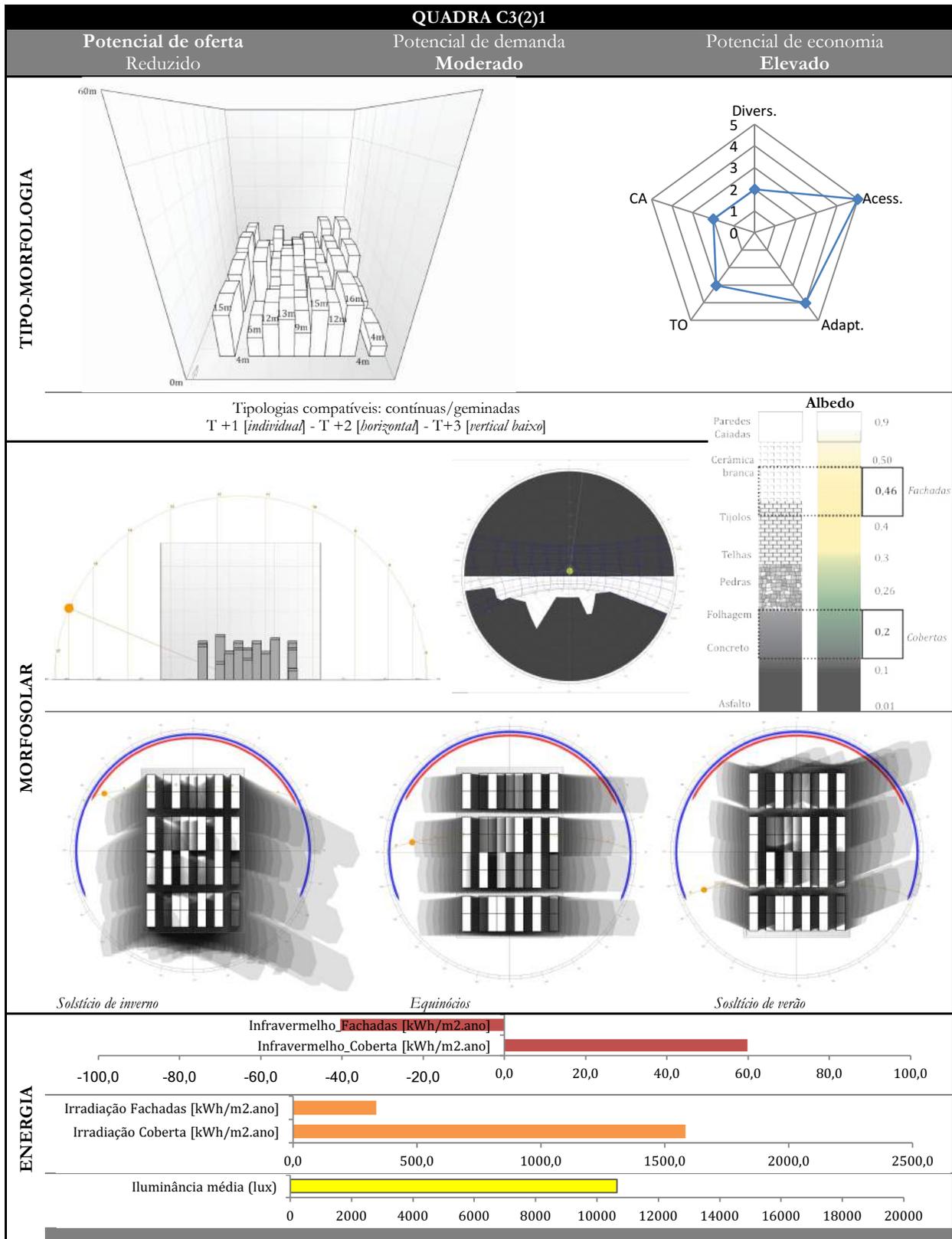


Tabela 63 : quadro síntese de diretrizes do código de microubanismo solar: exemplo de quadra tipo C3(2).

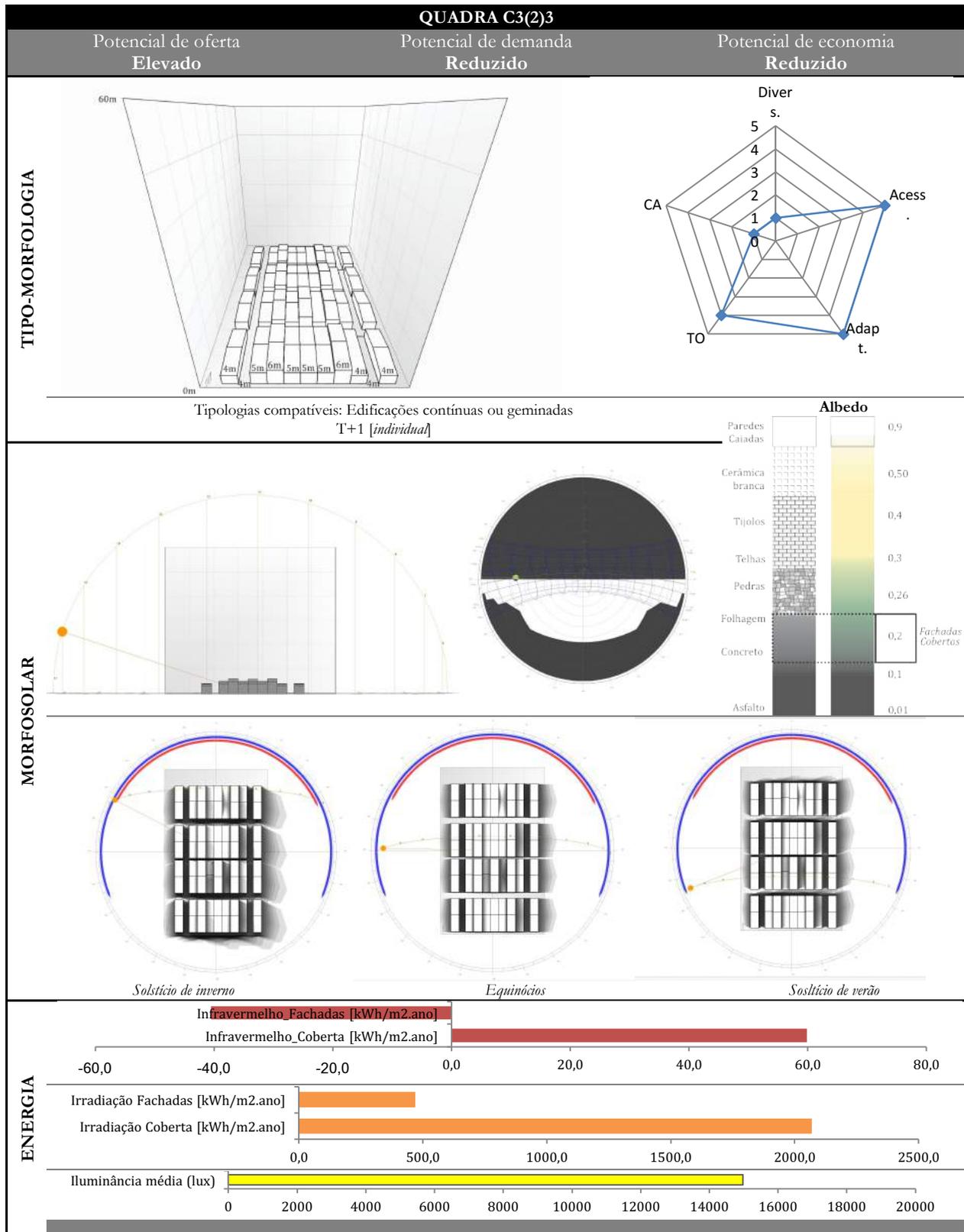


Tabela 64 : quadro síntese de diretrizes do código de microubanismo solar: exemplo de quadra tipo C3(2)3.

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 196). 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 compactidade 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 196), conforme já discutimos.

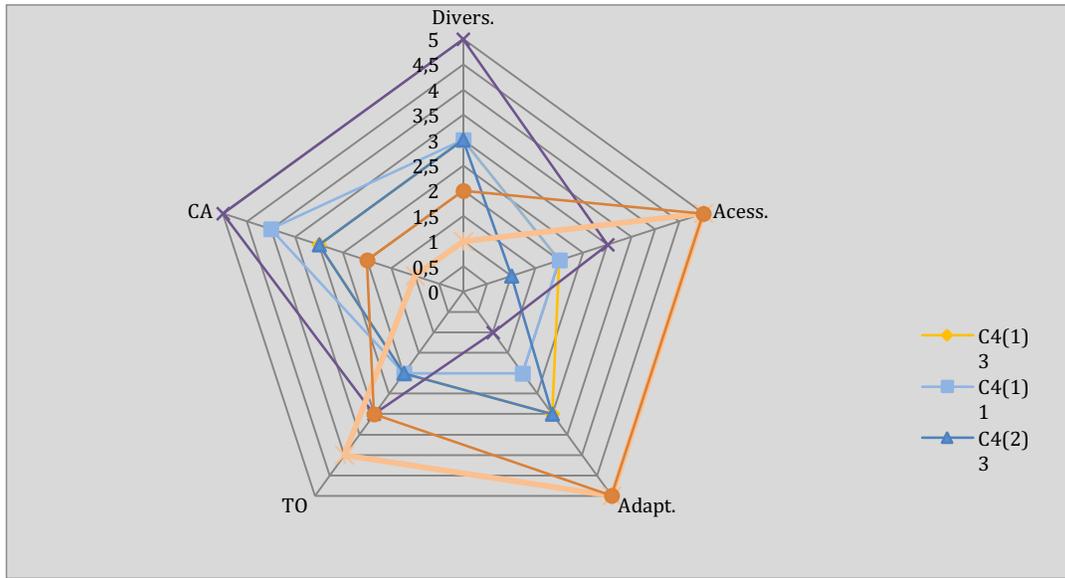


Figura 196 : gráfico comparativo do potencial tipo-morfológico entre algumas das quadras solares propostas.

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 197 e Figura 198). 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 199).

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, conseqüentemente, 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.

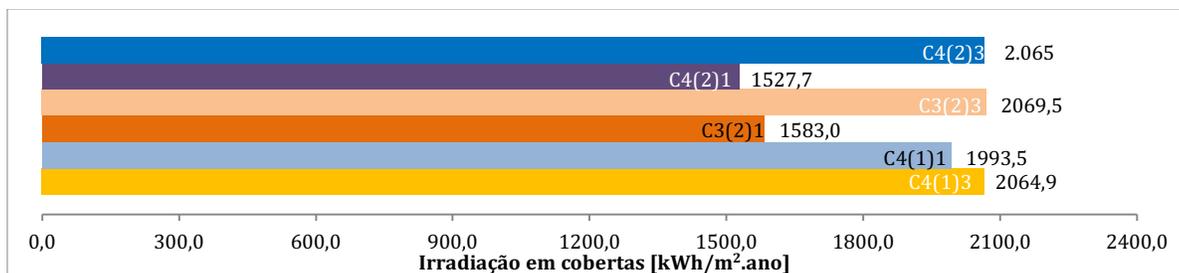


Figura 197 : gráfico comparativo do potencial solar nas cobertas entre algumas das quadras solares propostas.

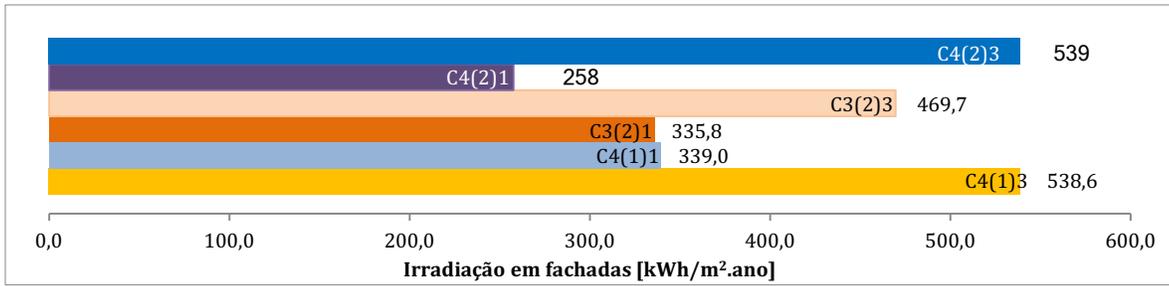


Figura 198 : gráfico comparativo da irradiação em fachadas para algumas das quadras solares propostas.

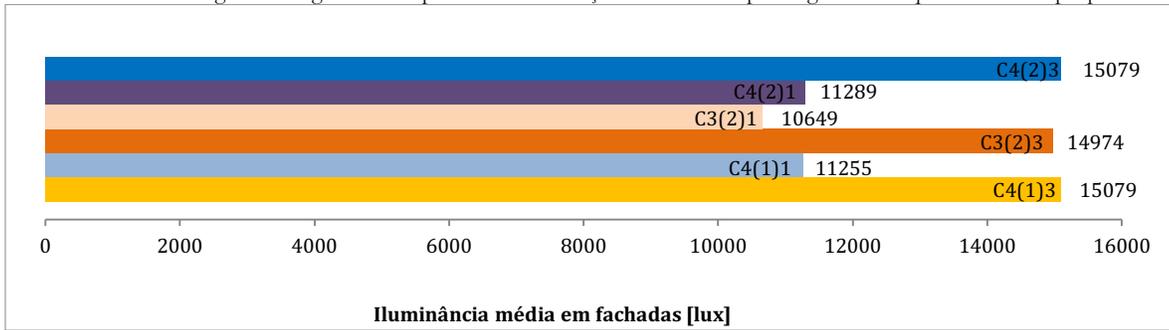


Figura 199 : gráfico comparativo da iluminância em fachadas para algumas das quadras solares propostas.

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 Macció. 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 200 e 227). 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 200 : exemplo de intervenção pontual em vizinhança situada na planície litorânea de Macció - planta. Fonte: ilustração do autor.

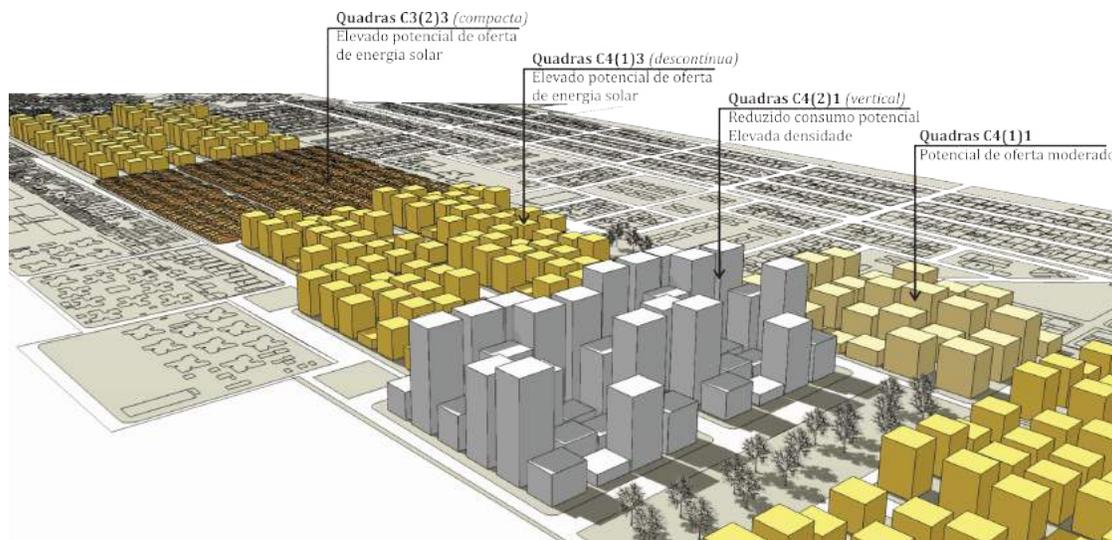


Figura 201 : exemplo de intervenção pontual em vizinhança situada na planície litorânea de Maceió – perspectiva e especificações das tipologias de quadra solar. Fonte: ilustração do autor.

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 encontrados⁶¹, 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 (*Evolutionary Design model*). Não detalharemos

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.

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.

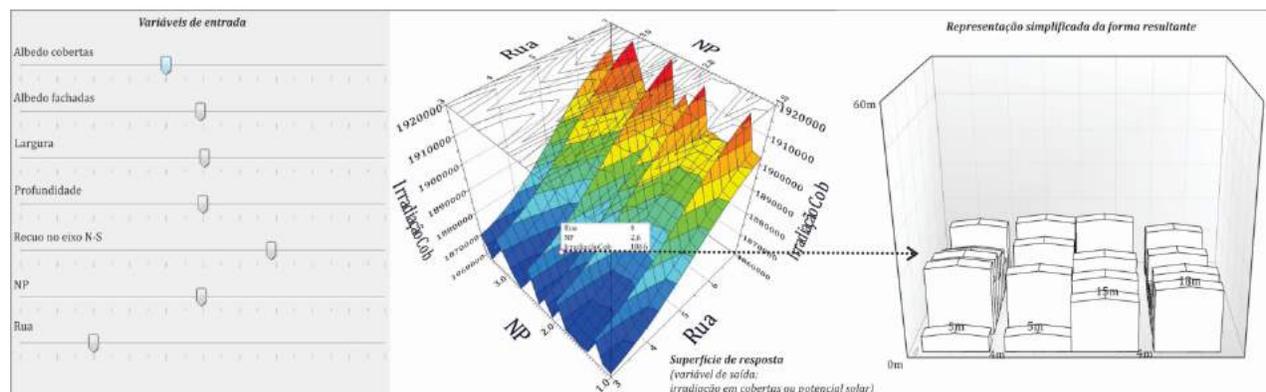


Figura 202 : exemplo de superfície de resposta de alguns projetos simulados e interpolados por um modelo evolucionário de regressão para futuro desenvolvimento de ferramenta de auxílio à decisão. Fonte: adaptado de modeFRONTIER, 2013.

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 tipológicas 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 microubanismo 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 iluminação 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.

⁶² 15% de 1000 W/m² representaria cerca de 150 W de energia.

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).

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 raiotrazado 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 macrozoneamento 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 espaces publics urbains: validation d'un système d'indicateurs «morpho-climatiques et d'un indicateur de confort.** Tese (Doutorado em Arquitetura). Université de Nantes. Nantes. 2002.
- AIT-AMEUR, K. **Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains: validation d'un système d'indicateurs «morpho-climatiques 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 ordenamento 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 (Doutorado em 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 électronique), 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. **Heurísticas e Metaheurísticas 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, Austrálie: [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. **Contribution à la generation des bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine**. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Toulouse, 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. **Balanco Energético Nacional 2013: ano base 2012 - relatório síntese**. Empresa de Pesquisa Energética. 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. **Téledétection 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 (Macció)**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal de Alagoas. Macció, 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 International**, v. 32, n. 1, p. 28-40, 2008.
- CHENG, V. et al. **Urban form, density and solar**. The 23rd PLEA Conference. Geneva, Suíça, 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 Internationale de l'Éclairage. Vienna. 1973.
- CIE. **Spatial distribution of daylight - CIE Standard Overcast Sky and clear sky**. Commission Internationale de l'Éclairage. Vienna. 1996.
- CIE. **Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky**. Commission Internationale de l'Éclairage. 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 Européenne des Sciences Sociales**, Gênev, 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. **Quatrième rapport annuel au Parlement sur la mise en œuvre des engagements du Grenelle Environnement**. Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie. 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 - 17th 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: Flammarion, 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 access in the compact city: a study case**. PALENC 2010: Passive and Low Energy Cooling 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 Wiley 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 arquitetura 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. Besançon: [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. Disponível 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. Québec. 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. **Environmental specificities of the urban built forme.** Rebuildrebuilding the European city, Integration renewable energies in established urban structure. Corfour: [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.; NAFFLIOTIS, N. **Multiobjective Optimization Using the Niche 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 Agency. [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 technology. Massachusetts, p. 163. 2010.
- JORMAKKA, K.; SCHÜRER, O.; KUHLMANN, D. **La Recherche de la forme.** Berlin: 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 predict 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-Essen. [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 - Secrétariat 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 Planejamento 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.; KERGMARD, 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 optimisation 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. 1. 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. Disponível 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 Mecânica). 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: Parathèses, v. 1, 2009.
- PARKER, D. C.; EVANS, T. P.; MERETSKY, V. M. **Measuring 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 macroscopic 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 Polytechnique 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.I.], 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 planète**. 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.
- ROUSSEAU, F.; LONG, N.; RENOARD, 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.I.]: [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 Evaluated Genetic Algorithms**. Dissertação. Vanderbilt University. [S.I.]. 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.; SATTTLER, 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 représentations 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 magnitudie 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.
- TRAINSEL, 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.; POUHEY, 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.
- VITRUVÉ. **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 Kaufmann, 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.