

EDITORA



UnB

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

**Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni
(Organizadores)**



Pesquisa,
Inovação
& Ousadia



Universidade de Brasília

Reitora
Vice-Reitor

Márcia Abrahão Moura
Enrique Huelva

EDITORA



UnB

Diretora

Germana Henriques Pereira

Conselho editorial

Germana Henriques Pereira (Presidente)
Fernando César Lima Leite
Beatriz Vargas Ramos Gonçalves de Rezende
Carlos José Souza de Alvarenga
Estevão Chaves de Rezende Martins
Flávia Millena Biroli Tokarski
Jorge Madeira Nogueira
Maria Lidia Bueno Fernandes
Rafael Sanzio Araújo dos Anjos
Sely Maria de Souza Costa
Verônica Moreira Amado

EDITORA



UnB

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni
(Organizadores)



Pesquisa,
Inovação
& Ousadia

Coordenadora de produção editorial
Preparação e revisão

Equipe editorial

Luciana Lins Camello Galvão
Alexandre Vasconcellos de Melo

© 2018 Editora Universidade de Brasília

Direitos exclusivos para esta edição:
Editora Universidade de Brasília
SCS, quadra 2, bloco C, nº 78, edifício OK,
2º andar, CEP 70302-907, Brasília, DF
Telefone: (61) 3035-4200
Site: www.editora.unb.br
E-mail: contatoeditora@unb.br

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser armazenada ou reproduzida por qualquer meio sem a autorização por escrito da Editora.

Esta obra foi publicada com recursos provenientes do Edital DPI/DPG nº 2/2017.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília

S614 Simulação, ambiente e energia no espaço construído /
 organizadores, Caio Frederico e Silva ... [et al.]. – Brasília :
 Editora Universidade de Brasília, 2020.
 284 p. ; 23 cm. – (Pesquisa, inovação & ousadia).

ISBN 978-65-5846-043-5

1. Simulação computacional. 2. Desempenho energético. 3.
Sustentabilidade. I. Silva, Caio Frederico e (org.). II. Série.

CDU 72

Sumário

Prefácio	7
<i>Otto Ribas</i>	
Apresentação	9
Parte 1: Inputs – conforto, vento e luz	
Capítulo 1. Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met	17
<i>Caio Frederico e Silva e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
Capítulo 2. Caracterização de dados e arquivos climáticos de Brasília para simulação higrotérmica.....	55
<i>Vanda Alice Garcia Zanoni e José Manoel Morales Sánchez</i>	
Capítulo 3. Ferramentas para a simulação de ventilação natural na Arquitetura	99
<i>Gustavo de Luna Sales e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
Capítulo 4. Qualidade da luz natural e ferramentas para o projeto arquitetônico	127
<i>Júlia Teixeira Fernandes e Cláudia Naves David Amorim</i>	

Parte 2: Outputs – ambiente construído e energia

Capítulo 5. Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil 173

Joára Cronemberger e Estefanía Caamaño-Martín

Capítulo 6. Análise do balanço energético de casa pré-fabricada ZEB em Brasília 215

Larissa Sudbrack e Cláudia Naves David Amorim

Capítulo 7. Considerações sobre uma pauta para governança da eficiência energética 259

*Tássia Fonseca Latorraca, Raquel Naves Blumenschein e
Maria Vitória Duarte Ferrari*

Prefácio

A equipe que lidera o grupo de pesquisa em Simulação Computacional no Ambiente Construído (SICAC), composta pelos professores Caio Frederico e Silva, Gustavo Luna, Vanda Alice Zanoni e Joára Cronemberger, todos da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília (FAU-UnB), organizou a coletânea de capítulos de pesquisadores da pós-graduação da FAU/UnB, resultando neste livro, *Simulação, ambiente e energia no espaço construído*, apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Governo do Distrito Federal (FAPDF).

Contribuíram para a construção deste livro os pesquisadores do LaSUS (Laboratório de Sustentabilidade Aplicada a Arquitetura e ao Urbanismo), do LACAM (Laboratório de Controle Ambiental) e do LACIS (Laboratório do Ambiente Construído, Inclusão e Sustentabilidade).

Com o objetivo de compreender e desenvolver diretrizes para arquitetura e urbanismo com qualidade ambiental no contexto climático brasileiro com ênfase no Distrito Federal (DF), a coletânea de capítulos é resultado de pesquisas empreendidas utilizando *softwares* consagrados no meio acadêmico para prescrever diretrizes e soluções mais adequadas para a obtenção do conforto dos usuários das edificações.

Os capítulos apresentados no livro são: “Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met”, de autoria dos professores Caio Silva e Marta Romero; “Caracterização de dados e arquivos climáticos de Brasília para simulação higratérmica”, de autoria dos professores Vanda Zanoni e José Manuel

Sánchez; “Ferramentas para a simulação de ventilação natural na Arquitetura”, de autoria dos professores Gustavo Luna e Marta Romero; “Qualidade da luz natural e ferramentas para o projeto arquitetônico”, de autoria da arquiteta Júlia Fernandes e da professora Cláudia Amorim; “Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil”, de autoria das professoras Joára Cronemberger e Estefanía Caamaño-Martín; “Análise do balanço energético de casa pré-fabricada ZEB em Brasília”, de autoria da arquiteta Larissa Sudbrack e da professora Cláudia Amorim; “Considerações sobre uma pauta para governança da eficiência energética”, da arquiteta Tássia Latorraca e das professoras Raquel Blumenschein e Vitória Ferrari.

O resultado das pesquisas apresentadas é uma valiosa contribuição para todos aqueles que pretendam projetar e construir. Esses capítulos dão um passo significativo no caminho da utopia concreta que é a arquitetura sustentável.

Otto Ribas

Praga, outono de 2017

Apresentação

A arquitetura e o urbanismo cumprem um papel de destaque perante os desafios atuais impostos pela sociedade quanto à sustentabilidade na construção civil. Nesse contexto, o controle do espaço construído, alcançado pela implementação das mais diversas estratégias de projeto, encontra bases sólidas nas diversas questões projetuais. Os temas perpassam a governança e a gestão energética, o aproveitamento de fontes renováveis de energia, o desempenho adequado dos materiais e sistemas construtivos associados ao design de projetos, condizentes com as especificidades locais.

Embora o controle ambiental não seja sinônimo de sustentabilidade, insere-se neste cenário como condição essencial para atingi-la, ou seja, é um tema relevante no cenário latente da crise energética persistente no Brasil, especialmente com os eventos de alterações climáticas que ameaçam as cidades e os reservatórios que abastecem as hidrelétricas. A busca pela mitigação ambiental instiga ainda mais as universidades, convocando-as para a construção de abordagens mais sustentáveis. Para a aplicação das estratégias de controle ambiental, faz-se necessário o entendimento de métodos, técnicas e tecnologias que auxiliam as melhores tomadas de decisão.

O livro aborda as dimensões metodológicas, tecnológicas e conceituais, relacionadas com os aspectos energético, higratérmico e lumínico, apresentando como pano de fundo o uso e a aplicação de programas de simulação computacional, diagramas e ferramentas simplificadas para os estudos analíticos e aplicados ao espaço construído em diferentes contextos climáticos.

O objetivo do livro é o de instrumentalizar estudantes, arquitetos, engenheiros, construtores e gestores públicos, apresentando ferramentas, *softwares*, metodologias e conhecimento inovador que contribuam com a produção mais qualificada do espaço construído. A obra está estruturada em duas partes: “*Inputs* – conforto, vento e luz” e “*Outputs* – ambiente construído e energia”, totalizando sete capítulos.

Na primeira parte, o leitor encontra capítulos que se dedicam aos *inputs* ambientais e climáticos, utilizados pelas ferramentas computacionais. Estes capítulos são:

Capítulo 1 – “Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met’”: apresenta a ferramenta alemã de simulação computacional, *software* ENVI-met, mostrando o seu potencial enquanto programa de análise do microclima urbano. Para tanto, o capítulo apresenta o Distrito Federal (DF) subdividido em três mesorregiões climáticas e apresenta simulações de conforto térmico que determinam três categorias de três comportamentos microclimáticos para o clima do DF do Brasil. Por fim, o capítulo estabelece diretrizes para o conforto bioclimático urbano no contexto climático de Brasília.

Capítulo 2 – “Caracterização de dados e arquivos climáticos de Brasília para simulação higrotérmica””: apresenta a caracterização das variáveis climáticas e dos arquivos climáticos utilizados nas simulações computacionais para análise higrotérmica. Com base no banco de dados climáticos horários registrados pela estação automática A001 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), apresentam-se os dados para a cidade de Brasília (DF). Ao longo do capítulo, a caracterização climática permite avaliar a intensidade (valores médios, máximos e mínimos) e a frequência de ocorrência das variáveis climáticas, em seu comportamento cíclico e sazonal ao longo do ano. Os estudos visam estabelecer uma base referencial para a seleção de dados e análise de sensibilidade.

Capítulo 3 – “Ferramentas para a simulação de ventilação natural na Arquitetura””: aborda as principais características dos programas de simulação do comportamento e quantificação da ventilação natural. A abordagem dessas ferramentas de auxílio ao processo de projeto se torna fundamental para que o profissional

determine as diretrizes de projeto mais eficazes, tendo em vista a qualidade do ar e o conforto térmico passivo no espaço construído. O uso dessas ferramentas possibilita a identificação de problemas e potencialidades, tanto na escala urbana quanto no nível dos ambientes do edifício. O domínio dessas ferramentas é muito importante, uma vez que tais problemas e potencialidades podem interferir diretamente na qualidade ambiental e no consumo energético desses espaços.

Capítulo 4 – “Qualidade da luz natural e ferramentas para o projeto arquitetônico”: traz a discussão sobre a complexidade dos estudos de iluminação, justamente pela necessidade de avaliar várias dimensões, simultaneamente. Enquanto os pesquisadores são os que investigam e compreendem o comportamento da luz, são os arquitetos que projetam os espaços, embora sejam os usuários que recebem os impactos diretos, positivos ou negativos. O conceito de Qualidade da Iluminação pauta-se na integração entre desempenho visual, conforto visual, eficiência energética, qualidade da vista externa e satisfação do usuário. Apresenta-se a simulação computacional como um dos principais métodos de avaliação da iluminação natural, método este que contribui para a prática na concepção do projeto, facilitando a compreensão do problema e a melhoria dos resultados.

Na segunda parte, o leitor encontrará os capítulos dedicados aos *outputs* qualitativos e quantitativos, perpassando as áreas de produção de energia solar fotovoltaica; edificação de balanço energético nulo; e tece considerações sobre governança energética. Esta parte é composta pelos capítulos:

Capítulo 5 – “Análise do balanço energético de casa pré-fabricada ZEB em Brasília”: traz a análise de uma casa pré-fabricada de balanço energético nulo no contexto climático de Brasília, sendo apresentados o seu potencial de produção de energia elétrica, as estratégias passivas e a eficiência energética, com especial foco nos materiais construtivos. O capítulo apresenta, ainda, uma análise de diferentes combinações de materiais opacos para cobertura e paredes, feita por meio de simulações computacionais termoenergéticas com o programa *DesignBuilder*, e os resultados são avaliados de acordo com a norma *The American Society of Heating*,

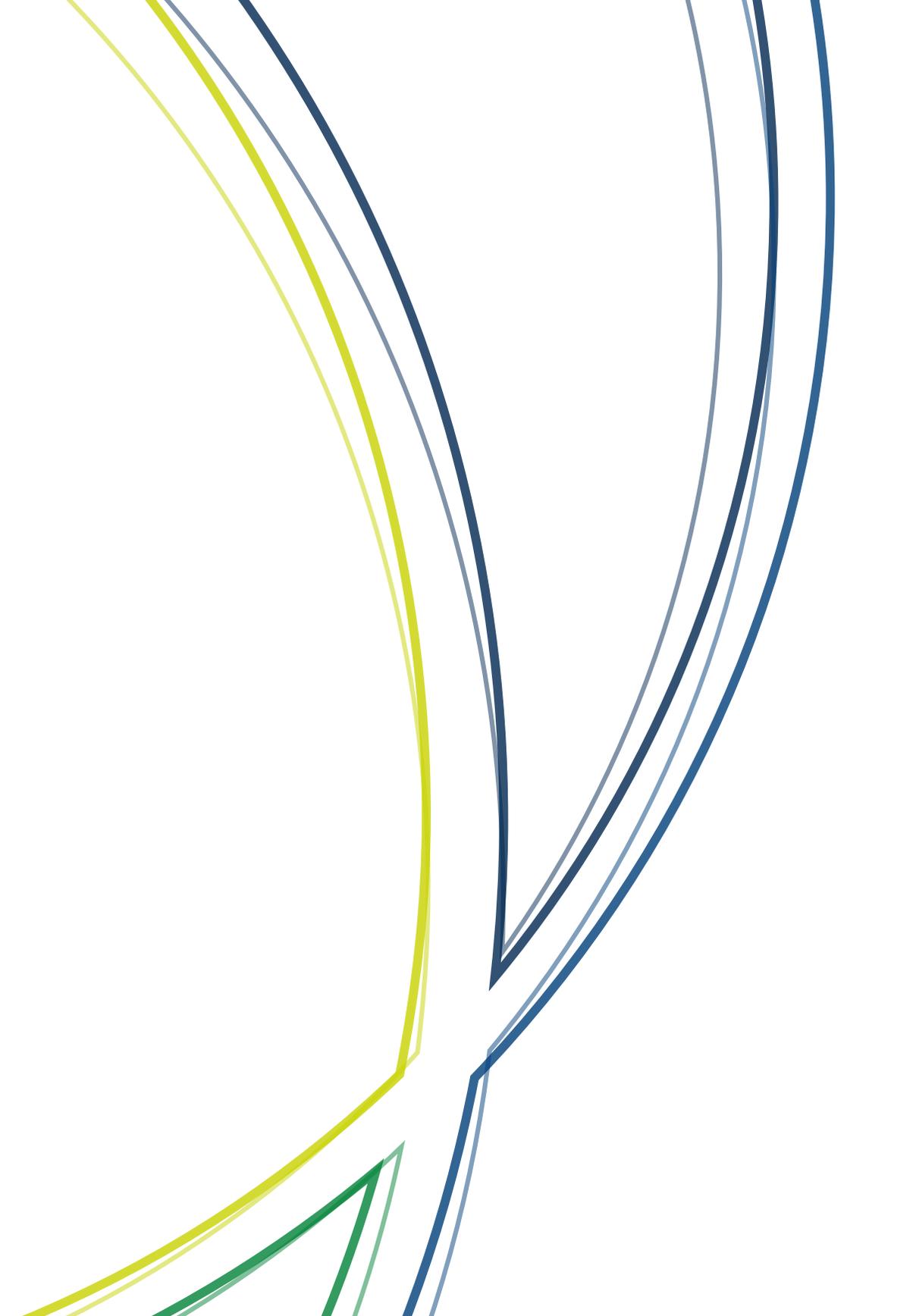
Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) 55, de modo a identificar quais dessas combinações oferecem maior conforto térmico aos usuários, e quais delas têm maior influência no balanço energético final da casa.

Capítulo 6 – “Irradiação solar: ferramenta de análise para edifícios solares fotovoltaicos no Brasil”: apresentam-se ferramentas gráficas simplificadas que permitem identificar o potencial de aproveitamento das envoltórias das edificações para integrar sistemas de geração de energia solar fotovoltaica. O método, idealizado como ferramenta de projeto para as primeiras fases de um projeto arquitetônico, foi desenvolvido considerando-se a disponibilidade de radiação solar em latitudes brasileiras. Nesse sentido, o capítulo oferece um material de consulta técnica para projetistas interessados em utilizar energia solar em suas obras.

Capítulo 7 – “Considerações sobre uma pauta para governança da eficiência energética”: introduz uma visão sistêmica sobre o uso da energia elétrica no país, sinalizando gargalos e pontos de alavancagem para o fortalecimento da eficiência energética. Propõe-se uma discussão sobre a análise da governança do setor de energia elétrica para a eficiência energética no Brasil. Para isso, utilizam-se dois métodos de análise e mapeia-se a integração de vetores como os agentes, as ações e os instrumentos, tendo como base diretrizes e critérios para uma boa governança.

Por fim, o uso das simulações computacionais aplicadas e das ferramentas apresentadas ao longo dos capítulos dialoga com diversos perfis profissionais. Estudantes, arquitetos e engenheiros, entre outros profissionais que busquem temas atuais, encontrarão neste livro diretrizes ambientais e estratégias que indicam as melhores práticas para a qualidade e sustentabilidade do ambiente construído.

Os Organizadores





Parte 1

Inputs – conforto, vento e luz



CAPÍTULO 1

Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met

Caio Frederico e Silva e Marta Adriana Bustos Romero

Este capítulo está organizado em cinco tópicos. Apresenta, num primeiro momento, o primeiro tópico com um breve panorama sobre as relações entre a revolução digital e a análise do desempenho do ambiente construído. No segundo tópico, apresenta-se o conceito de *simulação computacional bioclimática*, para, num terceiro tópico, apresentar uma proposta de caracterização climática para o Distrito Federal (DF). O quarto tópico dedica-se à apresentação das configurações, critérios e parâmetros do *software* ENVI-met; em resumo, os procedimentos metodológicos da pesquisa. Em seguida, tem-se o tópico cinco, que apresenta o real desempenho térmico das cavidades urbanas, seguido do tópico seis com as Considerações finais do capítulo. Por fim, tem-se o tópico sete com as referências bibliográficas utilizadas neste capítulo.

1. A revolução digital e o ambiente construído

A partir do século XX, com a revolução digital, toda a carreira dos profissionais ligados ao planejamento, à construção e à manutenção do ambiente construído foi

impactada pela chegada do computador. Esse novo cenário apontou para a necessidade de domínio de novas ferramentas, tanto para a elaboração e o monitoramento dos projetos quanto para a garantia de desempenho deles. Nesse sentido, o domínio de algum *software* tornou-se uma demanda natural para arquitetos, engenheiros e urbanistas, sobretudo desde o fim de 1990 (MONTENEGRO, 2001).

No contexto da revolução digital, marcada pelo manuseio do computador, a profissão do arquiteto e urbanista teve seu processo de trabalho bastante impactado, sendo possível observar benefícios como a agilidade na produção de um desenho técnico, a facilidade no entendimento de um projeto na terceira dimensão e mesmo a possibilidade de replicar um projeto com poucos cliques.

A tecnologia pode ser encarada como “uma das quatro variáveis básicas do desenvolvimento, acompanhada das outras variáveis: recursos humanos, recursos naturais e qualidade de vida” (LEDO, 1996, p. 14), o que implica dizer que a tecnologia se tornou necessária para o desenvolvimento das habilidades humanas. Dessa forma, as profissões devem incorporá-la na nova práxis, fazendo que ela seja um vetor para que se possa atingir um maior grau de qualidade no ambiente construído. A busca da qualidade exige um conhecimento prévio do território. Nesse sentido, diferentes metodologias de pesquisa buscam formas de compreender o território.

Uma das estratégias metodológicas para a compreensão do território é a modelagem. Neste livro, o conceito de *modelagem* é ampliado para *modelagem ambiental*, representando uma abstração do mundo natural e realizando a previsão de eventos baseados em princípios gerais (CHRISTOFOLETTI, 1999).

A chegada dos diversos tipos de *software* trouxe mais alternativas e incrementou às formas de compreender o ambiente ao redor, de forma que nunca foi tão fácil modelar a realidade, nunca foi tão acessível e, ao mesmo tempo, tão complexo transpor a realidade para o mundo digital.

A construção de um modelo é encarada por Anjos (2008) como etapa fundamental para a melhor compreensão do objeto de estudo. O autor explica o processo de elaboração de tipos lembrando que:

O mundo real mostra-se tão complexo que é impossível reproduzir todas as suas características, as suas relações funcionais e todo o conjunto de interdependências. Uma característica que nos parece muito relevante ao tratarmos da elaboração de um tipo é que este pode ser estruturado de forma que os aspectos importantes selecionados do mundo real sejam manipulados, relacionados e explorados visando a uma representação, uma simplificação. (ANJOS, 2008, p. 88).

Ainda que anteriores às técnicas de simulação computacional, as técnicas de modelagem na área de arquitetura, engenharia e urbanismo são permeadas por muitos desafios e dificuldades. Alguns programas computacionais focam na modelagem, ou seja, o arquétipo é o seu produto final. Entre eles, os mais conhecidos na área de arquitetura e urbanismo são os programas *Computer-aided Design* (CAD). Outra gama de programas compõem a geração do *Building Information Modeling* (BIM), pois compreendem a modelagem arquitetônica e todas as suas informações como o produto a ser construído.

Numa dimensão mais analítica, a simulação na área do bioclimatismo não é totalmente incorporada pelos programas utilizados pelos arquitetos e engenheiros. Com a chegada da tecnologia BIM, vê-se alguns *plug-ins* associados a essas ferramentas que passam a oferecer breves estudos, como análise da máscara de sombra por meio de dados simplificados como a latitude em relação ao Sol. No entanto, os estudos mais aprofundados de bioclimatismo desenvolvidos por meio da lógica BIM não o tornam por isso um programa de simulação ambiental. Alguns aplicativos e *plug-ins* surgem para apoiar as novas tecnologias e torná-las uma ferramenta integrada de avaliação do desempenho, mas essa realidade ainda não atinge o *workflow* dos projetistas.

2. Simulação computacional bioclimática: construindo um conceito

O uso da simulação computacional em pesquisas no ambiente construído tem se disseminado rapidamente nas últimas décadas. Isso se justifica, em parte, pelo avanço na tecnologia dos computadores – cada vez mais complexos.

A área da simulação computacional é complexa e desafiadora (BARBIRATO, 1999; IRVING, 1988). Muitas vezes, a técnica da simulação computacional existe, é aplicada em estudos de caso, mas não traz uma contribuição factível para a área de arquitetura e urbanismo (SOUZA *et al.*, 2010).

Os estudos computacionais, para serem considerados confiáveis, devem passar por um processo de certificação ou validação que, segundo Irving (1988, p. 282), tem a finalidade de “estabelecer a exatidão das soluções produzidas, de determinar os campos de valores para os quais os tipos são válidos e de adaptá-los aos domínios de aplicação”. Esse autor salienta que “o tempo dedicado à validação de grandes programas de simulação pode ultrapassar os 60% do tempo total de desenvolvimento”.

Irving (1988) aponta três técnicas de validação para esses tipos: “verificação analítica, comparação entre tipos e validação empírica”. Neste capítulo, utiliza-se a técnica de comparação entre tipos, que carrega a vantagem de minimizar os erros, uma vez que mantém muitas variáveis imutáveis, preservando a pureza dos dados, quando comparados.

A simulação computacional e a disponibilidade de interfaces aprimoradas permitem aos usuários criar tipos tridimensionais de construção, realizar uma simulação e exibir os resultados de forma a entender a tendência do comportamento de fenômenos naturais como a luz natural (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). Nesse sentido, a prática da simulação computacional torna-se uma ferramenta cada vez mais viável para análises que envolvem uma grande quantidade de variáveis.

Depois da virada do milênio, há, cada vez mais, iniciativas que visam à universalização de tecnologias computacionais associada ao acesso, cada vez maior, à rede mundial de computadores. Nesse novo cenário, pretende-se que a consulta de dados climáticos se torne rotina para profissional projetista de arquitetura ou de projeto urbano, uma postura necessária para que a produção de um espaço – arquitetônico ou urbanístico – com qualidades ambientais possibilite, segundo Romero (2010), “uma sustentabilidade progressiva”. Assim, os recursos tecnológicos disponíveis hoje devem ser, cada vez mais, empregados na tentativa de monitorar um espaço que possa ser mais sustentável ambientalmente.

O uso de ferramentas computacionais na avaliação do conforto térmico é desafiador (ARZTEGUI, 1995), porém registram-se estudos de casos em programas bastante complexos e que, ainda incipientes, contribuem significativamente para o avanço da área no Brasil (AKUTSU; VITTORINO; YOSHIMOTO, 1995). Quando fornece respostas práticas e de ordem econômica, a simulação computacional ocupa cada vez mais espaço (RAUBER *et al.*, 1993).

Ainda na década de 1990, Aroztegui (1995) desenvolve pesquisas precursoras que utilizam novos métodos para a avaliação do conforto térmico. O autor afirma que o conforto térmico dos espaços exteriores está fundamentalmente determinado pela ação combinada de variáveis complexas, de modo que ações orientadas para o monitoramento e a preservação da qualidade do ambiente são bem-vindas. Ainda de acordo com ele, “a complexidade das variáveis de conforto térmico impulsiona a criação de instrumentos de quantificação que forneçam as bases para critérios de gestão do espaço urbano”. (ARZTEGUI, 1995, p. 342).

Aroztegui (1995) dizia que

[...] era inviável modelar, experimental ou matematicamente, as variadas situações do efeito térmico produzido pelo vento sobre os pedestres em espaços urbanos, tendo em vista que os dados fornecidos nas estações meteorológicas são médias mensais que devem ser corrigidos pelos índices de rugosidade. (ARZTEGUI, 1995, p. 343).

Esse depoimento do pesquisador esclarece as dificuldades encontradas no desenvolvimento de pesquisas na área de conforto térmico e clima urbano e denuncia a fragilidade dos dados oferecidos pelas estações climatológicas. Hoje, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) oferece os valores horários, contribuindo significativamente para a precisão das pesquisas; além disso, a qualidade dos programas computacionais desenvolve, cada vez mais, algoritmos balizados por valores típicos, evitando o tratamento com valores médios que, por vezes, camuflam os resultados e agravam a qualidade dos dados pesquisados.

Por outro lado, o uso da simulação computacional passou a ser um instrumento cada vez mais presente em estudos de viabilidade e previsão de problemas, em decorrência da disponibilidade dos dados objetivos e sua maior precisão.

Em uma discussão acerca dos novos modos de modelagem computacional, como a tecnologia BIM, o presidente da *American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) discute a efetividade do uso da simulação computacional na avaliação integrada da arquitetura. Lynn (1981) garante que o processo de simulação pode gerar economia real de energia e melhorias do seu desempenho de construção quando o projeto é feito de modo integrado. Assim, deve-se investir para que se continue a desenvolver o BIM para automatizar a criação de tipos das áreas da arquitetura, da engenharia mecânica e da engenharia elétrica, para que se consiga, assim, projetos mais controlados e com a sua qualidade mensurada.

Rauber *et al.* (1993) afirma que o uso de *software* na avaliação do desempenho ambiental da arquitetura e do urbanismo tem grande espaço quando atinge a dimensão econômica, pois é possível mensurar com precisão os impactos econômicos advindos de tipos fictícios que atendam a diferentes demandas e contextos. Nesse sentido, vê-se que:

A utilização de ferramentas computacionais é especialmente importante no aspecto energético-econômico, por estimar gastos com condicionamento de ar e permitir uma otimização da edificação neste sentido. Seguindo esta tendência, vários programas de simulação de desempenho térmico de edificações foram implementados. (RAUBER *et al.*, 1993, p. 107).

Barbirato (1999) destaca que uma das dificuldades encontradas em trabalhos de simulação consiste na escassez de parâmetros de entrada e de dados físicos e meteorológicos, o que leva a estimativas ou suposições baseadas em informações disponíveis, muitas vezes, não apropriadas para a realidade local. Essa dificuldade

impede maior avanço no campo da simulação bioclimática, o qual só se verificará com a realização de maior número de investigações que digam respeito a dados climáticos para as regiões tropicais.

Souza *et al.* (2010) complementam alertando que, apesar dos diversos estudos hoje existentes sobre simulações computacionais,

[...] poucas são as ferramentas práticas disponíveis para que possam ser estabelecidas diretrizes de planejamento urbano. Este quadro se agrava ainda mais quando considerado o caso de cidades localizadas em países em desenvolvimento, para os quais frequentemente existe uma carência de dados básicos para este fim. (SOUZA *et al.*, 2010, p. 10).

Nesse sentido, visualiza-se uma lacuna na área das simulações computacionais na avaliação do desempenho do ambiente construído, em que mais pesquisas devem dedicar esforços. Sendo assim, todo o campo do ambiente construído pode ser beneficiado com a contribuição das ferramentas computacionais que passaram a servir como subsídios técnicos quando o seu uso promove a qualidade ambiental urbana no contexto climático das cidades. Nesse sentido, as simulações que contribuem com o maior entendimento dos fenômenos ambientais e que visam avaliar o desempenho do ambiente construído podem ser denominadas como *simulações bioclimáticas*.

3. Proposta de caracterização climática para o Distrito Federal

Estudos climáticos que visam uma caracterização climática brasileira são sempre genéricos ao descrever o clima do DF. Na Norma Brasileira de número 15.220, em sua parte 3, a ABNT (2005) apresenta o Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ZBB), apresentando Brasília como uma cidade pertencente à Zona Bioclimática (ZB) 4, com presença de inverno e verão. Em estudos mais recentes, Roriz (2012) apresenta uma proposta de revisão deste zoneamento. O pesquisador

apresenta dados de temperatura média anual de 21,39 °C para Brasília, e de 21,59 °C, para Planaltina, indicando uma leve diferença entre os respectivos núcleos urbanos. No entanto, o estudo apresenta uma proposta de zoneamento que mantém o DF inserido numa única Zona Bioclimática (RORIZ, 2012), não discute e não apresenta diferenças entre as Regiões Administrativas (RAs) do DF.

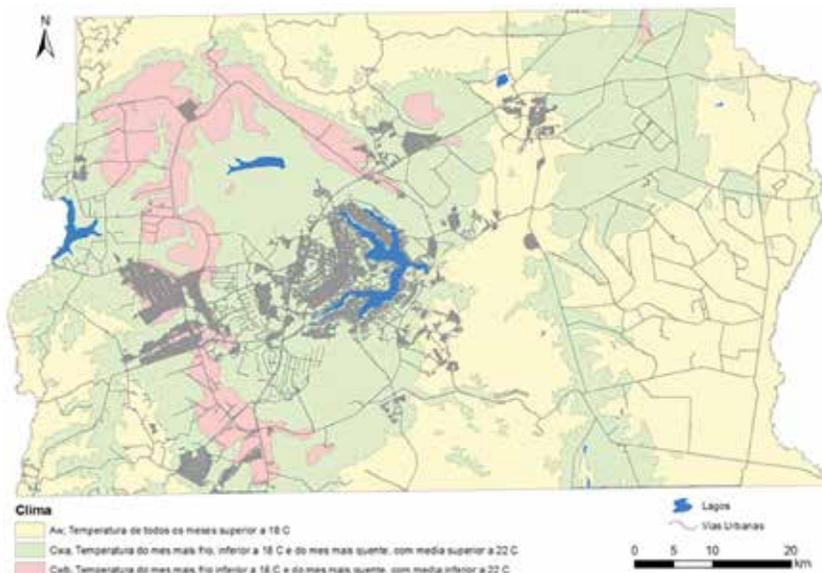
Diante da compreensão de que território do DF é polinucleado de centros urbanos, com RAs que se localizam do extremo norte do DF, como Sobradinho e Planaltina, até o extremo sul, como Santa Maria e São Sebastião, ou do extremo leste, como o Paranoá, até o extremo oeste, como Ceilândia e Brazlândia, busca-se outra forma de caracterizar climaticamente este território.

Para uma compreensão espacial mais aproximada, apresentam-se os mapas geomorfológicos e climáticos do DF. O mapa geomorfológico foi desenvolvido pela Codeplan (1986) e trata-se de um entendimento topográfico e suas relações de espacialidade territorial do DF. Como é sabido, há uma grande relação entre a geomorfologia e o comportamento do clima. O mapa climático, por sua vez, é um estudo original que segue a metodologia de Köppen-Geiger (1948) e é utilizado como parâmetro de classificação dos climas na escala topoclimática.

As RAs Planaltina (ao norte do DF) e cidade de Luziânia (ao sul e já no estado de Goiás) possuem estações meteorológicas que registram seus valores climáticos e podem indicar um desempenho ambiental diferente de Brasília, onde está localizada a estação meteorológica oficial do DF. Essas diferenças ficam evidentes ao se analisar o mapa geomorfológico proposto pela Codeplan (1986) (Figura 1).

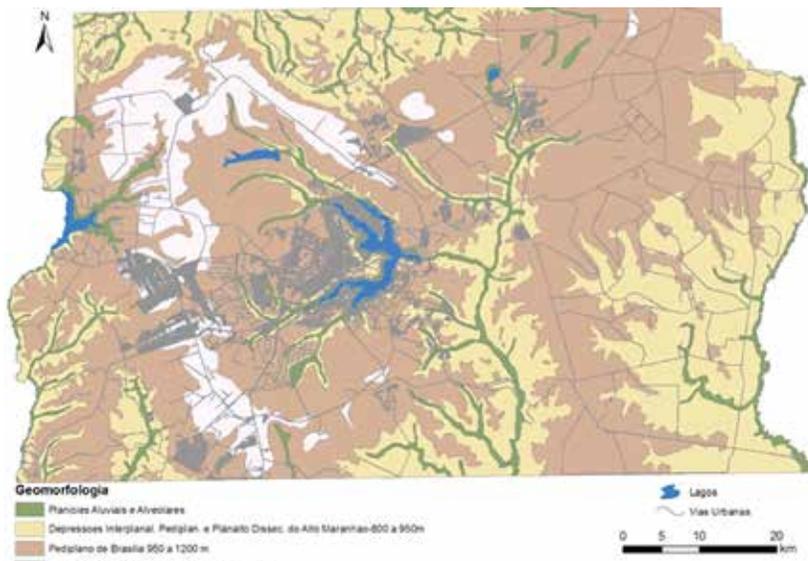
É possível discutir uma redefinição para a caracterização climática do DF e da cidade de Brasília. Para isso, é fundamental um conhecimento prévio das características ambientais da região de estudo. A partir dos problemas ambientais derivados e ligados ao clima urbano, como o fenômeno das ilhas de calor sinalizadas por Oke (1987), algumas pesquisas já apontam para a necessidade de elaboração de mapas de zoneamentos climáticos (ALVAREZ *et al.*, 2014; CARDOSO; MARCUZZO; BARROS, 2014).

Figura 1: Mapa geomorfológico do DF



Fonte: CODEPLAN (1986).

Figura 2: Mapa climatológico do DF



Fonte: CODEPLAN (1986).

Em um dos estudos normatizados, apresenta-se o ZBB. De acordo com o ZBB, Brasília e todo o DF estão inseridos na ZB 4, a qual se refere às características ainda marcantes de verão (período chuvoso) e inverno (seco), comportamento climático típico do clima tropical de altitude.

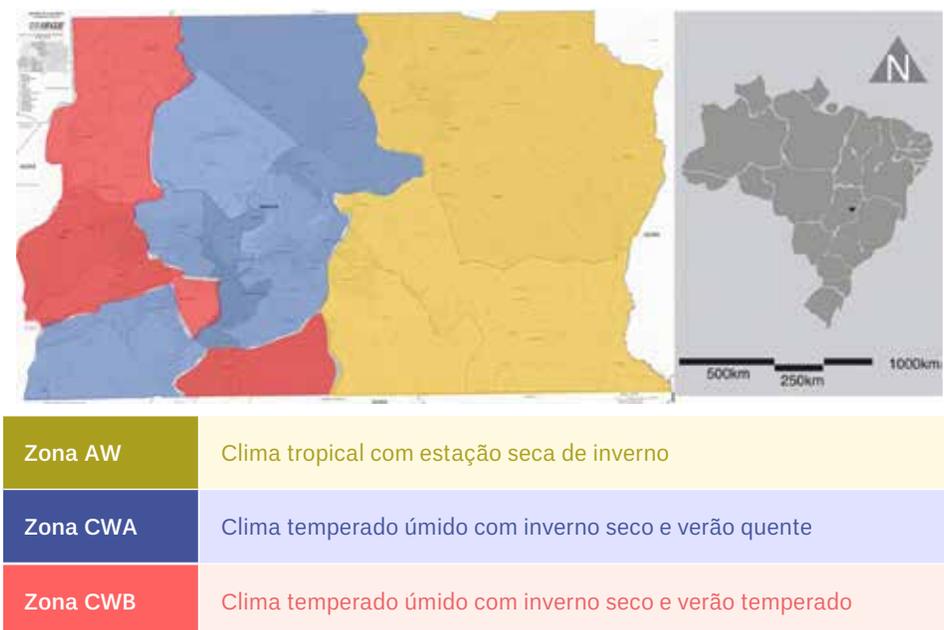
Amplia-se a caracterização climática de Brasília para as demais cidades do DF pela carência de estudos mais específicos e precisos. Nesse sentido, o atlas da Codeplan (1986) apresenta uma análise mais pormenorizada do cenário bioclimático do DF (Figura 1 e Figura 2). Os mapas têm validade, uma vez que se trata da dimensão geomorfológica cuja dinâmica temporal não se altera em curto espaço de tempo.

De acordo com a classificação de Köppen (1948), o DF enquadra-se no tipo climático Aw – clima tropical com estação seca no inverno. Discute-se, no entanto, que, no território do DF, há heterogeneidade climática que não justifica o uso de uma única categoria climática para a sua representação. Nesse sentido, o mapa climatológico, associado ao mapa geomorfológico, tornam marcantes três agrupamentos territoriais que representam três tipologias climáticas com nuances diferentes: zonas Aw, Cwa e Cwb, identificadas pelas cores amarela, verde e vermelha, respectivamente (Figura 3).

Analisando-se os mapas, vê-se que o perfil climático do DF tem forte correlação com a topografia e o relevo da região. No estudo, são identificados três tipos climáticos segundo a metodologia de Köppen (1948): Aw, Cwa e Cwb. Associando essas imagens à divisão política do DF, em que o mesmo é subdividido em regiões administrativas, percebe-se que os tipos climáticos conformam três diferentes áreas bioclimáticas distintas.

Tomando como base os estudos de Köppen (1948) e a revisão sistematizada por Roriz (2012) do ZBB para a região de Brasília, Silva (2013) apresenta uma proposta de Zoneamento Mesoclimático (ZM) para o DF baseada nos respectivos estudos supracitados, além da compreensão das normais climatológicas de Brasília (Figura 3).

Figura 3: Tipos climáticos das poligonais¹ Distrito Federal a partir da divisão política



Fonte: Silva *et al.* (2016, p. 285).

Destaca-se que, a partir da identificação das três subcategorias climáticas, de escala mesoclimática, os grupos de cidades podem ter a sua definição climática de forma mais precisa, com diretrizes mais específicas, voltadas para as demandas de proteção solar, acesso aos ventos, etc., o que exigirá, por sua vez, prescrições urbanísticas diferenciadas. Dessa forma, torna-se possível orientar a legislação urbanística mais focada no comportamento climático de cada região do DF e, assim, traçar diretrizes mais específicas para as diversas cidades ou sub-regiões do DF.

Para a distribuição das RAs, conforme o seu mesoclima específico, foi respeitado o limite da poligonal da RA, o que, muitas vezes, não permite uma leitura imediata com os mapas climatológicos e geomorfológicos que serviram de base para essa

¹ As poligonais do mapa referem-se ao agrupamento de RAs para fins documentais. Mais de uma RA compõe uma poligonal do mapa. Logo, as 31 RAs estão incluídas nas 18 poligonais indicadas.

separação. Sendo assim, Silva (2013) aponta que se justifica o desajuste entre esses mapas em virtude do peso legal de se estabelecer prescrições urbanísticas específicas.

Elaborou-se uma caracterização das três zonas mesoclimáticas para o DF por meio dos dados das normais climatológicas de Brasília. Para a nomenclatura das três subzonas, 4A, 4B e 4C – com os respectivos perfis mesoclimáticos –, foi utilizada a classificação da ZB para Brasília, que, segundo a NBR 15.220, pertence à ZB 4 (Quadro 1).

Quadro 1: Quadro das Mesozonas Bioclimáticas do DF

Mesozona Bioclimática	Perfil Mesoclimático
4A	Segundo ZBB e sua proposta de revisão apresentado por Roriz (2012), Planaltina está localizado na mesma zona da cidade de Brasília. Porém, segundo Köppen, o clima da região leste do DF tem um comportamento mesoclimático diferente da porção central e sudoeste do DF. Nesta porção 4A, de clima classificado como tropical, todas as temperaturas do ano são superiores a 18°C. O período da seca coincide com o período de inverno. Logo, tem o período de verão mais marcante e exige diretrizes mais voltadas para os períodos mais quentes.
4B	O ZBB utiliza os dados oficiais de Brasília, a partir da estação climatológica localizada no Plano Piloto (Sudoeste); logo, a zona 4B representa o clima tropical de altitude de Brasília. Köppen classifica este mesoclima como temperado úmido com inverno seco e verão quente, com médias mensais que superam 22°C. O clima temperado desta porção central do DF significa que o clima tem grandes amplitudes térmicas.
4C	O ZBB não possui dados oficiais desta porção sudoeste do DF, o que, a princípio, recebe a mesma classificação climática de Brasília. Köppen, no entanto, classifica esse clima como temperado no verão e inverno seco. As médias mensais não superam os 22°C, portanto, é a zona mesoclimática menos quente do DF. A partir dos dados oficiais do INMET, a ausência de um verão com temperaturas altas mais marcantes nesta zona permite que sejam orientadas diretrizes para evitar o desconforto por frio, ou seja, desenvolver estratégias que promovam o aquecimento solar passivo nos meses de inverno.

Fonte: Elaboração dos autores (2016).

O contexto climático do DF abordado neste tópico enquanto aporte físico, concreto, permitiu uma abordagem de um clima com dados precisos, o que tornou a pesquisa mais confiável e os dados das simulações computacionais mais palpáveis. O processo de modelagem e de simulação computacional foram desenvolvidos para o clima de Brasília (4B) por meio do *software* que modela o microclima urbano – o ENVI-met –, que será objeto do próximo tópico.

4. ENVI-met: simulação microclimática do clima urbano

De modo geral, uma característica observada no âmbito dos programas analíticos do desempenho ambiental utilizados hoje é o foco na dimensão energética. Muitos dos *softwares* disponíveis são desenvolvidos e regidos pelas demandas da engenharia mecânica, estando baseados em algoritmos matemáticos focados nos sistemas prediais e no edifício, e não na ciência urbana, em que deve ocorrer uma compreensão do comportamento sistêmico dos fenômenos ambientais. Assim, dentro de uma visão prospectiva, foi possível observar que o desenvolvimento de ferramentas de simulação tem sido de grande auxílio no entendimento dos fenômenos que se referem ao comportamento térmico do espaço construído e sua relação, em alguns programas, com o clima urbano. Este é o caso do programa ENVI-met.

O programa ENVI-met foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa chefiado pelo professor Michael Bruse (2007), que considera a abordagem climática urbana em uma microescala própria do entendimento do urbanista. O programa tem quatro perfis para uso (básico, estudante, pesquisador e empresarial); o perfil básico é gratuito e permite o desenvolvimento de simulações sem exigir a aquisição da licença comercial.

O programa foi submetido a processos de validação no centro de pesquisa da Universidade de Mainz (Alemanha) e em pesquisas de campo na Universidade de Brasília (UnB) (CASTELO BRANCO, 2009; SILVA, 2013; ROMERO, 2010). O ENVI-met oferece diversos parâmetros ambientais ligados ao clima urbano, pois opera por meio de uma plataforma tridimensional que avalia as interações entre

a vegetação, o solo e o ar. Considera, entre diversos parâmetros, a temperatura, a umidade, a radiação e a ventilação. O tipo de cálculo inclui: a radiação de onda curta e longa, o fluxo de sombreamento, a reflexão e a irradiação do edifício e a vegetação. As relações e inter-relações entre esses diversos parâmetros demonstram como o *software* é capaz e complexo.

Quanto ao funcionamento básico do programa ENVI-met, o diagnóstico do grau de conforto térmico é obtido por meio de cálculos matemáticos facilitados pela simulação computacional.

No que se refere às superfícies construídas, o programa considera as projeções de sombras, as reflexões e a reirradiação de sistemas edificados e a sua relação com a transpiração da vegetação, a evaporação e o fluxo de calor sensível da vegetação.

As simulações computacionais expostas neste capítulo utilizam a plataforma do programa ENVI-met,² presente nas pesquisas de Hirashima (2010), Werneck (2018), Silva (2009), Castelo Branco (2009), Souza *et al.* (2010) e Silva (2013). Um dos primeiros exemplos marcantes da eficácia do tipo de cálculo desenvolvido pelo programa ENVI-met está na pesquisa de Han, Mun e Huh (2007), quando investigaram as mudanças do microclima e a redução na escala urbana da carga de refrigeração resultantes do córrego Cheonggye, em Seul. O referido corpo de água restaurado resgatou a qualidade ambiental para a região, e o procedimento de revitalização dessa área contou com simulações computacionais do ENVI-met.

Embora o programa trabalhe com a interface tridimensional do clima situada em uma dimensão geográfica, os tipos desenvolvidos na análise são objetos projetados na microescala urbana, objeto de trabalho do arquiteto e urbanista. Dessa maneira, é fundamental compreender a dimensão bioclimática da configuração do espaço construído. Para isso, pode-se avaliar o impacto do microclima do espaço aberto no desenvolvimento das atividades humanas, visto que são inúmeras as interferências microclimáticas no meio urbano, como, por exemplo, a distribuição

² O *software* ENVI-met foi desenvolvido por Michael Bruse, Universidade de Bochum, Alemanha. Mais informações sobre esse programa, vide tópico 5 do Capítulo 2.

do tráfego, que pode tornar o impacto do microclima muito maior e mais visível. A conformação do espaço aberto é capaz de criar diferentes microclimas, dependendo do seu arranjo configuracional. Desse modo, investiga-se qual arranjo seria capaz de contribuir para, nas palavras de Bruse (2007), obter um “clima otimizado”.

O ENVI-met permite a geração de inúmeros tipos com agilidade, além de apresentar resultados com satisfatória precisão de cálculos. Outra vantagem do ENVI-met é a possibilidade de gerar resultados espacializados para diversas horas do dia; são mapas gerados pelo *plug-in* Leonardo que permitem a criação de mapas com legendas autoexplicativas e a extração de dados tanto no plano horizontal (x-y) quanto no plano vertical (x-z) ou (y-z). A plataforma computacional ENVI-met foi escolhida pela simplicidade da execução do processo de modelagem. O *software* também foi selecionado em outros estudos precursores no DF (CASTELO BRANCO, 2009; WERNECK, 2018).

4.1 Critérios e parâmetros do ENVI-met

Requisitos mínimos para a simulação bioclimática urbana participam da criação do arquivo de configuração climática exigido pelo programa ENVI-met, além da definição dos horários de simulação organizados neste tópico.

Os horários definidos para a simulação buscaram abranger a maior parte do dia: 6h, 9h, 12h, 15h, 18h e 21h, tendo sido registradas as simulações para cada 3h em virtude de orientação técnica da Organização de Meteorologia Mundial (OMM). Em um segundo momento, um horário para cada turno do dia foi selecionado para uma análise pormenorizada.

Antes do início do processo de simulação, são marcados os parâmetros a serem avaliados. Para essas simulações, foi selecionado exclusivamente o índice PMV-value, parâmetro que já é oferecido pelo programa ENVI-met como uma das opções de resultados, ou *output*. A partir disso, o programa utiliza algoritmo de cálculo segundo a fórmula de Fanger para o PMV, parâmetro adotado para a

avaliação do grau de conforto térmico. Os dados utilizados nas simulações de PMV estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Configuração básica para o índice PMV

Configuração PMV	Dados
Configuração de caminhada do pedestre	0,3 m/s
Energia e metabolismo do pedestre	116
Índice de percentual de vestimenta	0,5

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

A configuração climática para a cidade de Brasília a ser utilizada no programa foi calibrada por intermédio dos valores pesquisados por Castelo Branco (2009), validados por pesquisa de campo realizada pela equipe do Laboratório de Sustentabilidade Aplicada a Arquitetura e Urbanismo (LaSUS), em 2009, durante o Estudo de Impacto de Vizinhança da Região do Gama (SILVA, 2009; ROMERO, 2010).

Tabela 2: Configuração climática básica do programa ENVI-met (3.0)

Dados	Época seca	Época úmida
Dia típico	08.09.2008	13.01.2009
Horário de início de simulação	6 h	6 h
Velocidade do vento a 10 m (m/s)	1,4	1,2
Direção do vento (0:N;90:E.180:S.270:W)	90°	315°
Rugosidade da superfície de referência	1	1
Temperatura atmosférica inicial (K)	311	309
Umidade específica a 2.500 m (gWater/Kg air)	5,05	9,66
Umidade relativa a 2,0 (%)	17	61

Fonte: Castelo Branco (2009, p. 46).

Os dados que alimentam a configuração climática do programa são pesquisados na estação climatológica de referência da cidade analisada, no caso, de Brasília. Em caso de indisponibilidade dessas informações, são utilizados dados oficiais disponibilizados nas estações dos aeroportos, neste caso, do Aeroporto de Brasília. Ressalta-se que os dados apresentados na tabela como conformadores da configuração climática de Brasília foram avaliados em várias situações durante uma ampla pesquisa desenvolvida no âmbito do LaSUS (ROMERO, 2010). Dessa forma, passou-se a ter alguma confiabilidade dos dados obtidos por Castelo Branco (2009) (Tabela 2).

Os dados de Castelo Branco foram atualizados por Werneck (2018) para o uso da versão 4.0 do programa ENVI-met (Tabela 3).

Tabela 3: Configuração climática básica do programa ENVI-met (versão 4.0)

(continua)

Dados	Época seca
Dia típico	Setembro
Horário de início de simulação	06 h
Velocidade do vento a 10 m (m/s)	2,42
Direção do vento (0:N;90:E.180:S.270:W)	114° (Média do dia – INMET)
Rugosidade da superfície de referência	0,01
Umidade específica a 2.500 m (gWater/Kg air)	9,11
Umidade relativa a 2,0 m (%) Mínima (Hora)	44 %% (16 h)
Umidade relativa a 2,0 m (%) Máxima (Hora)	87 % (02 h)
Temperatura do Ar (oC) Mínima (Hora)	19° C (06 h)
Temperatura do Ar (oC) Máxima (Hora)	27,2° C (15 h)
Temperatura Atmosférica Inicial (K)	293 K

Tabela 3: Configuração climática básica do programa ENVI-met (versão 4.0)

(conclusão)

Dados	Época seca
Umidade relativa – camada superficial (0-20 cm)	50%
Umidade relativa – camada abaixo de 50 cm	60%
Nebulosidade (oitavas) baixas/médias/altas	4,00/0/0

Fonte: Werneck (2018, p. 82).

Com a finalidade de destacar os horários cujas mudanças de microclima sejam mais sensíveis, percebeu-se que o horário inicial da manhã (9h) e do final da tarde (18h) mantiveram um alto grau de variação em relação aos diferentes aspectos levantados. Assim, pesquisas semelhantes desenvolvidas na área do microclima urbano endossam a definição de utilizar o horário das 18h da tarde. Ballester-Olmos (2010) afirma que os contrastes térmicos são mais sensíveis no fim da tarde, o que pode ser apoiado na pesquisa mencionada desenvolvida pelo LaSUS, quando os horários das 18h foram aqueles cujos tipos destacaram mais claramente as áreas que elevaram o grau de desconforto na maioria dos tipos analisados. Após configuração climática do *software*, é necessário apresentar, de modo simplificado, os procedimentos metodológicos.

4.2 Procedimentos metodológicos da simulação com o ENVI-met

O fluxograma a seguir descreve os primeiros passos metodológicos que conduziram a etapa de avaliação computacional da pesquisa, ou seja, o percurso pelo desenvolvimento de tipos de cavidades urbanas, pelo posterior processo de modelagem 3D na interface no ENVI-met, pela configuração climática para a época seca de Brasília, considerando a inserção das especificações de simulação com o parâmetro PMV a ser avaliado, pela extração dos dados simulados, pela organização de

quadros para simplificar a sua interpretação, e, por fim, pela elaboração de planilhas dos dados simulados para, após tratamento estatístico, gerar com mais qualidade os resultados da pesquisa (Figura 4).

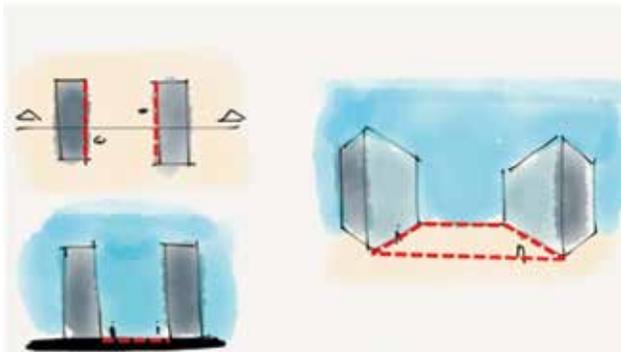
Figura 4: Fluxograma de procedimentos metodológicos para a simulação



Fonte: Elaboração dos autores (2016).

Os cenários criados são hipotéticos, e os números da sua configuração urbana, representados neste capítulo pela relação largura-altura da rua em relação aos edifícios que a limitam, são conhecidos como W/H , ou na literatura internacional como H/W . Os valores de W/H foram calculados utilizando-se números próximos a valores de configurações urbanas comuns em cenários urbanos, onde a superfície do solo é o que representa a cavidade urbana (Figura 5).

Figura 5: Desenho esquemático de exemplo de cavidade urbana



Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Em um segundo momento, foram extraídos os valores de alturas a partir das alturas regulares de edifícios (por exemplo, um pavimento, dois pavimentos, três pavimentos) e larguras comuns de ruas (por exemplo, uma faixa de rolamento, duas faixas de rolamento, três faixas de rolamento).

Para controlar a área da análise em questão, foi definida uma área quadrada de 100 m^2 , de modo que a dimensão do comprimento da rua também foi definida como 10 m. Com base nessa rua hipotética, foram definidas as diferentes alturas das edificações.

Uma caixa viária fictícia de 10 m de largura no plano da base, que representa a variável W na fórmula do W/H , serviu como base para que fossem calculados diferentes valores para a altura do conjunto edificado, de forma que conformaria a cavidade urbana.

Na pesquisa, em que os tipos representam cenários urbanos corriqueiros, foram criados 21 cenários representativos. O tipo 0 (também chamado de M_0) parte da menor relação analisada: 0,1, finalizando no tipo 20 (M_{20}), cuja relação é a maior analisada: 10. Acredita-se que, com os 21 cenários, grande parte das relações existentes entre altura edificada e recuo entre os edifícios esteja representada. Nesse sentido, tem-se a análise do desempenho do ambiente urbano configurado pelas cavidades urbanas.

5. Desempenho térmico das cavidades urbanas

São indicados os valores de PMV organizados por materiais, por horário e por orientação. Dessa forma, é possível obter o desempenho isolado das cavidades de melhor desempenho e associar o grau de conforto térmico ao seu material de configuração: árvore, grama, pedra, solo natural, asfalto ou concreto.

5.1 Orientação leste-oeste

É possível concluir que para os tipos orientados para leste-oeste, no horário da manhã (9h), apenas os tipos configurados com árvore ou grama obtiveram valores de PMV menores que 2,0. A partir do M_{14} , os valores de PMV atingem os valores

mais baixos, iguais a 1,25. Outro tipo que obteve desempenho regular é o M01. No horário da manhã, ainda é possível concluir que os materiais concreto e pedra obtiveram os piores desempenhos térmicos (Tabela 4).

Tabela 4: Resultados de PMV para tipos orientados para leste (9h)

(continua)

Modelos (L)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M0	2,75	2,75	2,75	1,75	2,25	2,25
M1	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M2	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M3	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M4	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M5	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M6	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M7	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M8	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M9	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M10	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M11	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M12	1,75	1,75	1,75	2,75	2,75	2,75
M13	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M14	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75

Tabela 4: Resultados de PMV para tipos orientados para leste (9h)

(conclusão)

Modelos (L)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M15	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M16	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75
M17	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M18	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75
M19	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M20	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

No horário da tarde (18h), há uma grande uniformidade de desempenho térmico, quando os valores máximos de PMV causam desconforto térmico. Apenas os tipos configurados com árvore e grama possuem valores de PMV abaixo dos valores extremos, ou seja, tipos acima do M14. O tipo M1 também obteve, isoladamente, valor de PMV inferior ao valor máximo, ou seja, 2,25 (Tabela 5).

Tabela 5: Resultados de PMV para tipos orientados para leste (18h)

(continua)

Modelos (L)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M0	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M1	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M2	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75

Tabela 5: Resultados de PMV para tipos orientados para leste (18h)

(conclusão)

Modelos (L)	Gramma	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M3	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M4	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M5	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M6	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M7	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M8	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M9	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M10	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M11	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M12	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M13	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M14	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M15	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M16	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M17	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M18	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M19	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M20	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

5.2 Orientação norte-sul

Os tipos orientados para norte-sul, no horário da manhã (9h), possuem resultados mais variados. Vê-se também que os tipos configurados como árvore ou grama obtiveram valores de PMV menores que 1,5. No entanto, também é notório que tipos inferiores a M7 são os com melhor desempenho em todas as configurações.

Ainda no horário da manhã (9h), o tipo M01 destaca-se dos demais, pois possui valores que denotam uma leve sensação de frio (PMV = -0,25). Os tipos M02, M3, M4 e M5 (especialmente) possuem valores de PMV inferiores a 1,0, que implica uma sensação de leve calor e, portanto, considerada aceitável.

Os materiais concreto, asfalto e pedra acumularam os maiores valores de PMV e, por isso, conformam situações de maior desconforto térmico. Entre todos, os tipos a partir do M07 possuem concreto e asfalto já em condição de desconforto extremo (valor de PMV superior a 2,5) (Tabela 6).

Tabela 6: Resultados de PMV para tipos orientados a norte (9h)

(continua)

Modelos (N)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M0	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
M1	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25
M2	0,25	0,25	0,25	0,75	0,75	0,75
M3	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
M4	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
M5	0,25	0,25	0,25	0,75	0,25	0,75
M6	0,75	2,25	0,75	0,75	0,75	0,75
M7	2,25	1,75	0,75	0,75	2,75	2,75

Tabela 6: Resultados de PMV para tipos orientados a norte (9h)

(conclusão)

Modelos (N)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M8	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M9	2,25	2,25	0,75	2,75	2,75	2,75
M10	2,25	2,25	0,75	2,75	2,75	2,75
M11	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M12	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M13	2,25	1,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M14	1,25	2,25	1,75	2,25	2,25	1,75
M15	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M16	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75
M17	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M18	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75
M19	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M20	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Observando o horário da tarde (18h), é possível detectar que os tipos de M06 a M14 possuem desempenho regular. Os tipos de menor desempenho térmico são os tipos de M01 a M05 e os tipos superiores a M15. Visualizam-se, portanto, três patamares de cavidades urbanas (Tabela 7).

Tabela 7: Resultados de PMV para tipos orientados a norte (18h)

(continua)

Modelos (N)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M0	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
M1	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M2	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M3	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M4	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M5	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M6	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M7	1,75	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25
M8	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M9	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M10	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M11	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M12	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M13	1,75	1,25	1,75	2,25	2,25	2,25
M14	2,25	2,75	1,25	1,75	1,75	1,75
M15	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M16	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M17	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M18	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75

Tabela 7: Resultados de PMV para tipos orientados a norte (18h)

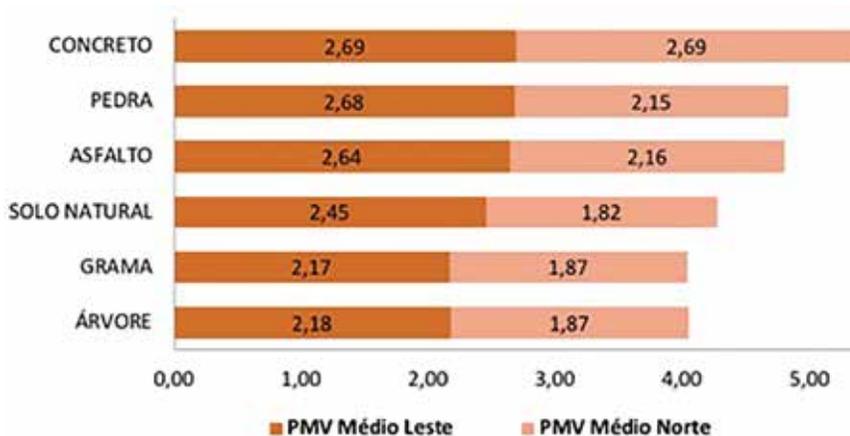
(conclusão)

Modelos (N)	Gramma	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M19	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M20	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Apresentam-se no Gráfico 2 as contribuições de cada material urbano para o índice PMV de conforto térmico. Os resultados mostram que os materiais impermeáveis (asfalto, concreto e pedra) são os maiores responsáveis pelo aumento do valor de PMV e, portanto, pela sensação de desconforto. Em contrapartida, os materiais permeáveis (árvore, grama e solo natural) são os que menos contribuem para o desconforto térmico. A contribuição de cada material para o índice PMV pode ainda ser obtida por meio dos valores médios de PMV para os cenários simulados para as horas de referência 9h e 18h (Gráfico 1).

Gráfico 1: Contribuição dos materiais urbanos para o índice PMV



Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Analisando-se os materiais permeáveis representados pelos modelos com árvores, grama e solo natural contribuem para o conforto térmico, assumindo melhor efeito nos tipos de orientação norte-sul. Nos tipos de orientação leste-oeste, esses materiais conferem um melhor desempenho térmico a quase todos os tipos, especialmente do tipo M01 ao tipo M14.

5.3 Resultados e categorização das cavidades urbanas

Este tópico desenvolve a análise final das cavidades urbanas. Durante a análise, conceitua-se e cria-se categorias de cavidades quanto ao seu desempenho térmico. Para isso, foi feita uma análise de variância aliada ao teste de Tukey por meio do *software* PAST (Versão 3.19). Os valores do índice PMV foram extraídos, em todas as simulações, das seis configurações de elementos de revestimento do solo. De acordo com ele, é possível concluir quais dos materiais avaliados apresentam valores de PMV com variância significativa, ou seja, que represente uma categoria de cavidade urbana.

Por meio dos resultados da análise de variância, é possível selecionar os cenários que, submetidos às mesmas condições climáticas, possuem resultados mais estáveis e, logo, confiáveis, o que permite uma análise de dados mais precisa.

Os altos valores de PMV (acima de 1,5) no horário das 18h mostram que os edifícios bloqueiam o vento leste predominante na região de Brasília, o qual é fundamental para favorecer as trocas térmicas do solo com o ar. Esse horário representa o pico de desconforto durante o dia, e essa morfologia impede que a superfície urbana perca calor com a chegada das brisas noturnas a partir desse horário.

Os altos valores de PMV no horário noturno mostram que edifícios de maior gabarito podem bloquear o vento leste, pois essa configuração impede que a superfície urbana perca calor com a chegada das brisas noturnas.

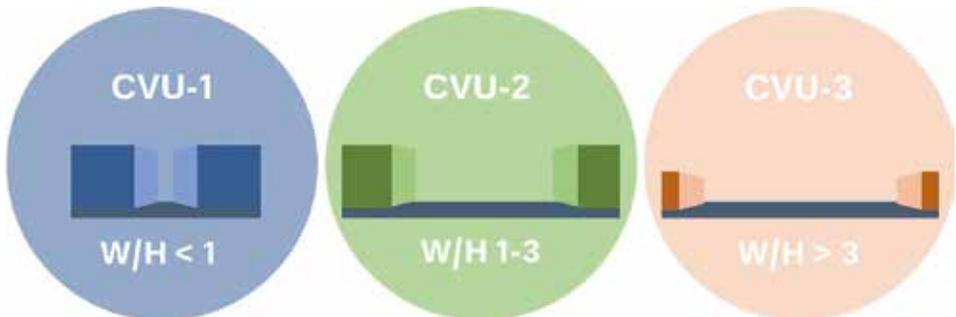
É possível concluir que, para os tipos orientados para leste-oeste, no horário da manhã (9h), apenas os tipos configurados como permeáveis obtiveram uma

situação de conforto mais adequado. No horário da tarde (18h), há uma grande uniformidade de desempenho térmico.

Na análise dos resultados dos níveis de PMV, entre os 21 tipos analisados, não foi identificada uma diferença significativa entre os materiais componentes do cenário urbano; no entanto, calculou-se uma correlação entre a relação W/h de todos os modelos e o nível de conforto atingido. Por isso, partiu-se para a definição de categorias de tipos, uma vez que a observação dos valores de PMV permitiu uma compreensão das categorias de cavidades urbanas. Sendo assim, os dados analisados foram submetidos à análise de variância.

Por fim, chegou-se à definição de três categorias de cavidades urbanas com base na relação W/h e no seu desempenho climático (Figura 6):

Figura 6: Categorias de cavidades urbanas



Fonte: Elaboração dos autores (2016).

Os tipos que representam as cavidades com W/h superiores a 7 não possuem o desempenho climático previsível como o das demais cavidades, logo, compreende-se que o microclima de configurações com relação W/h superiores a 7 não são conformados por essa configuração urbana. Sendo assim, chega-se ao conceito de cavidade urbana: significa a conformação urbana cuja relação W/h tem valores entre 0 e 7, uma vez que valores acima de 7 não possuem o seu microclima condicionado pela configuração urbana da microescala, mas do mesoclima ou do macroclima.

6. Considerações finais

A compreensão do ambiente construído passa a ter, com o uso das tecnologias, outro nível de aprofundamento. Aliado a isso, a previsão de problemas de ordem ambiental por meio de simulações computacionais pode apontar importantes soluções com baixo custo operacional. Especificamente no caso no ENVI-met, pode-se afirmar o baixo custo operacional, uma vez que se trata de um *freeware*.

A experiência no uso de simulações computacionais permitiu que fosse recortado um grande número de tipos para que elas fossem suficientes para a obtenção de resultados palpáveis. Essas simulações realizadas puderam oferecer um resultado útil que servirá de subsídio para uma planilha de análise de cavidades urbanas.

O uso da ferramenta computacional mostrou-se como uma estratégia útil, pois possibilitou a ampla análise de 252 cenários diferentes. Com essa avaliação, iniciou-se o preenchimento de planilhas do Excel, nas quais foi possível tabular e analisar estatisticamente os valores calculados pelas simulações de modo mais rápido e organizado.

Para a confiabilidade dos dados, no entanto, é essencial que a fonte deles seja segura e de uma estação climatológica mais próxima possível da área de estudo. Assim, reafirma-se que o uso de ferramentas computacionais na avaliação ambiental pode auxiliar na tomada de decisões em estudos prognósticos e na construção de um espaço mais qualificado ambientalmente. Dessa forma, pesquisas específicas que consigam oferecer propostas objetivas que amenizem o impacto ambiental causado pelo processo de urbanização são muito válidas.

Por outro lado, conforme apontado neste capítulo, há a limitação de acesso ao banco de dados do INMET e a do contexto climático do DF, que exige uma abordagem restrita.

A apresentação dos temas climatologia e conforto térmico baseada em um ponto de vista urbanístico foi destaque em muitas pesquisas voltadas para as

alterações que as atividades urbanas geraram no espaço construído. Nesse sentido, este capítulo se posiciona como um instrumento didático para que arquitetos e urbanistas compreendam melhor a dinâmica do clima urbano, sobretudo daquele que se processa na microescala urbana, e passem a assumir o papel de construtores de um microclima urbano mais confortável, visto que, a cada dia, são disponibilizados mais instrumentos de controle da qualidade ambiental. Observa-se que o programa ENVI-met concentra a modelagem e a simulação, facilitando o processo de trabalho e evitando o uso de outra ferramenta. Logo, o próprio programa é o responsável pela geração de todos os dados modelados e simulados; outra vantagem dele está na simplificação no processo de modelagem e na gratuidade para o desenvolvimento das simulações.

Para facilitar a interpretação dos resultados de conforto térmico, optou-se pelo uso do índice PMV de Fanger. O uso desse índice mostrou-se de fácil compreensão, pois trabalha com o conceito de *equilíbrio térmico*. Os valores foram sempre de interpretação direta e, ao serem utilizados na plataforma do programa ENVI-met, poupou-se um conjunto de operações e retrabalho, como não ocorreria se fosse empregado outro índice para os dados coletados em campo. Essa definição do índice PMV e da utilização do programa ENVI-met buscou evitar erros advindos da falta de controle de informações, caso fossem manipuladas outras ferramentas.

Com os dados obtidos pelas simulações de conforto térmico realizadas nas cavidades urbanas modeladas, obteve-se um banco de informações técnicas contendo o desempenho térmico de diferentes morfologias urbanas, as quais, por sua vez, eram compostas por diferentes materiais urbanos, todos submetidos ao contexto climático do DF. Dessa forma, analisa-se o desempenho de diferentes frações urbanas quanto ao seu nível de conforto térmico, para que, em um segundo momento, possa se estabelecer diretrizes específicas comprometidas com a construção de um espaço urbano com mais qualidade ambiental do ponto de vista do conforto térmico.

Por fim, com base na relação W/h e no seu desempenho climático, as cavidades foram classificadas em três categorias, com as suas respectivas recomendações para o contexto climático de Brasília:

- CVU-1: de W/h entre 0 e 1: não são recomendadas para o clima de Brasília, pois geram acúmulo de calor (exceção: ZB 4C, ausência de verão mais rigoroso). São consideradas cavidades urbanas desconfortáveis termicamente.
- CVU-2: de W/h 1 a 3: são recomendadas, desde que a base da cavidade conformada com solo seja permeável. São consideradas, portanto, cavidades confortáveis termicamente.
- CVU-3: de W/h entre 3 e 7: são indiferentes à morfologia urbana, portanto, podem ser recomendadas independentemente do tipo de solo da base, mas não garantem o conforto térmico.

Para trabalhos futuros, há a proposta da elaboração de uma ferramenta de análise do microclima do ambiente urbano em sua realidade mesoclimática e na compreensão da sazonalidade do clima, o que pode ser uma limitação dos experimentos desenvolvidos pelo ENVI-met por conta do seu único arquivo climático.

O acesso aos dados de análise do desempenho do ambiente urbano auxilia, didaticamente, o projetista do espaço urbano. Com base na morfologia de sua fração urbana projetada ou analisada e na definição de materiais de revestimento das superfícies urbanizadas, ele pode detectar qual o grau de conforto térmico proveniente de sua proposta urbanística, após tê-lo submetido aos diferentes períodos climáticos do DF.

No âmbito das legislações locais, uma maneira de contribuir é buscando métodos de avaliação aplicáveis na escala intraurbana, visto que nesta escala o ambiente pode ser modificado com mais agilidade, e a sociedade pode obter respostas mais emergentes. Nesse sentido, uma das formas viáveis de oferecer intervenções

urbanísticas que qualifiquem as cidades é monitorar a sua qualidade por meio de índices, como o de conforto térmico adotado na pesquisa.

Outra prospecção da pesquisa é fomentar o uso da simulação computacional para o ambiente urbano. Além disso, pretende-se disseminar a lógica da retroalimentação, que implica utilizar os dados simulados para a compreensão dos fenômenos climáticos urbanos e do seu impacto no ambiente construído e, assim, com base nesse comportamento, avaliar e testar as soluções mais adequadas, compreendendo o método da simulação como uma parte do processo na busca por cenários mais sustentáveis.

Referências

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 15220-3: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social*. Rio de Janeiro, 2005.

ALVAREZ, Clayton *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2015.

AKUTSU, Maria; VITTORINO, Fúlvio; YOSHIMOTO, Mitsuo. Método expedito para avaliação do desempenho térmico de habitações. In: III ENCONTRO NACIONAL E I ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO., 1995, Gramado, RS. *Anais [...]*, 1995.

ANJOS, Rafael Sanzio Araújo dos. *Dinâmica territorial: cartografia, monitoramento e modelagem*. Brasília, DF: Mapas Editora & Consultoria, 2008.

ARozTEGUI, José Miguel. Cuantificación del impacto de las sombras de los edificios. In: III ENCONTRO NACIONAL E I ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO., 1995, Gramado, RS. *Anais [...]*, 1995.

BALLESTER-OLMOS, José Francisco. *Interacciones de la vegetación urbana con el microclima*. Barcelona: Editora Universitat Politècnica de València, 2010.

BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Estudo multitemporal do fenômeno Ilhas de Calor no Distrito Federal. *Revista Meio Ambiente*, n. 2, p. 3-17, 2002.

BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Ilhas Urbanas de Calor. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n. 8, p. 54-59, 2003.

BARBIRATO, Giana Melo. O uso da modelagem climática no planejamento dos espaços urbanos. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Fortaleza, 1999.

BRUSE, Michael. Simulating human thermal comfort and resulting usage patterns of urban open spaces with a Multi-Agent System. In: WITTKOPF, St.; TAN, B. K. (Ed.). *Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA*, 2007. p. 699-706.

BRUSE, Michael. *ENVI-met 3.0 On-line Manual*. Disponível em: <http://www.ENVI-met.com>. Acesso em: 13 out. 2016.

BRUSE, Michael; FLEER, Heribert. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, n. 13, p. 373-384, Oct. 1998.

CASTELO BRANCO, Lorena Mileib Burgos. *Microclimas urbanos no Plano Piloto de Brasília: o caso da Superquadra 108 Sul*. 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CARDOSO, Murilo Raphael Dias; MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha; BARROS, Juliana Ramalho. Classificação Climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e Distrito Federal. *ACTA Geografia*, v. 8, n. 16, p. 40-55, jan. mar. 2014.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. *Modelagem de sistemas ambientais*. São Paulo: Edgar Blucher, 1999.

CODEPLAN (Companhia de Planejamento do Distrito Federal). *Atlas de Mapas do Distrito Federal*, 1986. Disponível em: <http://www.sedhab.df.gov.br>. Acesso em: 20 ago. 2012.

GIVONI, Baruch. Urban design in different climates. *WMO/TD*, n. 346. World Meteorological Organization, 1989.

GIVONI, Baruch. *Man, Climate and Architecture*. Amsterdam; London; New York: Elsevier Publishing Company Limited, 1969.

HAN, Soo-Gon; MUN, Sun-Hye; HUH, Jung-Ho. Changes of the micro-climate and building cooling load due to the green effect of a restored stream in Seoul, Korea. *Proceedings: Building Simulation*, 2007.

HIRASHIMA, Simone Queiroz da Silveira. *Calibração do índice de conforto térmico temperatura fisiológica equivalente (PET) para espaços abertos do município de Belo Horizonte, MG*. 225f. 2010. Dissertação (Mestrado Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, Belo Horizonte, 2010.

INSTITUTO Nacional de Meteorologia. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Fundamentos das Normais Climatológicas do Brasil. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 13 out. 2016.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Atlas das normais climatológicas*, 2009.

IRVING, A. D. Validation of dynamic thermal models. *Energy and Buildings*, Lausanne, Switzerland, v. 10, n. 3, p. 213-220, Jan. 1988.

KÖPPEN, Wladimir. *Climatologia*. México: Fondo de Cultura Económica, 1948.

LABORATÓRIO de Sustentabilidade Aplicada à Arquitetura e ao Urbanismo. *Projeto do Centro de Recuperação de Áreas Degradadas*. Disponível em: <http://www.lasus.unb.br>. Acesso em: 13 out. 2016.

LEDO, Andrés Reudo. *Ciudad y desarrollo urbano*. Madrid: Sintesis, 1996. (Colección Espacios e Sociedades.).

LYNCH, Kevin. *A boa forma da cidade*. Tradução de José Manuel Costa Almeida e Pinho. Lisboa: Edições 70, 1981.

LYNN, M. Presentation in SIMBUILD Conference. *American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*, 2010.

MONTENEGRO, Gildo A. *Desenho arquitetônico*. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2001.

OKE, Timothy R. *Boundary layer climates*. London; New York: Routledge, 1987.

RAUBER, D. L. *et al.* Comparação de *softwares* de análise térmica de edificações: resultados para um projeto padrão e interface programa-usuário. In: ENTAC/SOBRAC/ABERGO. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. *Anais...* Florianópolis, 1993.

REINHART, Christoph. F.; MARDALJEVIC, John.; ROGERS, Zack. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos*, v. 3, n. 1, p. 7-31, July 2006.

RORIZ, Maurício. *Uma proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro*. Relatório do Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações, São Carlos, 2012.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. *Urbanismo sustentável*. Notas de Aula. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2010.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. *Arquitetura do lugar: uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília*. São Paulo: Nova Técnica, 2011.

SILVA, Caio Frederico e. *Simulação computacional aplicada à reabilitação urbana de setores do Distrito Federal*. 2009. Monografia de Especialização, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA, Caio Frederico e; UWAI, Paulo A. Ribeiro; OLIVEIRA, Isabella F. Capanema de. Computer simulation of three Mesoclimatic urban the Federal District of Brazil. *Procedia Engineering*, v. 169, p. 280-288, Elsevier, 2016.

SOUZA, Léa Cristina Lucas de. Identificação de ilhas urbanas de calor através da interpretação de imagem de satélite. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Florianópolis, 1993.

SOUZA, Léa Cristina Lucas de *et al.* Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. *Ambiente Construído*, 2010.

SOUZA, Léa Cristina Lucas; RODRIGUES, Daniel S.; MENDES, José F. G. Sky view factor estimatin using a 3D-GIS extension. Proceedings of Eighth International IBPSA Conference. Eindhoven, Netherlands, p. 1227-1234, 2003.

WERNECK, Daniela Rocha. *Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas: estudo de caso em áreas comerciais em Brasília-DF*. 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Brasília, 2018.



CAPÍTULO 2

Caracterização de dados e arquivos climáticos de Brasília para simulação higrotérmica

Vanda Alice Garcia Zanoni e José Manoel Morales Sánchez

1. Sobre dados e arquivos climáticos

As simulações computacionais aplicadas aos estudos da eficiência termoe-nergética, conforto térmico e desempenho higrotérmico das edificações utilizam as variáveis climáticas como dados de entrada, sendo o conjunto desses dados denominado *arquivo climático*.

Os estudos higrotérmicos referem-se ao campo conceitual da física das cons-truções, que estuda o transporte de calor, de umidade e de ar nos componentes e ambientes construídos (CIB W040, 2012; ASHRAE, 2017).

Em geral, os programas computacionais para simulação higrotérmica requerem um ano climático com 8.760 dados horários como arquivo climático representa-tivo do clima local. Por vezes, são requeridos somente alguns dados climáticos. Nesse caso, para alimentar os dados de entrada, costumam-se adotar como parâ-metros, por exemplo, dias típicos de verão e de inverno ou valores máximos e mínimos anuais.

A qualidade dos resultados obtidos nas simulações computacionais é fortemente dependente da qualidade dos dados de entrada. Para tanto, é necessário que o utilizador tenha controle sobre a seleção do arquivo climático, baseado no conhecimento das características e comportamento das variáveis climáticas.

Visando estabelecer uma base referencial para a seleção de arquivos climáticos representativos do clima local e análise de sensibilidade,¹ neste capítulo são apresentados os estudos realizados para a caracterização das variáveis climáticas da cidade de Brasília, com base nos valores médios, mínimos, máximos e nas frequências de ocorrência, em seu comportamento cíclico e sazonal ao longo do ano.

Para os estudos de caracterização das variáveis climáticas, foram utilizados dados horários medidos por 13 anos, no período de 2001 a 2013, pela estação meteorológica automática de superfície A001-Brasília, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Nesse contexto, para melhor fundamentar a seleção de um ano climático para os estudos higrotérmicos por meio de simulação computacional, são apresentados os tipos de arquivos climáticos disponíveis para Brasília, assim como os principais aspectos que influenciam a representatividade desses arquivos.

A Irradiância Global Horizontal (GHI: *Global Horizontal Irradiance*) é uma das principais variáveis climáticas que afetam o comportamento higrotérmico das edificações. Segundo o INMET (1999), a radiação solar é uma das variáveis mais difíceis de se obter, com confiabilidade e precisão, por meios automáticos. Por essas razões e com base nessa variável, foi elaborado um estudo comparativo entre os arquivos de ano climático disponíveis para Brasília e a série 2001-2013/INMET de dados climáticos horários usados na caracterização.

¹ *Análise de sensibilidade* é um termo definido pela ISO 15686-5 – *Buildings and constructed assets – Service-life planning. Parte 5 – Life-cycle costing* (BS, 2008) e refere-se aos testes de resultado de uma análise, alterando um ou mais parâmetros do valor inicial [test of the outcome of an analysis by altering one or more parameters from initial value].

A Tabela 1 mostra as variáveis climáticas utilizadas nos estudos de caracterização, assim como as quantidades de horas registradas e os respectivos percentuais de dados nulos obtidos do arquivo climático da série 2001-2013/INMET para Brasília.

Tabela 1: Quantificação dos dados horários das variáveis climáticas da série 2001-2013/INMET – Estação meteorológica automática em Brasília A001 – Código 86715

Variáveis climáticas	Série 2001-2013	Horas com dados nulos (h)	% de dados nulos
Temperatura do ar (°C)	113.880	4.221	3,71
Umidade relativa do ar (%)	113.880	4.226	3,71
Temperatura máxima (°C)	113.880	4.465	3,92
Temperatura mínima (°C)	113.880	4.466	3,92
Vento-velocidade (m/s)	113.880	4.869	4,28
Vento-direção (graus)	113.880	4.873	4,28
Radiação global horizontal (Wh/m ²)	113.880	12.125	10,65
Precipitação (mm)	113.880	4.343	3,81
Nebulosidade (variando de 1 a 10)	14.231**	-	-

** Diariamente, a variável nebulosidade é obtida visualmente por um observador, nos três horários sinóticos.

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Para os estudos de caracterização, considerando-se o tamanho da amostra (13 anos de dados horários) e o percentual de dados nulos (10% ou menos), foi tomada a decisão de não preencher os dados nulos da série 2001-2013, mantendo-se, assim, somente os arquivos com os dados medidos válidos, de forma a não incorrer no risco de se alterar o comportamento dos dados reais (ZAHUMENSKÝ, 2004; ZANONI *et al.*, 2015).

2. Caracterização das variáveis climáticas de Brasília

Quanto aos aspectos gerais do clima, a cidade de Brasília-DF está localizada na latitude 15,78° Sul, longitude 47,92° Oeste e altitude média de 1.160 m. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima de Brasília caracteriza-se como Clima Tropical (A) com inverno seco (W). A cidade possui forte sazonalidade das chuvas, com duas estações bem distintas (ALVARES *et al.*, 2013). Situada no Planalto Central do Brasil, Brasília está localizada em um sítio convexo, aberto a todas as influências dos ventos predominantes (ROMERO, 2000).

O período chuvoso, sob a influência da Massa Equatorial Continental, compreende a primavera e o verão. Em relação à condição de tempo, nessa época, em geral, a cidade apresenta-se com céu nublado, evoluindo à tarde para encoberto com pancadas de chuvas e trovoadas, e ventos de rajadas moderadas a fortes. O período seco, que se estende pelo outono e inverno, com predomínio da Massa Equatorial Atlântica, apresenta boas condições de tempo em todo o Planalto Central, com sucessivos dias de céu claro pela manhã e à noite, nublado à tarde, com forte incidência de névoa seca, especialmente ao final do inverno (SALES; REBELLO; SILVA, 2010).

2.2 Precipitação

A precipitação é um conjunto de partículas líquidas ou sólidas que caem das nuvens em forma de chuva, chuveiro, neve, granizo, nevoeiro, bruma, geada ou orvalho. É medida em milímetros (mm), por meio de pluviômetro: uma lâmina de 1 mm de espessura corresponde a 1 litro de água em uma superfície plana horizontal de um metro quadrado. A intensidade da precipitação é o volume de água que cai na unidade de tempo. As medições podem ser registradas em milímetros por hora (INMET, 1999). O Quadro 1 apresenta uma classificação dos tipos de precipitação e suas características.

Quadro 1: Classificação do grau de intensidade da precipitação e suas características

Classificação	Intensidade e características	
Chuva ou chuvisco inapreciável (INAP)	Precipitação cuja quantidade não consegue ser acumulada.	
Chuvisco	Precipitação até 1,0 mm por hora	
Chuva fraca	Precipitação de 1,1 mm por hora até 5,0 mm por hora ou, no máximo, 0,8 mm em 10 minutos.	As gotas de chuva são bem destacadas; os pingos nos telhados são fracos; as poças de água formam-se lentamente; as superfícies secas levam cerca de dois minutos para se umedecerem; fios de água correm nas sarjetas das ruas.
Chuva moderada	Precipitação de 5,1 mm por hora até 60,0 mm por hora ou, no máximo, 6,0 mm em 10 minutos.	As gotas de chuva são bem identificadas, e ao encontrarem superfícies duras provocam borrifos; o escoamento das águas nas calhas dos telhados vai de um terço a mais da metade da sua capacidade; a queda das chuvas nos telhados provoca ruídos assemelhados a desde um simples chiado até o bater de tambores.
Chuva forte	Precipitação acima de 60,0 mm por hora ou de 10,0 mm em 10 minutos.	A chuva cai torrencialmente, e todas as demais características são mais acentuadas que as indicadas para chuva moderada.

Fonte: INMET (1999, p. 18).

As chuvas em Brasília ocorrem, principalmente, de setembro a abril. A Tabela 2 e a Figura 1 apresentam as médias mensais de precipitação em cada mês do ano, com base na série 2001-2013/INMET.

Tabela 2: Intensidade da precipitação mensal e anual (mm) da série 2001-2013/INMET para Brasília

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total anual
216,0	164,2	187,9	132,0	18,5	2,1	2,4	15,2	33,8	138,7	220,8	242,2	1373,8

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 1: Comportamento da precipitação ao longo do ano (mm) da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Na série 2001-2013/INMET, em 13 anos de dados horários analisados, foi identificado que os seis meses mais chuvosos do ano (outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março) correspondem a 85,15% do total de precipitação. Consequentemente, 14,85% do total da precipitação anual correspondem aos seis meses menos chuvosos do ano (abril, maio, junho, julho, agosto e setembro).

2.3 Umidade relativa do ar

O elemento água existe na atmosfera sob três estados: sólido, líquido e gasoso. A umidade ou o vapor de água presente na atmosfera é o estado gasoso do elemento água e apresenta-se misturado com o ar seco. A umidade relativa do ar (UR) é uma variável climática que exprime a quantidade de vapor contida no ar, expressa pela razão entre a quantidade real de vapor existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima de vapor que o ar pode armazenar quando está saturado, nas mesmas condições de temperatura e pressão. A proporção de umidade da atmosfera, expressa em porcentagem (%), pode aumentar, devido à evaporação, ou pode

diminuir, devido à condensação (mudanças de estado). O ar com temperatura mais elevada contém maior quantidade de vapor, ou seja, quando a temperatura do ar aumenta, a umidade relativa do ar diminui.

As medições de umidade relativa envolvem equipamentos que associam as leituras das temperaturas de bulbo seco (temperatura do ar) com as temperaturas de bulbo úmido. A temperatura do ponto de orvalho é outra variável climática associada à umidade relativa (INMET, 1999).

Os processos evaporativos e de evapotranspiração que regulam a umidade relativa do ar são influenciados pelos regimes de vento, ciclo hidrológico, topografia, ocupação urbana, presença de vegetação, lagos, rios, mares, entre outros. Ao longo do dia, quando a temperatura do ar se eleva, a umidade relativa do ar fica mais baixa.

Como Brasília está localizada no Planalto Central, em uma região de Cerrado e longe das grandes massas de água, a umidade relativa do ar está fortemente ligada à sazonalidade da precipitação e aos ciclos diários de temperatura, além do armazenamento e transporte de vapor de água nas camadas superiores da atmosfera.

Segundo Cavalcante, Gomes Filho e Bezerra (2008), desde o final da década de 1930 já se sabe que a precipitação não depende simplesmente da evaporação e evapotranspiração local; depende também do armazenamento de vapor de água na atmosfera e seu transporte pela circulação geral.

Para melhor caracterizar a umidade relativa do ar, foram calculadas as médias mensais com base na série 2001-2013/INMET, conforme apresentado na Tabela 3. A média anual da umidade relativa do ar é de 67%.

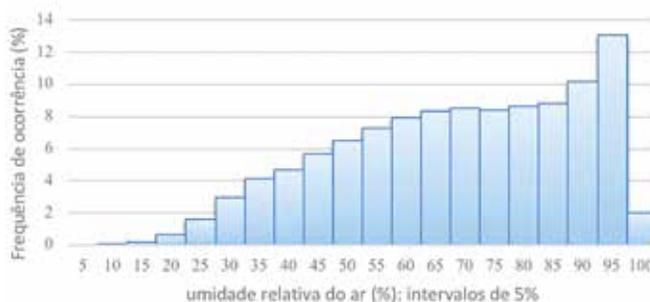
Tabela 3: Médias mensais e anual da umidade relativa do ar (%) da série 2001-2013/INMET para Brasília

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média anual
78%	75%	77%	73%	67%	63%	55%	47%	48%	63%	76%	77%	67 %

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Os dados de umidade relativa em estudo referem-se aos valores horários da umidade relativa do ar, não estando incluídas as variáveis climáticas UR_{máxima} e UR_{mínima}, que também são medidas pelo INMET.

Figura 2: Umidade relativa do ar (%): frequência de ocorrência da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A Figura 2 mostra a frequência de ocorrência da umidade relativa do ar da série 2001-2013, baseada em um total de 109.654 horas analisadas, com intervalo de classe variando em 5% UR. A frequência no intervalo de classe 95% UR é a mais alta da série, correspondendo a cerca de 12% da amostra.

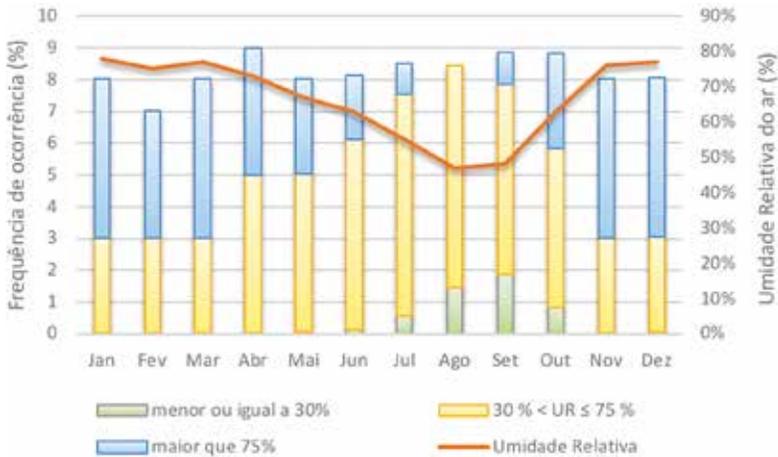
A Tabela 4 e a Figura 3 apresentam as frequências da umidade relativa do ar na série 2001-2013, em três faixas de ocorrência.

Tabela 4: Frequência de ocorrência por faixa de umidade relativa do ar (%) da série 2001-2013/INMET para Brasília

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média anual
UR<30%	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,13	0,53	1,46	1,87	0,83	0,02	0,05	5%
30%≤UR<75%	3	3	3	5	5	6	7	7	6	5	3	3	56%
UR>75%	5,5	4	5	4	3	2	1	0	1	3	5	5,5	39%

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 3: Umidade relativa do ar (%) da série 2001-2013/INMET para Brasília: média mensal e por faixa de frequência de ocorrência



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Para a cidade de Brasília, conhecida pelas baixas taxas de umidade relativa do ar, a série 2001-2013 apresenta uma média anual de 67%UR, com cerca de 39% das horas com umidade relativa acima de 75%; 56% das horas com umidade relativa entre 30% e 75%; e 5% das horas com umidade relativa abaixo ou igual a 30%.

2.4 Nebulosidade

A nebulosidade é uma variável climática que indica a fração de céu coberto pelas nuvens, correspondente à porção de céu encoberto que varia de 1/8 a 8/8. Para a representação dos dados climatológicos, adota-se a nebulosidade em décimos (variando de 0 a 10 décimos), proporcionalmente aos octais observados. Para a condição de céu claro, sem nuvens, a situação é zero. A obtenção da nebulosidade é feita por meio da observação visual, mesmo quando a estação é automática. Por isso, a estação automática A001 de Brasília não mede essa variável. Para registrar a nebulosidade, o INMET faz três observações visuais diárias, nos horários sinóticos 12 UTC, 18 UTC e 24 UTC (INMET, 2009).

A sigla UTC significa Tempo Universal Coordenado (*Universal Time Coordinated*) e corresponde à hora de referência do Meridiano de Greenwich, a partir da qual se calculam todas as outras zonas horárias. Para Brasília, na transformação de UTC para hora local, basta subtrair 3 horas.

A nebulosidade pode ser classificada de acordo com a condição de céu (Quadro 2). A Tabela 5 mostra as médias mensais da nebulosidade, com base no arquivo climático da série 2001-2013.

Quadro 2: Classificação da nebulosidade

Condição de céu	Classificação
0 a 3,9	Céu claro (baixa nebulosidade)
4,0 a 6,9	Céu parcialmente nublado (média nebulosidade)
7,0 a 10,0	Céu encoberto (alta nebulosidade)

Fonte: Adaptado de Wollmann e Sartori (2010, p. 4).

Tabela 5: Média mensal da nebulosidade da série 2001-2013/INMET para Brasília

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média anual
8,1	7,5	7,3	6,0	4,8	3,5	3,0	2,8	4,4	6,6	8,0	8,0	5,8

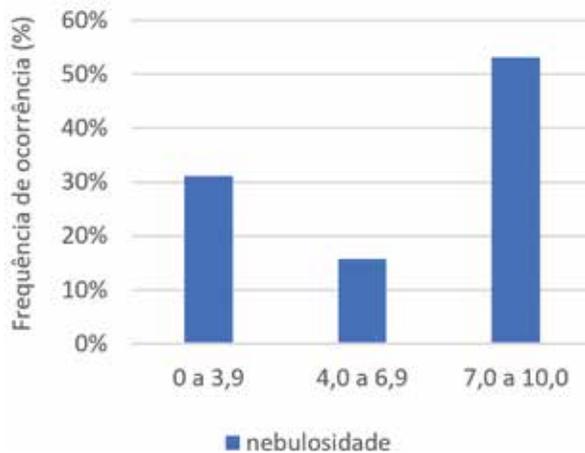
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A Figura 4 mostra a frequência de ocorrência da nebulosidade, de acordo com as faixas de classificação dadas para a condição de céu, apresentadas na Tabela 6.

A série 2001-2013 apresenta cerca de 53% de registros de nebulosidade para a condição de céu encoberto, típico do período chuvoso, quando as médias mensais da nebulosidade apresentam valores de 7 ou mais décimos. Cerca de 31% dos registros

de nebulosidade da série 2001-2013 correspondem à condição de céu claro, em que os valores de nebulosidade são da ordem de 0 a 3,9 décimos. No período seco, as médias mensais da nebulosidade dos meses junho, julho e agosto apresentam essa característica. Em média, o período da tarde registra maior índice de nebulosidade que o período da manhã ou o da noite.

Figura 4: Frequência de ocorrência (%) da nebulosidade por faixa de classificação da condição de céu da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Tabela 6: Condição de céu e frequência de ocorrência de nebulosidade da série 2001-2013/INMET para Brasília

Condição de céu	Frequência
Céu claro – 0 a 3,9	31,1%
Céu parcialmente nublado – 4,0 a 6,9	15,7%
Céu encoberto – 7,0 a 10,0	53,2%

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

2.5 Vento

Os ventos (movimento do ar) são originados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera, que causa diferenças de pressão, e influenciados pelo movimento de rotação da Terra. As forças que atuam no movimento do ar são: forças dos gradientes de pressão, força de Corioles, força centrífuga, forças de atrito e força da gravidade. Como resultado desses fenômenos, o vento sofre variação espaçotemporal, tanto em velocidade (intensidade) quanto em direção (INMET, 1999).

O regime de ventos, isto é, o comportamento estatístico dos ventos ao longo do dia, pode ser estudado em várias escalas: escala planetária, escala local e escala do edifício. O conhecimento do regime de ventos na escala local pode ser obtido pelo seu comportamento cíclico (periodicidade do movimento da série ao longo dos anos) e pela sua sazonalidade (picos repetitivos em intervalos iguais de tempo dentro da série, geralmente inferior a um ano) (SILVA, 1999; PEREIRA; PAIS; SALES, 1986).

O comportamento livre dos ventos corresponderia ao regime local dos ventos se o terreno fosse perfeitamente liso (sem rugosidade), plano e livre de obstáculos (MORETTIN; TOLOI, 2006). O Quadro 3 apresenta a Escala Anemométrica Internacional de Beaufort, que relaciona a velocidade dos ventos e as manifestações ou danos provocados na ambiência observada.

Para fins de comparação entre as estações meteorológicas, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda procedimentos padronizados para os registros do vento como uma variável meteorológica: velocidade em m/s; direção (em graus ou azimute); média horária em 24 leituras diárias; período de integração da média horária – 10 minutos; altura para instalação dos sensores – 10 metros; rugosidade do terreno onde são instalados os sensores – plano e sem obstáculos; rajada – vento máximo registrado no período de uma hora, caracterizado por aumento brusco de curta duração da velocidade do vento, geralmente acompanhado por mudanças de direção (WMO, 2008).

Quadro 3: Escala Anemométrica Internacional de Beaufort – velocidade equivalente na altura padrão de 10 metros acima de um terreno plano e descoberto

(continua)

Escala Beaufort	Categoria	Velocidade do vento		Indicações visuais na superfície terrestre
		m/s	km/h	
00	Calma	0,0 – 0,2	< 1	Não se nota o menor deslocamento nos mais leves objetos. Folhas de árvores sem movimento. A fumaça sobe verticalmente.
01	Aragem	0,3 – 1,5	1 - 5	A direção do vento é indicada pelo desvio da fumaça, mas não pelos cata-ventos.
02	Brisa leve	1,6 – 3,3	6 – 11	Sente-se o vento no rosto. Folhas das árvores são levemente agitadas. Cata-ventos comuns são agitados.
03	Brisa fraca	3,4 – 5,4	12 – 19	Bandeiras leves começam a se estender. As folhas das árvores e os pequenos arbustos ficam em movimento.
04	Brisa moderada	5,5 – 7,9	20 – 28	Movem-se os pequenos galhos das árvores, poeira e pedaços de papéis.
05	Brisa forte	8,0 - 10,7	29 – 38	Árvores pequenas e folhagem oscilam. Surgem ondas com cristas nas superfícies dos lagos.
06	Vento fresco	10,8 – 13,8	39 – 49	Galhos grandes das árvores são agitados. Ouve-se o assvio produzido pelo vento ao passar pelos fios telegráficos. Torna-se difícil usar o guarda-chuva.
07	Vento forte	13,9 – 17,1	50 – 61	Árvores inteiras oscilam. Torna-se difícil caminhar contra o vento.
08	Ventania	17,2 – 20,7	62 – 74	Galhos de árvores são quebrados. Impossível andar contra o vento.
09	Ventania forte	20,8 – 24,4	75 – 88	Ocorrem pequenos danos em edificações (chaminés e telhas são arrancadas).

Quadro 3: Escala Anemométrica Internacional de Beaufort – velocidade equivalente na altura padrão de 10 metros acima de um terreno plano e descoberto

(conclusão)

Escala Beaufort	Categoria	Velocidade do vento		Indicações visuais na superfície terrestre
		m/s	km/h	
10	Tempestade	24,5 – 28,4	89 – 102	Árvores são derrubadas. Danos consideráveis nas edificações.
11	Tempestade violenta	28,5 – 32,6	103 – 117	Ocorrem grandes destruições.
12-17	Furacão/ Tornado	> 32,7	> 118	Fenômenos extremos.

Fonte: Adaptado de INMET (1999, p. 25) e WMO (2008, p. 1-3).

A fim de caracterizar o regime de ventos de Brasília, na escala local, com base no arquivo climático da série 2001-2013, com 13 anos de dados medidos pelo INMET na estação automática de superfície A001-Brasília, buscou-se determinar as médias das velocidades e quantificar a frequência de ocorrência para cada direção dos ventos em cada mês do ano.

Na série 2001-2013, foram consideradas válidas 109.000 horas de dados de direção e velocidade dos ventos, o que corresponde a cerca de 96% dos dados registrados pela estação A001 de Brasília, ou seja, foram descartados cerca de 4% correspondentes aos dados nulos do arquivo climático.

A direção do vento da série 2001-2013 é dada em graus e varia de 1 a 360. O valor máximo encontrado para a velocidade do vento foi de 10,40 m/s, estando compatível com o range previsto para esta variável climática para a cidade de Brasília. A média anual encontrada foi de 2,45m/s, semelhante à mediana da amostra.

As horas com velocidade de vento igual a 0,00 foram consideradas horas com ventos ausentes, tendo sido considerado período de calmaria aquele que compreende essas horas com ventos ausentes e as horas com ventos classificados como calmos, com velocidade de 0 a 0,2 m/s, conforme Escala Anemométrica Internacional de Beaufort (Quadro 3).

As horas de calmaria concentram-se durante a noite, aumentando pela madrugada até o amanhecer. Ao longo do dia, o aquecimento do solo aquece o ar que se desloca ascendentemente, originando gradientes de temperatura e pressão que aumentam a velocidade dos ventos diurnos, nas horas mais quentes do dia. À noite, como esse gradiente térmico é menor, a velocidade do vento também é menor (MUNHOZ; GARCIA, 2008; BITTENCOURT; CANDIDO, 2010).

A análise da série 2001-2013/INMET permitiu identificar que 1,9% da amostra equivale a ventos ausentes (velocidade igual a 0,00). Ao longo do ano, quando consideradas todas as horas do período de calmaria (para ventos de 0-0,2), o percentual foi de 3%. O mês de agosto e o mês de abril apresentaram, respectivamente, 0,10% e 0,37% das horas de calmaria do ano.

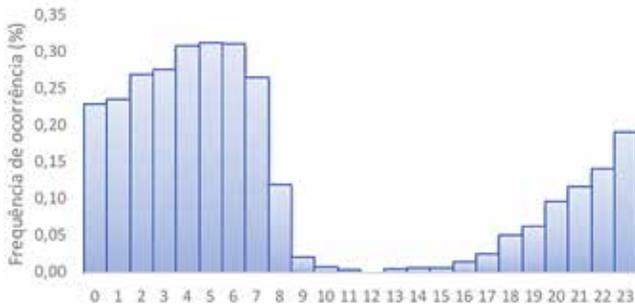
A Figura 5 mostra a distribuição das horas de calmaria (para ventos ausentes e na faixa de 0-0,2 m/s) ao longo das 24 horas do dia, cuja frequência foi tomada da série 2001-2013/INMET. O período do dia com menos horas de calmaria está entre 10h e 18h. A Figura 6 mostra a distribuição das horas de calmaria ao longo dos meses do ano. O mês de agosto é o mês com menos horas de calmaria. Os meses do período chuvoso possuem mais horas de calmaria que os meses mais secos, principalmente os meses da estação de inverno.

Figura 5: Comportamento dos ventos ausentes e calmos ao longo dos meses do ano para a série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

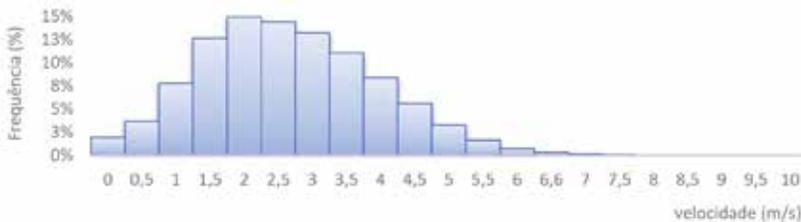
Figura 6: Comportamento dos ventos ausentes e calmos ao longo das horas do dia para a série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A figuras 7 e 8 apresentam, respectivamente, as frequências de ocorrência para a velocidade e para a direção dos ventos horários, incluindo-se as horas de calmaria.

Figura 7: Frequência de ocorrência da velocidade dos ventos da série 2001-2013/INMET para Brasília



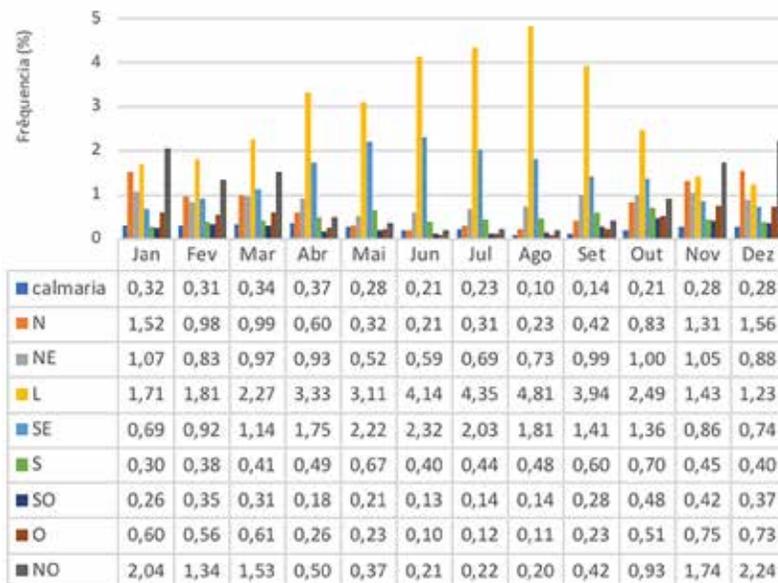
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 8: Frequência de ocorrência da direção dos ventos da série 2001-2013/INMET para Brasília



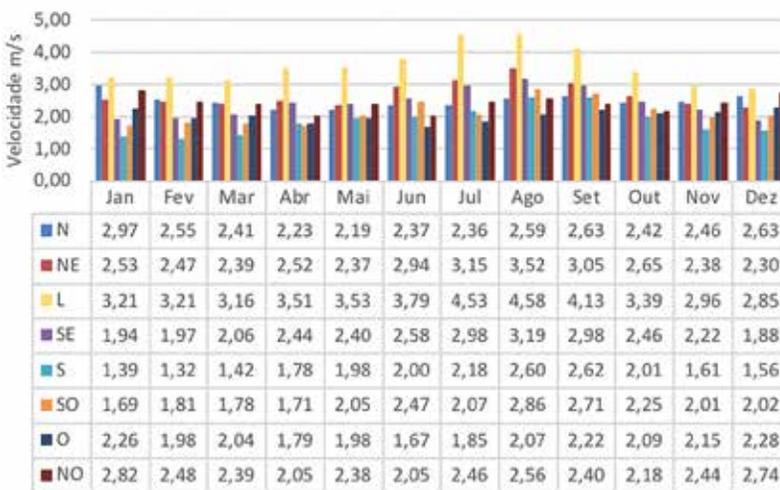
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 9: Frequência de ocorrência da direção dos ventos da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 10: Velocidade média mensal dos ventos (m/s) da série 2001-2013/INMET para Brasília, para cada direção e mês do ano



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A Figura 9 mostra a frequência de ocorrência dos ventos (em %) para cada mês do ano e para cada direção do vento. A Figura 10 mostra a média mensal da velocidade do vento para cada direção, em cada mês do ano. Assim, associando-se as Figuras 9 e 10, é possível relacionar a velocidade média dos ventos para cada mês do ano e direção do vento, e com que frequência ela ocorre.

A Tabela 6 apresenta a frequência de ocorrência dos ventos da série 2001-2013 para cada direção. A média anual da velocidade do vento para cada direção é apresentada na Tabela 7. Na série 2001-2013, os ventos predominantes atuam na direção Leste (34,62%), que apresenta a maior média anual de velocidade de vento (3,57 m/s).

Tabela 6: Frequência de ocorrência de cada direção dos ventos da série 2001-2013/INMET para Brasília

Direção	Frequência (%)
Calmaria	3,08%
N	9,28%
NE	10,24%
L	34,62%
SE	17,26%
S	5,72%
SO	3,27%
O	4,81%
NO	11,73%
Total	100%

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Tabela 7: Velocidade dos ventos: média anual em cada direção da série 2001-2013/INMET para Brasília

Direção	Velocidade (m/s)
N	2,48
NE	2,69
L	3,57
SE	2,43
S	1,87
SO	2,12
O	2,03
NO	2,41
Média Anual	2,45

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

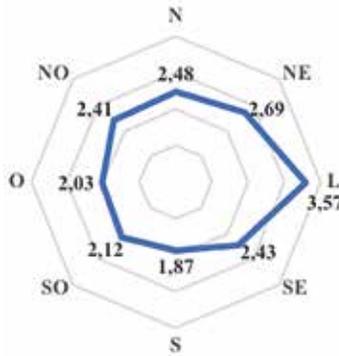
As médias mensais da velocidade do vento são apresentadas no gráfico da Figura 11, mostrando que, nos meses mais secos, a velocidade é maior. A Figura 12 apresenta as médias anuais da velocidade do vento para cada direção (já mostradas na Tabela 7).

Figura 11: Média mensal da velocidade do vento (m/s) da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 12: Média anual da velocidade do vento (m/s) da série 2001-2013/INMET para Brasília, em cada direção



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Para calcular as médias mensais da velocidade do vento, foram analisadas duas situações: a) média simples sem os valores 0,00; 0,10; 0,20, correspondentes ao período de calmaria; b) média simples com todos os dados da amostra. A Tabela 8 mostra os resultados e o percentual correspondente à diferença entre as médias.

Tabela 8: Média mensal da velocidade do vento (m/s) da série 2001-2013/INMET para Brasília

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média anual
Velocidades de 0,3-10,4 (sem dados horários de calmaria)	2,51	2,35	2,32	2,35	2,43	2,53	2,73	2,99	2,87	2,49	2,38	2,4	2,53
Velocidades de 0-10,4 m/s (com todos os dados horários)	2,42	2,26	2,23	2,25	2,34	2,47	2,66	2,95	2,82	2,43	2,3	2,32	2,45
Diferença entre as médias	3,5%	3,8%	3,8%	4,2%	3,7%	2,3%	2,5%	1,3%	1,7%	2,4%	3,3%	3,3%	3%

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Na metodologia do INMET para o cálculo das Normais Climatológicas 1961-1990, a composição da média mensal da velocidade dos ventos considerou todos os valores da amostra (INMET, 2009).

Para Bittencourt e Candido (2010), em seus estudos de conforto ambiental, os ventos de calmaria não devem entrar na composição das médias, pois mascaram a velocidade média. Os autores justificam que, por meio da análise do potencial do vento ao longo do dia e do ano, é possível identificar a disponibilidade e a velocidade real dos ventos, nos períodos de interesse, com vistas a adotar a ventilação natural como estratégia de resfriamento. Uma alta velocidade do vento no período de inverno pode causar desconforto, assim como uma baixa velocidade do vento no verão pode inviabilizar o uso da ventilação natural como estratégia de resfriamento dos espaços arquitetônicos.

A classe de velocidade de 1,6-3,3, na qual ocorrem cerca de 50% dos ventos, apresenta a maior predominância para os períodos noturno e diurno, tanto nos meses mais secos como nos chuvosos.

A segunda classe de velocidade predominante é a de 3,4-5,4 para os ventos diurnos, tanto nos meses mais secos como nos chuvosos; nessa classe, ocorrem cerca de 23% dos ventos.

Na classe de 0,3-1,5 ocorrem cerca de 23% dos ventos, principalmente os ventos noturnos. Para a velocidade de vento de 5,5 m/s ou mais, a frequência é menor que 2%. Os ventos de calmaria correspondem a 3% da amostra.

2.6 Radiação Solar Global Horizontal

A radiação solar atinge o globo terrestre na forma de ondas eletromagnéticas curtas, concentradas na região do espectro eletromagnético compreendido entre comprimentos de ondas de 0,2 μm e 0,3 μm . Varia continuamente ao longo do ano devido à distância Terra-Sol e de acordo com o ângulo zenital, que é o ângulo de incidência dos raios solares (BERGMAN *et al.*, 2011).

Os comprimentos de onda emitidos pelas componentes da radiação oriunda do Sol são considerados ondas curtas, e os comprimentos de onda emitidos pela Terra são considerados ondas longas. As fontes de baixa temperatura (por exemplo, o edifício) emitem radiação térmica de onda longa com comprimento de onda compreendido entre 3,0 μm e 100,0 μm . Quanto maior a temperatura da fonte, menor o comprimento de onda (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

Seguindo a lei do inverso do quadrado da distância, à medida que a Terra se afasta do Sol, a irradiância solar extraterrestre é reduzida. As distâncias máximas e mínimas na trajetória solar correspondem, respectivamente, aos solstícios de inverno (22/06) e de verão (22/12).

A irradiância solar extraterrestre é a energia disponível em uma dada latitude, sem que sejam considerados os efeitos atenuantes da atmosfera. Segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), a irradiância solar refere-se à taxa de radiação incidente sobre um corpo, por unidade de área de superfície.

O ângulo zenital formado entre o zênite local e os raios solares incidentes no plano do observador varia de acordo com a latitude, época do ano e hora do dia. Pela Lei do Cosseno de Lambert, quanto maior for o ângulo zenital, maior será a inclinação dos raios solares e, portanto, maior será a área para a mesma quantidade de energia distribuída, o que resulta em uma menor concentração de irradiância solar. Por isso, a irradiância é máxima no período próximo ao meio-dia do horário solar local e mínima ao nascer e ao pôr do sol (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2009).

A Tabela 9 apresenta os valores da irradiância solar extraterrestre, e da irradiância solar global horizontal, para a cidade de Brasília, a Figura 13 representa a atenuação da irradiância solar extraterrestre (Q_0), após sofrer os efeitos atenuantes da atmosfera e a Figura 14 ilustra as componentes direta, difusa e refletida da radiação global horizontal.

Tabela 9: Irradiância solar extraterrestre (Q_0) e irradiância solar global horizontal (I_g): Médias diárias em kWh/m² para Brasília

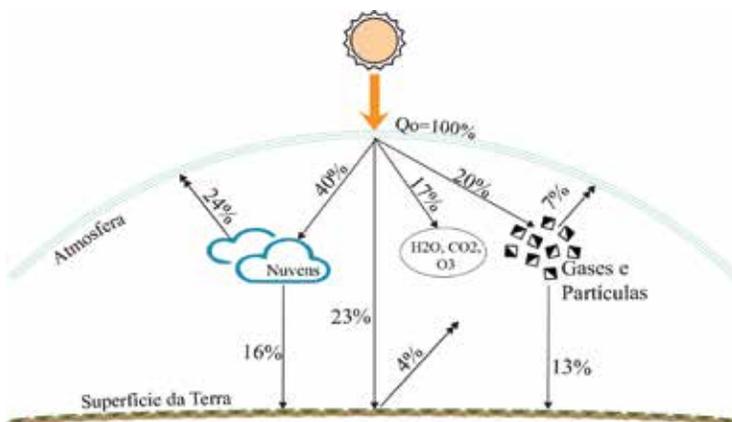
	Jan	Fev	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Q_0	11,43	11,28	10,79	9,76	8,51	7,51	7,31	8,00	9,21	10,33	11,08	11,37
I_g	5,15	5,38	5,15	5,05	4,84	4,77	5,01	5,64	5,71	5,33	4,9	5,05

Fonte da irradiância solar global horizontal: série 2001-2013/INMET.

Fonte da Irradiância solar extraterrestre: <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#sundata>.

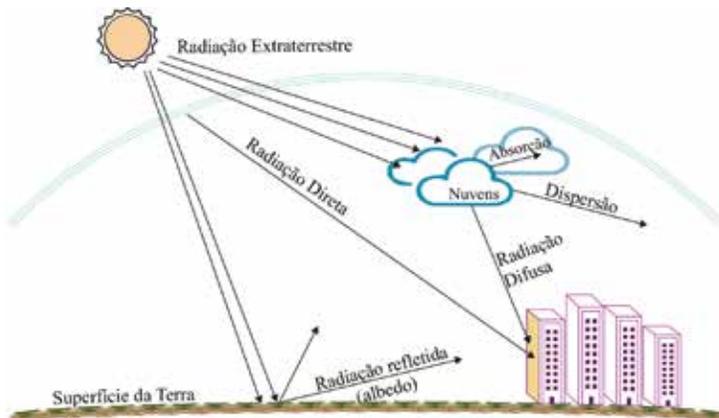
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 13: Irradiância solar após os efeitos atenuantes da atmosfera



Fonte: Elaboração dos autores (2015), baseado em Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007, p. 65).

Figura 14: Componentes da radiação solar



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A radiação global horizontal que incide na superfície terrestre é constituída pelas componentes direta e difusa. A radiação global direta é determinada pela Lei do Cosseno de Lambert, advinda da parcela da radiação extraterrestre que atravessa a atmosfera e incide diretamente sobre as superfícies. A radiação global difusa é resultado dos sucessivos processos de difusão, reflexão e absorção, que dependem das nuvens e das partículas da atmosfera, sendo refletida na abóbada celeste e nas nuvens e re-irradiada para a Terra. Para a condição de céu claro, sem nuvens, a radiação direta representa uma parcela maior que a difusa, mas, se o céu estiver muito nublado, a radiação difusa poderá apresentar-se em uma parcela maior que a parcela direta (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2011).

Nas Normais Climatológicas 1961-1990, não consta registro de radiação solar, somente de horas de insolação (INMET, 2009). Desde 2000, a estação automática de superfície A001-Brasília tem registrado dados horários de radiação solar global horizontal. Segundo o INMET (1999), a radiação solar é uma das variáveis meteorológicas mais difíceis de serem obtidas com confiabilidade e precisão por meios automáticos. Tal fato pode esclarecer a condição do arquivo climático da série 2001-2013, conforme a qual a variável radiação solar global é aquela que apresenta a maior quantidade de dados nulos ou espúrios.

2.7 Temperatura do ar

A temperatura é uma variável climática que indica a quantidade de calor que existe no ar. Apesar de o Sol ser a principal fonte de calor da Terra, não é a radiação solar que determina diretamente a temperatura do ar, visto que este é transparente a todos os comprimentos de onda.

A temperatura do ar é resultado dos efeitos da radiação solar sobre as superfícies da Terra e do balanço energético. A radiação solar atinge o solo e as superfícies, aquecendo-os, e, por convecção, o calor por eles liberado aquece o ar.

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2011), nesse balanço energético estão envolvidos a radiação solar incidente; o coeficiente de absorção das superfícies receptoras da radiação solar; a condutividade e a capacidade térmica do solo, que determinam a transmissão de calor por condução; e as perdas por evaporação, convecção e radiação.

As temperaturas possuem um comportamento cíclico diário e sazonal e podem ser expressas em valores médios (horários, diários, mensais e anuais), valores extremos (máxima e mínima) e amplitude térmica. A temperatura do ar é uma variável climatológica obtida pela média das temperaturas verificadas em um período específico de tempo. A temperatura máxima e a temperatura mínima resultam, respectivamente, das médias das máximas temperaturas e das mínimas temperaturas, em um determinado período. A temperatura máxima absoluta e a temperatura mínima absoluta são, respectivamente, a mais alta das temperaturas máximas e a mais baixa das temperaturas mínimas, observadas em um determinado período (INMET, 1999).

As temperaturas mais baixas acontecem um pouco antes do nascer do sol; ao longo do dia, elas vão se elevando, atingindo os valores máximos cerca de duas horas após a passagem do Sol pelo Meridiano do observador. A partir desse momento, a temperatura da Terra começa a diminuir, e o balanço energético começa a ser negativo: a energia perdida, especialmente por radiação em direção às altas camadas da atmosfera, é maior que a recebida.

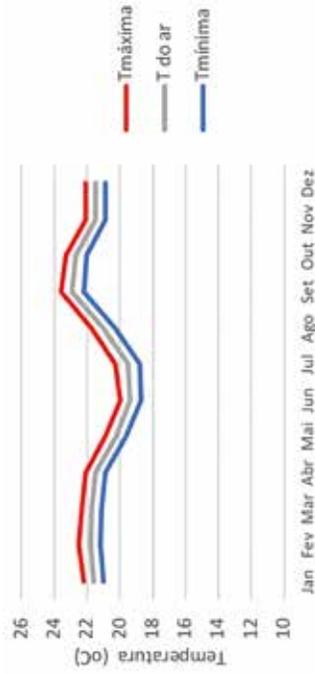
Com base na série 2001-2013 de dados climáticos horários, registrados pela estação automática de superfície A001-Brasília, são apresentados os perfis anuais das médias mensais da temperatura do ar, temperatura máxima e temperatura mínima (Tabela 10 e Figura 15).

Tabela 10: Médias mensais e anual das temperaturas da série 2001-2013/INMET para Brasília

Variáveis climáticas	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média anual
Temperatura máxima (°C)	22,2	22,5	22,3	22,1	20,9	20,0	20,3	21,7	23,6	23,3	22,1	22,1	21,3
Temperatura do ar (°C)	21,6	21,8	21,7	21,5	20,2	19,4	19,5	21,0	22,9	22,7	21,5	21,5	21,9
Temperatura mínima (°C)	21,0	21,2	21,1	20,9	19,6	18,7	18,8	20,3	22,2	22,0	20,9	20,9	20,7

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 15: Perfil das temperaturas médias mensais da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A Tabela 11 mostra a análise estatística das três temperaturas registradas na série 2001-2013: temperatura do ar, temperatura máxima e temperatura mínima.

Tabela 11: Estatística descritiva das temperaturas da série 2001-2013/INMET para Brasília

	Temperatura do ar (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
Média	21,3	21,9	20,7
Mediana	20,7	21,4	20,1
Moda	19,1	19,4	19,1

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Os valores absolutos máximos e mínimos das temperaturas da série 2001-2013 são mostrados no Quadro 4. Na cidade de Brasília, a temperatura horária mínima absoluta acontece na madrugada, pouco antes do nascer do sol, e a temperatura horária máxima absoluta ocorre no meio da tarde.

Quadro 4: Valores absolutos máximos e mínimos das temperaturas da série 2001-2013/INMET para Brasília

	Temperatura do ar (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
Mínima horária	8,9°C em 24/07/2004 às 7h	9,4°C em 24/07/2004 às 7h	8,8°C em 24/07/2004 às 7h
Máxima horária	34,9°C em 28/10/2008 às 14h	35,3°C em 28/10/2008 às 15h	34,4°C em 28/10/2008 às 15h
Máxima Absoluta da série 2001-2013: 35,3°C em 28/10/2008 às 15 horas Mínima Absoluta da série 2001-2013: 8,8°C em 24/07/2004 às 7 horas			

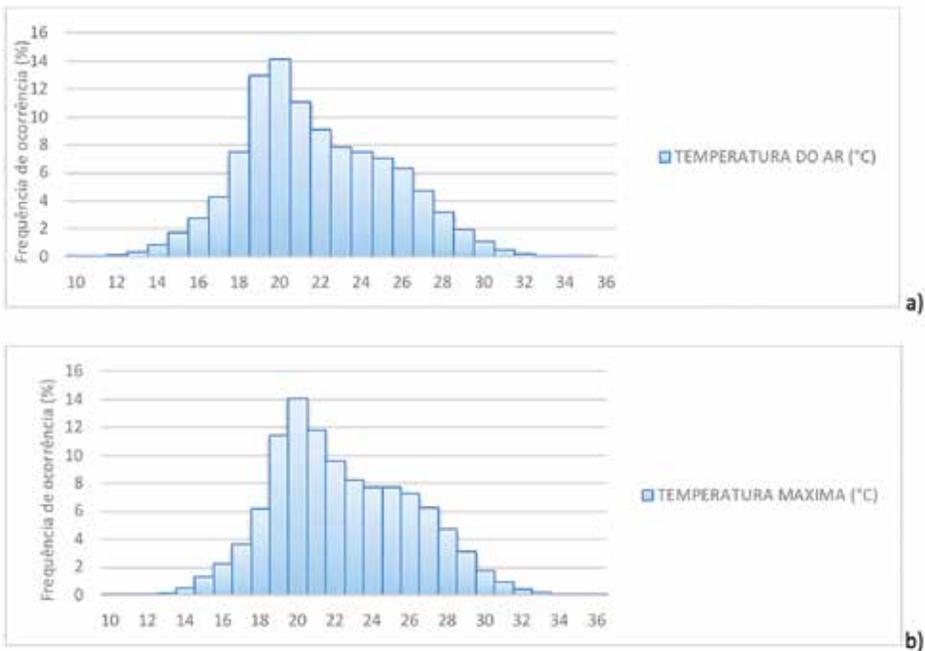
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

As frequências de ocorrência das temperaturas do ar, máxima e mínima, representadas nos histogramas da Figura 16, ilustram o clima ameno da cidade de Brasília, com muitas horas do ano na zona de conforto.²

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2013), Brasília possui 43,6% de horas do ano em zona de conforto térmico e 56,3% de horas em zona de desconforto, das quais 15,2% decorrem do calor e 41,1% do frio. Considerando-se a frequência de ocorrência da série 2001-2013, para os histogramas com intervalo de classe variando em 1°C, observa-se que menos de 1% das temperaturas máximas horárias ocorrem com valores acima de 31°C, e menos de 1% das temperaturas mínimas horárias ocorrem com valores abaixo de 14°C (Figura 16 – a, b e c).

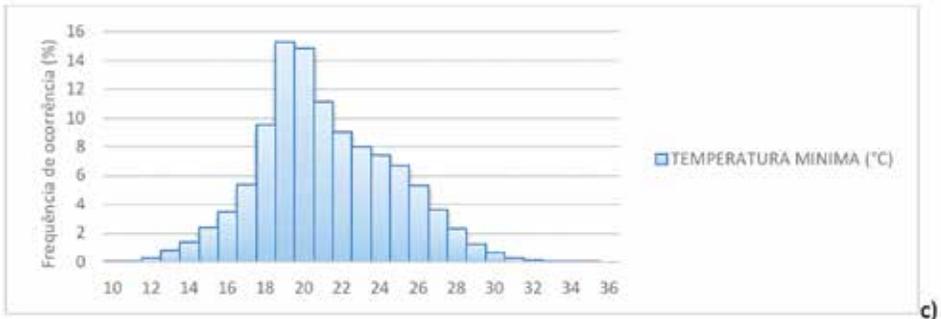
Figura 16: Histogramas para as temperaturas horárias da série 2001-2013/INMET para Brasília: a) Temperatura do ar (°C); b) Temperatura máxima (°C); c) Temperatura mínima (°C)

(continua)



² Baseado na carta bioclimática apresentada pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005), que classifica as zonas bioclimáticas conforme metodologia adaptada do Diagrama Psicrométrico de Givoni.

Figura 16: Histogramas para as temperaturas horárias da série 2001-2013/INMET para Brasília: a) Temperatura do ar (°C); b) Temperatura máxima (°C); c) Temperatura mínima (°C) (conclusão)



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

2.8 Amplitude térmica

A amplitude térmica é uma variável que mede a flutuação térmica diária, obtida pela diferença entre a temperatura horária máxima absoluta e a temperatura horária mínima absoluta registradas naquele dia. Isto é, a diferença entre a máxima e a mínima temperatura, ao longo de 24 horas de um dia, chama-se *amplitude térmica* (INMET, 1999).

A umidade do ar influencia a amplitude térmica: quando o ar está muito úmido, a amplitude térmica é pequena; quando está muito seco, as temperaturas máximas e mínimas podem ser mais acentuadas. Assim, a amplitude térmica é uma variável que depende da umidade do ar. Climas mais secos possuem amplitudes maiores e, por outro lado, climas mais úmidos possuem amplitudes menores. A Figura 17 mostra o comportamento da umidade relativa do ar e da temperatura máxima em um dia de inverno na cidade de Brasília.

Figura 17: Perfil diário da temperatura máxima (°C) e da umidade relativa do ar (%) para um dia de inverno (24/07/2009) da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

A amplitude térmica diária da série 2001-2013 foi obtida pela diferença entre a máxima temperatura horária e a mínima temperatura horária para cada dia válido da amostra, ou seja, foram utilizadas a máxima e a mínima absoluta das 24 horas de cada dia. Para se obter o valor da amplitude térmica representativa de cada mês, foi feita a média aritmética simples com todas as amplitudes térmicas dos dias correspondentes ao mês em questão.

A Tabela 12 mostra as médias mensais da amplitude térmica e os valores máximos mensais da série 2001-2013. Mostra, também, a frequência de ocorrência por faixa de variação das amplitudes térmicas. Buscou-se classificá-las em três faixas que fossem mais representativas das condições de exposição das edificações: $AT < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq AT < 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $AT \geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

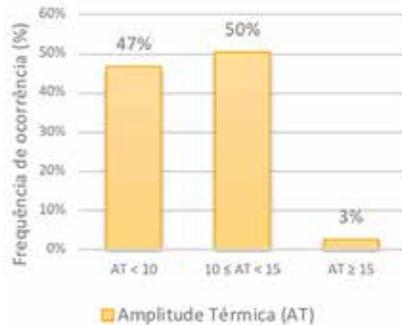
Tabela 12: Amplitude térmica (AT) da série 2001-2013/INMET para Brasília: médias mensais, máximos mensais e frequência de ocorrência

	Amplitude térmica do ar		Frequência da amplitude térmica diária por faixa de variação		
	AT média (°C)	AT max (°C)	AT < 10 °C	10 °C ≤ AT < 15 °C	AT ≥ 15 °C
Jan.	8,5	14,3	5,2%	4,5%	0,2%
Fev.	9,1	14,3	1,9%	6,4%	0,6%
Mar.	9,0	14,3	2,6%	6,9%	0,4%
Abr.	9,4	14,2	6,4%	2,3%	0,0%
Mai	10,6	16,2	4,7%	3,0%	0,0%
Jun.	11,2	18,3	2,1%	5,1%	0,4%
Jul.	12,0	16,9	2,2%	5,4%	0,4%
Ago.	12,1	17,6	5,4%	2,5%	0,0%
Set.	11,7	17,8	5,1%	2,6%	0,0%
Out.	10,5	16,1	2,2%	5,3%	0,4%
Nov.	8,8	14,3	3,5%	4,0%	0,2%
Dez.	8,6	14,2	5,4%	2,5%	0,0%
Média anual	10,1 °C	Total	47%	50%	3%

Fonte: Elaboração dos autores (2015).

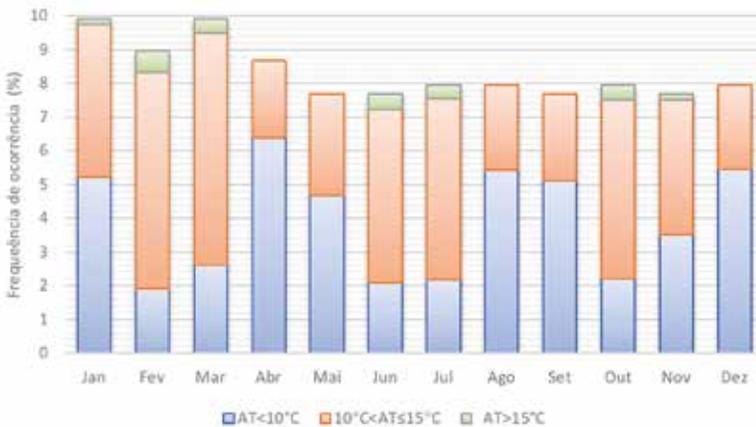
A Figura 18 mostra a frequência de ocorrência por faixa de variação das amplitudes térmicas da série 2001-2013. A Figura 19 ilustra as variações da amplitude térmica por faixa, ao longo dos meses do ano.

Figura 18: Frequência de ocorrência por faixa de variação da amplitude térmica (°C) da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Figura 19: Frequência de ocorrência (%) por faixa de variação da média mensal da amplitude térmica (AT em °C) da série 2001-2013/INMET para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

No mês de junho, observou-se o maior valor para a amplitude térmica diária (18,3 °C). Quanto às médias mensais, elas variaram entre 8,5 °C e 12,1 °C. Os meses que apresentaram as maiores médias mensais de amplitudes térmicas foram julho e

agosto (em torno de 12 °C). As máximas amplitudes térmicas diárias e as maiores médias mensais correspondem ao período seco.

Na série 2001-2013 da cidade de Brasília, cerca de 50% dos dias apresentaram amplitude térmica diária maior ou igual a 10°C e menor que 15°C, e cerca de 3%, amplitude térmica igual ou maior que 15°C. Considerando-se esses percentuais, é possível concluir que a cidade de Brasília possui altas amplitudes térmicas, principalmente no período seco.

3. Arquivos climáticos de dados horários para simulação

Para as simulações computacionais que usam variáveis climáticas para alimentar os dados de entrada, em geral, é necessário que o arquivo climático seja representativo do local e contenha um ano completo de 365 dias com 8.760 dados horários. No caso dos anos bissextos, o dia 29 de fevereiro deve ser descartado.

Um ano climático, típico ou de referência, consiste em um ano de dados climáticos horários apresentados em um formato padronizado para as 8.760 horas do ano. Metodologias específicas permitem tratar os dados de uma série de 30 anos (10 anos, no mínimo) para compor um ano completo que representa um ano climático médio, típico ou de referência de determinado local. Os dados selecionados devem representar a série de padrões climáticos que normalmente seria encontrada em um conjunto de dados de vários anos.

Nesse caso, há diversas metodologias para a sua obtenção, entre elas, o *Test Reference Year* (TRY) e o *Typical Meteorological Year* (TMY).

3.1 Ano Climático de Referência (TRY - *Test Reference Year*)

O *Test Reference Year* (TRY) consiste em um ano real com dados climáticos horários, contendo informações climáticas para as 8.760 horas do ano, apresentados em um formato padronizado, necessário para as simulações de desempenho das edificações.

O TRY é gerado a partir de dados de temperatura. A metodologia para a formação de um Ano Climático de Referência - TRY consiste em eliminar do banco de dados os anos de temperaturas médias mensais extremas (altas ou baixas), até que se obtenha apenas um ano de dados médios. O TRY seleciona o ano mais representativo entre vários anos (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998).

3.2 Ano Meteorológico Típico (TMY - *Typical Meteorological Year*)

O *Typical Meteorological Year* (TMY) é uma das metodologias para se obter um ano típico. Diferentemente do TRY, que seleciona o ano mais representativo entre vários anos, o TMY seleciona os meses mais representativos de vários anos distintos para compor um ano típico.

A metodologia para obtenção de um TMY baseia-se na variável temperatura e consiste em excluir sucessivamente os meses mais quentes e mais frios, até que reste apenas um, considerado como o mês típico do local. O TMY é formado por 12 meses reais, que podem ser de diferentes anos, desde que o mês selecionado seja representativo dos mesmos meses observados no período de 30 anos (de preferência) ou de, no mínimo, 10 anos (AKUTSU; VITTORINO, 1998).

3.3 Comparando arquivos de ano climático disponíveis para Brasília

Os principais arquivos climáticos referentes a um ano climático com 8.760 horas disponíveis para simulações computacionais para a cidade de Brasília são: Atlas SWERA, Atlas IRENA TRY, TMY da base SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) e TMY da base INMET (SCHELLER *et al.*, 2015).

A Figura 20 ilustra as médias diárias mensais da GHI dos arquivos climáticos Atlas IRENA, Atlas SWERA, SWERA, TRY e TMY-INMET, avaliados no trabalho de Scheller *et al.* (2015). Observa-se que, dependendo da base de dados e da metodologia utilizadas, os valores das médias mensais podem apresentar diferenças.

Figura 20: Média diária mensal da irradiância solar global horizontal ($\text{Wh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$) para Brasília



Fonte: Zanoni *et al.* (2015, p. 7) utilizando dados de Scheller *et al.* (2015).

Para simulações de desempenho termoenergético em Brasília, os arquivos climáticos mais utilizados são: arquivo climático TRY-1962_05CSV e arquivo climático TMY-INMET.

O arquivo climático TRY-1962_05CSV, pela metodologia adotada para a sua elaboração, selecionou o ano de 1962 como o ano médio representativo da série histórica de 30 anos de dados meteorológicos consecutivos, tomados das Normais Climatológicas Padronizadas do Brasil 1961-1990, resultantes de registros de dados sinóticos do INMET.

O arquivo climático TMY-INMET é resultado de uma metodologia que selecionou os meses médios mais representativos da série de dados horários medidos pelo INMET, no período 2000-2010, pela estação automática de superfície A001.

O arquivo climático TMY-INMET para Brasília foi elaborado por Maurício Roriz em 2012. Esse arquivo climático recebeu uma versão atualizada em 2016, sem apresentar, no entanto, nenhuma diferença nos dados em relação ao arquivo climático de 2012 (SCHELLER *et al.*, 2016).

As simulações computacionais que utilizam o arquivo TRY-1962_05CSV podem obter resultados bastante distintos entre os períodos de verão e de inverno, enquanto as simulações feitas com os arquivos TMY-INMET (2012 ou 2016) podem resultar em valores mais homogêneos, ao longo do ano.

A Figura 21 ilustra o comportamento das médias mensais diárias da irradiância global horizontal para a cidade de Brasília, de acordo com os arquivos climáticos: TRY-1962_05CSV, TMY-INMET (2012) e a série 2001-2013/INMET.

Figura 21: Médias mensais diárias da Irradiância Global Horizontal (Wh/m².dia) para Brasília



Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Zanoni *et al.* (2015) realizaram um estudo comparativo entre o arquivo climático TMY-INMET para Brasília e a série 2001-2013/INMET para a variável GHI.

As análises estatísticas mostraram que não existem evidências de diferenças significativas quando comparadas as médias anuais dos dois arquivos analisados, tampouco as médias efetuadas por período (seco e chuvoso).

Analisados os desvios por períodos, verifica-se que, no período chuvoso, a diferença entre os arquivos climáticos é de cerca de 1,13% (0,35 kWh/m².dia), enquanto no período seco a diferença é de cerca de 3% (0,91 kWh/m².dia).

A análise dos desvios entre as médias mensais dos arquivos climáticos mostrou que os meses do ano climático TMY-INMET apresentam diferenças em relação aos meses da série 2001-2013 do INMET, principalmente nos meses mais chuvosos.

Vale destacar que, nem sempre, a média anual é um bom indicador para avaliar a representatividade de uma série temporal. A cidade de Brasília é um exemplo de como as médias anuais podem mascarar as médias mensais, devido a sua forte sazonalidade, marcada pelo período seco e período chuvoso (ver Tabela 2, que mostra seis meses do período chuvoso com 85,15% do total de precipitação anual). Outra variável que marca bem essa sazonalidade é a nebulosidade, que apresenta valores abaixo de 4 para a estação de inverno e acima de 7 para a estação de verão.

Por outro lado, para a cidade de Brasília, o arquivo climático TMY-INMET é um ano climático suficientemente representativo para ser usado nas simulações computacionais, quando consideradas as médias mensais das variáveis temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e vento. Em relação à radiação solar, é o arquivo com a maior representatividade, se comparado com os outros anos climáticos disponíveis para simulação computacional. Quanto à variável nebulosidade, o arquivo climático TMY-INMET apresenta o valor de 0,5 fixado para todas as 8.760 horas do ano.

Para as simulações higrótérmicas, alguns programas utilizam a chuva dirigida como uma das fontes de umidade. Nesse caso, a opção pelo uso do ano climático TMY-INMET justifica-se, visto que este arquivo contempla as variáveis horárias precipitação e vento (velocidade e direção), utilizadas para a determinação da intensidade de chuva dirigida na envoltória edificada.

A representatividade de um arquivo climático pode ser afetada pela quantidade de anos utilizada para compor o ano climático, sendo recomendado, para tanto, uma amostra com, no mínimo, 10 anos de dados de registros horários consecutivos.

A metodologia para a obtenção de um ano meteorológico típico (TMY) seleciona os meses de referência com base nas temperaturas médias de 10 anos de

dados, no mínimo. Assim, os arquivos climáticos com 8.760 horas, gerados para simulações computacionais, a partir dos valores médios de temperatura, podem não ser representativos para outros parâmetros, quando analisados mês a mês.

Por essa razão, entre outras, recomenda-se avaliar os resultados das simulações higrotérmicas com base nas características cíclicas e sazonais das variáveis climáticas, considerando-se o seu comportamento mensal ou periódico, em termos de valores médios, máximos e mínimos, assim como a frequência de ocorrência, controlando-se os conflitos entre os arquivos climáticos e o clima local.

4. Considerações finais

Os estudos realizados com base no arquivo climático da série 2001-2013, com 13 anos de dados horários registrados pelo INMET na estação automática de superfície A001-Brasília, permitiram obter um conjunto de informações para a caracterização das variáveis climáticas e seus comportamentos cíclicos e sazonais, garantindo-se, assim, a base necessária para a seleção de arquivos climáticos, verificação da representatividade quanto ao clima local e análise de sensibilidade dos resultados dos estudos de simulação higrotérmica.

Em síntese, o período chuvoso integra os meses de primavera e verão, cujas temperaturas são mais elevadas que as do outono e do inverno. Os meses com temperaturas mais baixas são junho e julho. Os meses mais quentes do ano são setembro e outubro, coincidindo com o final do período da longa estiagem, quando começa o início das chuvas. Apesar de as temperaturas serem elevadas em todo o Brasil (por ser um país tropical), Brasília apresenta somente cerca de 1,5% das horas com temperaturas máximas acima de 30°C, e menos de 1% das temperaturas mínimas horárias ocorrem com valores abaixo de 14 °C.

A radiação solar é alta durante todo o ano, com médias diárias mensais acima de 4.700 Wh/m². No período chuvoso, apesar de maior nebulosidade (em média 7,6 décimos), a radiação é alta devido à trajetória do Sol mais próxima da Terra. No inverno

seco, apesar de o Sol estar mais distante da Terra, os dias de céu claro, devido à baixa nebulosidade (em média, 4,1 décimos), favorecem a radiação solar direta.

Em geral, os ventos são bem distribuídos em todas as direções, havendo baixa quantidade de horas de calmaria (3%). No entanto, 50% dos ventos horários são caracterizados como brisa leve (velocidade entre 1,6 e 3,3 m/s).

Embora a média anual da amplitude térmica do ar seja de 10,1 °C, cerca de 53% das amplitudes térmicas diárias ocorrem com valores iguais ou acima de 10 °C. Por isso, a cidade de Brasília pode ser considerada uma cidade com altas amplitudes térmicas, distribuídas durante todo o ano, sendo que as máximas amplitudes térmicas ocorrem no período seco, que compreende os meses mais frios. À noite, a temperatura cai, e, ao longo do dia, se eleva, fazendo cair a umidade relativa do ar. As baixas taxas de umidade relativa do ar (abaixo ou igual a 30% UR) correspondem somente a 5% das horas do ano, mas estão concentradas, principalmente, nos meses de agosto e setembro. Nesses meses, a velocidade de vento é maior, principalmente os ventos com direção Leste.

A chuva dirigida é a chuva projetada nas superfícies da envoltória edificada, decorrente da ação do vento sobre a precipitação. Apesar de os ventos predominantes serem mais frequentes na direção Leste, a chuva dirigida é mais intensa nas fachadas com orientações Norte e Noroeste, resultante da ação combinada de precipitação e vento (direção e velocidade).

Nos estudos sobre chuva dirigida, a média anual das variáveis climáticas nem sempre é representativa (ZANONI *et al.*, 2014). Para a cidade de Brasília, a média anual com base nas médias mensais descaracteriza fortemente a sazonalidade. Portanto, a periodicidade bem definida pelos seis meses mais secos e seis meses mais chuvosos deve ser considerada na análise de sensibilidade dos resultados das simulações higrótérmicas. Alerta-se que, para estudos similares em outras localidades, deve-se proceder às análises para identificar a caracterização mensal, sazonal, anual, ou outro período de tempo que melhor represente o comportamento dos dados climáticos do local a ser estudado.

Para as simulações computacionais, é preciso selecionar, como dado de entrada, um arquivo climático que represente um ano de 8.760 horas de dados climáticos característicos do clima local. Uma vez que a metodologia para obtenção de um ano meteorológico típico (TMY) seleciona os meses com base nas temperaturas médias, os arquivos climáticos gerados podem não ser representativos para as outras variáveis climáticas. Portanto, conhecer a metodologia de como o arquivo climático foi gerado, quais foram as bases de dados que o alimentaram e a representatividade desses dados, quando comparados com o contexto climático em estudo, são condições essenciais para a validação dos resultados simulados, considerando-se o comportamento cíclico e sazonal que afeta as pessoas, os edifícios e o ambiente.

Referências

AKUTSU, Maria, VITTORINO, Fúlvio. *Tratamento de dados climáticos para a avaliação do desempenho térmico de edificações – manual de procedimentos (Aplicação à cidade de São Paulo) - Anexo I*. Publicação IPT 1732. São Paulo, 1998.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Gebrüder Borntraeger, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-72, 2013.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. *2017 ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI)*. Atlanta, EUA, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 15220-3*. Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. Rio de Janeiro, 2005.

BERGMAN, Theodore L. *et al.* *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7. ed. Nova Jersey, EUA: Wiley, 2011.

BITTENCOURT, Leonardo; CANDIDO, Christhina. *Ventilação natural em edificações*. Rio de Janeiro: Eletrobras; PROCEL EDIFICA - Eficiência Energética em Edificações; PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2010.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. *BS ISO 15686-5*. Buildings and constructed assets – Service-life planning. Parte 5: Life-cycle costing. London, 2008.

CAVALCANTI, Enilson P.; GOMES FILHO, Manoel F.; BEZERRA, Wagner A. Fluxo de vapor de água atmosférico na obtenção do resíduo ET-P em três macrorregiões brasileiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 5, p. 471-479, 2008.

CIB W040 - International Council for Research and Innovation in Building and Construction – Heat and Moisture Transfer in Buildings. *Heat, air and moisture transfer terminology - parameters and concepts*. Publication 369. Porto: FEUP Edições, 2012.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken, NJ: Wiley, 1980.

GOULART, Solange V. G.; LAMBERTS, Roberto; FIRMINO, Samanta. *Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras*. 2. ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção UFSC, 1998.

GUIDE TO METEOROLOGICAL INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION. 7. ed. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), 2008. (WMO-No. 8.)

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Manual de observações meteorológicas*. 3. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1999.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990)*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>. Acesso em: 10 fev. 2013.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. *Eficiência energética na arquitetura*. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras; Procel Edifica, 2013, p.365.

MORETTIN, Pedro A.; TOLOI, Clélia M. C. *Análise de séries temporais*. 2. ed. São Paulo: Blusher, 2006.

MUNHOZ, Fabrício César; GARCIA, Anice. Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Ituverava-SP. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 1, p. 30-34, 2008.

PEREIRA, Basílio de Bragança; PAIS, Maria Bernadette Zanusso; SALES, Paulo Roberto de Holanda. *Análise espectral de séries temporais: uma introdução para Engenharia, Economia e Estatística*. Rio de Janeiro: Arte Final Leasing Editorial; Eletrobras S.A., 1986.

PEREIRA, Antônio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo Cesar. *Meteorologia Agrícola*. Edição revista e ampliada. Piracicaba, SP: LCE 306. ESALQ/USP, 2007. 192 p.

RAMOS, Andrea Malheiros; SANTOS, Luiz André Rodrigues dos; FORTES, Lauro Tadeu Guimarães (Org.). *Normais climatológicas do Brasil 1961-1990*. Ed. rev. e ampliada. Brasília, DF: INMET, 2009.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano*. São Paulo: ProEditores, 2000.

RORIZ, Maurício. Correções nas irradiâncias e iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos – SP, 2012. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>. Acesso em: 20 set. 2013.

SALES, Nadir Dantas de; REBELLO, Expedito; SILVA, José de Fátima da. Chuvas Intensas em Brasília nos últimos cinco anos. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA - CBMET2010. *Anais...* Belém, setembro de 2010.

SCHELLER, Camila; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. *Correções realizadas nos arquivos climáticos INMET 2012*. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. Florianópolis, 2016. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br>. Acesso em: 25 set. 2017.

SCHELLER, Camila *et al.* *Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações*. Centro Brasileiro de eficiência energética em edificações-CB3E. Universidade de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2015.

SENTELHAS, Paulo Cesar; ANGELOCCI, Luiz Roberto. *Radiação solar: balanço de energia*. Notas de aulas. ESALQ/USP. Piracicaba, 2009. Disponível em: <http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula5.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2013.

SILVA, Patrícia de Castro da. *Sistema para tratamento, armazenamento e disseminação de dados de vento*. 1999. Tese (Doutorado). Engenharia Mecânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

WOLLMANN, Cássio Arthur; SARTORI, Maria da Graça Barros. A nebulosidade como fator condicionante à percepção da pluviometria anual pela população urbana e rural de São Sebastião do Caí/RS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 3, n. 1, p. 1-6, 2010.

ZAHUMENSKÝ, Igor. *Guidelines on Quality Control Procedures for data from Automatic Weather Stations*. Slovak Hydrometeorological Institute (SHMI). Slovakia, 2004.

ZANONI, Vanda Alice Garcia. *Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília*. 2015. 293 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

ZANONI, Vanda Alice Garcia *et al.* Comparação entre arquivos climáticos de irradiação para estudos de degradação de fachada em Brasília-DF. In: XIII ENCAC - Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 2015. *Anais...* Campinas, 2015.

ZANONI, Vanda Alice Garcia *et al.* Matriz de análise do índice de chuva dirigida (ICD) para a cidade de Brasília-DF. *Revista Paranoá* (cadernos de arquitetura e urbanismo) - Conforto e Projeto: Cidades, Brasília, v. 11, p. 67-76, 2014.

CAPÍTULO 3

Ferramentas para a simulação de ventilação natural na arquitetura

Gustavo de Luna Sales e Marta Adriana Bustos Romero

1. A importância das ferramentas de cálculo da ventilação natural para a Arquitetura

De início, é importante destacar que o presente capítulo versa sobre as ferramentas de cálculo e quantificação da ventilação natural em edificações. Portanto, parte-se da premissa de que o profissional arquiteto considera que a ventilação natural é desejável para o projeto e que existe a necessidade de quantificação desta. Sabe-se que, para condições climáticas extremas e para certos tipos de uso – tais como escritórios, hospitais, hotéis, entre outros –, a ventilação natural não irá suprir completamente as necessidades dos usuários. Assim, a análise das condições favoráveis ou desfavoráveis para a utilização da ventilação natural fica a cargo do arquiteto projetista, não sendo esse assunto, no entanto, o objetivo específico deste tópico.

A ventilação natural é recomendada em aproximadamente 90% do território nacional como estratégia de melhoria das condições ambientais do projeto. Considerando que o Distrito Federal (DF) se enquadra nesse percentual, uma vez que possui condições climáticas favoráveis para o aproveitamento da ventilação natural, o profissional envolvido na construção do espaço deve se apoiar em ferramentas

específicas que o auxiliarão a encontrar soluções mais eficazes para o aproveitamento desse robusto potencial. Essa necessidade de auxílio deve-se ao fato de que a determinação do comportamento da ventilação natural, seja no meio urbano, seja no interior dos ambientes, é essencialmente uma tarefa árdua quando o profissional envolvido não possui grande experiência sobre o tema. Dessa forma, o presente capítulo esclarece quais são as principais ferramentas que podem auxiliar na análise da ventilação natural, em quais etapas do projeto elas são mais recomendadas e quais são seus benefícios e suas limitações. Busca-se, portanto, fornecer subsídios para a decisão de escolha do projetista da ferramenta mais adequada às suas necessidades.

Antes de tudo, é fundamental compreender a importância da ventilação natural e, conseqüentemente, a importância da utilização de ferramentas de simulação para analisá-la ao longo do processo de projeto.

A ventilação natural pode ser definida como o movimento do ar causado pela diferença de pressão e/ou diferença de temperatura. Os primeiros estudos sobre a importância da ventilação natural surgem com o propósito de assegurar o fornecimento de ar limpo às pessoas e a remoção de poluentes do ar – considerados “miasmas” causadores de graves doenças –, como descrito no tratado de Hippócrates (460 a.C), *Dos Ares, Águas e Lugares*. Enquanto no passado os principais focos de poluentes do ar estavam relacionados ao meio externo, atualmente as pessoas estão expostas a agentes nocivos até mesmo dentro de suas habitações – presentes em produtos de limpeza, materiais construtivos, decorrentes da preparação de alimentos, entre outros. Assim, no ar que se respira, composto pela mistura de gases, vapores e partículas, podem estar presentes centenas ou milhares de componentes químicos prejudiciais à saúde humana. Dessa forma, renovar adequadamente o ar dos ambientes que compõem uma habitação por meio da ventilação natural implica, por exemplo, reduzir o nível de exposição dos ocupantes às substâncias químicas e/ou orgânicas nocivas à saúde.

A baixa qualidade interna do ar pode causar sintomas perceptíveis cotidianamente, como aqueles relacionados à Síndrome do Edifício Doente (SED).

Tais sintomas interferem na produtividade e no desempenho de tarefas, seja em ambientes de trabalho, seja em residências. Nos Estados Unidos, Fisk (2001) estimou o potencial anual de economia e ganho de produtividade apenas com o aumento da qualidade interna do ar nos edifícios. Tal quantia, à época, foi estimada entre \$15 e \$40 bilhões – com a redução dos sintomas da SED –, e entre \$20 e \$200 bilhões – com o aumento da produtividade de funcionários.

Além de influenciar a saúde dos ocupantes do edifício, as características de temperatura, umidade e velocidade do ar também são determinantes para assegurar condições adequadas de conforto térmico. Assim, a utilização da ventilação natural se configura como uma estratégia fundamental para o favorecimento do conforto higrotérmico, tanto no interior das edificações como no meio urbano. Sob o ponto de vista do conforto térmico, a renovação adequada do ar por meio da ventilação natural representa uma das principais estratégias para o alcance de níveis adequados de conforto térmico no Brasil. Por ser uma estratégia arquitetônica passiva – ou seja, o seu funcionamento não necessita de artifícios que consomem energia –, a ventilação natural possui relação direta com a eficiência energética e a sustentabilidade do espaço construído. Dependendo das condições climáticas locais, é estimada uma redução de aproximadamente 50% no consumo de energia em climas quentes (CARROL *et al.*, 1982 citado por SANTAMOURIS, 2006) com a incorporação da ventilação natural no projeto arquitetônico. Por exemplo, estudos apontam que a ventilação natural pode representar um potencial de economia de energia em edifícios de, aproximadamente, 15% no Reino Unido, 53% na Itália e 30% na Grécia (EMMERICH; DOLS; AXLEY, 2001; CARDINALE; MINUCCI; RUGGIERO, 2003; SANTAMOURIS, 2006).

Com esta breve Introdução, fica evidente que, quando se pretende desenvolver um projeto no qual os ambientes serão ventilados naturalmente, os fatores relacionados à saúde humana e ao conforto térmico devem ser necessariamente considerados. Desses fatores decorrem impactos sociais, econômicos e ambientais diretamente relacionados com o projeto arquitetônico. Portanto, a ventilação natural não deve ser encarada pelo projetista como simplesmente uma abertura voltada para o exterior.

Tão importante quanto saber da importância da ventilação natural para o projeto arquitetônico é saber quais são as ferramentas de quantificação e/ou análise que podem ser utilizadas. Ao longo do desenvolvimento do projeto de arquitetura, o profissional pode utilizar algumas ferramentas de previsões do comportamento da ventilação natural que irão considerar, tanto os elementos constituintes do entorno da edificação como as características do interior dos seus ambientes. Essas ferramentas podem variar de simples cálculos matemáticos até avançados programas computacionais de dinâmica dos fluidos (CFD). Em casos muito particulares ou em edificações em grande altura, recorre-se à ferramenta que mais se aproxima da realidade em termos de previsão do comportamento da ventilação – o túnel de vento. Se, por um lado, os modelos matemáticos são de aplicação rápida e “gratuita”, por outro, a aplicação das ferramentas CFD, por exemplo, fornece resultados mais precisos ao projetista, possibilitando a proposição de diretrizes de projeto que irão solucionar um determinado problema de forma eficaz e precisa. Apesar do custo mais elevado de aplicação, as ferramentas CFD podem levar a uma tomada de decisão mais acertada nas etapas iniciais do projeto de arquitetura – o que acarretará uma importante economia futura com climatização artificial e favorecerá a saúde dos usuários da edificação.

Dado o exposto acima, fica clara a importância da utilização de ferramentas de quantificação/análise da ventilação natural ao longo do processo de projeto de arquitetura – etapa em que se tem maior liberdade de alterações e melhorias. Por outro lado, o profissional necessita saber qual é a ferramenta mais adequada para atender seus objetivos, prazos e orçamento – tema abordado no próximo tópico.

2. Características das ferramentas de simulação da ventilação natural

As principais ferramentas, também conhecidas como modelos, utilizadas na previsão do comportamento do fluxo do ar em edifícios são: modelos analítico e empírico, modelos multizona e de zona única, modelo em escala e CFD. Para a

melhor compreensão do universo de aplicação desses modelos, pode-se fazer a seguinte organização, sugerida por Heiselberg, Murakami e Roulet (1998):

- Modelos macroscópicos (simplificados): baseados na representação física de um espaço construído em um conjunto de volumes de controle, cujo comportamento pode ser descrito por equações algébricas ou equações diferenciais ordinárias;
- Modelos microscópicos (detalhados): baseados em soluções numéricas aproximadas de um sistema de equações diferenciais parciais, em que o domínio físico do sistema é subdividido em uma malha relativamente fina.

Os modelos analítico e empírico e multizona e de zona única são classificados como *modelos macroscópicos* – de utilização simples, rápida e com menor custo de aplicação; além de possuírem foco de análise mais amplo em termos de estimativa de resultados. Já os modelos em escala (reduzida ou real) e CFD são classificados como *microscópicos*, com foco de análise mais detalhado e preciso em relação aos modelos macroscópicos – sendo o grau de detalhamento e precisão refletido no custo e no tempo envolvidos na sua aplicação.

A partir dessa organização, pode-se identificar melhor a aplicação mais adequada de cada modelo para a quantificação das necessidades de ventilação em relação às etapas do processo de projeto. Assim, durante as etapas iniciais do projeto, quando a forma do edifício e as necessidades de “qualidade ambiental interna estão grosseiramente traçadas”, diretrizes e soluções para o sistema de ventilação a ser utilizado são baseadas na experiência do profissional e na correta aplicação de modelos simples de análise – modelos macroscópicos. Por outro lado, quando o projeto tratar de espaços críticos ou não convencionais, modelos de análise e predição mais detalhados (modelos microscópicos) também podem ser utilizados nas primeiras etapas de projeto (HEISELBERG; MURAKAMI; ROULET, 1998).

Evidencia-se, portanto, que, à medida que se aumenta o grau de informação a respeito do projeto, cresce a necessidade de aplicação de modelos mais detalhados de previsão e análise do sistema de ventilação. Analisando-se o processo de projeto, pode-se concluir que, quanto mais próximo se está do início do desenvolvimento do projeto, menor é a disponibilidade de informações específicas e detalhadas, e mais genéricas devem ser as análises. Em termos de qualidade interna do ar e conforto térmico passivo na fase do Estudo Preliminar de Projeto, por exemplo, busca-se a identificação de problemas e necessidades gerais, além do estabelecimento de soluções ou diretrizes que irão nortear as demais etapas do projeto quanto ao sistema de ventilação natural. Ou seja, nas etapas iniciais, os modelos macroscópicos são os mais adequados para auxiliar o projetista nas análises preliminares. É importante destacar, sob um ponto de vista geral, que a relação entre os modelos macroscópicos e microscópicos não se configura como hierárquica, mas, sim, como uma relação de interdependência. Em outras palavras, o adequado dimensionamento e a eficiência do sistema de ventilação determinado para o projeto (seja natural, artificial ou híbrido) depende tanto da aplicação inicial dos modelos macroscópicos quanto da aplicação posterior dos modelos microscópicos.

2.1 Caracterização dos modelos macroscópicos: modelos analíticos e empíricos

Os modelos analíticos aplicados à predição do comportamento do fluxo de ar em edifícios originam-se das equações fundamentais da dinâmica dos fluidos e transferência de calor, relacionadas com conservação de massa, momento e energia – baseando-se, geralmente, nas equações de Bernoulli.¹ Esse tipo de modelo pode ser considerado como o “mais antigo método científico” utilizado para a predição da performance da ventilação. No entanto, sua aplicação ainda é representativa

¹ Descreve o comportamento de um fluido de fluxo laminar ao longo de um duto, satisfeitas as condições iniciais com relação a densidade, viscosidade e velocidade do fluido (MASSEY; SMITH, 2002).

no contexto científico, devido a sua simplicidade, linguagem difundida e baixa exigência quanto a recursos computacionais para sua aplicação (CHEN, 2009).

Os modelos analíticos utilizam-se tanto de simplificações da geometria do ambiente ou espaço construído quanto das condições de borda do fluido (condições iniciais como: temperatura, densidade, viscosidade, etc.). Dessa forma, a equação obtida para um determinado caso não pode ser aplicada a outro sem que sejam considerados os devidos ajustes. Já os modelos empíricos se diferem por utilizarem um número maior de aproximações – representadas na equação na forma de valores fixos ou constantes. Estas, por sua vez, são obtidas de forma empírica, por meio de medições experimentais ou simulações computacionais específicas. À exceção desse aspecto, em teoria, os modelos analíticos e empíricos são semelhantes. Para Santamouris e Dascalaki (2002), esses dois modelos se tornam úteis por oferecerem uma primeira estimativa rápida de aspectos fundamentais para a análise da ventilação natural – a exemplo de uma estimativa da quantidade de fluxo de ar necessária para determinado ambiente.

A Equação 1 e a Equação 2, apresentadas a seguir, exemplificam as diferenças entre o modelo analítico e o empírico. A primeira equação foi desenvolvida por Fitzgerald e Woods (2008) para estudarem a influência do “efeito chaminé” sobre o padrão do fluxo e da estratificação da temperatura do ar em ambientes ventilados naturalmente por duas aberturas. Nota-se que não são utilizadas constantes, mas apenas variáveis relacionadas com o caso estudado pelos autores. Já a segunda equação é largamente utilizada para o cálculo do fluxo de ar em ambientes ventilados unilateralmente, apresentada por autores como Swami e Chandra (1987), Santamouris e Dascalaki (2002) e Chen (2009), em que a constante “0,025” foi obtida de forma empírica.

Equação 1

$$\Delta T = \left(\frac{Q_H^2}{\alpha \rho^2 C_p^2 A^2 g (H - h_B)} \right)^{1/3}$$

Em que:

ΔT = elevação da temperatura no ambiente;

Q_H = fluxo de calor distribuído;

α = coeficiente específico;

ρ = densidade do fluido;

C_p = calor específico;

A = área efetiva de abertura;

g = gravidade.

Equação 2

$$Q_w = 0,025A_{eff}U_w$$

Em que:

Q_w = fluxo de ar fornecido pela janela;

A_{eff} = área efetiva da abertura;

U_w = velocidade do ar incidente na janela.

Existem centenas de modelos analíticos e empíricos destinados à predição do comportamento do fluxo de ar. Por outro lado, apenas uma pequena parte é destinada ao cálculo do nível de concentração de poluentes, se comparada ao número de equações que tratam de aspectos de conforto térmico – como se pode identificar em trabalhos como os de Allard (2002), Seppanen (2006) e Santamouris e Wouters (2006). Por exemplo, Seppanen (2006) apresenta uma das poucas equações analíticas utilizadas para a predição da taxa de ventilação necessária para o controle de poluentes (Equação 3). Essa equação, aparentemente simples, relaciona a geração de poluentes, as diferentes concentrações de poluentes entre o ar interno e externo, bem como a eficiência da ventilação (quando essa for a única forma de remoção dos poluentes do ambiente).

Equação 3

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,o}} \cdot \frac{1}{\epsilon_v}$$

Em que:

Q_h = fluxo de ar necessário para a qualidade do ar em relação a cada contaminante no ar;

G_h = geração do contaminante;

$C_{h,i}$ = concentração aceitável de contaminante no ar interno;

$C_{h,o}$ = concentração de contaminante no ar que entra;

ϵ_v = eficiência do sistema de ventilação.

Em teoria, essa equação pode ser aplicável às etapas iniciais de desenvolvimento do projeto – dada a simplicidade de sua resolução. No entanto, existe a dificuldade de conhecimento das fontes de poluentes e dos níveis de concentração como principal fator limitante para sua aplicação. Somado a isso, a equação apresenta a eficiência do sistema de ventilação (ϵ_v) como variável, não sendo esta conhecida quando se trata de ventilação natural.

Além de restrições quanto aos aspectos de qualidade interna do ar relacionados com a saúde humana, de forma geral, os modelos analíticos e empíricos não consideram a interferência das divisões internas do edifício – considerando-se o ambiente como único. Dessa forma, por possuírem uma linguagem estritamente matemática como ferramenta de aplicação, esses modelos assumem simplificações nas condições iniciais (condições de contorno), tanto em relação à geometria do ambiente quanto às características físicas do fluido em estudo. Essas simplificações assumidas nos modelos analítico e empírico reduzem a precisão dos resultados, quando comparados aos demais tipos de modelo, o que inviabiliza a sua aplicação para estudos de caso mais complexos. Por outro lado, modelos analíticos e empíricos complexos ou híbridos (ex.: utilizados em conjunto

com modelos CFD ou em escala) exigem uma significativa carga de cálculos e habilidade matemática dos usuários, além de aumentarem o tempo e o custo de obtenção dos resultados esperados.

2.1.1. Modelos Multizona

De início, é importante tornar claro que a nomenclatura utilizada para denominar os modelos multizona pode variar entre autores de referência na área. Tal fato é atribuído ao próprio desenvolvimento do modelo ao longo do tempo e às diferentes traduções de linguagem de cada autor. Assim, na revisão da literatura sobre o tema, podem-se encontrar denominações como: modelo de rede (*network models*), modelo multizona, modelo multicelular (*multi-cell*), modelo multirrecintos (*multi-room*) (AXLEY, 2006).

Independentemente de suas diferentes denominações, e de algumas variações de base teórica, trata-se do mesmo princípio básico – em que cada zona de uma edificação é representada por um “nó de pressão”.² Também são utilizados “nós de borda”³ para representar o meio externo da edificação e pontos onde existe interação entre os nós de pressão no interior do edifício. Forma-se, portanto, uma malha, ou sistema, e que são resolvidas equações de conservação de massa, momento e energia, para se determinar o número de renovações de ar e/ou sua distribuição no edifício.

As principais vantagens desse modelo em relação aos modelos analítico e empírico, são: a possibilidade de análise ou predição conjunta dos ambientes da edificação, e a consideração de interações no fluxo de ar que ocorrem entre esses ambientes. Assim, uma edificação com “*N*” zonas é representada por uma

² Ponto que representa as condições de pressão do ambiente, as quais se deseja determinar após a interação com os demais nós da malha.

³ Ponto em que são inseridas as informações (conhecidas ou impostas) em relação à pressão exercida no exterior do edifício.

malha de “ N ” nós, e os nós onde se deseja calcular a pressão se comunicam com os nós do meio externo (onde a pressão é conhecida ou estimada). A interação por meio das ligações entre os nós da malha representa o fluxo de ar através de uma abertura. Dessa forma, segundo os autores, como a taxa de fluxo de ar está diretamente relacionada à diferença de pressão através de uma abertura, as pressões nos nós internos são determinadas por meio das pressões nos nós externos – ou seja, o cálculo das pressões não conhecidas é derivado da aplicação de balanço de massa em cada nó.

Além de aspectos relacionados ao conforto térmico, os modelos multizona também são utilizados para calcular aspectos relacionados à eficiência da ventilação, ao consumo energético, à retirada de poluentes do ar (agentes químicos e biológicos) e ao controle da fumaça de tabaco em ambientes climatizados artificialmente. Entretanto, dependendo do tipo de ferramenta utilizada para sua aplicação e do tipo de resultado a ser obtido, simplificações são aplicadas a esses modelos, interferindo, em determinados casos, de forma considerável, na precisão dos resultados. Podem-se destacar, como exemplos de simplificações assumidas nesse modelo, o volume de ar em repouso no interior dos ambientes e a uniformidade em sua temperatura e concentração de poluentes.

Para a aplicação do modelo multizona, podem ser utilizadas ferramentas puramente matemáticas (equações) ou ferramentas de modelagem computacional (*softwares*). Contudo, as ferramentas de modelagem computacional se destacam em termos de produção acadêmica e aplicação no mercado de trabalho. Dentre a diversidade de ferramentas de modelagem computacional, dois programas se destacam: o CONTAM (família de programas) e o COMIS.

Os programas da família CONTAM, desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Normas e Tecnologia dos Estados Unidos (NIST), auxiliam na determinação do fluxo de ar, das pressões relacionadas à ação dos ventos ou diferença de temperatura do ar, e da concentração de poluentes em recintos (WALTON; DOLS, 2005). Não obstante, percebe-se um viés mais voltado para a análise da quali-

dade do ar interno em termos de concentração de poluentes e dimensionamento de sistemas de ventilação (não especificamente ventilação natural). Dols (2001) apresenta o programa LoopDA (que utiliza a plataforma CONTAM), o qual foi desenvolvido pelo NIST especificamente para o projeto de pequenas edificações comerciais ventiladas naturalmente. Todavia, este programa não possui aplicação significativa em comparação ao CONTAM. Os programas CONTAM e COMIS são semelhantes em relação aos princípios e algoritmos utilizados para a obtenção dos resultados. No entanto, Feustel e Smith (1998) afirmam que o programa COMIS fornece um algoritmo mais evoluído em relação aos demais programas de aplicação do modelo multizona (ex.: ESP, BREEZE, AIRNET e PASSPORT-AIR), aumentando sua precisão e reduzindo problemas de convergência do sistema de equações.

De forma geral, as ferramentas computacionais de aplicação do modelo multizona são utilizadas em conjunto com modelos microscópicos, visando à calibração de resultados – principalmente para análises de consumo energético. Além disso, diferentemente de programas CFD comerciais, as duas ferramentas de aplicação mais populares (CONTAM e COMIS) foram desenvolvidas por laboratórios científicos – fato que resultou na criação de uma linguagem e interface não amigáveis, além de apresentação gráfica dos resultados não atrativa para profissionais de mercado (arquitetos, engenheiros, etc.). Denota-se, portanto, que tais deficiências limitam, significativamente, a aplicação do modelo multizona a estudos no campo científico.

2.1.2. Modelos de Zona Única

O modelo de zona única (*zonal model*)⁴ apresenta uma abordagem intermediária entre os modelos multizona e os modelos CFD, como afirmam Santamouris

⁴ Também pode ser encontrado em trabalhos científicos com a nomenclatura de “modelo de subzona” [*sub-zone model*].

e Dascalaki (2002), ou seja, fornecem resultados mais detalhados em comparação aos modelos multizona, sendo, portanto, de aplicação menos complexa em relação aos modelos CFD. O princípio básico do modelo de zona única consiste na subdivisão de um volume no interior do edifício (podendo ser um ambiente ou um determinado trecho do edifício) em um número limitado de células/subvolumes – geralmente, segundo Chen (2009), menos de 1.000 células para espaços tridimensionais. Em cada subvolume, são aplicadas as equações de conservação de massa, momento e energia, a fim de se obterem os campos de temperatura e velocidade do ar no volume em análise. Assim, enquanto o modelo multizona subdivide o edifício em zonas (que representam os ambientes) e realiza uma análise geral do comportamento do fluxo de ar, o modelo de zona única concentra-se na análise de apenas um volume específico, subdividindo-o em parcelas menores, nas quais são aplicadas as equações de conservação. Em vista dessa análise, mais detalhada e restrita a um determinado trecho da edificação, são obtidos resultados mais precisos como, por exemplo, a estratificação dos campos de temperatura e velocidade do ar (que não são calculados no modelo multizona).

O tipo de modelo de zona única, apresentado por Axley (2006), é um dos mais recentes e complexos utilizados para a predição da ventilação. O autor menciona que os modelos de zona mais recentes utilizam diferentes tipos de células de fluxo (vetores) para diferentes conjuntos de células, dependendo do contexto. Dessa forma, o fluxo de ar atuante nas células – representado pelas “células de jato” nas regiões de entrada de ar por ações dos ventos, e por “células de plumas” nas regiões onde ocorre a movimentação do ar por diferença de temperatura – é estabelecido com base em um conjunto de equações já conhecidas e caracterizadas em estudos de caso anteriores. Por fim, as células que não sofrem influência direta de células de jato e de plumas são caracterizadas como “células de baixa velocidade”, cujo regime será alterado devido à influência das demais células.

Por outro lado, é possível identificar modelos de zona única com abordagens e níveis de complexidade diferentes, dependendo do tipo de modelo de zona única.

Por exemplo, Heiselberg, Murakami e Roulet (1998) e Santamouris e Dascalaki (2002) mencionam duas abordagens mais simplificadas dos modelos de zona única, em relação à abordagem apresentada por Axley (2006). Na primeira abordagem, denominada “modelo de temperatura”, um padrão ao movimento do ar dentro do edifício é imposto tendo como base resultados de outros estudos de caso obtidos por modelos mais detalhados. Em vista disso, esse tipo de abordagem não é aplicável em qualquer tipo de geometria (configuração do edifício). A segunda abordagem é denominada “modelo de pressão”, em que uma equação simplificada (com momento nulo), baseada nas equações de Bernoulli, é inserida como equação adicional. Esse modelo é de abrangência mais geral em comparação ao “modelo de temperatura”, não apresentando a necessidade de uma definição do padrão do fluxo de ar (SANTAMOURIS; DASCALAKI, 2002).

Em termos de ferramentas de aplicação, os modelos de zona simples utilizam programas diversos, de linguagem matemática, que auxiliam na resolução das equações impostas. No entanto, não foi possível identificar na literatura um programa específico que se destaque ou de uso comercial que tenha sido desenvolvido, especificamente, para a predição da ventilação natural. Como aborda Chen (2009), a revisão dos trabalhos científicos publicados sobre esses modelos aponta para uma utilidade prática “insignificante” – a maioria dos estudos possui como objetivo o próprio desenvolvimento do modelo ou análise comparativa de resultados obtidos por modelos multizona, CFD e em escala. Por fim, o autor afirma que, em geral, as habilidades exigidas do usuário e o tempo necessário para a preparação dos dados de entrada nos modelos de zona única são comparáveis aos modelos CFD (até maior em determinados casos). Dessa forma, apesar de se caracterizarem como um modelo macroscópico, os modelos de zona única mais recentes apresentam certo grau de complexidade comparáveis aos modelos microscópicos. Tal fato não favorece a utilização desse modelo nas etapas iniciais do projeto arquitetônico, nas quais se busca uma primeira avaliação – mais simplificada e rápida – da ventilação natural.

2.1.3. Modelos macroscópicos: modelos em escala

Os modelos em escala utilizam métodos e ferramentas de medição para a predição e/ou análise do escoamento do fluxo de ar – podendo ser caracterizados, conforme a escala aplicada para o desenvolvimento da maquete do caso a ser estudado, como: modelo em escala reduzida e modelo em escala real. Devido ao menor custo de desenvolvimento e análise (em comparação com o modelo em escala real), os modelos em escala reduzida são mais amplamente conhecidos em termos de análise da ventilação, como aborda Chen (2009). Contudo, devem ser observadas, de forma cuidadosa, as características do fluido utilizado em cada método de abordagem – haja vista os diferentes tipos de fluidos que podem ser simulados em câmaras ou túneis de vento (ex.: querosene, areia, água, entre outros).

As características a serem observadas estão relacionadas, principalmente, com o número de Reynolds,⁵ o número de Grashof,⁶ entre outros. Como aborda Chen (2009), em análises que envolvem transferência de calor – um dos principais motivos para a utilização dos modelos em escala – existem dificuldades na obtenção do mesmo número de Reynolds e Grashof nos modelos em escala reduzida que utilizam o ar como fluido principal para as análises, fato que interfere, significativamente, nos resultados obtidos. A utilização de fluidos com densidade diferente da densidade do ar, como a água ou o Freon,⁷ é uma opção para atenuar essas diferenças, uma vez ponderados os diferentes parâmetros do fluido utilizado no resultado final.

Além do tipo de fluido utilizado, outras variáveis estão diretamente relacionadas com a consistência dos resultados obtidos nos modelos em escala, tais como:

⁵ Coeficiente adimensional inversamente proporcional à viscosidade do fluido, e diretamente proporcional à massa específica e velocidade do fluido, e ao diâmetro da tubulação por onde o mesmo percorre. É empregado na Mecânica dos Fluidos no cálculo do regime de escoamento laminar ($Re < 2000$), ou turbulento ($Re > 2400$).

⁶ Coeficiente adimensional que representa a relação entre a força de flutuação e a força de retenção de um determinado fluido, derivada de sua variação de viscosidade (ocasionada pela diferença de sua temperatura) (MASSEY; SMITH, 2002).

⁷ Gás derivado do metano.

a característica e calibração da câmara ou túnel de vento, a velocidade e direção do vento simulados, o detalhamento e representação do modelo físico e seu entorno, a qualidade dos equipamentos de medição, entres outros aspectos.

Por meio da revisão da literatura sobre o modelo em escala reduzida, Chen (2009) identificou a grande utilização desse tipo de modelo para a validação de resultados obtidos em modelos analíticos e empíricos, assim como para a análise comparativa entre modelos computacionais multizona, de zona única e CFD. A utilização dos modelos em escala reduzida também é aplicável para a visualização do escoamento do fluido sobre os elementos construídos (TOLEDO; PEREIRA, 2003; DRACH; VASCONCELLOS; CORBELLA, 2010). Por exemplo, Drach, Vasconcellos e Corbella (2010) abordam a aplicação prática desses modelos em experimentos realizados em túnel de vento, utilizando o “arrasto de areia”, para auxiliar os projetistas na especificação de diretrizes de projeto que visem o conforto térmico urbano. Toledo (2006) e Toledo e Pereira (2003) também utilizam modelos em escala, utilizando uma mistura aquosa, para a visualização e estudo quantitativo e qualitativo do escoamento do fluido.

Entretanto, considerando os custos com equipamentos e o tempo envolvidos entre a construção do modelo físico (maquete), esse tipo de modelo possui aplicação restrita a casos específicos, que geralmente envolvem projetos de pesquisa em universidades, edifícios construídos ou em estágio avançado de projeto. Por exemplo, durante as etapas de desenvolvimento do projeto, em que alterações de forma e de *layout* internos estão passíveis de modificações diversas, seria necessária a construção de um número considerável de modelos físicos (representando as alternativas de projeto) – fato que isoladamente já representa um fator negativo em relação aos modelos computacionais e modelos analítico/empíricos. Analisando sob outra ótica, não é necessariamente fundamental a obtenção de dados tão precisos e específicos (como os obtidos por meio dos modelos em escala) que justifiquem investimentos elevados de tempo e recursos para a identificação de possíveis diretrizes e alternativas gerais durante o desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto. Nesse sentido, este capítulo não aborda um modelo em escala real,

uma vez que os custos e o tempo requeridos nesse modelo são consideravelmente maiores em relação ao modelo em escala reduzida.

Cabe mencionar, *grosso modo*, que a aplicação do modelo no campo da ventilação (natural ou artificial) é limitada à análise de edificações existentes (medições *in loco*) ou experimentos de laboratório – tema abordado por autores como Liddament (1986). Por fim, vale ressaltar que os resultados obtidos por meio desse modelo são os mais precisos na predição e análise da ventilação, em comparação aos demais modelos. No entanto, esse modelo não está livre de erros, haja vista todo o processo envolvido nas medições e a calibração dos equipamentos.

2.1.4. Modelos computacionais de dinâmica dos fluidos

A dinâmica dos fluidos computacional é uma ciência baseada na resolução de um conjunto de equações diferenciais parciais de conservação de massa, momento, energia (equações de Navier-Stokes⁸), concentração de espécies químicas e intensidade de turbulência. Devido à complexidade envolvida na resolução das equações de Navier-Stokes, uma série de simplificações e aproximações foi feita para se obter um grupo de novas equações que pudessem ser resolvidas. Ao longo das três últimas décadas, difundiu-se a utilização de computadores de alto desempenho para a resolução aproximada das equações originais por meio de diversas técnicas, tais como: método dos volumes finitos⁹, método dos elementos finitos,¹⁰ entre outros. Assim, essa área de estudo passou a ser conhecida como Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

⁸ Desenvolvidas em estudos independentes por G.G. Stokes, na Inglaterra, e M. Navier, na França – no início de 1800 –, essas equações descrevem como estão relacionadas a velocidade, a pressão, a temperatura e a densidade de um fluido em movimento.

⁹ O Método dos Volumes Finitos baseia-se na realização de balanço de massa, movimento, e/ou energia sobre um volume de controle determinado, no qual o fluxo em estudo atravessa a face do volume (JUNIOR, 2012).

¹⁰ O Método dos Elementos Finitos baseia-se na discretização de um determinado domínio, representando-o como uma reunião de um número finito de elementos, de forma a resolver não o problema na forma original, e sim um que lhe é associado (AZEVEDO, 2003; GIACCHINI, 2012).

Os modelos computacionais de dinâmica dos fluidos predizem o escoamento de um fluido considerando a transferência de massa e calor, reações químicas, entre outras diversas aplicações – não somente no campo da arquitetura e engenharia, mas também em áreas como a medicina (estudo dos vasos sanguíneos, bombeamento do sangue, etc.), a petroquímica (extração e refinamento de petróleo) e, ainda, a engenharia aeronáutica, engenharia naval e outras.

Na predição da ventilação, os modelos CFD podem fornecer resultados quanto aos campos de distribuição da pressão, velocidade, temperatura, concentração de umidade e contaminantes no ar – presentes em ambientes internos e no espaço urbano, como abordam os trabalhos de Souza (2006) e Sales (2013).

Devido à disseminação do estudo do escoamento dos fluidos e ao avanço em termos de desenvolvimento de interfaces mais amigáveis, o modelo CFD se tornou o meio mais utilizado para a predição da performance da ventilação natural e artificial.

Em termos de aplicação, os programas computacionais de dinâmica dos fluidos vêm sendo elaborados e aplicados desde os anos de 1980 – sendo, desde então, tema de revisões que buscam identificar qual é a ferramenta mais precisa (AWBI, 1991; LIDDAMENT, 1996; ETHERIDGE; SANDBERG, 1996; HEISELBERG; MURAKAMI; ROULET, 1998; SANTAMOURIS; DASCALAKI, 2002; AXLEY, 2006). Por meio dessas revisões, pode-se observar toda a complexidade e a evolução envolvidas no desenvolvimento desse tipo de modelo.

Quanto à aplicação durante o desenvolvimento do projeto, os modelos CFD levam vantagem por integrarem-se aos programas de auxílio ao desenho arquitetônico (CAD) e aos programas de modelagem da informação de edifícios (BIM), como o AutoDesk© REVIT; e ainda aos de simulação energética, como o DesignBuilder. Assim, torna-se possível analisar aspectos da ventilação à medida que o projeto for modelado no computador. Com relação aos modelos em escala, analíticos e empíricos, a quantidade de tempo necessária para a obtenção de resultados no modelo CFD é consideravelmente menor – e com alto nível de precisão. Em comparação com todos os demais modelos, a representação gráfica dos

resultados obtidos no modelo CFD (dependendo do programa/ferramenta utilizada) também é um fator positivo para a visualização dos resultados e identificação das soluções. Por outro lado, o nível de precisão dos resultados fornecidos, o tempo necessário entre a modelagem e a obtenção dos resultados, bem como o nível de detalhamento do projeto, são variáveis que dependem da habilidade técnica do usuário da ferramenta e da qualidade dos equipamentos (*hardwares* e *softwares*) disponíveis. Esses fatores representam custos para o projetista, que devem ser considerados para se justificar a aplicação do modelo CFD durante o Estudo Preliminar de Projeto. Soma-se a isso a necessidade de validação dos resultados obtidos para que se tenha uma análise confiável.

No caso da ventilação natural, a validação dos resultados geralmente não é um processo simples, dada a característica extremamente variável desse fenômeno e a estaticidade das simulações feitas no modelo CFD¹¹ – exigindo-se a validação dos diversos cenários possíveis (como, por exemplo, as variações anuais de temperatura e umidade do fluido).

3. Potencialidades e limitações da aplicação das ferramentas de cálculo da ventilação natural

Ao longo dos tópicos do presente capítulo foram abordados aspectos relacionados com as potencialidades e limitações no uso das ferramentas de cálculo da ventilação natural. Para evidenciar tais potencialidades e limitação, foi realizada uma análise comparativa dos modelos utilizando-se os seguintes parâmetros relacionados com a aplicabilidade dos modelos:

¹¹ As simulações estáticas, no campo da arquitetura e urbanismo, são aquelas que fornecem um “retrato” estático de determinada situação, tendo como base as informações pontuais inseridas pelo usuário. Ou seja, não fornecem um perfil anual, mensal, semanal, diário, etc., tendo como base um arquivo climático (que reúne as características do clima da local) – tipo de informação que pode ser obtida em simulações dinâmicas.

- Interface Amigável ao Projetista – Arquiteto: considera se o modelo e suas ferramentas de aplicação possuem interface e/ou linguagem amigáveis ao profissional de projeto – mais especificamente ao arquiteto.
- Nível de Habilidade Técnica Exigida do Usuário: considera o nível de habilidade técnica que o modelo e suas respectivas ferramentas de aplicação exigem do usuário para a construção, simulação/análise e obtenção dos resultados.
- Tempo de Modelagem e Obtenção dos Resultados: considera o tempo necessário para o desenvolvimento do modelo físico ou computacional, da simulação/análise, do tratamento e da obtenção dos resultados.
- Disponibilidade / Acesso às Ferramentas de Aplicação: considera a disponibilidade e/ou facilidade de acesso do projetista às ferramentas de aplicação do modelo de predição escolhido.
- Custo de Aplicação durante o Estudo Preliminar de Projeto: considera os custos envolvidos na aplicação do modelo durante a etapa de Estudo Preliminar de Projeto.
- Qualidade Gráfica / Visualização dos Resultados: considera a forma como os resultados são apresentados, tendo em vista a melhor compreensão e identificação de problemas e elaboração de diretrizes.
- Nível de Precisão dos Resultados: considera o nível de precisão dos resultados obtidos por meio do modelo.
- Flexibilidade para Analisar as Variáveis de Projeto em Termos de QIA: considera a flexibilidade (capacidade de adaptação) da ferramenta de aplicação do modelo em relação às variáveis de projeto em termos de QIA. Por exemplo, a capacidade de adaptação de equações do modelo analítico para analisar um conjunto de informações, ou a flexibilidade de alteração de modelos em escala para analisar cenários diferenciados.

Quadro 1: Quantificação dos modelos de análise e predição em relação aos parâmetros estabelecidos

Parâmetros	Modelo Analítico	Modelo Empírico	Modelo Multizona	Modelo de Zona Única	Modelo em Escala Reduzida	Modelo em Escala Real	Modelo CFD
Amigável ao Projetista – Arquiteto	0	0	0,5	0,5	0	0	1
Nível de habilidade técnica exigido do usuário	0	0	0,5	0,5	1	1	1
Tempo de modelagem e obtenção dos Resultados	0	0	0,5	0,5	1	1	0,5
Disponibilidade / Acesso às ferramentas de aplicação	1	1	1	0,5	0	0	1
Custo de Aplicação durante o EPP	0	0	0,5	0,5	1	1	1
Qualidade Gráfica / Visualização dos Resultados	0	0	0,5	0,5	1	1	1
Nível de Precisão dos Resultados	0	0	0,5	0,5	0,5	1	1
Flexibilidade para analisar as variáveis de Projeto – QIA	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	1

Fonte: Elaboração dos autores (2016).

Além do estabelecimento desses parâmetros que compõem a análise comparativa entre os modelos, também se determinou uma forma de quantificá-los. Com base nos aspectos positivos e negativos dos modelos, identificados na revisão da literatura sobre o assunto, optou-se por uma quantificação numérica adimensional simples (de 0 a 1 – com nível intermediário 0,5), em que: “1” possui a conotação de “alto”, “0,5” possui a conotação de “médio”, e “0” possui a conotação de “baixo”. Importante destacar que o significado da quantificação depende do parâmetro a ser analisado, por exemplo, “0” (baixo) pode possuir significado negativo em termos de qualidade gráfica, mas possui significado positivo em termos de custo de aplicação. Da mesma forma, a atribuição do “0” a um determinado modelo não quer dizer que seu custo de aplicação ou tempo de modelagem sejam zero ou que não existam – mas, sim, que seu custo e tempo de modelagem são mais baixos em relação a outros modelos com pontuação superior, e vice-versa.

O Quadro 1 apresenta a quantificação estimada por Sales (2016) para os modelos de análise e predição abordados. Para melhor compreensão, também foi utilizado um sistema de cores para destacar quando a pontuação é positiva (em verde) e quando é negativa (em vermelho); a pontuação intermediária é representada, em todos os casos, na cor amarela.

4. Considerações finais

É possível destacar alguns fatores fundamentais a serem considerados durante o desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto. Os fatores externos ao projeto estão relacionados às fontes externas de geração de poluentes e às características de temperatura e umidade relativa do ar do clima local. Estão, portanto, sob o domínio indireto do projetista, uma vez que independem do projeto a ser desenvolvido. Assim, a existência de fontes externas de poluentes e as características do clima local são fatores que o projetista deve analisar, tendo como objetivo a adoção de ações e diretrizes de projeto.

Os fatores internos de projeto estão sob o domínio direto do projetista, pois seus efeitos sobre o favorecimento da qualidade interna do ar dependem das suas tomadas de decisão. Assim, a análise desses fatores auxilia na adoção de ações e diretrizes de projeto que os modifiquem, no sentido de maximizar a qualidade do ar no edifício. Dessa forma, esses fatores estão relacionados com a eficiência da ventilação natural em favorecer níveis adequados de qualidade do ar, com vistas à saúde dos ocupantes. O Quadro 2 apresenta os fatores externos e internos ao projeto destacados neste capítulo.

Quadro 2: Fatores Externos ao Projeto e Fatores Internos ao Projeto com relação à QIA – Saúde Humana

Fatores Externos ao Projeto	Fatores Internos de Projeto
Características do Clima: análise do clima local e microclima do sítio.	Uso e Localização do Ambiente: análise das variáveis de projeto quanto ao zoneamento dos ambientes em função da QIA.
Características de Ocupação e Atividades Desenvolvidas no Entorno: análise das variáveis relacionadas com a geração e presença de contaminantes do ar decorrentes do entorno.	Aberturas para Ventilação: análise das variáveis de dimensionamento, posicionamento e distribuição das aberturas em função da necessidade estimada de remoção de poluentes.
Composição das Superfícies do Entorno: análise das variáveis relacionadas com o tipo de material da superfície do solo no entorno (ex.: vegetação, asfalto, solo exposto, etc.).	Materiais Construtivos: identificação do tipo de material que melhor se adéque às necessidades de QIA em cada ambiente.

Fonte: Elaboração dos autores (2016).

No caso do conforto térmico passivo, os fatores externos ao projeto condicionam as características de temperatura, umidade e velocidade do ar externo em relação ao projeto, considerando-se: os fatores climáticos globais e locais; a densidade de ocupação, rugosidade e relação W/H dos edifícios no entorno; a forma dos edifícios no entorno; e barreiras de vento no entorno. Os referidos fatores são decisivos na identificação do potencial de utilização da ventilação natural no projeto. Já os fatores internos ao projeto são aqueles que influenciam a eficiência da ventilação natural em proporcionar as condições de conforto térmico. Nestes, estão

compreendidos: posicionamento, orientação e forma do projeto; posicionamento, tamanho e distribuição das aberturas; divisões internas e profundidade da planta dos ambientes; elementos de captação e controle da ventilação natural (Quadro 3).

Quadro 3: Fatores Externos ao Projeto e Fatores Internos ao Projeto que compõem os diagramas de análise da ferramenta proposta com relação à QIA – Conforto Térmico

Fatores Externos de Projeto	Fatores Internos de Projeto
Fatores Climáticos Globais e Locais	Posicionamento, Orientação e Forma do Projeto.
Densidade de Ocupação, Relação W/H, Forma dos Volumes Construídos e Rugosidade do Entorno	Posicionamento, Tamanho e Distribuição das Aberturas
Barreiras de Vento	Divisões internas e Profundidade da Planta dos Ambientes
	Elementos de Captação e Controle da Ventilação

Fonte: Elaboração dos autores (2016).

Conhecendo os principais fatores a serem considerados nas ferramentas de cálculo da ventilação natural, o projetista deve aplicar a ferramenta que mais se aproxima dos objetivos estabelecidos. Os modelos macroscópicos, por suas características, usualmente são capazes de considerar um número reduzido desses fatores – que pode ser suficiente em certos casos. Por outro lado, é possível inserir quase a totalidade dos fatores apresentados nos modelos microscópicos, obtendo-se um diagnóstico mais completo e detalhado da situação.

Com base no exposto neste capítulo, percebe-se a importância e a complexidade envolvidas no estudo da ventilação natural no espaço construído. Destaca-se que as exigências sobre a qualidade e eficiência do espaço construído são assuntos cada vez mais presentes no desenvolvimento de projetos no Brasil – tornando crescente, também, a incorporação de ferramentas de auxílio ao projetista. Esta breve abordagem do assunto possibilita a visualização e compreensão geral das ferramentas de simulação da ventilação natural com maior utilização no mercado e na academia. No entanto, o surgimento de novas ferramentas computacionais pode, em um futuro breve, tornar a análise da ventilação natural uma ação cada vez mais fácil e mais próxima das etapas iniciais do processo de projeto.

Referências

ALLARD, Francis (Ed.). *Natural ventilation in buildings*. London: James & James, 2002.

AWBI, Hazim. *Ventilation of buildings*. London: E & FN Spon, 1991.

AXLEY, James. Analytical methods and computing tools for ventilation. In: SANTAMOURIS, Matthaios; WOUTERS, Peter (Ed.). *Building ventilation: the state of the art*. London: Earthscan, 2006. Cap. 2. p. 39-106.

AXLEY, James. Multizone airflow modeling in buildings: history and theory. *HVAC& Research*, v. 13, n. 6, p. 907-928, 2007.

CARDINALE, Nicola; MINUCCI, Massimo; RUGGIERO, Francesco. Analysis of energy saving using natural ventilation in a traditional Italian buildings. *Energy and Buildings*, v. 35, p. 153-159, 2003.

CHEN, Qingyan. Ventilation performance prediction for buildings: a method overview and recent applications. *Building and Environment*, v. 44, p. 848-858, 2009.

DOLS, William. A tool for modeling airflow & contaminant transport. *ASHREA Journal*, v. 43, n. 3, p. 35-43, 2001.

DOLS, William S.; EMMERICH, Steven J. LoopDA – natural ventilation design and analysis software. NISTIR 6967 - *National Institute of Standards and Technology*, 2003. Disponível em: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build03/PDF/b03062.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2014.

DRACH, Patrícia; VASCONCELLOS, Virgínia; CORBELLA, Oscar. *Desenvolvimento de experimentos didáticos para visualização de vento: simulação experimental em túnel de vento e simulação computacional*. Anais... ECACE/ENLACAC, Canela, 2010.

EMMERICH, Steven; DOLS, William; AXLEY, James. *Natural Ventilation Review an Plan for Design and Analysis Tools*. NISTRIR 6781. Prepared for Architectural Energy Corporation Boulder, Colorado, 2001.

ETHERIDGE, David; SANDBERG, Mats. *Building ventilation: theory and Measurement*. John Chichester, UK: Wiley and Sons, 1996.

FARIA, Luciano. *Air flow in the urban environment: an evaluation of the relationship between urban aspect ratios and patterns of airflow, wind velocity and direction in urban areas, and coefficient of pressure distribution on building envelopes*. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade de Cardiff, País de Gales. 2012.

FEUSTEL, Helmut; SMITH, Bill. *COMIS 3.0 – User’s Guide*. Lawrence Berkley National Laboratory. California, 1998. Disponível em: <http://epb.lbl.gov/comis/>. Acesso em: 07 ago. 2014.

FISK, William. Estimates of potencial nationwide productivity and health benefits from better indoor environments: an update. In: SPENGLER, J. D.; SAMET, J.; MCCARTHY, J. F. (Ed.). *Indoor Air Quality Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2001. Cap. 4.

FITZGERALD, Shaun; WOODS, Andrew. The influence of stack on flow patterns and stratification associated with natural ventilation. *Building and Environment*, v. 43, n. 10, p. 1719-1733, 2008.

HEISELBERG, Per; MURAKAMI, Shin; ROULET, Claude-Alain. *Ventilation of Large Spaces in Buildings*; analysis and prediction techniques. Energy Conservation in Buildings and Community Systems – IEA, Annex 26, 1998.

LIDDAMENT, Martin. *Air infiltration calculation techniques – an applications guide*. Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), 1986.

SALES, Gustavo. *Relatório Técnico de Avaliação de Conforto Térmico e Ventilação Natural Centro de Visitantes Flutuante ICMBio – Rio Negro/AM*. QUALI-A Consultoria Ambiental, 2013.

SALES, Gustavo de Luna. *Diagrama de ventilação natural: ferramenta de análise do potencial da ventilação natural no estudo preliminar de projeto*. 2016. 217 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SANTAMOURIS, Matthaios; WOUTERS, Peter (Ed.). *Building Ventilation: the state of the art*. London: Earthscan, 2006.

SANTAMOURIS, Matthaios. Ventilation for comfort and cooling: the state of art. In: SANTAMOURIS, Matthaios; WOUTERS, Peter (Ed.). *Building ventilation: the state of the art*. London: Earthscan, 2006. p. 217-235.

SANTAMOURIS, Matthaios; DASCALAKI, D. Prediction Methods. In: ALLARD, F. (Ed.). *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. London: James & James, 2002. p. 63-156

SEPPANEN, O. The effect of ventilation on health and other human responses. In: SANTAMOURIS, Matthaios; WOUTERS, Peter (Ed.). *Building ventilation: the state of the art*. London: Earthscan, 2006. Cap. 2. p. 247-264.

SOUZA, Valéria Moraes Baldoino de. *A influência da ocupação do solo no comportamento da ventilação natural e na eficiência energética em edificações: estudo de caso em Goiânia: clima tropical de altitude*. 2006. 260 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SPENGLER, John; SAMET, Jonathan; McCARTHY, John. (Ed.). *Indoor Air Quality Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2001.

SWAMI, Muthusamy; CHANDRA, Subrato. *Procedures for calculating natural ventilation airflow rates in buildings*. Flórida: Florida Solar Energy Center, 1987.

TOLEDO, Alexandre. *Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos: uma aplicação em Maceió/AL*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TOLEDO, Alexandre; PEREIRA, Fernando. Potencial da mesa d'água para a visualização analógica da ventilação natural em edifícios. In: ANAIS DO ENCONTRO NACIONAL DO CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. p. 1383-1390, Curitiba, 2003.

WALTON, Gary; DOLS, William. *CONTAM User Guide and Program Documentation*. National Institute of Standards and Technology – NIST, U.S Department of Commerce, 2005.

CAPÍTULO 4

Qualidade da luz natural e ferramentas para o projeto arquitetônico

Júlia Teixeira Fernandes e Cláudia Naves David Amorim

A temática da qualidade de luz natural é complexa e multidisciplinar, pois envolve simultaneamente a avaliação de muitas variáveis e critérios, o que exigiu, ao longo do tempo, o aperfeiçoamento dos métodos em busca de resultados que reflitam o dinamismo e a temporalidade da luz natural. Nesse sentido, o uso dos variados tipos de *softwares* contribui para estudos mais precisos e o desenvolvimento de projetos e normas para melhoria do ambiente construído.

1. O conceito de qualidade da iluminação

Atualmente, o conceito de *Qualidade da iluminação* aparece como o início de uma discussão importante para o estabelecimento de novos critérios e métodos de avaliação mais consistentes com a realidade contemporânea, especialmente com relação à integração de iluminação artificial e natural.

Boyce (1996; 2003) alerta que os valores estabelecidos nas normas, internacionalmente, têm alterado os níveis de iluminância em função do desenvolvimento

político-econômico, e não das reais necessidades humanas (visibilidade, desempenho da tarefa, conforto visual, comunicação social, saúde, bem-estar e segurança).

No Quadro 1 é possível ver a relação dos níveis de iluminância exigidos pela IES e a situação econômica. Percebe-se que existe diminuição das exigências paralelo às crises econômicas (energia), mesmo que para o desenvolvimento do mesmo tipo de tarefa.

Quadro 1: Recomendações de iluminância (lux) para leitura, relacionadas a cada edição do IES Lighting Handbook, tecnologia dominante de lâmpadas usadas na iluminação de escritórios e o estado econômico/político dos EUA

Versão IES	Tarefa Visual	Nível de Iluminâncias	Tipo de Lâmpada	Situação Político/Econômica
1947	regular difícil	300-500	Incandescente	Crescimento moderado
1954	regular difícil	300-500	Incandescente / Fluorescente	Crescimento acelerado
1959	regular difícil	1000-2000	Fluorescente	Crescimento acelerado
1966	regular difícil	1000-1500	Fluorescente	Crescimento acelerado
1972	regular difícil	1000-1500	Fluorescente	Crescimento
1981	regular difícil	200-300-500-750-1000	Fluorescente	Crise energética
1987	regular difícil	200-300-500-750-1000	Fluorescente	Crise energética
1993	regular difícil	200-300-500-750-1000	Fluorescente	Consciência ambiental

Fonte: Fernandes (2016) (Adaptado de Boyce, 2003).

Osterhaus (2009) investiga o desenvolvimento de normas para iluminação de escritórios em 80 anos e discute a prática recomendada de iluminação e a natureza

quantitativa das recomendações. O autor afirma que os valores de iluminância, depois de estarem em ascensão por quase um século, atingiram o seu pico e foram descendo para um nível mais apropriado. Enfatiza, ainda, a importância de os projetistas e pesquisadores gradativamente focarem sua atenção em aspectos da luz, que vão além das preocupações com as iluminâncias (luz incidente na superfície), ou seja, devem se preocupar também com as luminâncias (luz refletida), considerando uma abordagem mais qualitativa da iluminação.

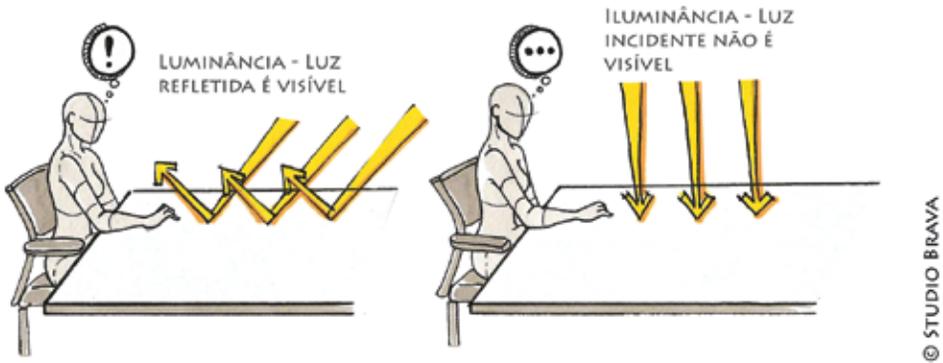
As conclusões das pesquisas avaliadas apontam para uma nova abordagem: a busca de critérios qualitativos para a iluminação, em especial para a luz natural. Além disso, buscaram definir como esses critérios poderiam ser trabalhados em normas e recomendações, sem restrições que interfiram na liberdade projetual. Apesar das investigações focarem nas questões quantitativas, é necessário avaliá-las no contexto das necessidades e suposições qualitativas (BOYCE, 2014; GALASIU; VEITCH, 2006; ARAJI, 2008; ARIES; VEITCH; NEWSHAM, 2010; DEHOFF, 2010; AIZENBERG, 2013; BARBATO *et al.*, 2013; DJOKIC; KOSTIC, 2013).

A abordagem quantitativa deve ser o início básico dos estudos, sendo crucial a definição dos parâmetros e critérios que serão utilizados em cada tipo de avaliação, segundo seus propósitos específicos (GALASIU; VEITCH, 2006).

A iluminação tem como função básica oferecer as condições visuais adequadas para que as pessoas possam desempenhar as atividades com eficácia, eficiência e conforto. Assim, é necessária a avaliação de critérios de desempenho e conforto (iluminâncias, luminâncias, refletâncias das superfícies, uniformidade, contrastes, ofuscamento, direcionalidade, modelagem, reprodução de cores, etc.), tanto em uma abordagem quantitativa (cálculos, medições, simulações) quanto qualitativa (percepção do usuário).

A Figura 1 apresenta a diferença entre a luz incidente e a luz visível. Como a reflexão da luz está diretamente relacionada às propriedades dos materiais superficiais, uma mesma quantidade de iluminância incidente pode gerar diferentes luminâncias.

Figura 1: Iluminâncias (lux) = luz incidente e luminância (CD/m²) = luz refletida



Fonte: Fernandes (2016, p. 38). Ilustração: João Felix.

Além disso, a avaliação apenas da incidência de luz nas superfícies não é adequada, uma vez que as pessoas percebem o ambiente luminoso e, conseqüentemente, a luz pelo seu campo visual, conforme Figura 2 (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1993).

Figura 2: Campo Visual



Fonte: Fernandes (2016, p. 38). Ilustração: João Felix.

Veitch e Newsham (1996) apontam que a avaliação de iluminâncias em um escritório é importante no desempenho visual apenas quando os níveis estão muito baixos. Eles enfatizam que, atualmente, os usuários de escritórios executam suas atividades visualizando um plano vertical (telas de computador) por mais tempo. Assim, é mais coerente avaliar a satisfação dos usuários com base em avaliações de luminâncias no campo visual do que simplesmente medir níveis de iluminância no plano de trabalho horizontal (mesa).

Diante de diversas críticas quanto à avaliação da iluminação apenas por parâmetros quantitativos, a discussão nas pesquisas passa a focar na Qualidade da Iluminação e como novos parâmetros, índices e métricas poderão ser incorporados a recomendações, normas e guias projetais em uma abordagem multidisciplinar. A evolução dos *softwares* de simulação colabora para o aperfeiçoamento dos métodos e a geração de resultados mais precisos e amplos.

Para estabelecer a relação entre iluminação, conforto, bem-estar dos usuários e a influência da arquitetura, é preciso buscar a definição do conceito de Qualidade da Iluminação, abordado em diversas áreas: Arquitetura, Engenharia, Arte, Psicologia e Medicina. (VEITCH, 2006; TRALAU, 2011).

A *Illuminating Engineering Society of North America* (IESNA) aponta que a Qualidade da Iluminação está, primeiramente, relacionada com a visibilidade, que é definida a partir das necessidades humanas que dependem da iluminação: humor e atmosfera, desempenho de tarefa, conforto visual, julgamento estético, saúde, segurança e bem-estar e, por fim, comunicação social (IESNA, 2000).

É fundamental o conhecimento dessas relações para fornecer dados sobre a Qualidade da Iluminação. O conceito definido pela IESNA (2000), apresentado na Figura 3, é amplamente referenciado atualmente no meio acadêmico e baseia-se na interação de três aspectos gerais: arquitetura, aspectos econômicos e necessidades humanas.

Figura 3: Diagrama que demonstra o modelo de Qualidade da Iluminação para a IESNA



Fonte: Fernandes (2016, p. 41). (Adaptado de IESNA, 2000)

A complexidade em definir o conceito de Qualidade da Iluminação está justamente na dependência da avaliação de várias dimensões, não podendo ser baseada em uma simples medida ou técnica de medição (BOYCE, 2014). Iluminamos os espaços para atender às mais variadas necessidades humanas e, por isso, não existe uma medida unitária da adaptabilidade entre esses objetivos e os resultados conseguidos (MARTAU, 2008). Vários autores buscam conceitos ou modelos que contribuam para demonstrar os fatores que devem estar presentes na boa iluminação. Martau (2008), por exemplo, estabelece oito diretrizes relacionadas à Qualidade da Iluminação:

1. Orientar e definir o tempo e o espaço para os usuários;
2. Ser elemento de composição do projeto;
3. Dar suporte às intenções (forma, cores, materiais);
4. Criar caráter e atmosfera do lugar, segundo as expectativas dos usuários;
5. Permitir e promover a comunicação;
6. Conter uma mensagem e significado (brilho, cor e movimento);
7. Ser original e causar efeito;
8. Permitir que as pessoas vejam e reconheçam o ambiente.

Veitch e Newsham (1996) defendem que a Qualidade da Iluminação depende das condições da luz que causam impactos desejáveis às pessoas que usarão o ambiente, como, por exemplo, o desempenho visual, o conforto visual, a interação e as comunicações sociais, a saúde e a segurança, o humor, o bem-estar, a satisfação e os julgamentos estéticos. De forma esquemática, demonstra-se a importância dos parâmetros relacionados às variáveis no Quadro 2. Os espaços vazios do quadro significam relações em que há pouca evidência, ou mesmo nenhuma, para se alcançar resultados conclusivos. Os espaços mais escuros são onde mais se devem investir estudos e esforços, segundo os autores, principalmente em pesquisas comportamentais a fim de investigar a gama de resultados e combinações possíveis.

Para Veitch, Christoffersen e Galasiu (2013), existe um grande problema criado pelos manuais ou pela interpretação errônea deles, já que, por apresentarem apenas indicadores quantitativos (iluminâncias recomendadas), estariam contribuindo para projetos de baixa qualidade e estimulando-os. Osterhaus (2009) afirma que o interesse recente na Qualidade da Iluminação e Produtividade, bem como o interesse renovado em Eficiência Energética puseram em evidência a falta de diretrizes e recomendações apropriadas para os projetistas (arquitetos e designers de interiores e iluminação). A consequência disso é que os ambientes, especialmente de escritórios, têm apresentado problemas com ofuscamento e consumo de energia.

De acordo com Dehoff (2010), deve haver um equilíbrio da Eficiência Energética e Qualidade de Iluminação, o qual pode ser avaliado com a relação de dois indicadores específicos: o *Lighting Energy Numeric Indicator* (LENI) e o *Ergonomic Lighting Indicator* (ELI). O LENI avalia a quantidade de energia utilizada para iluminação artificial do edifício durante um ano de uso, em kWh / (m² ano). Muitas normas e certificações europeias baseiam-se nesse indicador. O ELI especifica aspectos da Qualidade da Iluminação, sejam eles normativos, subjetivos e/ou criativos, por meio de questionários com usuários e medições realizadas por especialistas. São avaliados pelo ELI os cinco critérios: desempenho visual, vista, conforto visual, vitalidade e autonomia.

Quadro 2: Relação entre as variáveis no estudo de iluminação

Variáveis Independentes	Variáveis Dependentes						
	Conforto Visual	Desempenho Visual	Interação Social, Comunicação	Humor, Preferências, Satisfação	Saúde e Segurança	Julgamento Estético	
Luminância							
Iluminância							
Uniformidade (tarefa)							
Uniformidade (ambiente)							
Ofuscamento							
Cor							
Flicker							
Sistema de Iluminação							
Controle							
Ilum.Natural e Janela							

Fonte: Fernandes (2016, p. 40). (Adaptado de Veitch e Newsham, 1996).

Na discussão sobre Qualidade da Iluminação, algumas conclusões da pesquisa de Hellinga (2013) são importantes, como:

- A confirmação da área preferível de janela corresponde ao indicado pela literatura: mínima de 20-25% para o conforto visual, e preferência por 30%; fachadas totalmente envidraçadas não são as preferíveis. As pessoas preferem janelas horizontais, com posição relacionada à vista exterior;
- Indica que a quantidade de luz natural em um escritório influencia no conforto visual, bem como sua disposição e sua orientação.
- Pesquisas futuras poderiam investigar melhor a relação entre o conteúdo da vista e a preferência da complexidade e diversidade da paisagem.

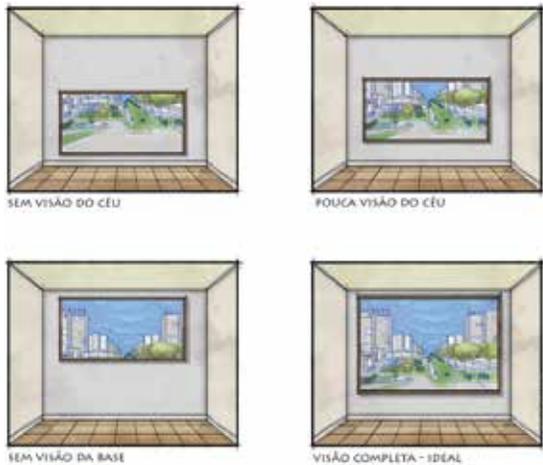
Bell e Burt (1995) também asseveram que olhar para um ponto distante no horizonte através de uma janela proporciona um relaxamento aos músculos oculares e vistas de cenas naturais com vegetação e céu despertam interesse pela variedade e pelo movimento que oferecem. Quando o cenário externo é urbano, vistas dinâmicas com atividades humanas e com mudanças do clima são preferidas pela maioria das pessoas (BELL; BURT, 1995; TOLEDO, 2008).

Segundo o *BS Daylight Code* (1992, p.100), citado por Toledo (2008), uma vista pode ser dividida em três camadas:

- Superior (distante): o céu acima do *skyline* natural ou urbano;
- Média: o objeto ou a cena, como campos, árvores, montanhas e edificações;
- Inferior (próximo): a base da cena, como pisos e pavimentações.

Para uma vista agradável, recomenda-se um equilíbrio na proporção entre as camadas (Figura 4). Segundo Toledo (2008), as vistas que contêm as três camadas são as mais satisfatórias para os usuários do ambiente em questão. Vistas em que o céu não aparece, ou em que as camadas estão desproporcionais, costumam causar insatisfação.

Figura 4: Divisão de camadas da vista exterior



Fonte: Fernandes (2016, p. 80). (Adaptado de Toledo, 2008). Ilustração: João Felix.

Assim, os estudos de iluminação natural foram intensificados na última década, principalmente em função do desenvolvimento de métricas e métodos específicos. Além disso, ficou clara a necessidade de um olhar multidisciplinar, com avaliação concomitante de aspectos da arquitetura, do usuário e do meio ambiente externo. Fernandes (2016) buscou sintetizar o conceito de Qualidade da Iluminação pela integração entre o desempenho visual (nível e distribuição de iluminâncias no plano horizontal), conforto visual (ofuscamento e contraste no campo visual), qualidade da vista exterior, eficiência energética e satisfação do usuário, conforme Figura 5.

Figura 5: Conceito de Qualidade da Iluminação



Fonte: Fernandes (2016, p. 47).

Apesar dos cinco aspectos da Qualidade da Iluminação, a depender da abordagem, cada pesquisa deve ponderar o uso de cada um deles e avaliar as variáveis de estudo, os critérios de avaliação e os métodos mais adequados em função de seus objetivos específicos.

2. Luz natural: benefícios e variáveis de avaliação

Os espaços construídos têm como principal finalidade atender às necessidades humanas. Este deve ser um conceito primário da estruturação formal dos ambientes e da própria arquitetura como ciência. No contexto da iluminação, os espaços são (ou deveriam ser) projetados para o desempenho e o conforto visual, uma vez que a satisfação do usuário influenciará o seu comportamento, a sua produtividade e o seu bem-estar físico e emocional.

Boyce, Hunter e Howlet (2003) realizaram uma revisão sobre os benefícios da iluminação natural proveniente de janelas, avaliando os impactos no desempenho e na produtividade em locais de trabalhos, na saúde humana e no retorno financeiro. As conclusões demonstraram que:

1. Fisicamente, a luz natural é apenas mais uma fonte de radiação eletromagnética, o que poderia apontar para uma facilidade de replicação pela luz artificial. No entanto, na realidade, os sistemas artificiais ainda não conseguem apresentar todas as características positivas detectadas na iluminação natural, justamente por ela ter uma variação constante. Assim, não existem garantias em relação à manutenção do desempenho da iluminação natural, uma vez que há uma maior possibilidade de ocorrência de ofuscamento,¹ brilhos e sombras indesejáveis.

¹ “Ofuscamento é a sensação visual produzida por áreas brilhantes dentro do campo de visão e pode ser experimentado tanto como um *ofuscamento desconfortável* quanto um *ofuscamento inabilitador*.” (NBR ISO/CIE 8995, 2013, grifos nossos).

2. Fisiologicamente, a luz natural é um estimulante eficaz para o sistema visual e o sistema circadiano humano e, psicologicamente, é um atrativo para o usuário. A vista externa é muito desejada, e janelas que fornecem uma visão agradável de fora podem reduzir o estresse e, por consequência, a demanda por serviços de saúde.
3. Diferentes condições de iluminação podem mudar o humor dos ocupantes de um edifício; no entanto, não é simples estabelecer as condições ideais de iluminação que favoreçam um ambiente satisfatório para todos. Indivíduos que preferem a luz natural e ficam expostos a ela durante o dia podem ficar mais satisfeitos, se comparados a indivíduos com a mesma preferência e que têm seu acesso à iluminação natural limitado.

A disponibilidade da luz natural está relacionada principalmente com aspectos sazonais do clima (nebulosidade e radiação solar) de regiões onde há variações de luminosidade em função da época do ano e da hora do dia. Esses aspectos também são influenciados pela qualidade do ar e as características físicas e geográficas (latitude, continentalidade e altitude, orientação e configuração do entorno). Percebe-se, portanto, que a disponibilidade de luz é determinada por características dinâmicas e de caráter local.

Em função da complexidade e da diversidade de situações climáticas e atmosféricas, a Comissão Internacional de Iluminação (*CIE Commission Internationale de l'Eclairage*) estabeleceu 15 modelos de céu para estudos da luz natural. De forma geral, são identificados, geralmente, como céu de luminosidade uniforme (hipotético), céu encoberto (típico de latitudes altas, como o norte europeu), céu claro (típico das baixas latitudes, como o sul europeu e regiões equatoriais) e céu parcialmente encoberto ou intermediário (regiões tropicais e subtropicais).

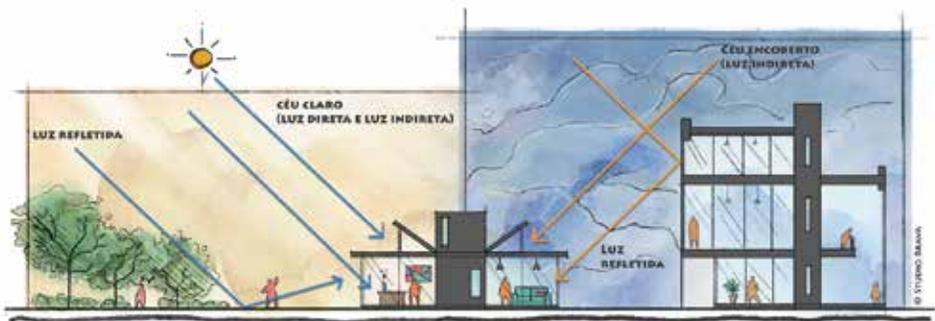
Para o Brasil, de modo geral, o céu parcialmente encoberto ou intermediário é o mais representativo, como comprovado por Scarazzato (1995), que fez um levantamento das condições típicas de céu nas diferentes capitais brasileiras para os dias

típicos.² Essa peculiaridade reforça o alerta para o perigo de adoção de critérios e normas internacionais, comparativos de estudos de caso e metodologias elaboradas com base em climas e tipos de céu fora dos padrões brasileiros.

Na realidade brasileira, por exemplo, são encontrados valores elevados de iluminâncias, em espaços abertos, que ultrapassam os 70.000 lux ao meio dia no inverno e 100.000 lux no verão. Para o desenvolvimento de tarefas de alta precisão, são necessários aproximadamente 1.500 lux, dessa forma, observa-se que existe um excedente significativo de luz natural disponível.

Além da significativa diferença na disponibilidade de luz entre uma situação de céu claro e céu encoberto, a interferência do entorno também é determinante no desempenho lumínico nos ambientes interiores. Destaca-se a importância de as normas urbanísticas também serem elaboradas em função da visão da abóbada celeste resultante das edificações do entorno, que moldam a configuração da abóbada celeste resultante. Essas relações de tipo de céu e obstruções externas são apresentadas na Figura 6:

Figura 6: Diferença de Disponibilidade de Luz (Tipo de Céu) e Obstruções Externas (entorno)



Fonte: Fernandes (2016, p. 54). Ilustração: João Felix.

As soluções arquitetônicas, por sua vez, devem ser coerentes e comprometidas com o conforto visual dos usuários, pois existe um elevado risco de desconforto por

² Aqueles que melhor representam as condições mais frequentes de nebulosidade em cada local.

excesso de luz natural, tanto em termos quantitativos como qualitativos (VIANNA; GONÇALVES, 2007).

Em relação às variáveis do entorno do edifício, Amorim (2007) estabelece como principais critérios do espaço urbano: o desenho urbano, a refletância e a especularidade das fachadas dos edifícios do entorno e o ângulo máximo de incidência do sol na base do edifício. De forma complementar, autores ressaltam que o espaço urbano influencia no aproveitamento da iluminação em função do desenho urbano, da configuração espacial, das obstruções, das características dos materiais superficiais (texturas, cores, refletâncias), da disposição das edificações (dimensões, proporções e espaçamentos), da densidade, rugosidade e porosidade (ROMERO, 2000; LEDER *et al.*, 2007).

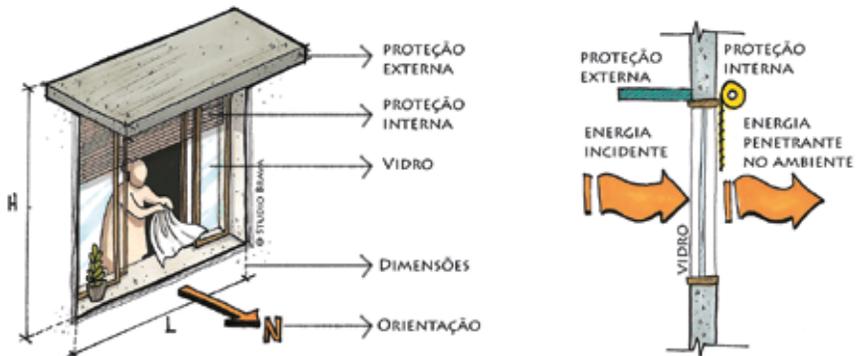
Na escala do edifício, os aspectos relacionados à forma (compacidade, porosidade e esbeltez) e à envoltória são os grandes responsáveis pelo desempenho da iluminação natural (ROMERO, 2000). Amorim (2007), baseado em Baker, Fanchiotti e Steemers (1993), aponta que os principais parâmetros para avaliação da iluminação de um edifício são: a forma, a planta baixa, a taxa de abertura, a orientação, a distribuição das aberturas nas fachadas, as proteções solares e as aberturas zenitais.

Para o ambiente interno, aspectos relacionados à dimensão e à proporção do ambiente – características do coletor de luz, especificação do vidro, dispositivo de sombreamento e materiais superficiais – são grandes definidores da Qualidade da Iluminação Natural (BELL; BURT, 1995; BITTENCOURT *et al.*, 1995; BOGO *et al.*, 2009; CINTRA, 2011; TABET AOUL, 2012).

A abertura (Figura 7), com suas dimensões, seu posicionamento, sua orientação e seus elementos de controle, além de definir a quantidade e a qualidade de luz interna, também é o elemento que promove a integração com o meio exterior e faz o enquadramento de uma visão específica para o usuário. Essa vista exterior influencia na percepção do espaço e na própria satisfação e bem-estar dos indivíduos (ARAJI, 2008; ARIES *et al.*, 2010; SHIN *et al.*, 2012; HELLINGA, 2013). Por isso,

o entendimento específico da abertura lateral, particularmente da janela, nos estudos de iluminação natural, é fundamental para o desempenho visual, o conforto visual e a qualidade da vista exterior.

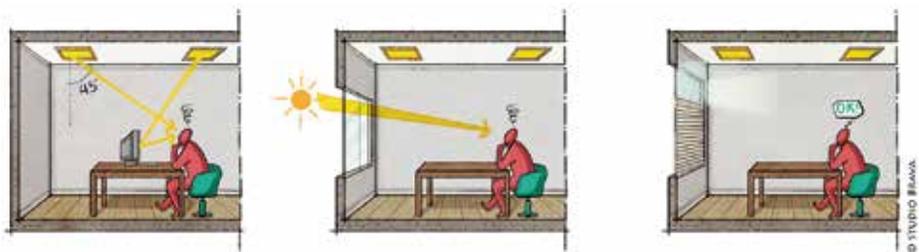
Figura 7: Principais variáveis da janela



Fonte: Fernandes (2016, p. 93). Ilustração: João Felix.

Janelas amplas podem proporcionar níveis mais altos de iluminação natural e melhor vista para o exterior, mas também podem causar ofuscamento e maiores ganhos ou perdas de calor, o que refletirá no desconforto do usuário e gerará maior consumo de energia para o condicionamento artificial (GHISI; TINKER; IBRAHIM, 2005; FERNANDES, 2009; LIMA, 2010; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). A Figura 8 apresenta exemplos de ofuscamento causado pela visão direta de fontes de luz: natural (janela) e artificial (luminária e tela de computador).

Figura 8: Exemplos de ofuscamento causado por iluminação artificial e iluminação natural

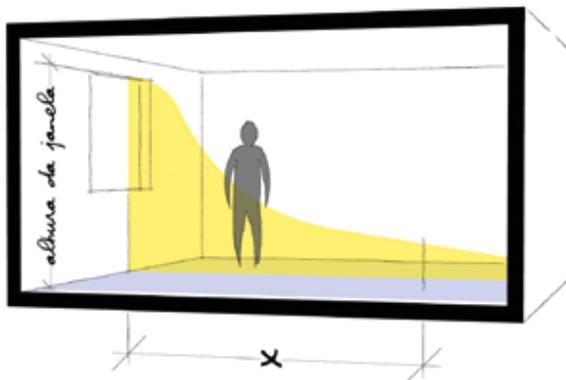


Fonte: Fernandes (2016, p. 71). Ilustração: João Felix.

É comum que o usuário use proteções internas (persianas) para bloquear a entrada da radiação ou da luz excessiva e sistemas artificiais por conseguir maior controle e qualidade (AMORIM, 2007; LIMA, 2010). No entanto, a vista para o espaço externo fica comprometida, intensificando uma contradição entre eficiência energética e conforto visual.

Nos ambientes iluminados lateralmente, existe uma diminuição dos níveis de iluminâncias ao longo da profundidade do ambiente, conforme demonstrado na Figura 9. É comum encontrar níveis altos próximos às janelas e áreas muito escuras à medida que se distancia da fachada. Ambientes profundos intensificam o contraste, podendo causar fadiga visual. Além disso, esse contraste é um dos grandes responsáveis pela não utilização da luz natural pelo usuário de escritórios, que prefere a uniformidade da iluminação artificial para a realização de tarefas (PEREIRA, 1993; DIDONÉ, 2009).

Figura 9: Sala iluminada lateralmente: demonstração da uniformidade da iluminação natural

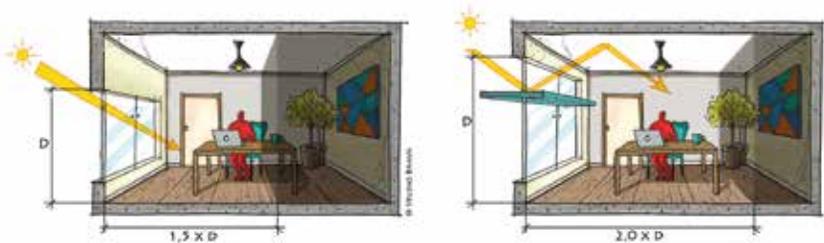


Fonte: Cintra (2011, p. 36).

Assim, já é comprovada a ineficiência da abertura lateral na distribuição uniforme da luz no espaço. A quantidade de luz em um ambiente tem relação direta com a profundidade e a altura da abertura em uma proporção que chega a duas vezes e meia a altura do piso ao topo da janela (CINTRA, 2011).

É possível empregar estratégias no projeto arquitetônico para ampliar a distribuição da luz natural no interior do ambiente, principalmente com a utilização de elementos que permitam maiores reflexões e direcionamentos da luz. A Figura 10 apresenta o uso de prateleira de luz e o aumento da distribuição da luz natural na profundidade do ambiente.

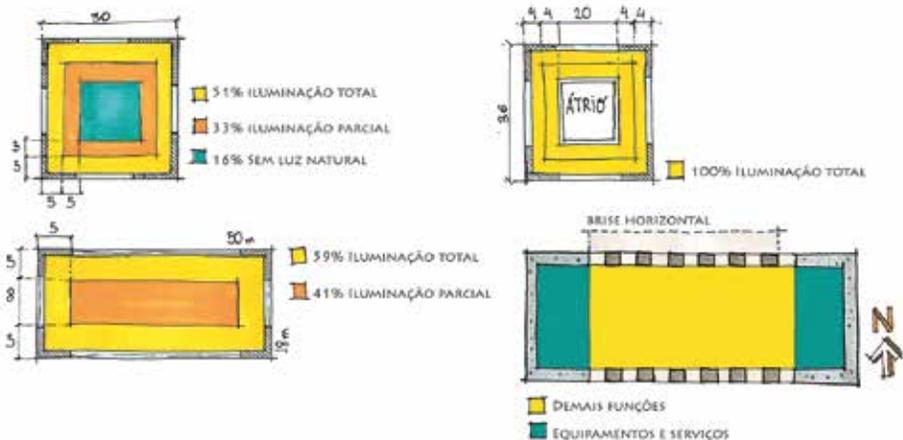
Figura 10: Relação da altura da abertura e profundidade do ambiente



Fonte: Fernandes (2016, p. 61). Ilustração: João Felix.

Em edifícios com vários pavimentos, como na Figura 11, uma distância de 5 metros pode ser totalmente iluminada com luz natural, enquanto os 5 metros além desse limite podem apenas ser parcialmente iluminados (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Figura 11: Aproveitamento da luz natural na profundidade do pavimento



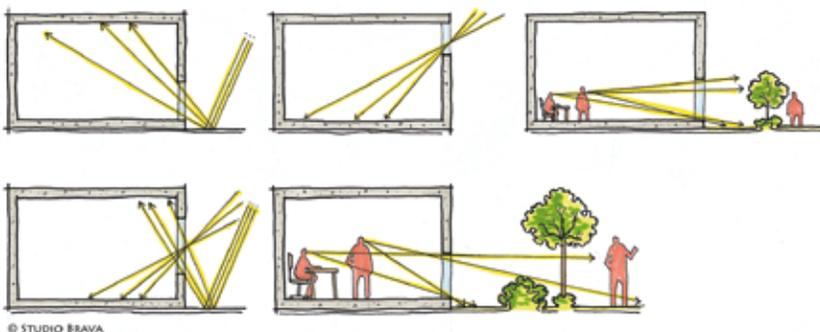
Fonte: Fernandes (2016, p. 62). (Adaptado de Lamberts, Dutra e Pereira, 2014). Ilustração: João Felix.

Quanto à orientação das janelas, a literatura mostra que a melhor orientação para a iluminação natural, segundo a realidade brasileira, é o posicionamento das maiores fachadas para norte e sul, isso porque é mais fácil fazer proteção para a fachada norte, além da fachada sul receber menos radiação solar direta, com menos problemas de ofuscamento (ROMERO, 2000; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

De forma geral, conforme a Figura 12, as dimensões e as alturas das janelas modificam a distribuição de luz ambiente, segundo os seguintes princípios (BARBOSA, 2010):

- Janelas posicionadas mais baixas proporcionam iluminação pouco uniforme com risco de ofuscamento por se situarem na linha de visão; por outro lado, elas permitem contato visual com a paisagem;
- Janelas com posição mais alta propiciam um maior alcance na distribuição da luz e maior uniformidade, diminuindo a possibilidade de ofuscamento por estarem situadas acima do campo visual;
- Janelas com formas contínuas proporcionam maior uniformidade nas áreas próximas às aberturas do que janelas descontínuas;
- Espaços que têm mais de uma janela possuem uma distribuição de luz mais equilibrada.

Figura 12: Influência das janelas na distribuição da luz ambiente



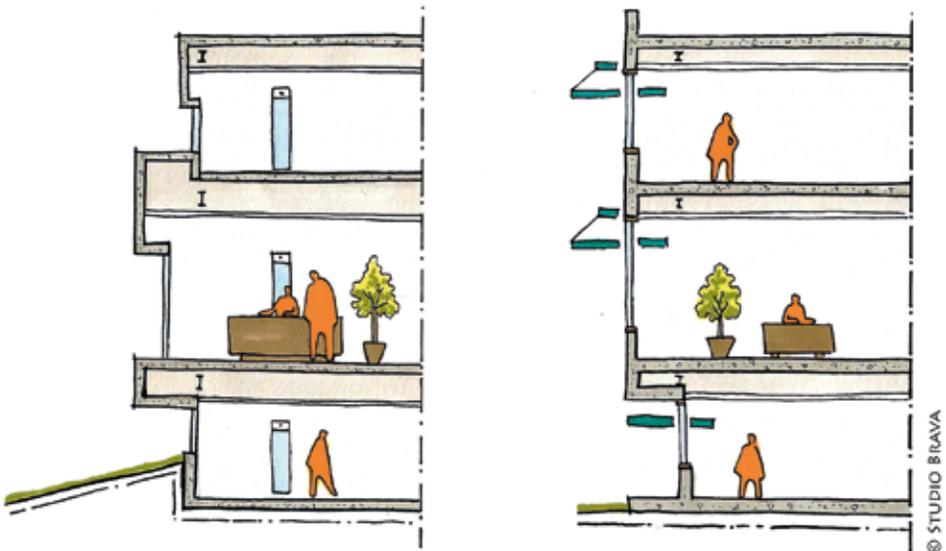
Fonte: Fernandes (2016, p. 63). Ilustração: João Felix.

A diversidade de tipos de Céu e as alterações dinâmicas da quantidade de luz exigem, cada vez mais, o uso de *softwares* de simulação para a avaliação da luz natural, uma vez que permitem avaliar simultaneamente as variáveis ambientais, do espaço arquitetônico, do entorno e as condições de uso.

3. A luz natural e o projeto arquitetônico

O partido arquitetônico já estabelece intenções e soluções definitivas quanto à relação do edifício e à iluminação natural, em especial na determinação da janela, como principal elemento de passagem da luz (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1993). A Figura 13 apresenta opções de partido para a janela.

Figura 13: Opções de partido para a janela



Fonte: Fernandes (2016, p. 17). Ilustração: João Felix.

Para Baker, Fanchiotti e Steemers (1993), a abordagem tradicional para o projeto com iluminação natural, assim como outros elementos da arquitetura, vem sendo mais praticada com bases na experiência consolidada do próprio arquiteto.

Eles afirmam que, provavelmente até o século passado, os arquitetos ainda não identificavam a iluminação natural como um tópico específico ou que poderia ser avaliado, independentemente da própria linguagem do projeto. O desenho da janela estava relacionado ao estilo arquitetônico, visto que era um elemento dominante na aparência visual do edifício.

No início do século XX, apesar da existência da iluminação artificial, a luz natural ainda era considerada a principal fonte de iluminação em edifícios que usavam a iluminação artificial somente à noite. Naquele momento, os projetos ainda adotavam plantas baixas com pouca profundidade e formas adequadas às condições de iluminação natural. Essa postura fortaleceu a necessidade de desenvolvimento de mecanismos que auxiliassem o projeto com iluminação natural e, conseqüentemente, a criação de métodos de predição: matemáticos, geométricos, gráficos, diagramas, maquetes, etc. (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1993).

Para os requisitos de iluminação natural, surgiram diversos métodos com foco principalmente na determinação da luz disponível internamente, sua distribuição, a influência das obstruções e das reflexões. O arquiteto, por sua vez, deve estar ciente de todas as implicações em suas escolhas; e no caso particular da janela, a IEA (1999) apresenta as principais considerações que devem ser feitas, relacionando aspectos funcionais e projetuais, conforme apontado na Figura 14.

A própria janela evoluiu, adaptando sua funcionalidade, incorporando as oportunidades tecnológicas e sendo influenciada por aspectos culturais, de forma que enriqueceu a trajetória da própria arquitetura. No entanto, após a criação da lâmpada fluorescente, a iluminação natural foi relativamente abandonada, enquanto a definição dos aspectos quantitativos da luz artificial passou a ser quase uma obsessão das pesquisas, em especial quanto à definição das iluminâncias (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1993; BOYCE, 2003; AMORIM *et al.*, 2011).

Para Baker, Fanchiotti e Steemers (1993), o processo de projeto arquitetônico tradicional apresenta uma série de incertezas e fases conduzidas quase que somente pela intuição e pela experiência de um projetista. Os autores enfatizam que há uma

ênfase ao desenho de uma só pessoa, geralmente o titular do escritório. O esboço inicial do projeto é normalmente elaborado num período muito curto, e isto gera quase sempre uma falta de oportunidade para que especialistas ou o uso de ferramentas possam contribuir nas fases iniciais do processo projetual.

Figura 14: Funções e considerações para o projeto de janela e sistemas de iluminação natural



Fonte: IEA – Inter-regional Energy Agency. *Daylighting Design Tools* (1999, p. 34).

Para Alucci (2007), não há vantagens evidentes no engessamento das decisões de projeto. A autora destaca que a prática arquitetônica tem mostrado que, mesmo o conhecimento da teoria do conforto ambiental por parte do arquiteto, não implica necessariamente na produção de uma boa arquitetura.

Aspectos mais específicos da luz natural devem ser examinados ainda na fase inicial de projeto, como questões relativas à implantação, à forma e à orientação da edificação e à caracterização das aberturas devido ao fato de condicionarem inteiramente a quantidade e a qualidade da luz natural que incidirá no ambiente

interior. Entretanto, a prática de projeto demonstra que esses aspectos geralmente têm sido decididos em função de outros fatores (PEREIRA *et al.*, 2005; DUTRA; YANNAS, 2006; AMORIM, 2007).

Pereira *et al.* (2005) buscaram identificar as barreiras para que fossem considerados aspectos essenciais da iluminação natural no projeto e em relação às suas diversas fases: partido geral, anteprojeto e detalhamento. Concluíram que a principal barreira é a compreensão do fenômeno da luz natural no ambiente construído e dos aspectos a ele relacionados. De acordo com a pesquisa, nas fases iniciais do projeto arquitetônico, o aspecto mais valorizado foi o domínio da ideia central, ou seja, a existência de um princípio organizador como elemento fundamental para a condução do processo projetual. A pesquisa também detectou que, na prática, as variáveis de projeto relacionadas com a luz natural e a eficiência energética (geometria, características, dimensões e localização das aberturas) ganham maior ênfase no anteprojeto e no detalhamento.

Para que a conexão dos indicadores de conforto oriundos da pesquisa científica ocorra, de fato, no projeto, é fundamental visualizar os fenômenos atuantes por meio de imagens estimulantes ao processo criativo. Assim, cada aspecto do conforto necessita de tradução específica dos conceitos e indicadores em imagens gráficas adequadas ao processo projetual, atualmente advindas principalmente do uso de softwares de simulação (MOREIRA; KOWALTOWSKI, 2011).

Em sua pesquisa para o desenvolvimento do Diagrama Morfológico, que foi baseado em Baker e Steemers (1998), Amorim (2007) ressalta que alguns autores têm desenvolvido trabalhos buscando reunir repertório de arquitetura exemplar no uso da iluminação natural e da adequação ao contexto climático (BAKER; STEEMERS, 1998, FONTOYNONT, 1998) ou, ainda, sistematizando o processo de organização desse repertório projetual (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1993; ROGORA, 1997; OLIVEIRA, 1998).

Para Dutra e Yannas (2006), os diagramas se mostraram ferramentas úteis para a análise de projetos bioclimáticos, pois permitiram identificar como diretrizes

bioclimáticas podiam ser identificadas e tratadas no processo de projeto. Em geral, é o resultado de um procedimento analítico que permite captar, para além da mera aparência, uma estrutura que é parte da essência da realidade, ou seja, esse recurso gráfico é, na maior parte das vezes, entendido como uma espécie de “sistema reductor” que comprime e torna legível certa quantidade de informações (BARKI, 2009).

Diagrama é um recurso gráfico de longa história; no entanto, ganhou um papel relevante na arquitetura moderna com Le Corbusier e os pioneiros do De Stijl, do Vkhutemas e da Bauhaus. Hoje, arquitetos como Stan Allen, Rem Koolhaas, Ben van Berkel e Petr Eisenman demonstram seu uso continuado e eficaz (BARKI, 2009).

Atanasio, Pereira e Pereira (2007) afirmam que, apesar do avanço em pesquisas e aparatos tecnológicos desenvolvidos nas últimas décadas, nota-se que existem barreiras que dificultam a aplicação desse avanço no projeto arquitetônico de modo satisfatório. Estudos recentes têm apontado como uma das principais barreiras a falta de adequada compreensão do fenômeno da luz. “Esse fato gera um quadro inverso de valores, pois antigamente possuíamos menos tecnologia e os projetistas tomavam mais partido arquitetônico da luz natural.” (ATANASIO; PEREIRA; PEREIRA, 2007).

O processo de projeto também é um processo de aprendizagem, em que o projetista estuda o objeto e seus condicionantes, necessitando do suporte de vários tipos, como sistemas de informação (referências, códigos, manuais, entre outros), desenhos, modelos, cálculos, simulações e discussões (opiniões de cliente, usuário, colaboradores, entre outros). A qualidade desse sistema de suporte reflete diretamente no processo de projeto e (espera-se) na qualidade do produto (projeto) (KOWALTOWSKI; MOREIRA; PETRECHE, 2006).

Para Madsen e Osterhaus (2006), a inserção da qualidade da iluminação natural no projeto é complexa e não pode ser avaliada apenas por meio de equações ou regras simples. Por isso, muitas vezes, as soluções propostas para o projeto são limitadas a estabelecer e verificar os níveis e a distribuição da iluminação. Os autores defendem o uso dos *softwares* como base das soluções propostas.

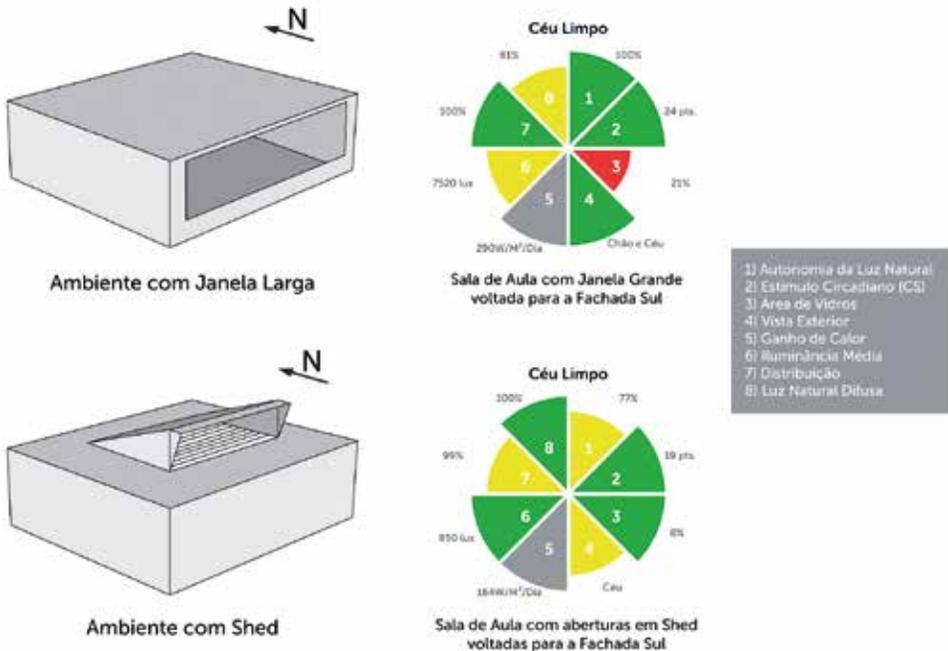
Proposto por Leslie, Radetsky e Smith (2012), o “*Daylighting Dashboard*” é uma representação visual do potencial de aproveitamento da luz natural na fase inicial do projeto, buscando atender a oito principais objetivos, que são priorizados de acordo com a situação. Para os autores, as decisões mais importantes para aproveitar a iluminação natural nos ambientes internos estão na fase conceitual do projeto, quando são definidas a configuração do edifício e da janela. Essas decisões afetam a qualidade e a quantidade da luz, os custos, a vista exterior, o ganho de calor e o uso de energia. Os oito parâmetros principais para o projeto podem ser resumidos em:

- iluminância média: fornecer luz natural suficiente para executar tarefas;
- distribuição: distribuir a luz em todo o ambiente;
- luz natural difusa: minimizar a radiação direta e controlar o ofuscamento;
- autonomia de luz natural: economizar energia;
- estímulo circadiano : promover a estimulação do ciclo circadiano;
- área de vidros: controlar custos e minimizar área de janelas ou zenitais;
- vista: fornecer vista para o exterior;
- ganho de calor: reduzir o gasto de energia do edifício com condicionamento de ar.

O método utiliza cores (vermelho, amarelo e verde) para indicar um *ranking* de aspectos positivos e/ou negativos. Por exemplo, na definição de uma sala, em que são avaliados dois tipos diferentes de abertura, poderiam ser comparados os resultados, conforme Figura 15. As cores sinalizam os aspectos positivos e negativos de cada opção em relação aos oito parâmetros avaliados.

Como qualquer sistema de avaliação simplificada, o “*Daylighting Dashboard*” deve ser usado na fase inicial do projeto. O objetivo é simplesmente dar ao projetista a condição de comparar o potencial das possíveis soluções, atendendo às oito grandes metas da iluminação natural, enquanto existe a oportunidade, no processo de projeto, de modificar a forma, a orientação ou a quantidade de vidros (LESLIE; RADETSKY; SMITH, 2012).

Figura 15: *Daylighting Dashboard* com avaliação de duas opções de abertura para um ambiente



Fonte: Fernandes (2016, p. 107). Adaptado de Leslie, Radetsky e Smith (2012).

Edição: Thiago Freire

Os autores alertam que a classificação e as avaliações mais precisas, bem como uso de *software* de simulação, ficam em aberto para uma decisão do próprio projetista. Se o arquiteto, ainda na fase inicial, for alertado sobre potenciais fraquezas ou erros (sinalizados em vermelho), ele prestará mais atenção a essas questões e poderá recorrer a diagnósticos mais precisos e/ou ajuda de especialistas.

Outro exemplo para auxiliar o projetista é a publicação “*Tips for Daylighting with Windows*”, de 1997, a qual apresenta diretrizes de referência para uma abordagem integrada de projeto. Essa publicação possui 11 seções com ideias-chave, ferramentas, dicas, regras, ressalvas e problemas na integração, para que o projetista se baseie quando da tomada de decisões: 1) a abordagem integrada; 2) viabilidade da iluminação natural; 3) decisões quanto a envoltória e ambiente; 4) escolha dos

vidros; 5) estratégia de sombreamento; 6) coordenação dos sistemas mecânicos; 7) coordenação do sistema de iluminação; 8) sensores e controles; 9) calibração e comissionamento; 10) manutenção; 11) análise custo-benefício.

Fernandes (2016) gerou diretrizes para a ferramenta Quali-Luz (Figura 5), que busca auxiliar o projetista nas fases iniciais do projeto, com foco na apresentação de orientações gráficas, como croquis, que possam rapidamente ser assimilados pelo arquiteto. Outra característica importante considerada é a avaliação conjunta dos principais fatores da Qualidade da Luz, com base em padrões já avaliados no banco de dados por meio de simulações. Isso porque é comum, na área de conforto ambiental, que a solução adequada para determinado aspecto gere outros problemas. Dessa forma, é importante que se detecte o desempenho geral, considerando vários aspectos da Qualidade da Luz e que seja o arquiteto o definidor da solução ou da priorização de um dos aspectos.

O fundamental é que a solução arquitetônica seja fruto de uma análise crítica e consciente do problema, e não apenas de uma visão parcial ou empírica. A avaliação de vários aspectos reforça a necessidade de simplificação da ferramenta para que os muitos resultados não tornem inviável o entendimento ou a aplicação.

Assim, as simulações computacionais tornaram-se um método fundamental nas avaliações da luz natural, tanto em pesquisas diretas quanto na geração de padrões, diagramas e diretrizes gráficas geradas como ferramentas para a fase inicial de projeto.

4. Simulação computacional de avaliação da luz natural

Atualmente, a simulação computacional é um dos principais métodos de avaliação da iluminação natural. As pesquisas apontam a simulação como ferramenta prática na concepção do projeto e afirmam que o seu uso na fase inicial do projeto facilitou a compreensão do problema de projeto e melhoria dos resultados (FERNANDES, 2016).

O uso de simulações computacionais e imagens tridimensionais contribuem para facilitar a manipulação de dados científicos, assim como possibilitar resultados

gráficos mais amigáveis, como a visualização mais realista das variáveis de projeto. É uma forma de aproximar conceitos técnicos da linguagem gráfica do projetista (IBRAHIM; HAYMAN; HYDE, 2011).

As ferramentas computacionais podem ajudar a estabelecer índices de ofuscamento e distribuição de luminosidade, até certo ponto, mas que normalmente continuam a ser bastante abstratos para os projetistas (alunos e profissionais) (MADSEN; OSTERHAUS, 2006).

Alguns autores apontam que ainda são necessárias pesquisas de aspectos primordiais, como definições de métodos, índices e critérios específicos, que servem como base inicial quantitativa para a abordagem qualitativa da iluminação natural (BOYCE, 2003; PELLEGRINO, 2012).

Para melhor controle, definição das relações e tempo para os experimentos, os pesquisadores buscam reduzir de forma significativa o número de variáveis. A maioria das pesquisas ainda tenta resolver questões relacionadas aos aspectos quantitativos da luz natural por haver ainda uma grande carência de normas e recomendações (HELLINGA, 2013).

Por exemplo, a primeira versão da ABNT NBR 15.575 (2013), de desempenho para habitações, aborda a iluminação natural utilizando o método do Daylight Fator, já mencionado (NABIL; MARDALJEVIC, 2006), como um método não adequado (sem adaptações e correções) para condições de céu parcialmente nublado (realidade brasileira). Também exige simulação computacional com comprovação de no mínimo 60 lux para habitação no centro dos ambientes. A norma apresenta limitações nos métodos, uma vez que exige simulação estática (dia e hora específicos), a qual, atualmente, foi substituída pela simulação dinâmica (todas as horas do ano) nas principais pesquisas na área de iluminação. No entanto, é um avanço em relação à abordagem simplista da maioria dos Códigos de Obra.

Nos últimos anos, grande foi o progresso dos métodos e das métricas específicas para a iluminação natural, e Pellegrino (2012) aponta, por exemplo, que esses métodos e essas métricas de avaliações tradicionais (como *Daylight Factor*)

têm se apresentado ineficientes ou inadequados para avaliar de forma abrangente e simultânea as múltiplas dimensões da iluminação natural, em especial quando se relaciona energia, saúde e conforto.

A disseminação e a utilização de ferramentas baseadas em análises do clima melhoraram significativamente os estudos de iluminação natural, pois fornecem dados mais precisos e, muitas vezes, integrados com análises térmicas.

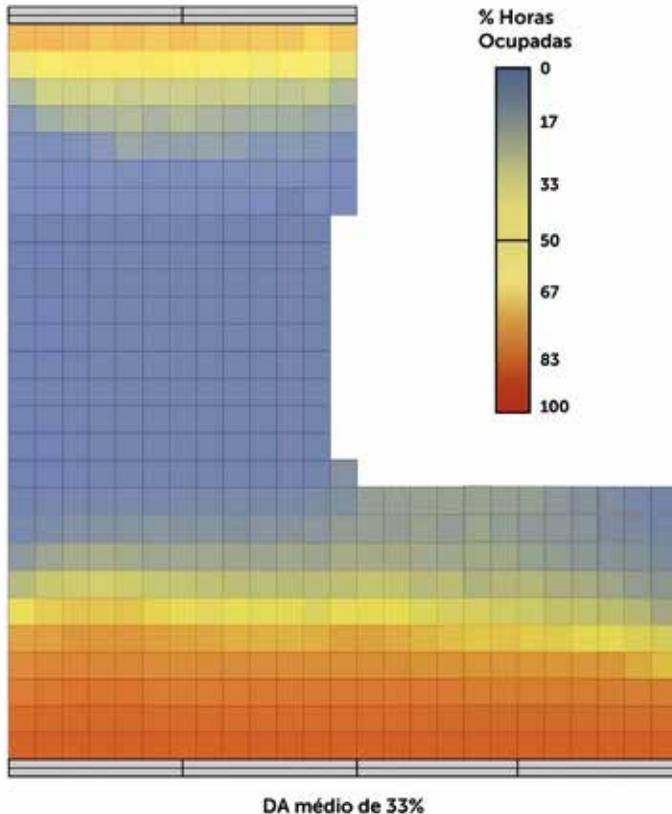
Nos últimos anos, os estudos de avaliação da iluminação natural passaram a utilizar métodos de simulação dinâmica (*Softwares Daysim* e *DIVA*), ou seja, desenvolveram novos índices que consideram o comportamento da luz natural em todas as horas do ano, em todo o ambiente – *Daylight Autonomy* (DA) e *Useful Daylight Illuminance* (UDI). O DA é definido como um percentual das horas ocupadas por ano, nas quais um nível mínimo de iluminâncias (lux) pode ser mantido, apenas pela iluminação natural.

Em um escritório, pode-se adotar um DA de 300 lux, ou seja, 60% do exigido em norma (500 lux), de acordo com a norma DIN 5034. Se, em 50% ou mais do tempo, verifica-se menos de 50% do espaço com a iluminância mínima designada (300 lux), considera-se que tal ambiente atinge um resultado insatisfatório, com pouca iluminação; se, em 50% ou mais do tempo, verifica-se mais de 50% do espaço com a iluminância mínima (300 lux), considera-se que tal ambiente atinge um resultado satisfatório. No ambiente da Figura 16, por exemplo, observa-se que a iluminância mínima estabelecida (DA de 300 lux em 50% do tempo e em 50% do espaço) não é alcançada.

O UDI é definido pela frequência de iluminâncias (lux) em um determinado tempo de acordo com faixas preestabelecidas. Esse índice permite verificar qual porção do ambiente possui valores úteis (não muito baixos nem muito altos e que possam causar ofuscamento ou ganho de calor) e qual o percentual de ocorrência desses valores durante um ano inteiro. Se, em 50% ou mais do tempo, verifica-se menos de 50% do espaço com a iluminância dentro dos limites de UDI (100-2000 lux), considera-se que tal ambiente atinge um resultado insatisfatório; se, em 50%

ou mais do tempo, verifica-se mais de 50% do espaço com essas iluminâncias, considera-se que tal ambiente atinge um resultado satisfatório.

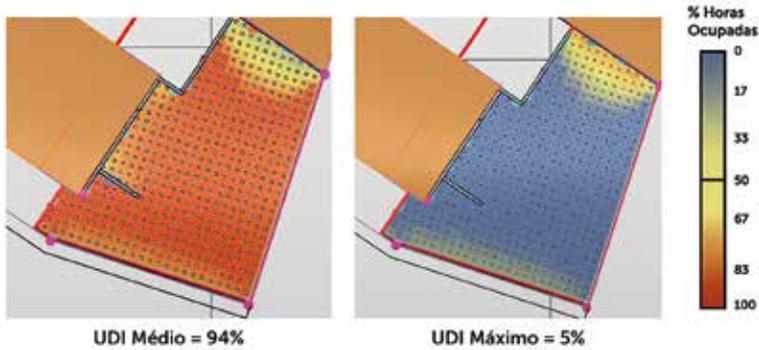
Figura 16: Simulação de DA de 300 lux (Resultado de 33%)



Fonte: Fernandes (2016, p. 191).
Simulações: Márcia Birck. Edição: Thiago Freire.

Na Figura 17, o ambiente da esquerda (a) apresenta mais de 94% do espaço com valores de iluminância dentro dos limites de UDI (100-2000 lux) em 50% ou mais do tempo, e que apenas 5% do espaço possui valores de iluminância acima da iluminância máxima recomendada (2000 lux) em 50% ou mais do tempo. Já o ambiente da direita (b) apresenta UDI de apenas 5%, não tendo desempenho luminoso satisfatório.

Figura 17: Simulação de UDI médio 100 lux $>DA < 2000$ lux em 50% do tempo (Resultado Ambiente “a” UDI = 94% do tempo e Ambiente “b” UDI = 5% do tempo)



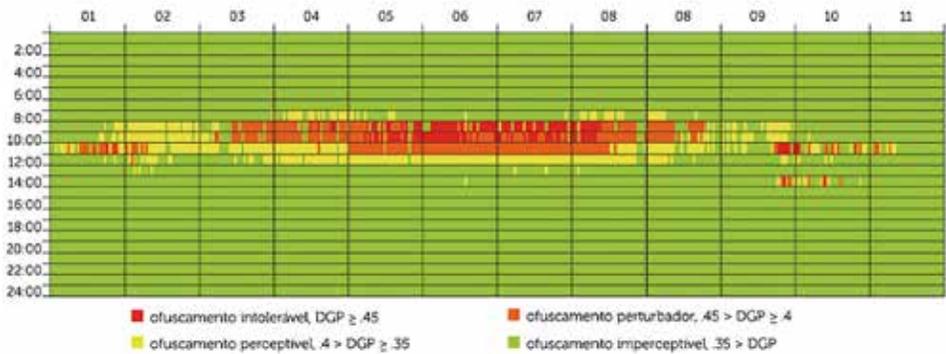
Fonte: Fernandes (2016, p. 196). Simulações: Márcia Birck. Edição: Thiago Freire.

A simulação dinâmica é considerada inovação em relação aos tradicionais métodos de medição e simulação estáticos, que conseguem mensurar a quantidade de iluminação em um determinado ponto e hora (REINHART; MARDALJEVIC, 2006). Nesse sentido, surge também o *Daylight Glare Probability* (DGP), desenvolvido a partir de medições e avaliações pelos usuários e tido, atualmente, como o índice mais confiável para avaliação do ofuscamento pela iluminação natural (REINHART, 2010).

O *software* DIVA faz simulação do DGP de forma dinâmica com o *Annual Glare*, considerando todas as horas do ano, e, de forma estática, com o *Point-in-time Glare*.

O *Annual Glare* é um índice de avaliação dinâmica da luz natural e mensura as luminâncias no campo visual. Por ele, pode-se avaliar a possibilidade de ocorrência de desconforto por ofuscamento, em função do índice DGP. Se, em 10% ou mais do tempo total, verifica-se a presença do ofuscamento intolerável e/ou perturbador, considera-se que tal ambiente atinge um resultado insatisfatório; se em 90% ou mais do tempo total, verifica-se a presença do ofuscamento perceptível e/ou imperceptível, considera-se que tal ambiente atinge um resultado satisfatório. Por exemplo, na Figura 18, o ambiente foi simulado em todos os meses, no período das 9h às 14h. Observa-se que, em 77,21% do tempo, há ofuscamento imperceptível e, em 22,79% das horas do ano, ocorre ofuscamento intolerável 3,52%, perturbador 13,71% e perceptível 13,71%.

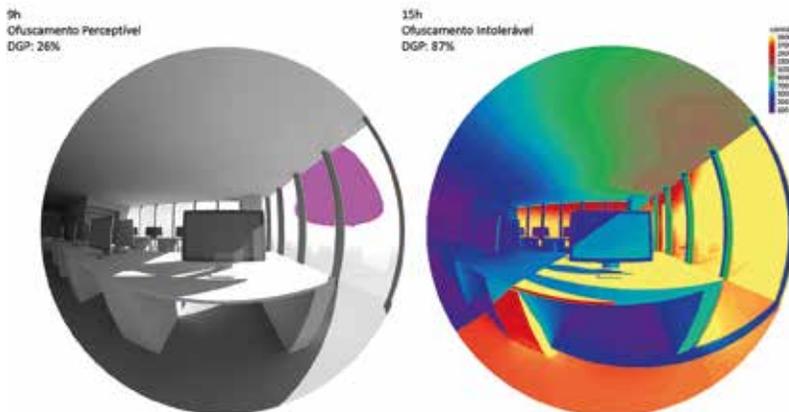
Figura 18: Resultados das Simulações de Annual Glare, Orientação Leste, com 22,79% do ofuscamento



Fonte: Fernandes (2016, p. 197). Simulações: Márcia Birck. Edição: Thiago Freire.

O *Point-in-time Glare* é uma simulação que produz a imagem de uma vista realista do ambiente (no caso, a janela) e aponta para determinado dia e hora, quando há ofuscamento e também qual foi o tipo de ofuscamento identificado. Na Figura 19, no ambiente simulado, a simulação da vista do *Point-in-time Glare* acusou a probabilidade de ofuscamento perceptível de 26% em 27 de fevereiro, às 9h. Já no período da tarde (15h), houve 87% de ofuscamento intolerável.

Figura 19: Simulações de *Point-in-Glare* (comparação de probabilidade de ofuscamento às 9h e 15h)



Fonte: Solemma/Diva (<http://solemma.net/Diva.html>, acesso em 10/07/2019)

A imagem do *Point-in-time-Glare* também fornece os níveis de luminâncias (CD/m²) no campo visual, sendo possível verificar os contrastes, de acordo com as tolerâncias recomendadas.³ Esses avanços metodológicos, aliados aos novos conceitos qualitativos da iluminação, direcionam um novo olhar às normas, aos indicadores e aos padrões. Existe uma grande demanda de atualização dos índices e a criação de parâmetros específicos para luz natural, principalmente em pesquisas de caráter multidisciplinar (GALASIU; VEITCH, 2012).

O avanço dos métodos de simulação contribuiu para a agilidade e a amplitude dos processos de avaliação. É possível ter maior controle das variáveis e fazer simulações de um número enorme de situações. Diversas normas e recomendações surgem por meio desses estudos – é o caso de simulações de padrões, diagnósticos preliminares e diretrizes de projeto, baseados em simulação computacional.

De forma específica, o *Advanced Buildings*, do *New Buildings Institute*, em parceria com a Universidade de Idaho e Universidade de Washington, desenvolveu o *Daylighting Pattern Guide*.⁴ Trata-se de uma ferramenta disponível gratuitamente para o desenho de estratégias de iluminação natural comprovadas em uma variedade de tipos de construção. Estabeleceram 19 padrões, com situações típicas relacionadas ao comportamento da iluminação natural.

Existem padrões que apresentam situações mais comuns de edifícios, como os relacionados à geometria da planta do edifício, área da janela e profundidade do ambiente, divisórias das estações de trabalho, persianas e cortinas, entre outros.

Para cada padrão, existe um número, um título e um link com apresentação de slides com demonstração das alterações que acontecem na avaliação da iluminação natural e com modificações na variável específica. São utilizados como critérios de análise o *Daylight Factor*, *Daylight Autonomy*, *Continuous Daylight Autonomy*, *Useful Daylight Illuminance*, *Daylight Saturation Percentage* e *Glare Analysis*.

³ Consultar: <http://diva4rhino.com/user-guide/simulation-types/point-in-time-glare>. Acesso em: 30 jul. 2019.

⁴ Disponível em: <https://patternguide.advancedbuildings.net/>. Acesso em: 10 jul. 2019.

Quadro 3: Resumo das variáveis da avaliação da iluminação da iluminação natural

VARIÁVEIS INDEPENDENTES	VARIÁVEIS DEPENDENTES		MÉTODOS DE AVALIAÇÃO	ÍNDICES E REFERÊNCIAS TÉCNICAS
	PARÂMETROS	CRITÉRIOS		
VARIÁVEIS DO ESPAÇO DE TRABALHO	<p>Tipologia: Escritório; Geometria/Proporção do Ambiente: altura, largura e profundidade; Materiais superficiais: piso, parede, teto e mobiliário; Tipo de abertura: janela; Geometria e percentual da abertura; Proteção Solar Externa e Interna; Tipo de vidro: transmissão luminosa; Iluminação artificial: luminária, lâmpada e circuitos; Controle da iluminação: artificial e natural; Número de Ocupantes; Tipo de Tarefa.</p>	Níveis de iluminâncias no plano horizontal	<ul style="list-style-type: none"> • Simulação no software RADIANCE/DAYSIM (Avaliação Dinâmica); • Medição com malha de pontos (Avaliação Estática); 	<ul style="list-style-type: none"> • DA: Mínimo de 300 lux de iluminação natural • UDI: Mínimo de 300 lux e máximo de 2.000 lux (REINHART; JAKUBIEC & LAGIOS; MARDALJEVIC; BAKER; BOYCE; DEHOFF). • Normas Brasileiras (ABNT) e internacionais (CIE, IESNA, ISO, EN, DIN)
		DESEMPENHO VISUAL		
VARIÁVEIS AMBIENTAIS	<p>Dia e Horário; Latitude e Longitude Clima; Tipo de Céu; Disponibilidade de Luz; Insolação; Orientação; Obstrução Externa (Afastamentos); Entorno</p>	Ofuscamento no campo visual (Níveis de Luminâncias)	<ul style="list-style-type: none"> • Simulação no software DIVA for RHINO e DAYSIM (Avaliação Dinâmica); • Fotografia de Imagens HDR (Avaliação Estática); • Medição com Luminômetro (Avaliação Estática) 	<ul style="list-style-type: none"> • DGP e Anual Glare (Intensidade de Luminâncias no campo visual) (REINHART; JAKUBIEC & LAGIOS; OSTERHAUS; BAKER, KIM; JACOBS; SOUZA & SCARAZZATO; WIENOLD & CHRISTOFFERSEN) • Normas Brasileiras (ABNT) e internacionais (CIE, IESNA, ISO, EN, DIN)
VARIÁVEIS HUMANAS		CONFORTO VISUAL		
		QUALIDADE DA VISTA EXTERIOR	Amplitude Ângulo de Visão Elementos Ambientais Nº Camadas	<ul style="list-style-type: none"> • Hellinga, 2013; Tips for Daylighting with Windows; BS Daylight Code; IEA (2014) Technical Report T50-D3 (Monitoring protocol for lighting and daylighting retrofits)

Fonte: Fernandes (2016, p. 52).

A proposta do guia é inovadora por propor diretrizes de mais fácil entendimento para o projetista, pois trabalha com base em exemplos de edifícios os impactos causados em alterações de variáveis específicas. Também é positiva a abordagem simultânea da avaliação das iluminâncias e luminâncias no ambiente. Ainda em desenvolvimento, a parte de ofuscamento tratada no guia ressalta a dificuldade histórica de avaliar as luminâncias e mostra a comparação de imagem do campo visual com níveis de luminâncias “preferíveis” e com “apenas ofuscamento perturbador”.

É necessário entender que vários elementos do meio ambiente externo, do espaço arquitetônico (ambiente interno) e do próprio ser humano se influenciam, e portanto, são importantes variáveis da iluminação natural, presentes em grande parte dos estudos da área. Podem-se sintetizar as variáveis da iluminação natural e os melhores métodos de avaliação, conforme Quadro 3.

A vantagem das simulações computacionais está justamente na avaliação simultânea de uma grande quantidade de aspectos. Interessante ressaltar o fato de os métodos computacionais terem evoluído muito, mas que, ainda, existe pouca orientação para os projetistas melhorarem suas soluções projetuais, pois essas métricas ainda pertencem a uma área de pesquisa emergente, restrita aos especialistas.

5. Considerações finais

Os estudos de iluminação devem prever uma abordagem quantitativa e qualitativa, e o conceito de Qualidade de Iluminação deve ser entendido como a integração do desempenho visual, conforto visual, qualidade da vista exterior, eficiência energética e satisfação do usuário.

A abordagem multimétodos é eficiente desde que se tenha clareza quanto aos melhores métodos de acordo com cada foco de investigação. O cuidado no tratamento dos dados também é essencial para a diminuição dos erros e discrepâncias. Há necessidade de alertar os arquitetos quanto à adoção de “regras” e

princípios consolidados na área de iluminação, sem análise crítica das muitas variáveis envolvidas no projeto específico.

O avanço dos métodos de simulação contribuiu para a agilidade e a amplitude dos processos de avaliação. É possível ter maior controle das variáveis e fazer simulações de um número enorme de situações. Diversas normas e recomendações estão sendo criadas e/ou revisadas a partir desses estudos. As simulações dinâmicas representam um salto qualitativo nos resultados das avaliações e recomenda-se, atualmente, o uso do *software* DIVA como ferramenta da luz natural, uma vez que utiliza os índices mais confiáveis.

Acima de tudo, é importante deixar claro que os métodos, por mais eficientes que sejam, não garantem os resultados, sendo necessários o conhecimento e o domínio do *software* escolhido, além de conhecimento teórico e senso crítico para uma leitura adequada dos dados.

Referências

AIZENBERG, J. B. *Hollow light guides: 50 years of research, development, manufacture and application – a retrospective and looking to the future*. Proceedings of CIE (CIE Commission Internationale de l’Eclairage) Centenary Conference “Towards a New Century of Light”. CIE - Paris, Abril, 2013.

ALUCCI, Marcia Peinado. *TAO: uma metodologia para implantação de edificação: ênfase no desempenho térmico, acústico, luminoso e eficiência energética*. 2007. 145 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

AMORIM, Cláudia Naves David. Diagrama Morfológico Parte I – Instrumento de análise e projeto ambiental com uso da luz natural. *PARANOÁ: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, Brasília: PPG/FAU/UnB, Ano 6, n. 3, ago. 2007.

ARAJI, Mohamad Tarek. *Balancing human visual comfort and psychological well-being in private offices*. 2008. Tese (Ph.D), University of Illinois, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15575-1: Edifícios habitacionais. Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais*. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior*. Rio de Janeiro, 2013.

ARIES, M. B. C.; VEITCH, J. A.; NEWSHAM, G. R. Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *Journal of Environmental Psychology* 30, p. 533-541, 2010.

ATANASIO, Veridiana; PEREIRA, Fernando. O. R.; PEREIRA, A. T. C. Utilização de um modelo analítico para a implementação de um método inovador para o ensino de iluminação natural em Arquitetura. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 129-142, jul./set. 2007.

ARIES, Myriam. B. C.; VEITCH, Jennifer A.; NEWSHAM, Guy R. Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *Journal of Environmental Psychology*, v. 30, p. 533-541, 2010.

BAKER, Nick; STEEMERS, Koen. *Daylight design of buildings: a handbook for architects and engineers*. London: James and James Editors, 1998.

BAKER, Nick V.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, K. *Daylighting in Architecture: a European reference book*. Bruxelas: James & James Editors, 1993.

BARBATO, G. *et al.* Subjective responses to different light sources. A study on light preferences and comparison of standard light measures with human individual estimates. Proceedings of CIE Centenary Conference “Towards a New Century of Light”. CIE-Paris, Abril, 2013.

BARBOSA, Cláudia Verônica Torres. *Percepção da iluminação no espaço da arquitetura: preferências humanas em ambientes de trabalho*. 2010. 238 f. Tese (Doutorado) –Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo 2010.

BARKI, José. Diagrama como discurso visual: uma velha técnica para novos desafios. In: 8 DOCOMOMO BRASIL Sessão 3, "O Movimento Moderno e os novos desafios ecológicos e técnicos", Rio de Janeiro, setembro de 2009.

BELL, J.; BURT, W. *Designing buildings for daylight*. London: BRE; CIBSE, 1995.

BITTENCOURT, Leonardo *et al.* Influência da localização, dimensão e forma das janelas nos níveis de iluminação natural produzidos por céus encobertos. In: ENCAC, Gramado, 1995.

BOYCE, Peter Robert. Illuminance Selection Based on Visual Performance – and Other Fairy Stories. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, v. 25, n. 2, p. 562-577, 1996.

BOYCE, Peter Robert. *Human factors in lighting*. 2nd ed. London: Taylor & Francis Group, 2003.

BOYCE, Peter Robert. Editorial: What does it take to change a metric? *Lighting Research and Technology*, p. 491, 4 June 2014.

BOYCE, Peter; HUNTER, Claudia; HOWLETT, Owen. The benefits of daylight through windows. U.S. Department of Energy, Lighting Research Center, New York, September 2003.

BOGO, Amilcar J.; PEREIRA, Fernando O. R.; CLARO, A. Controle solar e admissão de luz natural em aberturas com proteção solar. In: ENCAC - Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Natal, 2009.

CABUS, Ricardo; PEREIRA, Christina; Fernando. O. R. Avaliação através de método gráfico da distribuição de iluminâncias em ambientes. In: ENCAC – Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 1997.

CINTRA, Milena Sampaio. *Arquitetura e luz natural: a influência da profundidade de ambientes em edificações residenciais*. 2011. 156 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011

DEHOFF, P. A. The balance between energy efficiency and human aspects in lighting. Proceedings of CIE 2010 “Lighting Quality and Energy Efficiency”, 2010.

DIDONÉ, Evelise Leite . *A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC*. 2009. 174 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2009.

DJOKIC, L. KOSTIC, M. B. Subjective impressions as quality indicators of ambient lighting. Proceedings of CIE Centenary Conference “Towards a New Century of Light”. CIE-Paris, Abril, 2013.

DUTRA, Luciano; YANNAS, Simon. Análise de processo de projeto bioclimático. In: XI ENTAC- Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Florianópolis, 2006.

FERNANDES, Júlia Teixeira. *Código de obras e edificações do DF: inserção de conceitos bioclimáticos, conforto térmico e eficiência energética*. 2009. 249 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

FERNANDES, Júlia Teixeira; AMORIM, Cláudia Naves David. *Lighting and Daylighting Quality: critical review of criteria and recommendations and its insertion in Brazilian context*. Proceedings of CIE Centenary Conference “Towards a New Century of Light”. CIE-Paris, Abril, 2013.

FERNANDES, Júlia Teixeira. *Qualidade da iluminação natural e o projeto arquitetônico: a relação da satisfação do usuário quanto à vista exterior da janela e a percepção de ofuscamento*. 2016. 337 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

FERNANDES, Júlia Teixeira; AMORIM, Cláudia Naves David. Qualidade da iluminação natural e a satisfação do usuário. In: Anais do III ENANPARQ - Encontro Nacional da Associação de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 2014.

FONTOYNONT, Marc *et al.* *Proposal of simple daylighting performance indices for regulations: validation with on-site measurement campaign*. Proceedings of CIE Centenary Conference “Towards a New Century of Light”. CIE-Paris, Abril, 2013.

GALASIU, Anaca D.; VEITCH, Jennifer A. Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review. *Energy and Buildings*, v. 38, p. 728-742, 2006.

GHISI, Eneidir; TINKER, John. A.; IBRAHIM, Siti Halipah. Área de janela e dimensões para iluminação natural e eficiência energética: literatura versus simulação computacional. *Ambiente Construído*, v. 5, n. 4, p. 81-93. ANTAC, Porto Alegre, 2005.

HELLINGA, Hester; HORDIJK, Truus. The D&V analysis method: a method for the analysis of daylight access and view quality. *Building and Environment*, v. 79, p. 101-114, 2014.

HELLINGA, Hester. *Daylight and view: the influence of windows on the visual quality of indoor spaces*. Tese (Ph,D) – Delft University of Technology, Netherlands, 2013.

HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. *Iluminação natural (Daylighting)*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1966.

IEA – International Energy Agency. Daylighting Design Tools. Results of Subtask C. IEA SHC TASK 21 / IEA ECBCS ANNEX 29: Daylight in Buildings, 1999.

NIK IBRAHIM, N. L.; HAYMAN, S.; HYDE, R. A typological approach to daylighting analysis. *Architectural Science Review*, v. 54, p. 141-147, 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. SHC Task 50. Monitoring protocol for lighting and daylighting retrofit. *Technical Report T50.D3*, julho, 2014.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA (IESNA). *The IESNA Lighting handbook Reference & Application*. 9. ed. New York, 2000.

IKEDA, Débora Félix Rodrigues. *Análise de projeto com foco em iluminação natural: aprimoramento e validação de um método*. 2012. 175 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

KOWALTOWSKI, Doris K. (Org.). *O processo de projeto em arquitetura – da teoria à tecnologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando. *O. Eficiência energética na arquitetura*. São Paulo: UFSC/Procel/Eletronbras, 2014.

LEDER, S. M.; PEREIRA, Fernando. O. R.; CLARO, A. Janela de Céu preferível: proposição de um parâmetro para controle de acesso à luz natural no meio urbano. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, Ouro Preto, 2007. *Anais...* Ouro Preto: ANTAC, 2007.

LESLIE, R. P.; RADETSKY, L. C.; SMITH, A. M. Conceptual design metric for daylighting. *Lighting Res. Technol.*, v. 44, p. 277-290, 2012.

LIMA, Mariana. *Percepção visual aplicada a arquitetura e iluminação*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2010.

MADSEN, M.; OSTERHAUS, W. Exploring Simple Assessment Methods for Lighting Quality with Architecture and Design Students. Centre for Building Performance Research, School of Architecture, Victoria University of Wellington, New Zealand, 2006.

MARTAU, Betina Tschiedel. *A luz além da visão: iluminação e sua relação com a saúde e bem-estar de funcionárias de lojas de rua e de shopping centers em Porto Alegre*. 2009. 504 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 2009.

NABIL, Azza; MARDALJEVIC, John. Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, v. 38, p. 905-913, 2006.

OSTERHAUS, Werner. Design guidelines for glare-free Daylit work environments, 2009. (disponível em : https://www.researchgate.net/publication/242585328_Design_Guidelines_for_Glare-free_Daylit_Work_Environments, acesso em 10/07/2019)

PELLEGRINO, A. *et al.* Climated-Based Metrics for Daylighting and Impact of Building Architectural Features on Daylight Availability. Proceedings of 27th Session of the CIE. CIE-South Africa, julho, 2011, p. 82.

PELLEGRINO, A. CIE Division 3, Interior Environment and Lighting Design, Associate Director's Report – Daylighting, CIE Division 3 Webex Meeting, June 2012.

PEREIRA, Fernando. O. R. Luz solar direta: tecnologia para melhoria do ambiente lumínico e economia de energia na edificação. In: ENCAC, 1993.

PEREIRA, Fernando. O. R.; LOPES, A. C. L.; MARQUES, A.; TEODORO, E.; BATISTA, J. O.; SANTANA, M. V.; FONSECA, R. W.; ATANASIO, V. Uma investigação sobre a consideração da iluminação natural nas diferentes etapas de projeto. ENCAC, Maceió, 2005.

REINHART, Christopher. The Use of Glare Metrics in the Design of Daylit Spaces: Recommendations for Practice, 9th International Radiance Workshop; September 20-21, 2010.

REINHART, Christopher F.; MARDALJEVIC, John.; ROGERS, Zack. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building. *LEUKOS*, v. 3, n 1, 2006.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano*. São Paulo: ProEditores, 2000.

ROGORA, Alessandro. *Luce naturale e progetto*. Rimini: Maggioli Editori, 1997.

SACARAZZATO, Paulo. S. *O conceito do dia de projeto aplicado à iluminação natural: dados referenciais para localidades brasileiras*. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SHIN, Ju Young; YUN, Geun Young; KIM, Jeong Tai. View types and luminances effects on discomfort glare assessment from windows. *Energy and Buildings*, v. 46, p. 139-145, Março, 2012.

TABET AOUL, K. A. Visual requirement and window design in office buildings – a study of window size, shape, climatic and cultural impacts. In: CIE (CIE Commission Internationale de l'Éclairage) - China, 2012.

TRALAU, B. *et al.* Extension of lighting quality criteria and their evaluation for different application areas. *Proceedings of 27th Session of the CIE*. CIE – South Africa, julho, 2011.

TOLEDO, Beatriz Guimarães. *Integração de iluminação natural e artificial: métodos e guia prático para projeto luminotécnico*. 2008. 165 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

VEITCH, Jennifer A.; CHRISTOFFERSEN, Jens; GALASIU, Anca D. *What we know about windows and well-being and what we need to know*. Proceedings of CIE Centenary Conference “Towards a New Century of Light”. CIE-Paris, Abril, 2013.

VEITCH, J. A.; NEWSHAM, G. R. Determinants of lighting quality I: research and recommendations. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, v. 27, n. 1, p. 92-102, 1996.

VIANNA, Nelson Solano; GONÇALVES, Joana Carla. *Iluminação e arquitetura*. São Paulo: Geros S./A. Ltda, 2007.



Parte 2

Outputs – ambiente
construído e energia



CAPÍTULO 5

Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil

Joára Cronemberger e Estefanía Caamaño-Martín

1. Introduzindo o conceito de edifícios solares fotovoltaicos

Entre as preocupações atuais mais importantes da humanidade estão as consequências da geração de energia no meio ambiente natural e a escassez de combustíveis fósseis. Essa consciência está referendada por acordos internacionais e legislações que preconizam a diminuição no consumo de energias sujas e sua substituição por outras mais limpas e renováveis, bem como a melhora da eficiência energética. Nesse sentido, os setores da arquitetura e da construção têm trabalhado para proporcionar à sociedade sua contribuição para solucionar tais problemas.

Discutem-se e renovam-se em diferentes âmbitos os conceitos do *bioclimatismo*, *edifícios verdes*, *ecológicos*, *construção sustentável*, *ecoficiência* e *eficiência energética*. Universidades, centros de pesquisa, arquitetos, urbanistas, engenheiros, indústrias e agentes envolvidos nesses setores colaboram para obter as melhores soluções tecnológicas que permitam a utilização eficiente dos recursos energéticos na construção e operação dos edifícios – um alto nível de conforto ambiental interno e redução da

dependência dos recursos naturais. O esforço está justificado: os edifícios dos setores comercial e industrial consumiram, em 2005, quase 40% de toda a energia elétrica produzida no mundo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012). Esse panorama favoreceu enormemente o desenvolvimento dos sistemas de captação de energia solar ativa para edificações – a utilização de módulos térmicos ou fotovoltaicos que captam e utilizam a energia solar para seu aproveitamento como energia térmica ou elétrica.

A integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios é uma estratégia ativa de aproveitamento da radiação solar alinhada com os critérios de sustentabilidade e com a política de utilização de energias renováveis que vem sendo adotada internacionalmente em busca de uma maior eficiência energética (HESTNES, 1999; SCOGNAMIGLIO; RØSTVIK, 2012). No Brasil, assim como em outros países localizados em latitudes baixas, caracterizados pela alta disponibilidade e uniformidade da irradiação solar, a utilização de energia solar fotovoltaica (FV) é incipiente. Tradicionalmente, a energia solar FV foi usada no Brasil para atender às necessidades de comunidades localizadas em zonas isoladas, não atendidas pela rede elétrica de distribuição. Entretanto, vários estudos (MARTINS *et al.*, 2008; BRAUN; RÜTHER, 2010) já identificaram a utilização de sistemas FV integrados em edifícios conectados à rede elétrica como o maior potencial de utilização desse recurso natural.

Ultimamente, nota-se uma mudança nesse cenário, fruto da recente normativa vigente no país que estabeleceu um avançado sistema de compensação de energia elétrica, regulando as condições de acesso de geração distribuída às redes elétricas, bem como da política de eficiência energética e desempenho das edificações.

As edificações são reconhecidas como o segmento de mercado com o maior potencial de crescimento na indústria FV (SOLARPOWER EUROPE, 2014). Além da eficiência crescente de conversão energética, foram notáveis, nos últimos 10 anos, o aperfeiçoamento técnico e estético dos módulos, o aumento da confiabilidade técnica e a drástica redução dos custos de instalação dos sistemas. Uma das atrativas fontes energéticas é a energia solar FV, dado que o país é caracterizado por altos níveis de irradiação solar (BRAUN; RÜTHER, 2010;

BUENO PEREIRA *et al.*, 2017) e possuidor de grandes reservas das matérias-primas minerais necessárias na fabricação de componentes FV.

Deve-se ressaltar que o Brasil conta com o maior número de centros de pesquisa solar na América Latina, como, por exemplo, o LABREN,¹ responsável pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (BUENO PEREIRA *et al.*, 2017), e o FOTOVOLTAICA-UFSC,² pioneiro e impulsor de importantes projetos de energia FV no país e também da normativa que regula a injeção de energia distribuída na rede pública. Em conjunto com o LSF/IEE/USP,³ o LABEEE⁴ e outras instituições da sociedade civil organizaram numerosos projetos demonstradores, como aeroportos (RÜTHER; BRAUN, 2009) e instalações desportivas (SANTOS *et al.*, 2010), colaborando para criar um ambiente francamente favorável ao desenvolvimento e aceitação de edifícios solares FV.

O método introduzido neste capítulo foi desenvolvido para facilitar a identificação de potenciais superfícies de envoltória arquitetônica adequadas para a integração de sistemas solares FV, especificamente de edifícios localizados em latitudes mais baixas, como o Brasil. Pretende-se evitar que se utilizem erroneamente as recomendações mais comuns na literatura sobre BIPV (*building integrated photovoltaics*), normalmente baseadas na climatologia de países na América do Norte e na Europa, onde essa tecnologia está em franca utilização.

2. Envoltórias multifuncionais: produzindo calor e eletricidade

O conceito de *fachadas multifuncionais* é relativamente novo, e é utilizado para descrever uma envolvente – fachada ou cobertura – que desempenhe uma ou mais tarefas energéticas (HERAS CELEMÍN, 2002). As fachadas multifuncionais incorporam sistemas solares ativos que produzem calor e/ou eletricidade. O aproveitamento

¹ Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LABREN/INPE).

² Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina.

³ Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

⁴ Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina.

das envolventes realizado com esse objetivo tem grande protagonismo na busca de soluções de eficiência energética, como os edifícios de consumo energético zero (DIDONÉ; WAGNER; RUTTKAY-PEREIRA, 2014). Por meio do aproveitamento do sol, seja direta ou indiretamente, as consequências sobre forma e sistemas construtivos do edifício demandam a atenção de diversas disciplinas da arquitetura e das engenharias, já que é nas envoltórias dos edifícios que se produzem os principais intercâmbios térmicos com o meio ambiente externo, determinante no balanço energético final de um edifício (HAUSLADEN; DE SALDANHA; LIEDL, 2008).

O aproveitamento direto ou passivo de irradiação solar corresponde ao conjunto de medidas construtivas destinadas a coletar, armazenar e distribuir a irradiação solar recebida no edifício, sem aparatos técnicos, preceitos básicos da arquitetura bioclimática (HERAS CELEMÍN, 2002). Ao aproveitamento indireto ou ativo correspondem as medidas técnicas adicionais necessárias à coleta, armazenagem e distribuição da energia solar, ou seja, com a utilização de coletores, bombas térmicas para aquecimento e/ou esfriamento, energia solar FV e eólica para a geração de eletricidade (Quadro 1). O aproveitamento indireto está condicionado à quantidade de irradiação solar que recebem os edifícios e às variações estacionais, mas também são fundamentais para seu funcionamento efetivo a orientação, inclinação e a ausência de sombras nas superfícies expostas.

Quadro 1: Esquema de aproveitamento indireto de irradiação solar

Água Quente / Aquecimento	Refrigeração	Geração de corrente elétrica
Coletores	Bombas de absorção térmica	Sistemas fotovoltaicos
Bombas térmicas	Sistemas de armazenamento termoquímico	Aerogeradores
Sistemas de armazenamento	Cisternas de águas pluviais	Espelhos parabólicos + motor Sterling

Fonte: Elaboração dos autores, baseado em Heras Celemin (2002).

Para gerar eletricidade de forma indireta utilizando a energia do sol, é necessário utilizar células fotoelétricas agrupadas em módulos FV. Nessa modalidade, exige-se a otimização de um grande número de variáveis que determinam não apenas o desempenho energético do edifício, mas também o relacionamento com o usuário e seu meio ambiente. A complexidade reside no fato de que esses componentes geradores, os módulos FV, devem harmonizar os requisitos construtivos da envoltória com as necessidades do sistema de instalações elétricas. Além disso, elas têm forte impacto na aparência final da edificação e do seu entorno, e, portanto, na sua aceitação pela sociedade, fator decisivo para a efetiva adoção dessa tecnologia e, em princípio, excelente solução energética.

3. Definições de edifícios solares: BIPV E BAPV

Vários autores (HESTNES, 1999; REIJENGA, 2003; MARTÍN CHIVELET; SOLLA, 2007; ROBERTS; GUARIENTO, 2009; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012) e normas (CENELEC, 2014) propuseram classificações e nomenclaturas para sistemas FV quando instalados em edifícios com abordagens mais ou menos similares. As definições com mais aceitação internacional baseiam-se na distinção de até que ponto a instalação FV faz parte da envoltória arquitetônica do edifício (Figura 1):

- BAPV:⁵ os módulos FV são usados apenas para gerar energia, não desempenhando funções de materiais de construção. Eles são fixados à cobertura ou à fachada por uma estrutura exclusiva;
- BIPV:⁶ os módulos FV desempenham simultaneamente as funções de gerador de energia elétrica e de material de construção, cumprindo com um ou mais de seus requisitos. São projetados e fabricados especificamente para integrar as envoltórias arquitetônicas.

⁵ Do inglês “*Building Added/Adopted/Attached Photovoltaics*”.

⁶ Do inglês “*Building Integrated Photovoltaics*”.

Figura 1: Protótipo no concurso Solar Decathlon Europe 2012: cobertura/BAPV, fachada /BIPV



Fonte: Solar Decathlon Europe (SDE).

As funções desempenhadas por componentes BIPV estão relacionadas à barreira física necessária entre o meio ambiente externo e o usuário para regular a ventilação, a iluminação natural, a proteção contra umidade, temperatura e ruído, ou seja, a questão relevante é se o componente FV compatibiliza os requisitos elétricos com os de um material de construção convencional.

É difícil dizer qual das duas soluções é mais utilizada, BIPV ou BAPV. Um estudo dos protótipos apresentados ao concurso Solar Decathlon Europe⁷ 2010 e 2012 na Espanha indicou que os sistemas BAPV predominaram sobre os BIPV (CRONEMBERGER *et al.*, 2014). A tendência foi usar componentes FV como parte integrante da estratégia energética dos protótipos de casas, como o controle de iluminação natural e sombreamento.

⁷ Disponível em: <http://solardecathlon.eu>.

Qualquer que seja o enfoque da integração, os mecanismos para operação e manutenção dos sistemas precisam ser pensados ainda na fase inicial do projeto. Em geral, costuma-se confiar na água da chuva para manter os módulos fotovoltaicos integrados em fachadas limpos. No entanto, é aconselhável instalar mecanismos que possam facilitar a limpeza, manutenção e substituição de módulos, especialmente se a zona estiver localizada em áreas mais poluídas ou áridas, onde a periodicidade deve ser maior. A manutenção e as substituições em geral são realizadas pelo exterior, em capas, fachadas ou outras aplicações. É recomendável desenvolver uma estratégia de manutenção que contemple a estocagem de uma porcentagem de módulos de reposição, a fim de evitar interrupções no fornecimento de energia.

5. Tecnologias de geração de energia solar FV

A produção de eletricidade utilizando a energia radiante do sol como combustível baseia-se no fenômeno físico denominado “efeito fotovoltaico”,⁸ que consiste em converter a radiação em energia elétrica através de dispositivos semicondutores – as chamadas células FV –, que constituem a unidade básica de um sistema FV. Uma certa quantidade delas conectadas, encapsuladas e montadas sobre uma estrutura construtiva conformam um módulo FV. A corrente elétrica gerada pelos módulos é contínua (CC) e deve ser convertida em corrente alternada (CA) pelos inversores antes de ser utilizada diretamente ou injetada na rede pública de distribuição.

O silício dopado é o semicondutor mais utilizado e comercializado atualmente em todo o mundo. Cerca de 92% das células fabricadas eram baseadas em tecnologia de silício no ano de 2015, mais da metade delas (56%) do tipo multicristalino (FRAUNHOFER, 2015). Trata-se de uma tecnologia já dominada, fiável e que proporciona rendimentos relativamente altos. As lâminas delgadas de silício amorfo (*thin film*) representam outra parcela significativa de células no mercado. Apesar de

⁸ O termo “fotovoltaico” tem origem na palavra grega $\phi\acute{\omega}\varsigma$:phos, que significa “luz” e em “voltaico”, homenagem ao físico italiano Alessandro Volta (1745-1827).

apresentarem eficiências mais baixas, seu custo é mais reduzido, fator que, aliado ao fato de que elas são menos suscetíveis aos efeitos do aumento de temperatura, faz com que sejam especialmente interessantes para os edifícios solares FV.

Quadro 2: Tipos de células fotovoltaicas

Silício		Compostos	
Cristalino	Amorfo	Monocristalino	Policristalino
Monocristalino (m-Si)	Silício Amorfo (a-Si)	Arseneto de Gálio (GaAs)	Telureto de Cádmi (CdTe)
Policristalino (p-Si)	Silício microamorfo (μ a-Si)		Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)
Borda Definida (EFG)			Disseleneto de Cobre Índio e Gálio(CIGS)
			Células Orgânicas (OPV)

Fonte: Elaboração dos autores (2015), baseado em Luque e Hegedus (2003).

Além do silício, existem outros materiais e compostos capazes de funcionar como semicondutores (Quadro 2) que crescem em importância no mercado e nas pesquisas sobre o tema, com eficiências de conversão que já chegam a mais de 46% (NREL, 2017).⁹

6. Alternativas no design dos módulos FV

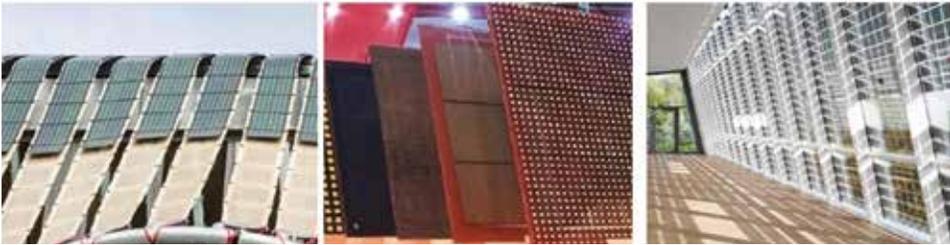
Uma grande variedade de módulos e produtos está disponível atualmente no mercado, especificamente projetados para ser usados como material de construção integrados ou aplicados (CERÓN; CAAMAÑO-MARTÍN; NEILA

⁹ Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/national-center-for-photovoltaics.html>. Acesso em: 5 out. 2017.

GONZALEZ, 2013). Além disso, sempre é possível personalizá-los e é comum adotar soluções customizadas, as quais devem ser discutidas e avaliadas em detalhe, pois podem afetar a produção de energia elétrica, seus custos e prazos de produção. Existem diversas possibilidades para variar a aparência dos componentes (Figura 2):

- Formas e dimensões dos módulos: os convencionais de silício cristalino geralmente são retangulares, com dimensões aproximadas a 80 cm x 160 cm, porém também podem ser fabricados com outras formas e dimensões. Módulos com filme fino permitem maior flexibilidade de formatos, inclusive curvos.
- Formas e dimensões das células: variam de acordo com a tecnologia FV e seu método de fabricação. Células de silício multicristalino têm forma quadrada ou bordas arredondadas, com 10 cm a 15 cm de lado, resultado dos processos de fabricação e corte. As células de filme fino variam com o substrato usado.
- Estrutura construtiva dos módulos: a estrutura portante do módulo pode variar para ajustar-se à aplicação desejada. O suporte mais convencional (molduras de alumínio) pode originar a montagem em esquadrias de cortina de vidro ou fachadas de vidro duplo, ventiladas ou não. Podem ser encontrados módulos com formato de telhas planas e placas para fachadas montados em cerâmica e, ainda, em proteções solares.
- Cores das células: são determinadas pela espessura da camada antirreflexiva, a qual pode ser alterada para variar o padrão de azul a cinza em células de silício cristalino, o que implica, entretanto, diminuição de eficiência. Células de silício amorfo também podem sofrer variações nas cores de acordo com as camadas utilizadas no processo de dopagem.
- Transparência: diferentes efeitos podem ser alcançados variando-se a quantidade e o espaçamento entre as células nos módulos cristalinos, ou a espessura e o substrato nos módulos de película fina.

Figura 2: Exemplos de módulos FV variados

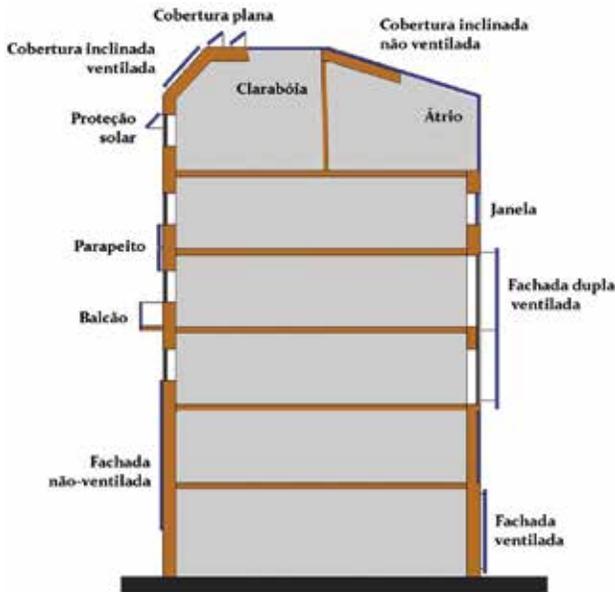


Fonte: Kennedy e Violich Arq., Extex Solar e HHS Planer + Architekten AG.

7. Superfícies potenciais de utilização

Os sistemas FV podem ser integrados nos edifícios de várias maneiras (Figura 3). As aplicações em coberturas inclinadas têm a vantagem de usar telhados como suporte estrutural; já os telhados planos frequentemente requerem uma estrutura exclusiva para conseguir a orientação e a inclinação adequadas para os módulos FV.

Figura 3: Possíveis tipologias de integração de sistemas FV em edifícios



Fonte: Cronemberger (2015, p. 47-49).

Devido à sua alta visibilidade, os sistemas integrados nas fachadas demandam um padrão de qualidade alto e são mais exigentes, tecnicamente, do que as instalações nas coberturas, haja vista a necessidade de ocultar o cabeamento e localizar os outros componentes do sistema. Outras tipologias são as aplicações para sombrear janelas, pérgulas, varandas e outros.

Qualquer que seja o tipo de integração escolhido para um edifício, especial atenção deve ser dada à manutenção, substituição e limpeza dos módulos e dos outros componentes do sistema FV. Assim, o acesso, os mecanismos de operação, limpeza e substituição devem ser cuidadosamente pensados desde os primeiros estágios do projeto.

7.1 Coberturas

Os telhados são as superfícies mais propícias para a integração de sistemas fotovoltaicos: desde que a orientação seja favorável, é o local onde as sombras podem ser melhor evitadas, e mais facilmente pode-se ventilar a face traseira dos módulos.

Há um grande número de componentes FV no mercado prontos para instalação em telhados, inclinados ou planos, que podem ser desde módulos de superposição convencionais fixados em trilhos metálicos até módulos com formato de telhas curvas. Para coberturas de grandes vãos, existem soluções de células de silício amorfo ou CIS coladas diretamente sobre telhas metálicas. Graças à flexibilidade do material amorfo, essa também é uma opção muito adequada para coberturas curvas. As tecnologias de película fina (*thin film*) têm a vantagem de não estarem sujeitas a perdas de eficiência, devido ao aquecimento da face posterior dos módulos, e são integradas ao componente construtivo já no seu processo de fabricação. Outra tipologia adequada para telhados planos são os sistemas integrados nas membranas flexíveis de PVC (policloreto de vinila) ou EVA (copolímero de etileno e acetato de vinila), que são membranas impermeabilizantes; algumas, até mesmo, com isolamento incorporado. Esses sistemas também usam películas finas de silício amorfo, o que lhes dá a flexibilidade necessária.

Ao integrar sistemas FV em telhados inclinados, a ventilação da face posterior dos módulos deve ser sempre favorecida para evitar perda de eficiência na produção de energia elétrica. Deve-se prover aberturas nas extremidades superior e inferior das superfícies com módulos integrados, o que ajuda a evitar também a condensação e a transmissão de calor para o interior da edificação, pelo risco de provocar superaquecimento. Já a integração de sistemas FV em coberturas planas geralmente é independente do edifício existente. Embora com menor grau de integração, proporcionam soluções mais econômicas, por utilizarem módulos e fixações padronizados. Esse tipo de montagem em edifícios existentes tem a vantagem de manter a face traseira do módulo ventilado sem grandes custos ou esforços técnicos.

A integração dos sistemas FV em claraboias e átrios proporciona superfícies de geração de energia transparentes. O jogo de transparência e sombras é obtido ajustando-se a distância entre as células, o que gera alto impacto na linguagem arquitetônica do espaço, uma vez que as células são visíveis. A maneira usual, para tanto, é integrar os módulos no suporte da superfície envidraçada, substituindo a face exterior dos vidros duplos por vidros laminados temperados ou termoendurecidos. Como em qualquer átrio envidraçado, deve-se observar os aspectos de estanqueidade, segurança física e estrutural, manutenção e substituição de módulos. A isso soma-se o cuidado extra quanto à localização das caixas de conexão, cabeamentos e demais componentes do sistema FV.

7.2 Fachadas

O uso de sistemas FV integrados em fachadas pode ser feito de numerosas maneiras. Embora as fachadas geralmente ocupem muita superfície, seu uso para gerar energia depende de sua orientação e das sombras, às quais são mais propensas do que as coberturas. As fachadas podem ser montadas para ser ventiladas ou não, e essas características devem ser consideradas na escolha do tipo de tecnologia de conversão FV a ser integrada.

A integração em *fachadas ventiladas* é feita substituindo-se a camada exterior por módulos FV, que podem ser de vidro transparente ou translúcido, bem como de outros substratos opacos, como alumínio, cerâmica ou plástico. O sistema de fixação é o mesmo da tecnologia já desenvolvida para fachadas ventiladas convencionais. Também é possível fazer painéis modulares de fachadas, totalmente montados em fábrica e com o cabeamento integrado, o que economiza tempo na obra e permite maior controle de qualidade da execução. Do ponto de vista da instalação FV é importante favorecer a drenagem das águas de chuva para evitar possíveis danos à fiação. Algumas vantagens desse tipo de integração são a facilidade de montagem dos outros componentes do sistema, tais como caixas de conexão e cabeamento, assim como a maior facilidade de adaptar-se às medidas comerciais dos módulos, tornando-se uma escolha mais econômica.

A instalação em *cortinas de vidro* pode ser aplicada em fachadas verticais ou inclinadas, curvas ou não, por meio do sistema tradicional montado diretamente em obra ou do sistema modular pré-fabricado, o qual tem como vantagem a instalação da fiação e das conexões elétricas sob condições controladas. Para essa instalação, admitem-se também soluções mistas, com módulos transparentes e opacos. A integração em fachadas tipo cortinas de vidro é feita substituindo-se o vidro exterior por módulos FV, sendo uma de suas vantagens o fato de que os módulos FV, absorvendo uma parte significativa da irradiação, reduzem o Fator Solar do conjunto, melhorando potencialmente o desempenho energético do edifício. As fachadas inclinadas, quando bem orientadas, são particularmente adequadas para aplicações BIPV, pois otimizam as superfícies disponíveis e maximizam o potencial de produção de energia elétrica.

As *janelas* são outra possível superfície de integração, tanto nas partes fixas quanto nas partes móveis. A utilização de módulos com algum grau de transparência é adequada para que se continue permitindo a visão direta do exterior. Nesses casos, deve-se observar o tipo de uso dos ambientes internos, já que as células obstruem a radiação direta e afetam a iluminação natural.

A integração de elementos FV na forma de *proteções solares* combina perfeitamente duas oportunidades: evita que parte da irradiação incida sobre uma superfície envidraçada, controlando as condições de conforto interior, e a aproveita para a produção de eletricidade. Em edifícios de escritórios em áreas com alta disponibilidade de irradiação solar e climas menos exigentes do ponto de vista de aquecimento, essa aplicação é particularmente vantajosa, uma vez que é possível aproveitar a irradiação mais tempo durante o ano e a simultaneidade entre a energia produzida e sua funcionalidade como elemento de sombreamento (CRONEMBERGER, 2016).

Entretanto, nesse tipo de uso a análise das sombras torna-se mais complexa, já que, além das possíveis sombras provocadas por objetos contíguos ao edifício, o ideal é evitar o autossombreamento, de modo que a produção de energia FV seja favorecida. Dependendo da latitude e orientação, a geometria de um sombreamento pode ser muito eficaz ao sombrear a superfície envidraçada, embora possa produzir sombras que impeçam a integração de módulos FV nas fachadas.

A identificação correta das sombras permite ajustar a instalação dos *strings* para que um *array* possa gerar energia, mesmo com algum módulo parcialmente obstruído, e evitar os chamados *hotspots*, tão prejudiciais para as instalações e até mesmo perigosos para a segurança de um sistema. Conhecer-las possibilita também opções de projeto no sistema FV e na arquitetura. No primeiro caso, permite escolher inversores ou microinversores mais adequados, e/ou utilizar tecnologias de células solares mais sensíveis a radiações difusas, como as a-Si, CIS e CIGS. Quanto ao projeto de arquitetura, permite antever a necessidade de incluir módulos “cegos” no *array* na superfície desejada, mesmo que desconectada.

8. Princípios básicos de projeto

O projeto de um edifício solar FV é um processo multidisciplinar que deve obedecer a vários critérios e parâmetros. Deve começar nas fases iniciais, quando a influência dos agentes interessados pode ser maior, e os custos das mudanças de decisão são menores.

À luz das necessidades e demandas do cliente, que nem sempre é o usuário final, e conhecendo as características ambientais e físicas do local de implantação do edifício, as equipes de projeto e de construção devem harmonizar os aspectos arquitetônicos e construtivos com os regulamentos relevantes, os requisitos da concessionária de energia local e os materiais disponíveis no mercado (Figura 4). Dependendo das necessidades e da magnitude de um projeto, o processo pode ser sumamente complexo.

As necessidades do projeto do sistema FV, como a distribuição de fiação e dos outros componentes elétricos, deve ser compatível com os demais requisitos funcionais da envoltória – ventilação e iluminação natural, estanqueidade, estabilidade, proteção térmica, proteção contra os ventos, controle de irradiação solar, controle de ganhos térmicos, segurança física, isolamento acústico, poluição do ar, vistas exteriores, proteção contra incêndio e sua própria vida útil.

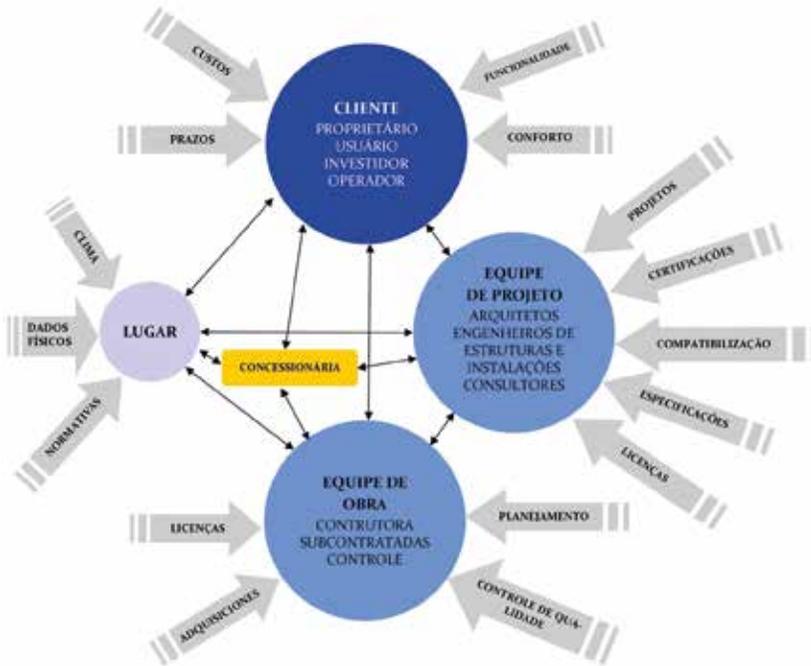
Além disso, no caso de um componente multifuncional, um módulo FV que seja ao mesmo tempo material de construção deve atender a uma série de requisitos de certificação de acordo com as normativas locais.

Do ponto de vista do projeto do sistema BIPV, os aspectos mais críticos são semelhantes a uma instalação fotovoltaica padrão: trata-se de tanto quanto possível maximizar a irradiação recebida pelos módulos através da orientação e inclinação e evitar os fatores de perdas de rendimento. A quantidade de irradiação depende da latitude e do clima do lugar. As perdas de rendimento podem ocorrer por fatores como a presença de sombras, a temperatura dos módulos e do cabeamento, e até mesmo o nível de limpeza dos módulos. Essas condições básicas podem afetar o *design* de um edifício em vários aspectos, desde a orientação e *layout* no terreno, até mesmo a sua forma e sistema construtivo (MARTÍN CHIVELET; SOLLA, 2007).

Dado que a maior parte das tecnologias de geração FV perdem potência com o aumento da temperatura de operação, o fator temperatura deve ser cuidadosamente avaliado. Há estudos que reportam perdas de potência de cerca de 5% em sistemas integrados com tecnologia de silício cristalino (ROBERTS; GUARIENTO, 2009).

Para diminuir as perdas por temperatura, é fundamental prever no projeto a ventilação da superfície posterior dos módulos.

Figura 4: Atores e processos envolvidos em projetos BIPV



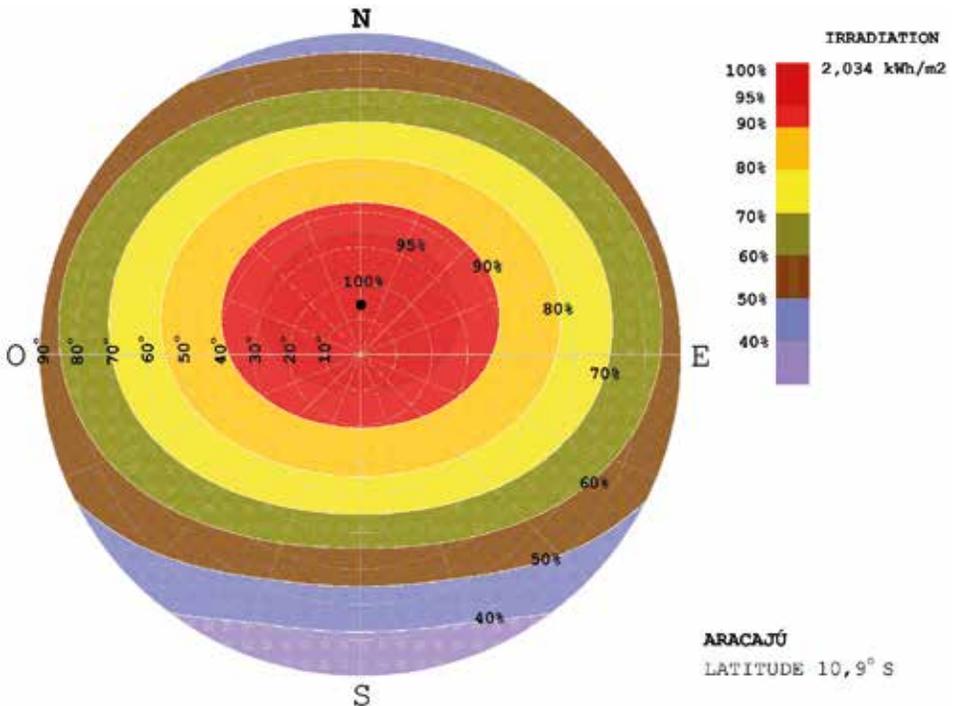
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Do ponto de vista do comportamento energético, é aconselhável que os edifícios objetos de integração FV sejam de baixo consumo, considerando a aplicação de onde várias estratégias de conservação de energia. Uma prioridade na concepção de um projeto de edifício solar FV é definir uma estratégia energética, que implica definir a proporção da demanda de energia que pode ser atendida com a energia gerada localmente. Os regulamentos para o acesso à rede pública de energia local, a existência de possíveis taxas de incentivo, a superfície disponível adequada para a integração e, finalmente, os custos serão decisivos. A simultaneidade da demanda com a geração de energia solar também deve ser verificada.

9. Orientação e inclinação dos módulos

A irradiação máxima recebida pelos módulos depende fundamentalmente da sua orientação e inclinação. Por exemplo, para uma cidade localizada a $-10,9^\circ$ de Latitude (Aracajú/Brasil), a irradiação máxima será recebida por uma superfície orientada em direção ao Equador (Norte), inclinada a 10° em relação à superfície horizontal (Figura 5).

Figura 5: Aracajú: diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

Devido à posição relativa do Sol nessa latitude, observa-se no diagrama que há uma grande variedade de combinações para outras faixas de orientação, quando inclinadas de 0° a 50° , com orientação que vão de Este a Oeste em sentido anti-horário.

A situação ideal na geração FV seria aquela em que os módulos não fossem sombreados em nenhum momento, o que pode ser um objetivo muito difícil em edifícios solares FV, tipicamente localizados em áreas urbanas. As sombras de edifícios contíguos afetam mais as fachadas do que os telhados, e podem ser mais facilmente resolvidas no caso de ambientes urbanos mais baixos e com menor densidade de ocupação. No entanto, em centros urbanos mais densos e edifícios mais altos, as sombras podem ocorrer por longos períodos de tempo, chegando a impossibilitar a integração de sistemas FV.

Outra fonte importante de sombras consiste naquelas geradas por massas de vegetação arbórea. No processo de projeto de novos edifícios solares FV, é preciso escolher cuidadosamente as novas espécies que serão plantadas nas proximidades do prédio e observar o crescimento daquelas já existentes. Uma maneira de minimizar o problema pode ser o uso de módulos com diodos de *bypass* e diodos de bloqueio, ou ainda, trabalhar com módulos equipados com microinversores individuais.

10. Potencial solar das envoltórias

Denomina-se *ângulo ótimo* o ângulo de inclinação de uma superfície fixa em relação à horizontal, que permite captar a maior quantidade de irradiação por ano. Há diferentes referências na literatura científica sobre o ângulo de inclinação ótima (β_{opt}) de um campo gerador FV fixo. Uma vez orientada em direção ao Equador terrestre (Norte no hemisfério Sul e Sul no hemisfério Norte), a recomendação mais comum é inclinar a superfície com o mesmo ângulo de latitude local (GOPINATHAN, 1991; DUFFIE; BECKMAN, 2006; GUNERHAN; HEPBASLI, 2007; SANTOS; RÜTHER, 2014; PRASAD; SNOW, 2006). Recomenda-se também incliná-lo cerca de 8° em relação à latitude (LEWIS, 1987) ou, ainda, usar a equação $\beta_{opt} = 3,7 + 0,69$ (LORENZO, 2003). Outras referências argumentam que a inclinação ótima corresponde a 10° menos que a latitude local (ESPANHA, 2015) e 20° abaixo da latitude local (ROBERTS; GUARIENTO, 2009).

Numerosos estudos foram realizados para determinar mais precisamente o impacto do ângulo de inclinação e do azimute sobre a produção de energia solar FV relacionada a diferentes latitudes e climas (MONDOL *et al.*, 2007; HUSSEIN *et al.*, 2004), alguns deles levando em conta variáveis como o preço da comercialização de energia (ROWLANDS *et al.*, 2011) ou as características sazonais da irradiação solar (CHRISTENSEN *et al.*, 2001), a maioria delas considerando localizações no hemisfério Norte.

No que diz respeito à proporção da quantidade de irradiação que pode ser aproveitada em sistemas integrados, costuma-se considerar ótimo aproveitar a partir de 90% da irradiação anual, e muito bom entre 80% e 90% (MONDOL; YOHANIS; NORTON, 2007) Na Alemanha, admite-se como aceitável o aproveitamento de 55% da irradiação disponível (CHENG; JIMENEZ; LEE, 2009). Isso significa, considerando-se que a irradiação anual nesse país varia entre 900 kWh/m² e 1.250 kWh/m², cerca de 600 kWh/m² anuais. O Código Técnico de Construção (ESPANHA, 2015) estabelece que as perdas por orientação e inclinação não devem exceder 40%. Ou seja, presume-se que 60% da utilização é um limite mínimo aceitável. Considerando-se que a irradiação anual em Espanha varia entre 1.200 kWh/m² e 1.850 kWh/m², os valores mínimos aceitáveis são da ordem de 720 kWh/m².

11. Ângulo ótimo de uma superfície FV no Brasil

Identificou-se o ângulo ótimo de inclinação em 78 cidades brasileiras distribuídas desde a linha do Equador até a latitude - 31,3°, e estabeleceu-se uma relação com a latitude local. Para isso, inicialmente, calculou-se a irradiação anual disponível para uma superfície com orientação Norte e ângulo de inclinação igual à latitude local. Em uma segunda fase, repetiu-se o cálculo variando a inclinação da superfície em 1° em intervalos que permitiram verificar a variação da irradiação calculada para a inclinação igual à latitude.

Tabela 1: Irradiação máxima anual e ângulo ótimo

(continua)

A	B	C	D	E
Cidade	ϕ	$G_a(\beta = \phi, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m ² y	β_{opt}	$G_a(\beta = \beta_{opt}, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m ² y
Bagé	-31.3	1797	31.3	1797
Porto Alegre	-30	1810	30	1810
Caxias do Sul	-29.1	1736	29.1	1736
Passo Fundo	-28.2	1870	28.2	1870
Florianópolis	-27.6	1721	30	1722
Blumenau	-26.9	1564	26.9	1564
São Francisco do Sul	-26.2	1637	26.2	1637
Foz de Iguaçu	-25.5	1841	27	1842
Curitiba	-25.3	1460	25.3	1460
Campo Mourão	-24	1880	27	1882
Santos	-23.9	1633	27	1634
São Paulo	-23.5	1559	26	1561
São José dos Campos	-23.2	1769	27	1772
Taubaté	-23	1768	25	1771
Rio de Janeiro	-22.9	1833	26	1835
Campinas	-22.8	1951	28	1957
Piracicaba	-22.7	1905	27	1910
Resende	-22.4	1773	26	1776
Volta Redonda	-22.4	1632	25	1634
Macaé	-22.3	1913	26	1917
Presidente Prudente	-22.1	1944	26	1948
São Carlos	-22	1899	26	1903
Juiz de Fora	-21.7	1644	25	1646
Cataguases	-21.3	1790	25	1793

Tabela 1: Irradiação máxima anual e ângulo ótimo

(continuação)

A	B	C	D	E
Cidade	ϕ	$G_a(\beta = \phi, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m ² y	β_{opt}	$G_a(\beta = \beta_{opt}, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m ² y
Viçosa	-20.7	1861	25	1866
Campo Grande	-20.4	1928	25	1933
Vitória	-20.3	1902	25	1906
Belo Horizonte	-19.9	1699	25	1705
Uberaba	-19.7	2054	26	2064
Sete Lagoas	-19.4	2058	26	2069
Corumbá	-19	1970	23	1975
Patos de Minas	-18.6	1980	25	1991
Catalão	-18.1	1960	25	1972
Paracatu	-17.5	1920	24	1930
Goiânia	-16.6	1939	24	1953
Cáceres	-16	1822	22	1831
Brasília	-15.7	1907	24	1926
Cuiabá	-15.5	1944	21	1951
Vitória da Conquista	-14.8	1768	19	1773
Posse	-14.1	1911	22	1925
Correntina	-13.3	1962	20	1972
Salvador	-13	1956	13	1956
Lençóis	-12.5	1714	17	1718
Barreiras	-12.1	2022	19	2036
Morro do Chapéu	-11.5	1686	15	1689
Jacobina	-11.1	1803	15	1806
Aracajú	-10.9	2031	14	2034
Propriá	-10.2	1890	14	1891
Rio Branco	-9.9	1667	17	1676

Tabela 1: Irradiação máxima anual e ângulo ótimo

(continuação)

A	B	C	D	E
Cidade	ϕ	$G_a(\beta = \phi, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m ² y	β_{opt}	$G_a(\beta = \beta_{opt}, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m ² y
Maceió	-9.6	1980	12	1981
Petrolina	-9.3	1987	14	1992
Garanhuns	-8.8	1906	11	1907
Porto Velho	-8.7	1697	17	1710
Caruaru	-8.2	1871	10	1872
Recife	-8.05	2092	10	2093
Olinda	-8	2016	11	2019
Campina Grande	-7.2	1865	10	1866
Joao Pessoa	-7.1	2016	10	2018
Florianópolis	-6.7	1911	13	1919
Colinas	-5.9	1804	14	1820
Natal	-5.7	2071	9	2073
Imperatriz	-5.5	1802	14	1818
Crateús	-5.1	1981	11	1988
Teresina	-5	2015	12	2027
Guaramiranga	-4.2	1714	9	1720
Fernando de Noronha	-3.8	2019	8	2023
Fortaleza	-3.7	2030	8	2035
Manaus	-3.13	1797	9	1805
Parnaíba	-2.9	2073	8	2079
São Luiz	-2.5	1791	8	1798
Óbidos	-1.9	1875	8	1885
Belém	-1.4	1838	7	1847

Fonte: Elaboração dos autores (2012).

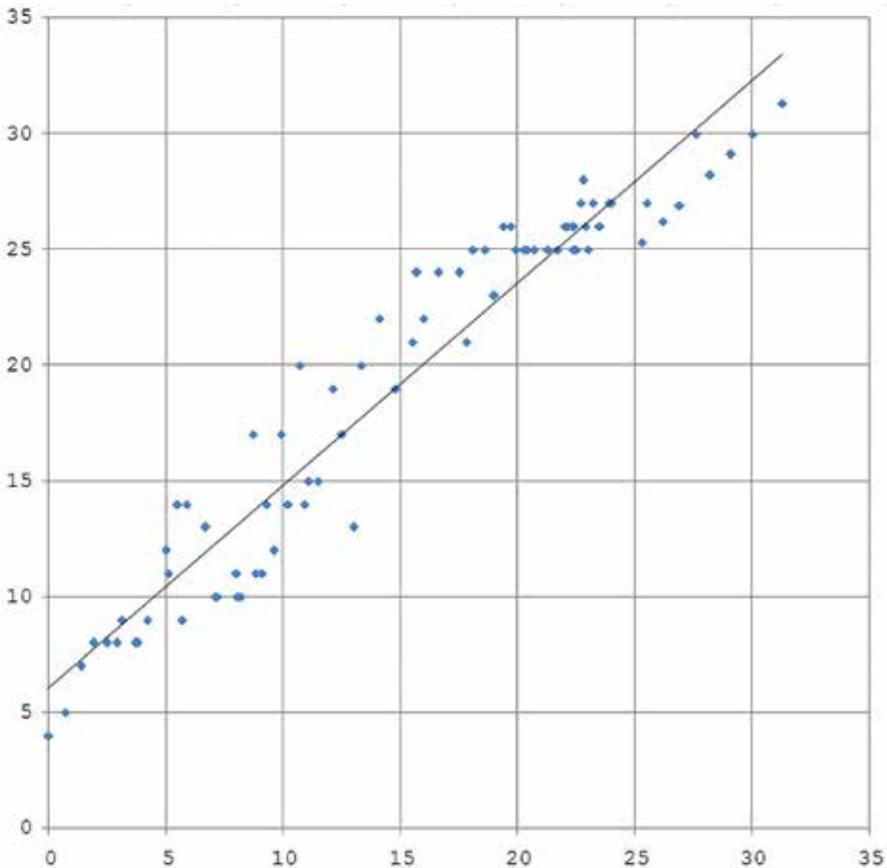
A estimativa da irradiação foi calculada com base nos dados de Irradiância Global Horizontal (G_{dm}) médias mensais publicados pelo *World Radiation Data Center* (RUSSIA, 2012). Com base nesses dados, foi calculada a irradiação diária média em superfícies inclinadas arbitrariamente orientadas, $G_{dm}(\beta, \alpha)$, separando as componentes direta e difusa da irradiação (LIU; JORDAN, 1960). A metodologia e os cálculos detalhados podem ser encontrados em *Assessing the Solar Irradiation Potential for Solar Photovoltaic Applications in Buildings at Low Latitudes - Making the Case for Brazil* (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; VEGA SÁNCHEZ, 2012). A Tabela 1 mostra os resultados encontrados para a relação irradiação máxima anual versus ângulo ótimo em 78 cidades no Brasil. Nas colunas são detalhadas:

- Coluna A - Nome da cidade
- Coluna B - Latitude local (ϕ)
- Coluna C - Irradiação incidente anual quando o ângulo de inclinação da superfície de recepção é igual à latitude local ($\beta = \phi$) em kWh/m²
- Coluna D - ângulo ótimo nesta cidade (β_{opt})
- Coluna E - irradiação incidente numa superfície fixa quando o ângulo de inclinação da superfície é igual ao ângulo ótimo (β_{opt}) em kWh/m².

Das 74 localidades examinadas, nenhuma apresentou valores para o ângulo ótimo abaixo do ângulo da latitude local; em apenas oito delas o valor é igual à latitude. Em 89% dos casos, o ângulo ideal de inclinação de uma superfície FV varia entre 1,5° a 9,3° acima do valor da latitude local. A modelagem desses dados em um gráfico em que os valores para latitudes se encontram no eixo da abscissas e dos ângulos ótimos, no eixo das ordenadas (Figura 6), permitiu deduzir uma relação matemática linear com coeficiente de determinação $R^2 = 0,93$ para calcular o ângulo ótimo em cidades brasileiras:

$$\beta_{opt} = 0,874 + 6,062 \phi \quad (\text{Equação 1})$$

Figura 6: Relação linear entre Inclinação ótima e Latitude



Fonte: Elaboração dos autores (2016).

Cabe ressaltar a tendência observada de que quanto maior a proximidade Equador terrestre, maior será o desvio do valor de β_{opt} acima da latitude local. Isso se deve ao fato de que, em cidades com baixas latitudes, embora as trajetórias solares indiquem que o ângulo ótimo coincida com a latitude, os modelos de radiação solar mostram que, devido às condições climáticas locais (disponibilidade de recursos solares, proporção da componente difusa, etc.), o máximo aproveitamento solar é proporcionado por inclinações ligeiramente superiores à latitude. É precisamente para locais de latitude superior a -25° que essa tendência muda.

12. Diagramas de aproveitamento da irradiação solar

A seguir, apresentam-se diagramas demonstrativos do recurso solar disponível em superfícies em todas as orientações e inclinações para sete cidades brasileiras (Figura 7) localizadas a aproximadamente cada 5° de latitude - Belém ($\Phi = - 1,4^\circ$), Teresina ($\Phi = - 5^\circ$), Aracajú ($\Phi = - 10,9^\circ$), Brasília ($\Phi = - 15,7^\circ$), Belo Horizonte ($\Phi = 19,9^\circ$), Curitiba ($\Phi = 25,3^\circ$) e Porto Alegre ($\Phi = - 30,0^\circ$).

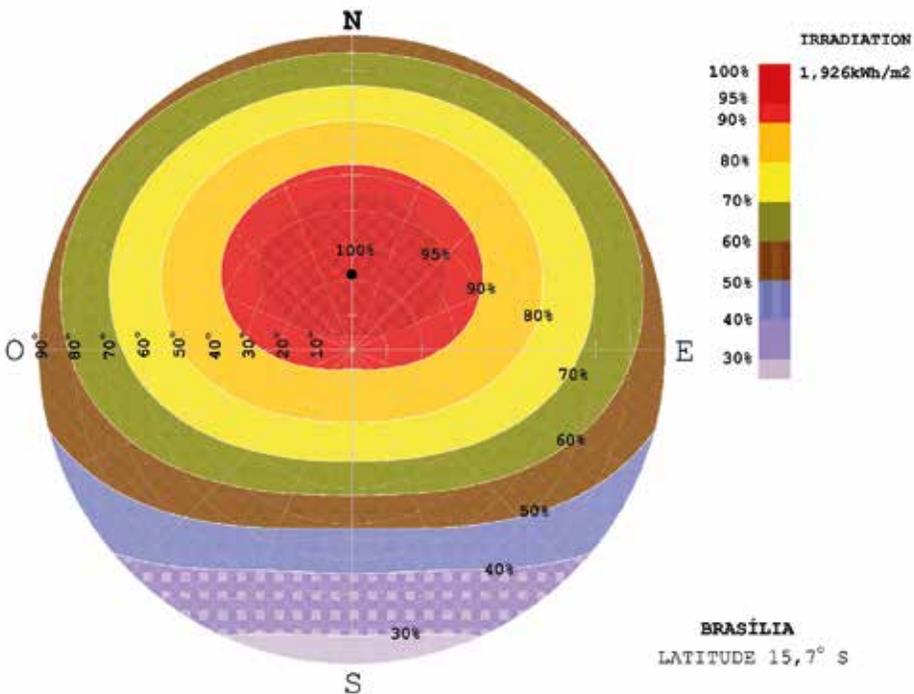
Figura 7: Localização das cidades no mapa do Brasil



Fonte: Cronemberger (2015, p. 115).

O procedimento utilizado foi o de calcular a irradiação solar recebida pelas superfícies fixas em 1.368 pontos diferentes da abóboda solar. A distância entre os pontos é de 5° – suas inclinações (β) variam de horizontal (0°) a vertical (90°), enquanto os azimutes (α) percorrem de 0° a 360° . Esses dados foram representados em diagramas com sistema esférico de coordenadas, utilizando-se o programa OriginPro 8.5. Cada diagrama foi criado diretamente a partir de dados organizados em três eixos – *theta* (azimute), *raio* (inclinação) e *zeta* (irradiação) por triangulação.

Figura 8: Brasília: Diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação



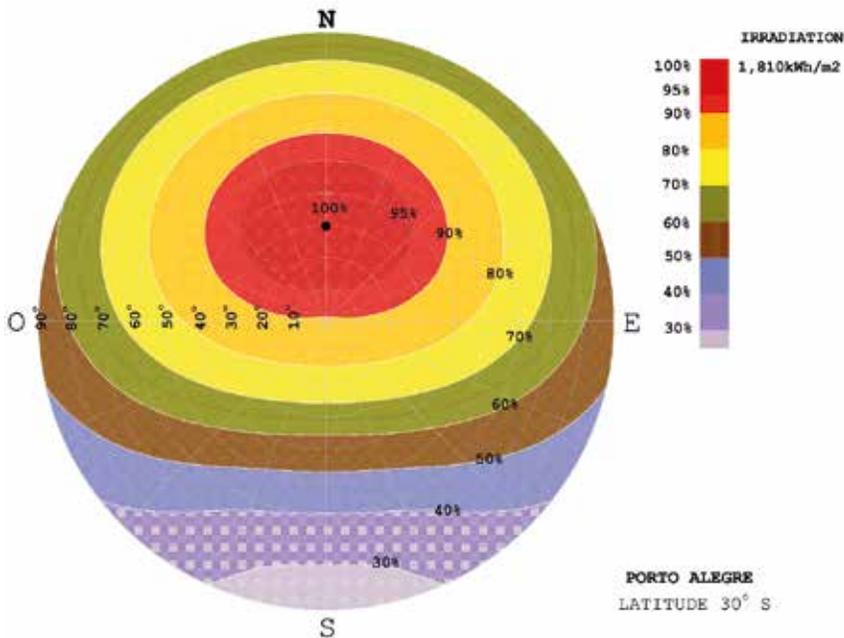
Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

A Figura 8 mostra o diagrama de aproveitamento da irradiação solar para Brasília (latitude $15,7^\circ$) em todas as orientações e inclinações. Observa-se que o ponto de aproveitamento máximo (100%) será para uma superfície inclinada 24° em relação à horizontal e orientada a Norte (1.926 kWh/m^2), ideal para uma cobertura solar FV.

O diagrama exibe um amplo intervalo de combinações inclinação/orientação ótimas (aproveitamento $\geq 90\%$) para superfícies inclinadas de 0° a 53° e orientadas entre Noroeste e Nordeste. Basicamente, todo o quadrante Norte tem combinações aceitáveis (aproveitamento $\geq 55\%$). Para orientações percorridas entre Leste e Oeste na direção horária também há combinações aceitáveis para edifícios solares FV.

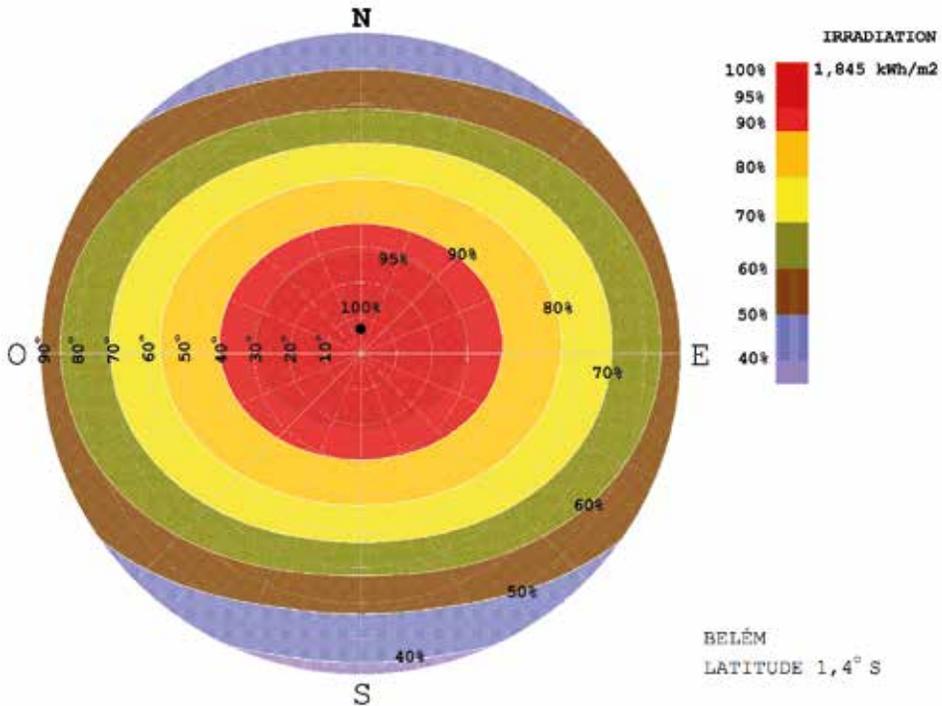
Já para Porto Alegre (latitude 30°), o diagrama de aproveitamento (Figura 9) mostra que a situação ótima para aproveitamento máximo da irradiação (1.810 kWh/m^2) refere-se a uma superfície inclinada 30° em relação à horizontal e orientada a Norte. Observa-se, também, assim como em Brasília, um amplo intervalo de combinações inclinação/orientação ótimas (aproveitamento $\geq 90\%$) para superfícies inclinadas de 2° a 58° e orientadas entre Noroeste e Nordeste. Igualmente, todo o quadrante Norte tem combinações aceitáveis (aproveitamento $\geq 55\%$). Para orientações entre Leste a Oeste na direção horária, também há combinações aceitáveis.

Figura 9: Porto Alegre: Diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

Figura 10: Belém: Diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martin e Vega Sánchez (2012, p. 270).

Quase no outro extremo do país, em Belém (lat. - 1,4°), o ponto de aproveitamento máximo (1.845 kWh/m²) está orientado a Norte e inclinado 7° em relação ao plano horizontal (Figura 10). O intervalo ótimo para a combinação inclinação/orientação concentra-se no centro do diagrama, como é natural pela proximidade com o Equador. Uma superfície de captação com qualquer orientação, inclinada até aproximadamente 40°, tem o potencial de aproveitar mais de 90% da irradiação solar disponível para essa latitude. O diagrama demonstra que há situações aceitáveis em todas as orientações, mais favoráveis a Leste e Oeste. Note-se, entretanto, que uma superfície vertical orientada a Oeste, apesar de potencialmente receber apenas 56,3% da irradiação total, traduz-se na disponibilidade de 1.039 kWh/m², uma quantidade consideravelmente alta. Tais dados mostram que, nessas latitudes, para uma

boa variedade de tipologias de envoltórias inclinadas até 40°, qualquer que seja sua orientação, é possível obter aproveitamentos bons, muito bons ou ótimos. Relações análogas podem ser observadas nos diagramas para as cidades de Teresina (Figura 12) e Aracajú (Figura 5) e também para Belo Horizonte (Figura 13) e Curitiba (Figura 14).

A Tabela 2 sumariza os resultados dos sete diagramas de irradiação solar para fachadas e coberturas. O recurso solar disponível nas *coberturas* ($\beta = 0^\circ$ a 30°) será sempre potencialmente igual ou maior que 89%, quando orientadas a Norte, em qualquer das latitudes verificadas. Quanto mais próximo do Equador, maior será o aproveitamento potencial. Para coberturas com orientação Sul os aproveitamentos potenciais são mais baixos, com um mínimo de 66% em Porto Alegre, podendo chegar, no entanto, a 99% em Belém.

Tabela 2: Potencial de aproveitamento anual da irradiação disponível em coberturas e fachadas

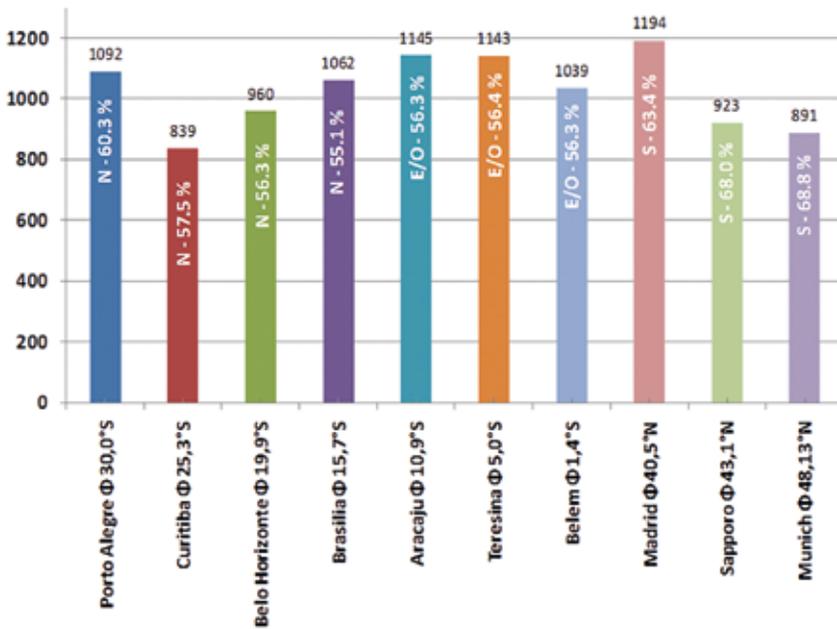
Cidade	Max. Irrad. (kWh/m ² .ano)	Lat (φ)	Posição superfície (β)	Norte (%)	Leste/Oeste (%)	Sul (%)
Porto Alegre/RS	1.810	-30,0°	cobertura	89,1 – 100	85,5 – 89,3	66,6 – 89,0
			fachada	60,3 – 98,7	54,5 – 81,9	25,9 – 55,9
Curitiba/PR	1.460	-25,3°	cobertura	92,3 – 100	87,5 – 92,5	71,0 – 92,3
			fachada	57,5 – 97,6	53,3 – 83,4	28,6 – 61,2
Belo Horizonte/MG	1.705	-19,9°	cobertura	92,1 – 100	87,6 – 92,4	70,7 – 92,1
			fachada	56,3 – 97,4	55,3 – 83,5	27,0 – 60,6
Brasília/DF	1.926	-15,7°	cobertura	92,5 – 100	88,6 – 92,9	71,9 – 92,5
			fachada	55,1 – 97,0	54,6 – 84,6	26,6 – 61,8
Aracajú/SE	2.034	-10,9°	cobertura	96,8 – 100	93,1 – 97,8	83,5 – 97,4
			fachada	45,6 – 91,8	56,3 – 88,5	31,9 – 74,7
Teresina/PI	2.026	-5,0°	cobertura	96,0 – 100	93,9 – 98,6	85,8 – 98,3
			fachada	44,3 – 90,3	56,4 – 89,2	33,8 – 77,3
Belém/PA	1.845	-1,4°	cobertura	93,3 – 100	94,6 – 99,7	89,9 – 99,4
			fachada	42,0 – 87,5	56,3 – 89,9	37,8 – 82,3

Nota: Coberturas 0° - 30° / Fachadas 40° - 90°.

Fonte: Cronemberger (2012, p. 179).

No que diz respeito ao recurso solar disponível nas *fachadas*, verifica-se que em todas as cidades brasileiras simuladas o percentual máximo de aproveitamento será de, no máximo, aproximadamente 60% ($\beta = 90^\circ$). Essa proporção será maior quanto maior for a latitude da cidade – a porcentagem mais alta se observa em fachadas orientadas a Norte (60,3%) em Porto Alegre, e a mais baixa (42,4%), em Belém. Em Porto Alegre, Curitiba, Belo Horizonte e Brasília (latitudes entre -15° e -30°), a diferença de aproveitamento entre as fachadas Leste/Oeste e Norte é de cerca de 5%, o que indica que ambas têm a mesma importância do ponto de vista de integração de um gerador solar. Situação diferente encontra-se em Aracaju, Teresina e Belém (latitudes entre -1° e -10°), onde superfícies verticais ($\beta = 90^\circ$) orientadas a Leste/Oeste conseguiriam aproveitamentos potenciais de 10% e 14% maior do que na orientação Norte. Em Belém, devido à proximidade do Equador, a diferença entre o uso das fachadas Norte e Sul é inferior a 5%.

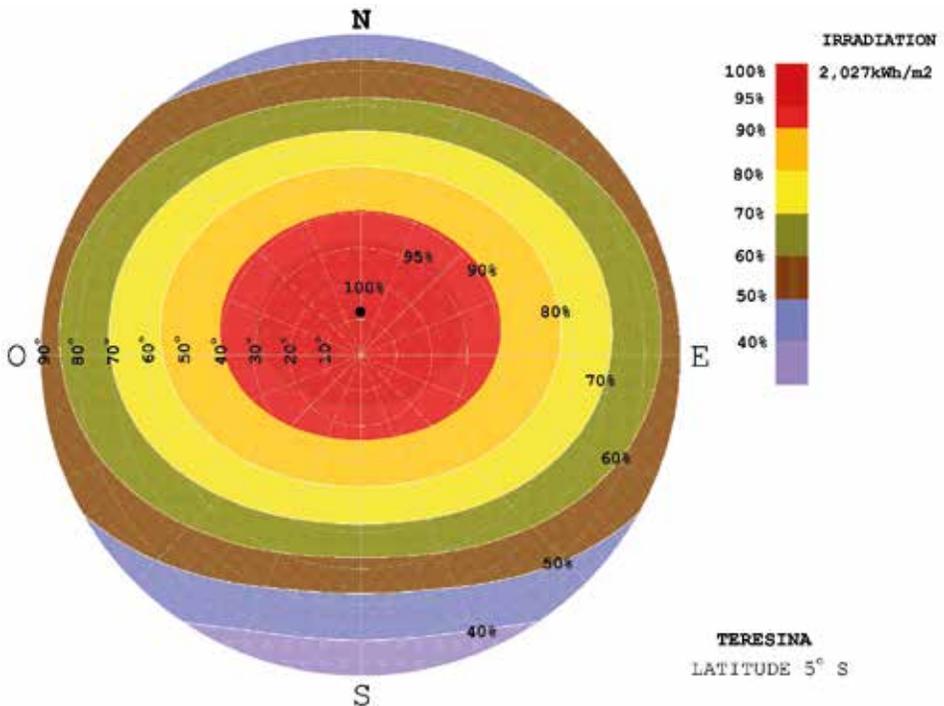
Figura 11: Comparação de aproveitamento solar das fachadas melhor orientadas



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 180).

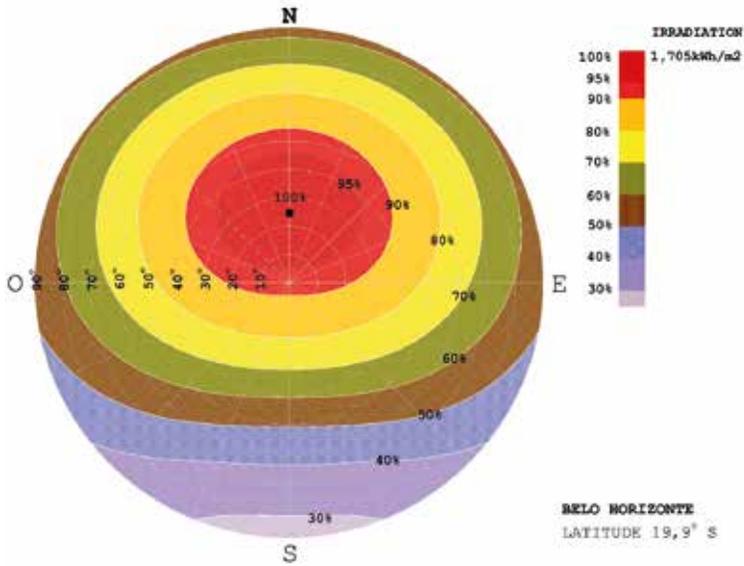
Embora abaixo de 60%, o aproveitamento potencial em *fachadas* apresenta um valor de irradiação anual consideravelmente elevado, se comparado aos valores observados em países onde essa tecnologia já está disseminada (Figura 11). Por exemplo, em Belém, o aproveitamento nas fachadas Leste/Oeste é de 56,3% (1.039 kWh/m²). Esse valor representa apenas 13% menos do que a fachada melhor orientada em Madri, na Espanha, e 14% a mais do que uma fachada Sul em Munique, na Alemanha. Situações muito semelhantes foram verificadas em outras cidades brasileiras na faixa de latitude entre -15° e -5°. Esses dados são significativos também em projetos de envoltórias inclinadas, como átrios e elementos de sombreamento de fachadas e janelas.

Figura 12: Teresina: Diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação



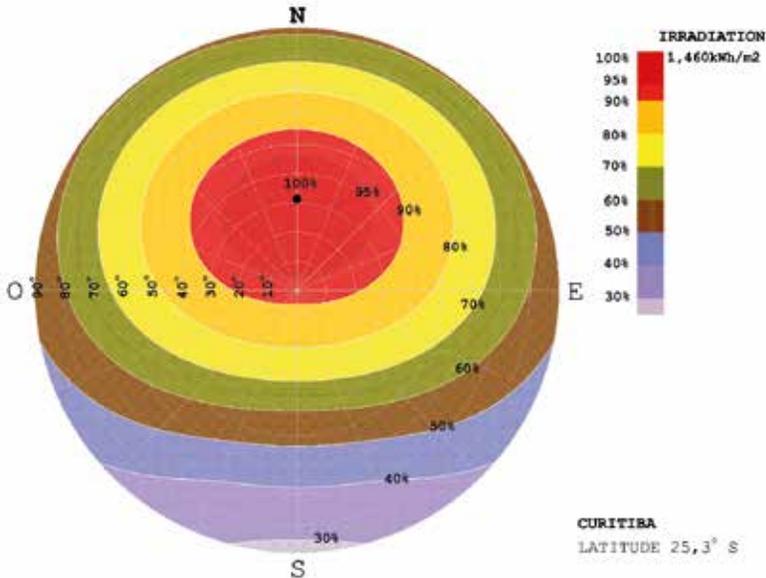
Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

Figura 13: Belo Horizonte: irradiação para qualquer orientação e inclinação



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

Figura 14: Curitiba: irradiação para qualquer orientação e inclinação



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

13. Aspectos normativos de conexão à rede pública

A normativa de compensação de energia adotada no Brasil, apesar de tecnicamente interessante e elogiada por muitos especialistas internacionais, não inclui incentivos econômicos ao consumidor de energia, ao contrário de outros países como Espanha ou Alemanha. Isso faz com que sua aquisição deva ser autofinanciada, e, conseqüentemente, se retarde sua disseminação. A atual crise hídrica que afeta várias regiões do país aliada ao incremento acentuado das tarifas de energia elétrica observadas nos últimos anos podem contribuir para acelerar o processo de adoção dessa tecnologia.

Existem algumas poucas iniciativas de incentivo à instalação de sistemas FV, tais como o Fundo Solar, organizado pelo Instituto Ideal¹⁰ com o *Grüner Strom Label*,¹¹ ou, ainda, o Crédito Produtivo SIC/Energias Renováveis, para pequenos consumidores. Nenhum deles é apoiado pelo Governo Federal. Ainda assim, estima-se que a capacidade instalada de geração distribuída crescerá, mantendo-se o atual cenário de ausência de incentivos federais, em 835MWp até 2023 (BRASIL, 2014).

Publicada em 17 de abril de 2012, a Resolução Normativa 482/2012 – ANEEL regula a injeção de eletricidade de fontes renováveis à rede elétrica para os chamados mini e microgeradores (BRASIL, 2015). O documento, atualizado em 24 de novembro de 2015, pela Resolução Normativa 687/2015 - ANEEL (BRASIL, 2015) em vigor desde 2016, estabelece os procedimentos de conexão à rede e às condições para o sistema de compensação de energia (*net-metering*). A normativa define um sistema de microgeração distribuído como uma instalação com potência instalada de até 75 kW, para fontes hidráulicas, solares, eólicas, de biomassa ou de cogeração, conectada à rede como unidade de consumo. Sistemas com potência instalada entre 75 kW e 5 MW são considerados do tipo minigeração.

¹⁰ Disponível em: <http://institutoideal.org>.

¹¹ Etiqueta de Eletricidade Verde (tradução nossa), originária da Alemanha.

O sistema de compensação baseia-se no empréstimo gratuito da energia gerada por um consumidor para a rede do distribuidor local de eletricidade, que é compensado pelo consumo subsequente da energia ativa dessa mesma rede. Isso pode ser feito no mesmo ponto em que a geração ocorreu ou em outro local de propriedade do mesmo consumidor. A cobrança de energia elétrica é feita por contabilização da energia ativa consumida menos a energia injetada, por período da tarifação. As taxas horárias são levadas em consideração, de modo que, quando a energia injetada em hora ponta for maior do que a consumida, a diferença será feita nos horários subsequentes, o que é uma vantagem para o consumidor. Uma das inovações que traz o regulamento é a possibilidade de que a geração distribuída também possa ser feita para unidades de consumo múltiplo, como condomínios e cooperativas.

14. Considerações finais

Em primeiro lugar, nota-se que a implementação de um sistema solar ativo em um edifício requer uma análise detalhada do ambiente urbano em que se situa. Contextualizando as conclusões deste capítulo, enfatiza-se que, para maximizar a produção fotovoltaica de qualquer tipo de instalação, integrada ou não em envolventes arquitetônicas, é necessário evitar ao máximo as perdas por sombreamento, temperatura dos módulos, dispersão de parâmetros e limpeza, o que pode ser um desafio no ambiente urbano.

A simulação e a análise dos dados de irradiação solar apresentados permitiram verificar que, nas cidades brasileiras estudadas, a inclinação ideal de uma superfície FV (ângulo ótimo) é quase sempre maior que o valor da latitude local, em até 9°. Apresenta-se como ferramenta de projetos uma expressão linear para calcular o ângulo ótimo nas latitudes brasileiras, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,93$.

Nas cidades verificadas, o aproveitamento em superfícies FV integradas em *coberturas* serão boas, muito boas ou ótimas, varrendo orientações que vão de Leste a Oeste em sentido anti-horário, com perdas máximas de até 15%. Em latitudes

de 0° a -25°, até mesmo superfícies orientadas a Sul podem ser beneficiadas com resultados igualmente bons, permitindo aplicações satisfatórias em diversas tipologias de coberturas. Desaconselha-se posicionar os módulos horizontalmente, uma vez que o escoamento de águas pluviais deve ser favorecido, o que é particularmente importante em cidades com altas taxas de precipitação, muito comuns na climatologia brasileira.

No caso de *fachadas*, os melhores potenciais de aproveitamento são encontrados nas superfícies orientadas a Norte, para latitudes -15° a -30°, ou orientadas a Leste/Oeste quando as latitudes variam do Equador até -10°, até um máximo de 60%. No caso de superfícies inclinadas, como em átrios e componentes de sombreamento, o aproveitamento pode chegar até 90% da irradiação disponível.

Ao contrário da crença geral, demonstra-se que a integração de módulos FV em superfícies verticais em baixas latitudes pode ser efetiva e sempre deve ser considerada, desde que os demais critérios de projeto sejam adequados. A boa disponibilidade da irradiação solar em uma ampla gama de orientações e inclinações no Brasil é evidente, o que permite afirmar que a integração FV em edifícios é adequada não só para coberturas, mas também a diversas tipologias de fachadas.

Apresentam-se diagramas que permitem desenvolver uma rápida análise gráfica do potencial de aproveitamento de irradiação solar em todas as orientações e inclinações para sete cidades brasileiras – Belém, Aracajú, Teresina, Brasília, Belo Horizonte, Curitiba e Porto Alegre –, os quais podem ser utilizados como ferramenta na busca de soluções arquitetônicas de integração FV, não apenas no Brasil, mas também em outras regiões localizadas em latitudes equivalentes.

O consumo de energia elétrica no Brasil em edifícios¹² representou, em 2014, um total de 41,1% da oferta nacional de energia elétrica (BRASIL, 2014). Isso sugere que os edifícios solares FV podem ser utilizados como uma estratégia energética vantajosa, que colabora para a otimização e a estabilidade da rede pública de distribuição.

¹² Setores residencial (20,5%), público (6,8%) e comercial (13,8%).

Há outro condicionante importante que talvez seja outro impulsor dessa tecnologia, já que é esperável que se confirme no Brasil a afirmação de que “o desenho verde é a razão básica para integrar sistemas BIPV em edifícios”¹³ (REIJENGA, 2003, p. 1011, tradução nossa).

Seguindo a tendência de uma maior conscientização ambiental em todos os níveis da sociedade, já estão em vigor no país as normativas relacionadas aos projetos e construção de edifícios, focadas na obtenção do conforto ambiental e de eficiência energética (BRASIL, 2010a; BRASIL, 2010b; ABNT, 2003). Coerentes com outras normativas internacionais similares, essas normativas obrigarão que se cumpram requisitos mais exigentes em relação ao desempenho térmico, acústico e energético de edifícios, levando a uma adaptação dos sistemas e práticas construtivas atuais, podendo até mesmo desencadear uma verdadeira revolução no setor. A introdução de sistemas FV em edifícios no Brasil e outros países localizados em zonas de baixas latitudes é uma questão de tempo, razão pela qual se considerou oportuno apresentar uma revisão crítica da práxis no contexto internacional.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR15220: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Resolução Normativa Nº 482*, de 17 de abril de 2012. Brasília, 2010a.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Portaria INMETRO 372/2010, de 17 de setembro de 2010b. *Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos*. Brasília, 2010b.

¹³ “Green design is the basic reason for integrating PV into buildings.”

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2014.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Resolução Normativa Nº 687*, de 24 de novembro de 2015. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2015.

BRAUN, Priscila; RÜTHER, Ricardo. The role of grid-connected, building-integrated photovoltaics generation in commercial building energy and power loads in a warm and sunny climate. *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 12. p. 2457-2466, 2010.

BUENO PEREIRA, Enio *et al.* *Atlas brasileiro de energia solar*. 2. ed.. Sao José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), 2017.

CERÓN, Isabel; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; NEILA GONZALEZ, Javier. State-of-the-art of building integrated photovoltaic products. *Renewable Energy*, v. 58, p. 127-133, 2013.

CHENG, C. L.; SANCHEZ JIMENEZ, Charles S.; LEE, Meng-Chieh. Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans. *Renewable Energy*, v. 34, n. 6, p. 1644-1650, 2009.

CHRISTENSEN, Craig; BARKER, Greg. Effects of tilt and azimuth on annual incident solar radiation for United States locations. In: SOLAR FORUM 2001: SOLAR ENERGY: THE POWER TO CHOOSE, 2001, Washington, DC. *Anais...* Washington, 2001.

CRONEMBERGER, Joara *et al.* BIPV Technology application: highlighting advances, tendencies and solutions through Solar Decathlon Europe houses. *Energy and Buildings*, v. 83, p. 44-56, 2014.

CRONEMBERGER, Joara. *Integración de sistemas fotovoltaicos en edificios de oficinas en bajas latitudes: estudio del balance energético aplicado a Brasil*. Tese (Doutorado) – (Programa de Doctorado em Construcción y Tecnología Arquitectónica) - Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha, 2015.

CRONEMBERGER, Joara; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; VEGA SÁNCHEZ, Sergio. Assessing The Solar Irradiation Potential For Solar Photovoltaic Applications In Buildings At Low Latitudes – Making the Case for Brazil. *Energy and Buildings*, v. 55, p. 264-272, 2012.

DIDONÉ, Evelise Leite; WAGNER, Andreas; RUTTKAY-PEREIRA, Fernando Oscar. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 3, p. 27-42, 2014.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, Willian. A. *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley. 2006.

ESPANHA. Real Decreto 314/2006 de 17 de março e atualizações. *Código Técnico de la Edificación. HE5 Ahorro de Energía* - contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica. Madrid. Versão, 2015. Disponível em: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-ahorro-energia.html>. Acesso em: 12 dez. 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTHECNICAL STANDARDIZATION – CENELEC. *Photovoltaics in Buildings - DRAFT prEN 50583*. Bruxelas. 2014.

FRAUNHOFER – INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS – ISE. *Photovoltaics Report*. Freiburg. 2015.

GOPINATHAN, Kannam K. Solar radiation on variously oriented sloping surfaces. *Solar Energy*, v. 47, n. 3, p. 173-179, 1991.

GUNERHAN, Huseyin; HEPBASLI, Arif. Determination of the optimal tilt angle of solar collectors for building applications. *Building and Environment*, v. 42, n. 2, p. 779-783, 2007.

HAUSLADEN, Gerhard; DE SALDANHA, Michael; LIEDL, Petra. *Climate skin, building skin concepts that can do more with less energy*. Berlin: Birkhäuser, 2008.

HERAS CELEMÍN, Maria del Rosario; MONTORO, José Marco. *Comportamiento energético de edificios pasivos – Plan de Monitorización del Instituto de Energías Renovables*. Madrid: CIEMAT, 1990.

HERAS CELEMÍN, Maria del Rosario. *Energía solar en la edificación*. 4. ed. Madrid: CIEMAT, 2002. (Serie Ponencias del CIEMAT.).

HESTNES, Anne Grette. Building Integration of Solar Energy Systems. *Solar Energy*, v. 6, n. 4-6, p. 181-187, 1999.

HUSSEIN, H. M.; AHMAD, Gaffar; EL-GHETANY, H. H. Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations. *Energy Conversion and Management*, v. 33, p. 400-405, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The Solar Heating and Cooling Programme - SHC. Task 41: Solar Energy and Architecture. *Building Integration of Solar Thermal and Photovoltaics - Barriers, Needs and Strategies*. IEA. 2012.

LEWIS, Gladius. Optimal tilt of solar collector. *Solar & Wind Technology*, v. 4, p. 407-410, 1987.

LIU, Benjamin Y.; JORDAN, Richard C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffused and total solar radiation. *Solar Energy*, v. 4, p. 1-19, 1960.

LORENZO, Eduardo. Energy collected and delivered by PV modules. In: LUQUE LÓPEZ, Antonio; HEGEDUS, Steven (Ed.). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. New Jersey: JohnWiley and Sons. 2003. p. 905-967.

LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester, West Sussex, Inglaterra: Wiley and Sons, 2003.

MARTÍN CHIVELET, Nuria; SOLLA, Ignacio Fernández. *Envolvente fotovoltaica en la arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2007.

MARTINS, Fernando Ramos *et al.* Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. *Energy Policy*, v. 36, n. 8, p. 2865-2877, 2008.

MONDOL, Jayanta Deb; YOHANIS, Yigzaw G.; NORTON, Brian. The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*, v. 32, n. 1, p. 118-140, 2007.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). Research Cell and Champion Module Efficiency Records. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/national-center-for-photovoltaics.html>. Acesso em: 5 out. 2017.

PRASAD, Deo; SNOW, Mark. *Designing with solar power: A sourcebook for Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*. New York: The Images Publishing Group and Earthscan, 2006.

RUSSIA. *World Radiation Data Centre*. Disponível em: <http://wrdc.mgo.rssi.ru>. Acesso em: 12 mar. 2012.

RÜTHER, Ricardo; BRAUN, Priscila. Energetic contribution potential of building-integrated photovoltaics on airports in warm climates. *Solar Energy*, v. 83, n. 10, p. 1923-1931, 2009.

SOLARPOWER EUROPE. *Sustainability Working Group: Sustainability of Photovoltaic Systems - Fact Sheet on the The Carbon Footprint*. Bruxelas, 2011.

SOLARPOWER EUROPE. *Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018*. Bruxelas, 2014.

REIJENGA, Tjerk. H. PV in Architecture. In: LUQUE LÓPEZ, Antonio; HEGEDUS, Steven (Ed.). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. New Jersey: JohnWiley and Sons, 2003. p. 1005-1042.

ROBERTS, Simon; GUARIENTO, Nicolás. *Building integrated photovoltaics: a handbook*. Basel: Birkhäuser Verlag AG, 2009.

ROOS, Maria; HENZE, Norbert; FUNTAN, Peter; CRONEMBERGER, Joara; FIRGES, Julian. MULTIELEMENT II – Verbesserung der bautechnischen und baurechtlichen Rahmenbedingungen für PV-Fassadenkomponenten. In: Sechstes Forum Bauwerkintegrierte Photovoltaik 2014: 11 de março de 2014, Kloster Banz, Bad Staffelstein. *Anais...* Bad Staffelstein. 2014. p. 113-120.

ROWLANDS, Ian H.; KEMERY, Briana Paige; BEAUSOLEIL-MORRISON, Ian. Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: an Ontario (Canada) case-study. *Energy Policy*, v. 39, n. 3, p. 1397-1409, 2011.

SANTOS, Ísis Portolan; RÜTHER, Ricardo. Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. *Renewable Energy*, v. 63, p. 116-124, 2014.

SANTOS, Ísis Portolan *et al.* Estádios solares: potencial de aplicação da energia solar fotovoltaica nos estádios da Copa 2014. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2010, Belém-PA. *Anais...* III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém-PA, 2010.

SCOGNAMIGLIO, Alessandra; RØSTVIK, Harald N. Photovoltaics and zero energy buildings: a new opportunity and challenge for design. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 21, Special Issue: 27th EU PVSEC, Frankfurt, Germany, 2012.



CAPÍTULO 6

Análise do balanço energético de casa pré-fabricada ZEB em Brasília

Larissa Sudbrack e Cláudia Naves David Amorim

1. Balanço energético nulo

Em função da crise energética e das conseqüentes políticas reguladoras, surgiram propostas de edificações conhecidas como “*zero-energy building (ZEB)*”, termo que se refere a um edifício com demanda energética reduzida, por meio de estratégias passivas e sistemas eficientes que fazem com que o balanço anual de energia necessária para seu funcionamento possa ser suprido por tecnologias renováveis, considerando-se o período de um ano (TORCELLINI *et al.*, 2006). Para alcançar tal resultado, são incorporados ao projeto dos edifícios conceitos de *tecnologias passivas* (arquitetura), *ativas* (equipamentos) e *proativas* (produção de energia) (ROMERO; REIS, 2012). Tais projetos, complexos, envolvem metodologia específica, maior nível de detalhamento e planejamento, além de equipes multidisciplinares com profissionais de formações específicas e especialistas.

São vários os conceitos relacionados aos edifícios de balanço energético nulo. Além do simples “*ZEB (zero-energy building)*”, temos os NZEB – *nearly zero energy buildings* –, edifícios de alta *performance* energética, em que a pequena quantidade de

energia que necessita é fornecida por fontes renováveis. Já a sigla NZEB diz respeito aos “*net-zero energy buildings*”, que são edifícios em que necessariamente há uma troca entre a energia fornecida pela rede e a energia renovável produzida pelo edifício.

O primeiro passo em relação à possibilidade de ZEBs no Brasil foi dado em 2012, com a Resolução Normativa nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012), que estabelece as condições gerais para o sistema de compensação de energia elétrica, tendo sido posteriormente alterada pela Resolução nº 687, em novembro de 2015 (ANEEL, 2015). Para fins deste capítulo, o principal assunto tratado nessas resoluções é o sistema de compensação de energia elétrica, no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito à distribuidora local e, posteriormente, compensada com o consumo de energia elétrica ativa. Com o objetivo de compensação, a unidade consumidora passa a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 meses.

Isso permite que o sistema fotovoltaico, por exemplo, torne-se mais economicamente viável, uma vez que as baterias de armazenamento residencial são, ainda, muito caras. Além disso, devolver a energia à rede faz com que se aproveite toda a infraestrutura já existente nas cidades e grandes centros urbanos.

1.1 Residências ZEB: a influência do projeto no desempenho térmico e luminoso da edificação e seu impacto no consumo energético residencial

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a análise do consumo de energia de uma edificação é tão importante para o processo de projeto quanto quaisquer das outras ferramentas usadas comumente pelos projetistas, estando diretamente relacionada às decisões do projeto arquitetônico, sendo o desempenho térmico e luminoso da envoltória o mais afetado pelas decisões do arquiteto.

Mais da metade dos projetos ZEB construídos no contexto mundial é residencial. Isso ocorre por duas razões principais: uma delas é que a maior parte dos

edifícios em geral é residencial; e a outra, pelo fato de que é em casa os conceitos de economia de energia são mais facilmente percebidos, uma vez que as altas taxas de energia elétrica podem ser sentidas no bolso mais diretamente (VOSS; MUSALL, 2013). A maioria dos edifícios ZEB localiza-se em climas onde o aquecimento tem um papel dominante no consumo (VOSS; MUSALL, 2013). Em países tropicais como o Brasil, a maior demanda é de resfriamento, o que exige estudos específicos.

A Agência de Energia Internacional (IEA) publicou, em 2014, um relatório com 30 estudos de caso sobre edifícios de balanço energético nulo em todo o mundo. Dentre eles, cinco são residências unifamiliares em climas em que o aquecimento e o resfriamento são predominantes. A Tabela 1 compara os diferentes consumos de energia elétrica nesses estudos de caso, e mostra valores de consumo energético em casas ZEB nesses países.

Tabela 1: Comparativo de consumo energético (uso final) em Casas ZEB

Localidade	Nome do projeto	Arquiteto	Consumo (kWh/m ² .ano)
Dinamarca	Energy Flex House	Henning Larsens Architects	28
França	Le Charpak	Villa & Battesti	11
Itália	Leaf House	MEP	74
Itália	Casa Zero Energy	Arnaldo Savorelli	17
Espanha	Lima	J. Sabate, C. Peters, H. Espe	57

Fonte: Adaptado de IEA (2014).

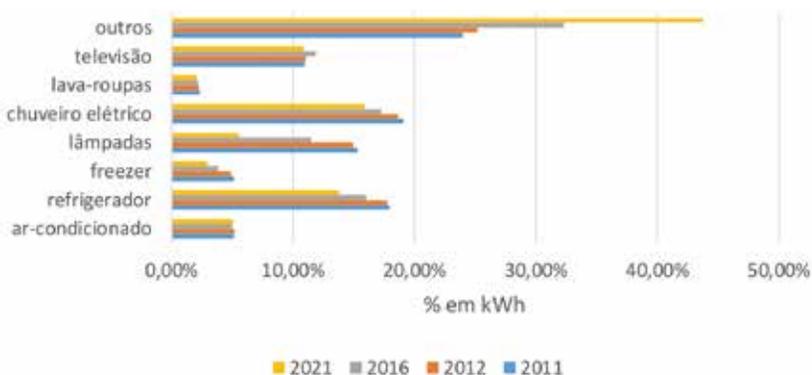
Para Voss e Musall (2013), a questão mais importante acerca das casas ZEB é a redução do consumo. Estratégias de projeto como ventilação natural, iluminação natural, sombreamento de aberturas no verão e aproveitamento do calor do sol no inverno estão presentes em quase todos os casos. Os equipamentos de suprimento energético são em sua maior parte coletores solares térmicos para aquecimento da água, sistemas fotovoltaicos para energia elétrica e aquecimento geotérmico.

No que diz respeito à influência do projeto no consumo de uma casa, de todos os usos finais residenciais, é possível relacionar diretamente a iluminação e o condicionamento de ar e o aquecimento de água (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), sendo este menos relacionado à arquitetura. A iluminação natural tem menor impacto, pois mesmo que a luz do dia possa ser aproveitada, o sistema de iluminação artificial é utilizado à noite, e seu consumo nunca chegará a zero, embora possa ser minimizado. Portanto, de modo geral, a influência do projeto de uma casa em seu consumo energético está diretamente relacionada com os sistemas de resfriamento e aquecimento do ar interior, que, por sua vez, relacionam-se às condições de conforto térmico dos usuários.

1.2 Consumo energético no setor residencial no Distrito Federal

O gráfico da Figura 1 mostra como o consumo de energia elétrica está dividido no setor residencial e sua provável evolução em 10 anos, devido ao crescimento demográfico e econômico. É visível que, ao mesmo tempo que os índices de consumo de vários equipamentos como lâmpadas e refrigeradores caem, outros, como ar-condicionado, mantêm-se ou até mesmo aumentam.

Figura 1: Consumo de energia elétrica no setor residencial no Brasil em 2011 e previsão para o ano de 2021



Fonte: Adaptado de EPE (2012).

Estudos feitos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012) mostram a evolução da eficiência energética nos próximos 10 anos, bem como a demanda elétrica nos diferentes setores. No setor residencial, é esperado que as lâmpadas representem a maior evolução em termos de eficiência, devido à difusão da tecnologia LED e à política de proibição de comercialização de lâmpadas halógenas (EPE, 2012). Os dados da Tabela 2 dão uma previsão da demanda energética no Brasil no ano de 2050.

Tabela 2: Posse média de equipamentos selecionados (2013-2050)

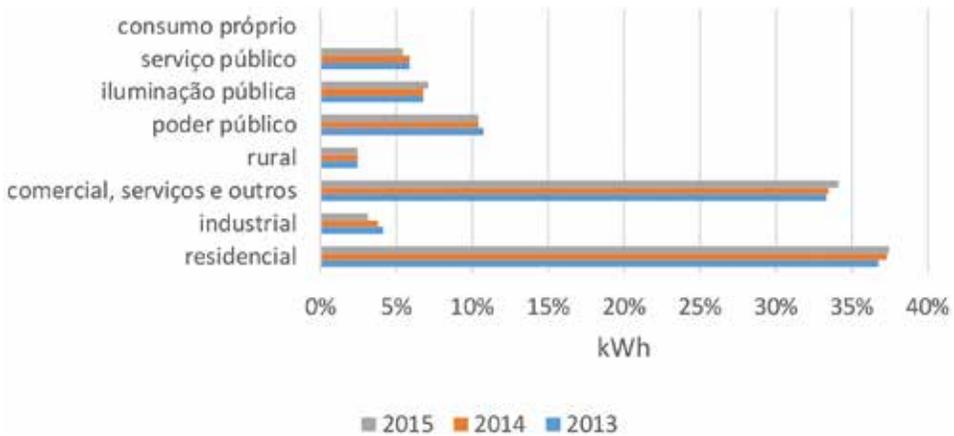
Equipamento	2013	2050
Ar-condicionado	0,23	0,65
Geladeira	1,03	1,03
Lâmpada	8,25	12,13
Chuveiro	0,70	0,32
Televisão	1,61	2,32
Máquina de lavar	0,68	0,94
Freezer	0,18	0,12

Fonte: Adaptado de EPE (2014, p. 117).

A partir desses dados, evidencia-se que o ar-condicionado é responsável pelas maiores taxas de crescimento.

O consumo energético residencial no Distrito Federal (DF) representou 37% do consumo total da cidade nos últimos três anos, de 2013 a 2015 (CEB, 2016), e pode ser visto na Figura 2; e uma redução no consumo em todos os setores pode ser notada. Devido à crise hídrica no Brasil nos últimos anos, o aumento das tarifas de energia elétrica foi de aproximadamente 25%, em 2015. Como reflexo desse aumento nas taxas, a redução do consumo de energia elétrica se deu em praticamente todos os setores.

Figura 2: Demanda energética por setor no Distrito Federal



Fonte: Adaptado de CEB (2016).

Figura 3: Consumo médio mensal (kWh) por pessoa nas Regiões Administrativas do Distrito Federal de 2013 a 2015



Fonte: Adaptado de CEB (2016).

O consumo médio mensal de energia elétrica no DF (Figura 3), no setor residencial, é de 79 kWh por pessoa. Percebe-se que esse consumo está também relacionado às diferentes faixas de renda e classe econômica que prevalecem nas regiões avaliadas: por exemplo, na Região Administrativa do Bairro Lago Sul, o consumo é cerca de três vezes maior que nas Regiões de Planaltina, São Sebastião e Recanto das Emas.

2. A norma ASHRAE 55-2013 e as condições de conforto térmico para ambientes ventilados naturalmente

O Brasil não possui norma de conforto térmico para edificações naturalmente ventiladas. Há, portanto, pesquisadores que vêm se empenhando para elaborar uma proposta para a primeira norma brasileira de conforto térmico humano em edificações com ventilação natural (LAMBERTS *et al.*, 2013). De acordo com Sorgato (2015), a proposta da norma está sendo desenvolvida com base na norma internacional ASHRAE Standard 55-2013, cujas condições de conforto térmico nela consideradas serão apresentadas a seguir.

Segundo Olesen (2007), citado por Sorgato (2015, p. 52), os critérios para a avaliação do conforto térmico em edificações condicionadas naturalmente devem ser diferentes dos critérios adotados para edificações com condicionamento artificial, devido às diferentes expectativas e adaptações dos usuários. Para as edificações condicionadas naturalmente, alguns modelos adaptativos fazem uma relação entre a temperatura no interior da edificação e a temperatura do ar, levando em consideração que os usuários se adaptam às variações sazonais e ao clima local. Segundo De Dear e Brasger (2002) citado por Sorgato (2015, p. 52), as teorias dos modelos adaptativos estabelecem, além dos fatores físicos e fisiológicos, a importância da expectativa e as preferências térmicas dos ocupantes do ambiente. Assim, a satisfação do usuário é influenciada pela expectativa do clima ambiente, relacionada às condições existentes.

O objetivo da ASHRAE 55-2013 é especificar as combinações de fatores ambientais térmicos e fatores pessoais e subjetivos que produzem condições ambientais favoráveis à maioria dos ocupantes de um ambiente.

Os fatores ambientais a que essa norma diz respeito são temperatura, radiação térmica, umidade e velocidade do ar; os fatores pessoais são os de atividade e vestimenta. As condições térmicas especificadas por essa norma são tidas como aceitáveis para indivíduos adultos, saudáveis, em localidades de até 3.000 metros de altitude, em espaços internos projetados para a ocupação humana por períodos não inferiores a 15 mm.

A norma apresenta dois métodos para a avaliação do conforto térmico nas edificações: o método da aceitabilidade térmica, baseado no PMV, e o método da aceitabilidade térmica, para ambientes condicionados naturalmente. O segundo método, também denominado Método de Modelo Adaptativo, aplica-se a ambientes ventilados naturalmente controlados pelos usuários, como é o caso das edificações residenciais unifamiliares abordadas neste capítulo.

A ASHRAE 55-2013 determina que há uma relação das condições do ambiente e os fatores pessoais que determinam a aceitabilidade dos usuários. A seção 5.4 da norma aborda a determinação de condições térmicas aceitáveis em espaços naturalmente condicionados controlados por seus usuários, por meio da abertura e do fechamento das janelas dos ambientes. Quando houver climatização artificial nos ambientes, seja de resfriamento, seja de aquecimento, essa normativa não poderá ser utilizada; ela se aplica a locais em que os usuários exerçam atividades com taxas metabólicas, variando entre 1,0 e 1,3 met (atividades físicas praticamente sedentárias) e em locais em que seja possível aos usuários a adaptação de suas vestimentas para se adaptar às condições climáticas externas e internas. É importante ressaltar que essa norma não pode ser aplicada em localidades em que a temperatura externa mínima seja menor que 10 °C ou em que a temperatura máxima seja maior que 33,5 °C. Portanto, ela pode ser aplicada a várias outras cidades brasileiras.

3. Ferramentas de simulação computacional térmica e energética de edificações

A simulação computacional é uma ferramenta que permite a avaliação integrada das opções de projeto, sob condições de operação realísticas, e dá aos projetistas a oportunidade de visualizar antecipadamente o desempenho dos sistemas e tomar decisões criteriosas para melhorá-lo (CLARK, 2001). No entanto, apesar de ser uma ferramenta multidisciplinar e abrangente (HENSEN; LAMBERTS, 2011), a simulação computacional é complexa e requer conhecimento multidisciplinar.

Atualmente, existem diversos programas para a simulação do desempenho térmico e energético de edificações. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2013) apresenta uma lista de programas computacionais para simulação e avaliação de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade em edificações.

O EnergyPlus é um dos programas de simulação de edificações bastante utilizados mundialmente, que calcula as trocas térmicas, os índices de iluminação e o consumo energético das edificações a partir da modelagem física do edifício e de seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento (DOE, 2013). O programa é, em primeiro lugar, um gerenciador de simulação, ou seja, não existe uma interface formal para o usuário; no entanto, é permitido o uso de outras interfaces desenvolvidas por uma terceira parte, que possibilite modelar a geometria dos edifícios e inserir informações como dados térmicos de materiais, padrões de ocupação, entre outros.

O *software* DesignBuilder é um dos programas utilizados como interface do EnergyPlus. Ele permite a análise do consumo de energia de edifícios; é validado pela ASHRAE Standard 140; modela 8.760 horas por ano; modela variações horárias de ocupação, potência de iluminação, equipamentos e sistemas de ar-condicionado, definidos separadamente para cada dia da semana, mês, podendo ser incluídos feriados e períodos em que o edifício encontra-se desocupado; modela efeitos de inércia térmica; permite a modelagem de multizonas térmicas; e tem capacidade de simular as estratégias bioclimáticas adotadas no projeto, caso o edifício proposto utilize sistema de condicionamento de ar (SILVA, 2014).

4. Procedimentos metodológicos

4.1 Definição do projeto da casa pré-fabricada a ser simulada

Sudbrack (2017) desenvolveu um projeto de casa pré-fabricada a fim de analisar estratégias de projeto para atingir o balanço energético nulo. Para que seja

possível fixar algumas variáveis a serem utilizadas nas simulações, foram definidas algumas premissas de projeto. Essas premissas consideram, entre outros fatores, as estratégias bioclimáticas para a cidade de Brasília, previstas na NBR 15220-3 (ABNT, 2005), para que a casa tenha o melhor desempenho térmico possível, e que seja verificada a necessidade de se utilizar um sistema de climatização artificial ou não. O uso desse sistema impactará diretamente no consumo energético da residência, por isso é um ponto importante a se considerar.

A escolha de um projeto em que a edificação é térrea está relacionada também a uma das estratégias para ZEBs (de modo geral), em que a proporção entre a área disponível de cobertura para a instalação de equipamentos geradores de energia seja suficiente ou maior do que a área interna que deve ser abastecida. O projeto a ser simulado, representado nas Figura 5, é, portanto, uma casa pré-fabricada térrea, de três quartos, cuja modulação da estrutura e dos elementos construtivos é de 1,2x1,2 m.

As janelas contam com uma moldura que faz as vezes de um *brise soleil*. Como uma mesma casa pode ser montada em vários terrenos diferentes e, consequentemente, diversas orientações solares, as proteções das janelas são tanto verticais quanto horizontais, e contam também com painel de venezianas de alumínio que permitem a ventilação noturna e maior segurança dos panos de vidro. A casa é elevada em 25 cm do solo para abrigar a passagem das tubulações. O sistema construtivo e estrutural ideal para a casa será definido a partir das simulações, que têm por objetivo definir qual combinação de materiais de parede e cobertura gera os melhores índices de conforto térmico a seus moradores com a menor necessidade de condicionamento artificial do ar.

Foram modeladas três composições de paredes e duas composições de coberturas que representam os materiais e sistemas construtivos mais representativos utilizados em edifícios pré-fabricados no Brasil (SUDBRACK, 2017).

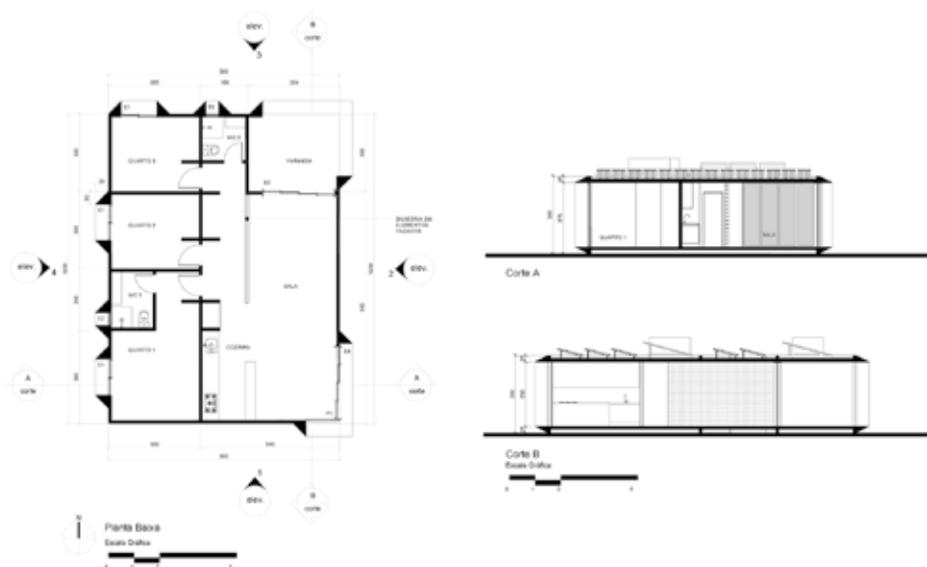
As características de coberturas e paredes simuladas estão descritas nas tabelas 3 e 4.

Figura 4: Vista exterior da casa



Fonte: Sudbrack (2017, p. 91).

Figura 5: Planta baixa e Cortes da residência



Fonte: Adaptado de Sudbrack (2017).

Tabela 3: Características térmicas das coberturas

Descrição	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade (kg/m³)	Absortância	Transmitância (W/m².K)
Placa de CLT (<i>Gross Laminated Timber</i>) com 200 mm de espessura, e aplicação de manta impermeabilizante aluminizada (3 mm) na face externa.	Manta aluminizada	0,003	0,23	1460	1000	0,05	0,59
	CLT	0,20	0,13	2100	550	-	
	Núcleo em EPS	0,0907	0,032	1420	40	-	
	Chapa metálica interna	0,00043	55	460	7800	-	
	Concreto	0,04	1,75	1000	2200	-	
	EPS	0,09	0,032	1420	40	-	
	Concreto	0,03	1,75	1000	2200	-	
	Chapa metálica externa	0,00050	55	460	7800	0,2	
Isotelha PUR, telha metálica tipo sanduíche com preenchimento em PUR (poliuretano), com 100 mm de espessura, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Núcleo em PUR	0,0907	0,02	1420	40	-	0,21
	Chapa metálica interna	0,00043	55	460	7800	-	
	Ar	0,02	0,023	1012	1,20	-	
	Água	0,05	0,6	4190	1000	-	
	Manta impermeabilizante	0,003	0,23	1460	1000	-	
	CLT	0,20	0,13	2100	550	-	

Fonte: Sudbrack (2017, p. 105).

Tabela 4: Características térmicas das paredes

Descrição	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade (kg/m ³)	Absortância	Transmitância (W/m ² .K)	
Placa de CLT (<i>Cross Laminated Timber</i>) com 200 mm de espessura, e aplicação de pintura branca nas faces interna e externa.	CLT	0,20	0,13	2100	550	0,2	0,58	
	Sistema de paredes secas (<i>dry wall</i>), composto por placa cimentícia nas faces externas, núcleo de lâ de rocha, e placa de gesso acartonado nas faces internas, com 120mm de espessura total, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Placa fibrocimento	0,01	0,95	840	2200	0,2	2,08
		Núcleo em lâ de rocha	0,092	0,033	750	90	-	
		Placa de gesso acartonado	0,018	0,35	840	750	0,2	
		Chapa metálica interna	0,0065	55	460	7800	-	
Painel de tijolos cerâmicos e argamassa armada, com 140mm de espessura, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Argamassa armada e pintura branca	0,025	1,15	1000	2100	0,2	1,65	
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	-		
		Ar	0,03	0,023	1012	1,20		-
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	-		
		Ar	0,03	0,023	1012	1,20		-
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	-		
	Argamassa armada e pintura branca	0,025	1,15	1000	2100	0,2		

Fonte: Sudbrack (2017, p. 106).

As seis diferentes combinações de materiais de envoltória a serem simuladas e comparadas entre si serão descritas a seguir, bem como os demais parâmetros fixos considerados para a simulação.

4.2 Características consideradas para as simulações de casas ZEB pré-fabricadas

Para Lamberts, Dutra e Pereira (2014), o arquiteto pode racionalizar o uso da energia em um edifício, se reduzir o consumo em iluminação, condicionamento do ar e aquecimento de água. Para tanto, existem três formas: usar sistemas naturais de iluminação e condicionamento do ar; usar sistemas artificiais de maior eficiência; e integrar estes dois sistemas (natural e artificial). O potencial de redução desse setor é expressivo.

O conforto ambiental, neste caso mais especificamente conforto térmico e luminoso, depende diretamente das características arquitetônicas e dos materiais utilizados na construção do edifício. Algumas características construtivas e arquitetônicas podem influenciar no consumo energético dos edifícios, como, por exemplo, a cobertura (cores e materiais, forma, inclinação, área); as paredes internas e externas (cores e materiais); o percentual de aberturas nas fachadas; o tipo de vidro; a orientação solar; a proteção solar de aberturas; a forma e a compactidade da edificação; e a porosidade da edificação (ventilação natural). A compreensão do comportamento e da influência de cada uma dessas características é de extrema importância para que o projeto de um edifício possa ser definido, pois dizem respeito às características da envoltória do edifício.

Para este capítulo, teremos algumas das características arquitetônicas e os dados de consumo energético (densidades de potência instalada para os sistemas de ar-condicionado, iluminação artificial e equipamentos em geral) fixos e isolados. Os materiais de paredes e cobertura serão as variáveis que tornarão possível saber como e quanto a escolha desses materiais influencia no consumo energético

da casa pré-fabricada. Desse modo, as estratégias a serem traçadas como resultado deste capítulo serão, em sua maior parte, relacionadas às estratégias passivas para eficiência energética, ou seja, estratégias de eficiência energética relacionadas ao edifício em si, e não apenas aos sistemas a ele acoplados.

4.3 Parâmetros considerados nas simulações

A casa conta com 108 m² de área coberta. Para a orientação solar da casa a ser simulada, será levada em consideração a pior orientação possível (Figura 5). Pelo fato de esta ser uma casa pré-fabricada, que pode ser montada em qualquer terreno e orientação, a opção de considerar a pior orientação garante que, no caso de outras possíveis orientações solares, a casa funcionará ainda melhor do ponto de vista térmico. O percentual de aberturas nas fachadas foi calculado levando-se em conta a orientação solar proposta anteriormente.

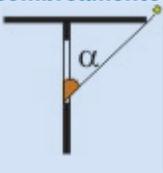
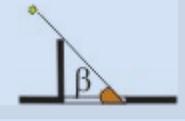
Tabela 5: Percentual de aberturas envidraçadas nas fachadas

Orientação	Área de fachada	Área de abertura	% de abertura
Norte	27m ²	11,75	43,5%
Leste	36m ²	7m ²	19%
Sul	27m ²	0m ²	0%
Oeste	36m ²	8,25m ²	23%

Fonte: Sudbrack (2017, p. 101).

O tipo de vidro utilizado no modelo será vidro comum liso 4 mm, fator solar 0,87. As aberturas envidraçadas da casa têm ângulos de sombreamento horizontal e vertical, que variam de acordo com as dimensões das janelas, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Ângulos de sombreamento das aberturas envidraçadas

Esquadria	<p>Ângulo vertical de sombreamento</p> 	<p>Ângulo horizontal de sombreamento</p> 
E1 (1,40x2,50m)	Esquerda: 20° / Direita: 20°	11°
E2 (0,50x2,50m)	Esquerda: 45° / Direita: 45°	11°
E3 (2,80x2,50m)	Esquerda: 50° / Direita: 10°	54°
E4 (2,80x2,50m)	Esquerda: 10° / Direita: 0°	11°

Fonte: Sudbrack (2017, p. 102).

Quanto à porosidade da edificação, no que diz respeito à ventilação natural, temos a área de piso da casa, de 108 m², e a área de ventilação, de 17,2 m², que representam, portanto, 16% da área do piso.

Tabela 7: Áreas de ventilação

Esquadria	Área de abertura	Área de ventilação	Qtde.	Área total de ventilação
1	1,40 x 2,50 = 3,5m ²	50% = 1,75m ²	3	5,25m ²
2	0,50 x 2,50 = 1,45m ²	50% = 0,725m ²	2	1,45m ²
3	2,80 x 2,50 = 7m ²	75% = 5,25m ²	1	5,25m ²
4	2,80 x 2,50 = 7m ²	75% = 5,25m ²	1	5,25m ²
Total			8	17,2m²

Fonte: Sudbrack (2017, p. 102).

Os materiais de cobertura e de paredes serão variáveis nas simulações, o que permitirá definir quais os materiais disponíveis na indústria brasileira que mais se adequam às residências de balanço energético nulo para a cidade de Brasília. A escolha dos materiais a serem testados nas simulações se deu a partir da avaliação de características térmicas de painéis pré-fabricados oferecidos pela indústria brasileira, de acordo com Sudbrack (2017).

4.4 Simulações do desempenho térmico e energético

Para as simulações de desempenho térmico e energético, foi utilizado o *software* DesignBuilder, versão 2.4.0.1, que segue os algoritmos de cálculo do *software* EnergyPlus (SILVA, 2014).

Foram modelados diferentes materiais para compor a envoltória da casa, e as simulações permitiram comparar quais são as combinações de materiais com melhor e pior desempenho termoenergético. Para a análise de desempenho térmico, foram utilizados os dados de temperatura operativa das zonas térmicas da casa, por meio dos quais foi possível calcular o percentual de horas do ano em que a casa se encontra na zona de conforto e analisar se a necessidade de uso de ar-condicionado ou não. Para a análise energética, foram utilizados os dados de consumo energético da casa com e sem o uso de ar condicionado, permitindo-se, assim, comparar a variável materiais x consumo energético.

As simulações foram realizadas com o arquivo climático EPW – EnergyPlus Weather File (INMET, 2016) para a cidade de Brasília (Latitude 15° 46' 48" Sul, Longitude 47° 55' 45" Oeste). Os arquivos climáticos contêm informações sobre as características de cada região geográfica do Brasil e representam um ano típico de uma série de 10 anos (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998). Os dados dos arquivos são horários e apresentam cada uma das 8.760 horas do ano, o que possibilita uma avaliação horária precisa das simulações.

As propriedades termofísicas dos materiais, a forma arquitetônica, a orientação das paredes e aberturas são determinantes no desempenho térmico interno de uma edificação em relação ao ambiente externo em que se insere. Os componentes da envoltória (paredes, cobertura, aberturas e piso) das edificações que separam o ambiente interno do externo são essenciais para a determinação dos ganhos e perdas de calor de um meio para outro.

Neste capítulo, os componentes piso e aberturas são isolados como variáveis fixas. Foi utilizado um mesmo valor de propriedades termofísicas para os vidros e para o piso. No caso dos vidros, foi considerado um vidro transparente simples de 4mm de espessura, transmitância térmica de $5,385 \text{ W/m}^2\text{K}$, transmitância visível de 0,89 e fator solar 0,87. Para o piso, foi modelada uma única composição, composta por uma camada de piso cerâmico de 10 mm, argamassa de nivelamento de 20 mm, e laje armada de 100 mm. A transmitância térmica total do conjunto é de $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Foram modeladas as três composições de paredes e as duas composições de coberturas, cujas características térmicas foram descritas nas tabelas 3 e 4. Os dois tipos de cobertura e os três tipos de paredes modelados foram combinados entre si, gerando seis diferentes combinações de materiais de envoltória a serem simulados e comparados entre si, como mostra a Tabela 8. As simulações de desempenho térmico permitirão verificar quais materiais têm melhor desempenho para a envoltória da casa.

Tabela 8: Combinações de cobertura e parede avaliadas

Material de cobertura	Material de parede
CLT+manta	CLT
CLT+manta	Dry Wall
CLT+manta	Painel Tijolo
Isotelha PUR	CLT
Isotelha PUR	Dry Wall
Isotelha PUR	Painel Tijolo

Fonte: Adaptado de Sudbrack (2017).

O padrão de ocupação (Figura 6) representa uma família de quatro moradores e ocorre de acordo com o estabelecido por Sudbrack (2017).

Figura 6: Padrão de ocupação da casa



Fonte: Sudbrack (2017, p. 109).

O padrão de iluminação da residência (Figura 7) está vinculado ao padrão de ocupação (SUDBRACK, 2017).

Figura 7: Padrão de uso da iluminação artificial da casa



Fonte: Sudbrack (2017, p. 109).

Com base nas atividades exercidas em cada ambiente da casa, foram estabelecidas as taxas metabólicas para cada atividade. Tem-se, portanto, o valor de 81W/pessoa nos dormitórios e 171W/pessoa na sala e cozinha. A fração radiante considerada referente à carga térmica das pessoas é de 0,3.

Nos dormitórios, sala de estar e cozinha, considerou-se uma densidade de potência de iluminação artificial de $5,0\text{W}/\text{m}^2$. A definição da baixa densidade de potência de iluminação artificial deve-se ao uso de lâmpadas LED, de acordo com o projeto da casa, em todos os ambientes.

Para a previsão de consumo energético da casa, foram considerados equipamentos eficientes, bem como o adequado uso destes. Para o aquecimento da água foi considerado sistema de aquecimento solar.

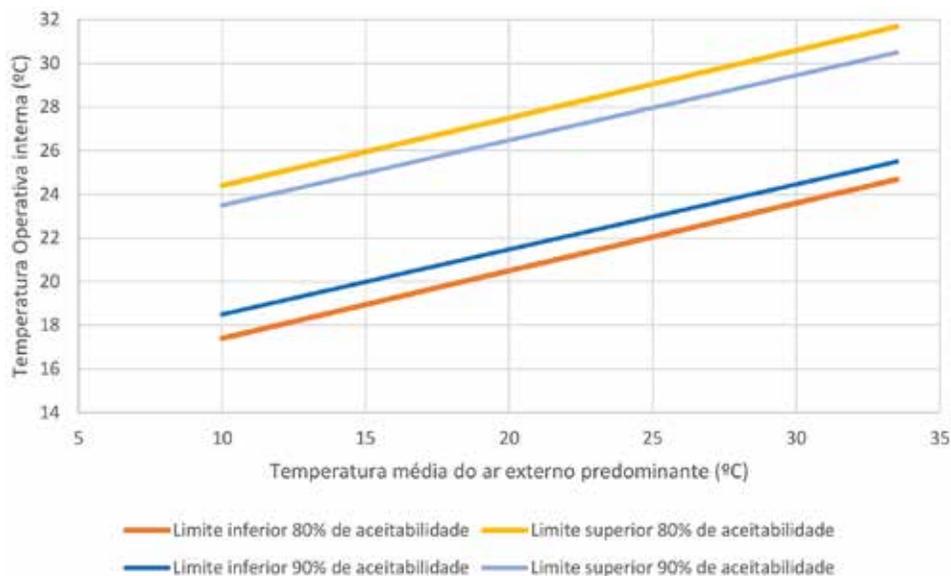
Os valores de consumo mensal são considerados fixos, pois independem do desempenho térmico da envoltória. Como parâmetro fixo para as simulações, utilizou-se o consumo energético por metro quadrado, calculado por Sudbrack (2017), equivalente a $45,35\text{ kwh}/\text{m}^2/\text{ano}$.

Apesar das altas taxas de renovação do ar permitidas pelo dimensionamento das janelas da residência, foram consideradas, para as simulações, 15 trocas de ar por hora, o que representa um valor suficiente para a ventilação estrutural ou seletiva, que considera refrescar ou aquecer o interior utilizando a diferença de temperatura externa e interna e varia de 10 a 20 renovações por hora (SILVA, 2014).

4.5 Avaliação das condições de conforto e aceitabilidade dos usuários de acordo com a norma ASHRAE 55-2013

A determinação das condições de conforto térmico e aceitabilidade dos usuários da ASHRAE Standard 55-2013 em espaços ventilados naturalmente é realizada a partir do gráfico da Figura 8, a seguir, que fixa os valores aceitáveis de temperatura operativa interna do ambiente para um limite de 80% de satisfação dos usuários em função da temperatura média do ar externo predominante. O limite de 90% é de caráter informativo, e não será considerado para este capítulo. O gráfico já considera os efeitos de desconforto térmico localizado, roupa, atividade metabólica, umidade e velocidade do ar; portanto, essas variáveis não precisam ser analisadas isoladamente (ASHRAE, 2013).

Figura 8: Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados



Fonte: ASHRAE (2013, p. 12) (adaptada com tradução para o português).

As equações a seguir indicam os limites de temperatura operativa apresentados no gráfico (ASHRAE, 2013):

Limite superior de 80% de aceitabilidade (°C) = $0,31 \times tpma(out) + 21,3$;

Limite inferior de 80 % de aceitabilidade (°C) = $0,31 \times tpma(out) + 14,3$; em que $tpma(out)$ é a temperatura média do ar externo predominante.

Neste capítulo, considerou-se o limite de 80% para a avaliação do conforto dos usuários na edificação. A temperatura média do ar externo predominante é calculada a partir da média aritmética simples de todas as temperaturas médias do ar externo, considerando não menos que os sete dias e não mais que os 20 dias anteriores em relação ao dia de referência. A temperatura média do ar externo deve ser obtida por meio de uma média aritmética simples de todas as medições de temperatura externa de bulbo seco para as 24 horas do dia (ASHRAE, 2013).

Neste capítulo, os valores de temperatura média do ar externo predominante foram calculados a partir da média aritmética das temperaturas externas dos últimos sete dias em relação ao dia de referência. As temperaturas de bulbo seco horárias foram extraídas do arquivo climático EPW do INMET (2016) para a cidade de Brasília.

A norma prevê, ainda, um aumento do limite superior de aceitabilidade do gráfico da Figura 9, caso a temperatura operativa seja maior que 25°C e a velocidade do ar seja maior que 0,3 m/s. Os valores do aumento devem estar de acordo com a Tabela 9 (ASHRAE, 2013).

Tabela 9: Aumento nos limites de temperatura operativa aceitável em ambientes naturalmente condicionados

Velocidade do ar até 0,6 m/s	Velocidade do ar até 0,9 m/s	Velocidade do ar até 1,2 m/s
1,2°C	1,8°C	2,2°C

Fonte: ASHRAE (2013, p. 13) (adaptada com tradução para o português).

Para este capítulo, foi desconsiderado o aumento dos limites superiores de conforto do gráfico da Tabela 9 para velocidades do ar interno maiores que 0,3m/s e para temperatura operativa acima de 25°C.

Para avaliar a edificação de acordo com a ASHRAE Standard 55-2013, foi necessário realizar uma simulação computacional da edificação no programa DesignBuilder, que apresentou as temperaturas operativas horárias internas dos ambientes de permanência prolongada durante o período de um ano. Os ambientes de permanência prolongada considerados foram os quartos e a sala/cozinha. Esses valores alimentaram o gráfico, que indica os limites da faixa de temperatura operativa aceitável e, a partir disso, foi possível calcular o percentual de horas totais do ano nas quais cada ambiente encontrava-se em conforto e desconforto térmico.

De acordo com a seção 7.4.2.2.1 da ASHRAE 55-2013, as horas que excedem os limites superior e inferior devem ser atribuídas a valores “0” (zero), para aquelas que se encontram dentro dos limites, ou “1” (um), para as que estão fora dos limites; a soma dessas horas resultará no número total de horas de desconforto do ano. Além disso,

é possível multiplicar esses valores (0 e 1) pela diferença entre a média da temperatura externa usada como parâmetro de avaliação e a temperatura operativa interna, e verificar a quantidade de graus hora excedentes para frio ou para calor no ano.

4.6 Dimensionamento do sistema de condicionamento artificial de ar

Após a análise do percentual de horas de conforto para cada combinação de materiais de parede e coberturas, foram identificadas as horas que excedem os limites superiores e inferiores, que podem também ser chamadas de horas de desconforto para cada modelo. Para as combinações em que todos os ambientes obtiverem no mínimo 80% das horas dentro da zona de conforto, caso ocorra, será desconsiderado o uso de equipamentos para condicionamento artificial do ar.

No caso de desconforto por frio, até o limite mínimo de 18°C para a temperatura operativa no interior da edificação, considerou-se que o usuário se aclimata às condições do ambiente, ajustando a vestimenta para evitar o desconforto por frio (DE VECCHI *et al.*, 2014). Caso os resultados apresentem temperaturas operativas abaixo de 18°C, deve ser considerado o uso de aquecimento artificial do ar.¹

Com os dados de horas de desconforto por calor, e o cálculo do consumo de eletricidade necessários para o condicionamento do ar, será possível avaliar quais as combinações de materiais têm os maiores e os menores consumos de energia elétrica. Através do simulador de capacidade para aparelhos, foram definidas as potências de cada aparelho a ser utilizado por ambiente.

Com os resultados de horas excedentes do limite superior de conforto ao ano para cada combinação de material, calcula-se a potência anual destinada aos aparelhos condicionadores de ar para cada ambiente.

¹ Outras propostas de sistemas de condicionamento do ar poderiam ser utilizadas, como ventilação mecânica, resfriamento evaporativo, dentre outros. No entanto, para este capítulo optou-se por considerar o ar-condicionado tipo *split*, pelo fato de este sistema representar o pior cenário do ponto de vista do consumo energético.

Tabela 10: Estimativa da potência dos aparelhos de ar-condicionado por ambiente

Ambiente	Área (m ²)	Iluminação	Orientação solar	Número de pessoas	Equipamento	Cap. do aparelho (BTU)	Pot. do aparelho (W)
Sala	47,75	Led	Leste	4	Televisor e refrigerador	2x18.000	2x1600
Quarto 1	15,75	Led	Oeste	2	Televisor	18.000	1600
Quarto 2	9,85	Led	Oeste	1	Televisor	9.000	815
Quarto 3	9,85	Led	Norte/Oeste	1	Televisor e computador	9.000	815

Fonte: Sudbrack (2017, p. 117).

4.7 Simulações da estimativa de geração de energia

Para a produção de energia local, a produção de energia é voltada para o aquecimento solar da água e para eletricidade de fonte fotovoltaica. A área considerada disponível para instalação de módulos fotovoltaicos é de 44 m². A orientação dos módulos fotovoltaicos é norte, e eles são inclinadas 30° em relação à superfície plana do telhado. O *software* utilizado para estimar a geração local de eletricidade do sistema fotovoltaico é o PVSyst v.6.6.1 (PVSyst, 2016). A base de dados para os valores sintéticos de irradiação global horizontal e difusa, e temperatura média mensal do ar é do MeteoNorm 7.1 (1991-2010). Os fatores de perda adotados nas simulações do sistema fotovoltaico no programa PVSyst constam na Tabela 11.

Tabela 11: Fatores de perda adotados na simulação

Detalhes das perdas	Valores
Fator de perda térmica	20 W/m ² . K
Perda ôhmica na fiação	1,5%
Perda na qualidade do módulo	2,5%
Perda <i>mismatch</i> do módulo	0,8%
Efeito do ângulo de incidência	0,05
Fator de degradação	0,4%
ISC dispersion RMS	0,4%
<i>Voc dispersion</i> RMS	0,4%
Fator de perda por sujeira	3,0%

Fonte: Adaptado de PVSyst (2016).

5. Apresentação e análise dos resultados

5.1 Simulações térmicas e análise de conforto térmico

Após a modelagem da casa no *software* DesignBuilder, de acordo com os parâmetros descritos anteriormente, foram alternados os materiais de paredes internas e externas e de cobertura para gerar os resultados das simulações, os quais foram gerados para cada uma das quatro zonas térmicas (sala/cozinha, quarto 1, quarto 2, quarto 3), que representam os ambientes de longa permanência. Para a análise, foram utilizados os dados de temperatura operativa e temperatura do ar externa (bulbo seco). De acordo com a metodologia da ASHRAE-55-2013 para avaliação do conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados, as temperaturas operativas foram analisadas considerando-se a média da temperatura externa dos sete dias anteriores, para as 8.760 horas do ano.

Determinadas as temperaturas máximas e mínimas de aceitação para 80% dos usuários, avaliou-se o percentual de horas que se encontravam dentro e fora da zona de conforto. Para as horas que se encontram fora da zona de conforto (horas excedentes), foi calculado em quantos graus estas temperaturas excedem o limite máximo (calor) e mínimo (frio).

Para permitir uma comparação com os mesmos parâmetros (orientação, área de cobertura, área de aberturas), os resultados foram agrupados por ambiente. Os dados estão classificados de acordo com os graus hora excedidos por calor em ordem crescente.

Comparando os ambientes “quartos” entre si, nota-se que a orientação solar se reflete no número de graus hora excedidos por calor, já que o quarto 3 é o que tem abertura envidraçada protegida voltada para o Norte e paredes externa voltada para o Oeste. No entanto, apresenta resultados similares ao quarto 2, que tem abertura envidraçada protegida voltada para Oeste. Já o quarto 1 é o ambiente que apresenta menores valores de graus hora excedidos por calor: a abertura envidraçada protegida está voltada para Oeste, e a parede externa exposta, para o Sul.

Percebe-se que o ambiente sala é o que apresenta os maiores valores de graus hora que excedem os limites superiores de temperatura, ou seja, que representam desconforto por calor aos usuários. Isso ocorre devido ao fato de que este é o ambiente com maior área de piso, e conseqüentemente com maior área de cobertura. Portanto, recebe radiação direta através da cobertura durante várias horas do dia, e uma vez que essa radiação é absorvida pelo material de cobertura, é transformada em carga térmica no interior do ambiente. Além disso, o fato de que boa parte das aberturas envidraçadas desse ambiente estão voltadas para Leste significa que o ambiente começa a receber carga térmica desde as primeiras horas do dia, e apesar de não receber insolação direta no período da tarde nas fachadas, recebe sol em toda a área de cobertura, como mencionado anteriormente. A sala é também o ambiente que mais possui temperatura radiante, tanto dos usuários quanto dos equipamentos. Uma vez que a temperatura operativa interna leva a fração radiante dos equipamentos e dos usuários em conta, este é certamente um fator que influencia na alta quantidade de graus horas excedentes por calor no ambiente.

O quarto 1, cujos resultados encontram-se na Figura 10, não recebe insolação direta na fachada voltada para o Sul durante os meses de inverno, com temperaturas mais baixas. No entanto, tem maior área de cobertura (se comparada à dos outros quartos), e, portanto, recebe maior carga térmica pela cobertura que os quartos 2 e 3. O quarto 1 também tem sua abertura envidraçada voltada para Oeste, recebendo a carga térmica dos horários mais quentes durante toda a tarde. Esses fatores fazem com que o balanço térmico no interior do ambiente seja equilibrado, apresentando os menores valores de graus hora excedentes quando comparados aos outros ambientes. Da avaliação dos grupos formados pelos resultados mais próximos, tem-se uma combinação que ultrapassa os 1.000 graus hora de desconforto por calor, compostos por cobertura em Isotelha PUR e paredes Drywall. Essa é também a combinação que apresenta valores de grau/hora mais elevados em relação aos limites para o frio neste ambiente.

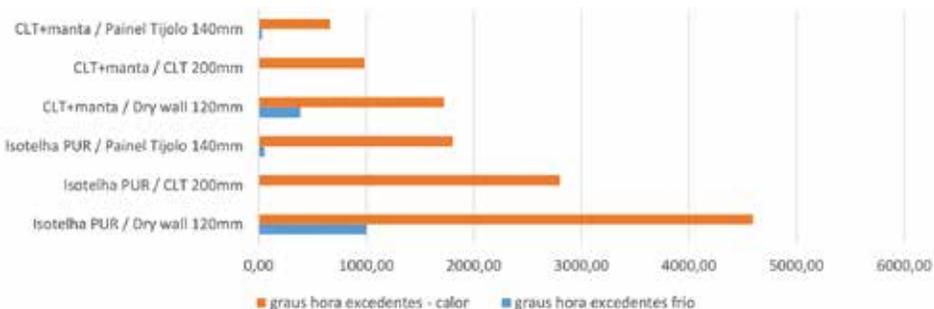
O ambiente quarto 2 é a única zona térmica analisada que possui apenas uma parede externa, as outras três são chamadas paredes internas, por dividirem dois

ambientes internos e por não terem contato com o ar no exterior da casa. A área de cobertura do ambiente é igual à do quarto 3, e a abertura envidraçada neste ambiente fica voltada para Oeste, como no quarto 1. Novamente, o gráfico da Figura 11 mostra que, no caso do quarto 2, nota-se uma combinação que excede os 1.000 graus hora por calor, representados pelas combinações de telhas Isotelha PUR e paredes Drywall. Essa combinação também apresenta maior quantidade de graus hora excedentes por frio.

Na zona térmica do quarto 3 (Figura 12), notam-se picos de percentuais de graus hora excedentes pelo frio, apesar de este ser o ambiente com paredes expostas voltadas para a orientação Norte e Oeste. Os maiores valores de graus hora excedentes resultam do uso de materiais isolantes para as paredes, como o Drywall (que tem isolamento térmico em lâ de rocha). O fato de este ser o único ambiente com abertura envidraçada voltada para a orientação norte mostra que esta zona térmica demora mais a ser aquecida, pois, apesar de receber insolação direta durante todo o dia, nos meses de inverno as temperaturas demoram mais a se elevar, atingindo seus picos apenas no período da tarde.

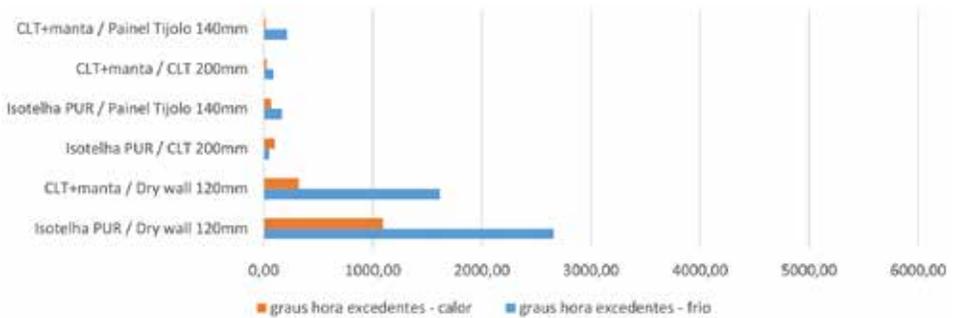
Portanto, para materiais de baixa inércia térmica, as baixas temperaturas da madrugada resfriam o ambiente de tal modo que ele só vai começar a se reaquecer no período da tarde. Este resultado demonstra também que as aberturas envidraçadas estão bem protegidas do sol; caso contrário, os resultados deste ambiente demonstrariam nos altos valores de graus hora excedentes por calor quando comparados aos do ambiente quarto 2, por exemplo.

Figura 9: Graus hora excedentes no ambiente “Sala”.



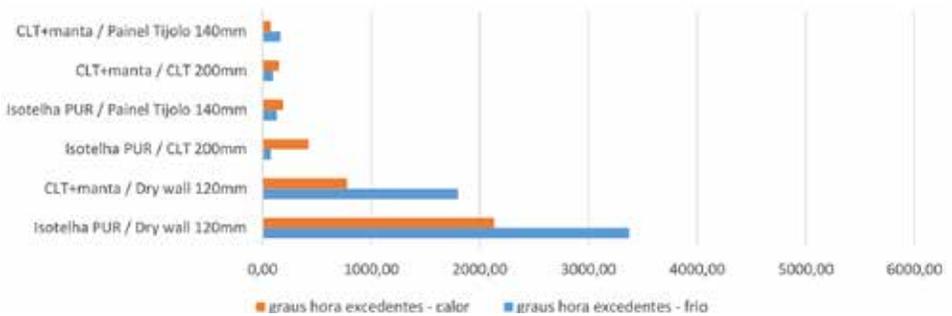
Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 124)

Figura 10: Graus hora excedentes no ambiente “Quarto 1”



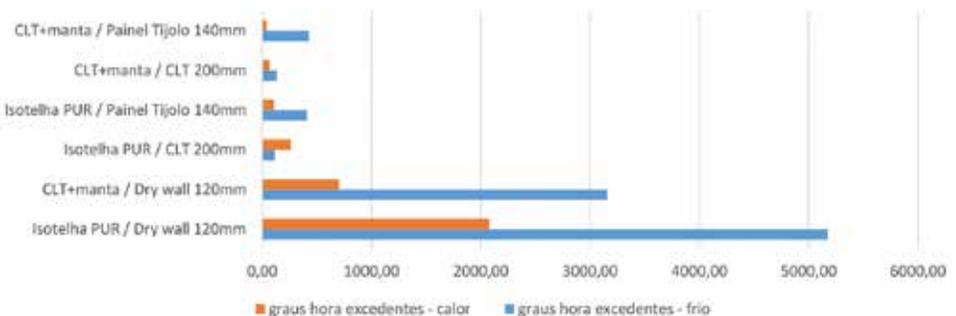
Fonte: Adaptado de Sudbrack (2017, p. 125).

Figura 11: Graus hora excedentes no ambiente “Quarto 2”



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 126).

Figura 12: Graus hora excedentes no ambiente “Quarto 3”



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 127).

Analisando-se os melhores resultados para os quatro ambientes, a partir dos menores valores de graus hora excedentes para os limites superiores da zona de conforto, percebe-se que a combinação de cobertura em “CLT+manta” e paredes em “Painel de tijolos 140 mm” confere os melhores resultados para todos os ambientes. Já quando se analisam os piores resultados de todos os ambientes, ou seja, aqueles com o maior número de graus hora excedentes por calor, a combinação formada por materiais isolantes tanto na cobertura quanto nas paredes, cobertura Isotelha PUR e parede Drywall, foi a que causou maior desconforto por calor.

Para os graus hora de desconforto para o frio, nota-se que o material de parede Drywall apresenta em todos os ambientes os piores graus de desconforto. Isso se dá pela baixa inércia térmica do material, ao ser exposto a temperaturas mais baixas durante a noite faz com que o calor interno se dissipe. A combinação de cobertura Isotelha PUR e parede Drywall é a que apresenta os piores resultados para o frio.

5.2 Uso final de eletricidade da residência

Para a previsão de consumo energético da casa foram considerados equipamentos eficientes e hábitos adequados de uso desses equipamentos. A eficiência e o uso consciente da energia elétrica pelos seus usuários são partes importantes do balanço energético nulo.

5.2.1 Consumo energético fixo da residência

O conceito de *balanço energético* nulo adotado neste capítulo baseia-se em cálculos anuais de consumo e produção de energia elétrica. Considera-se consumo fixo aquele estimado para os equipamentos eletrodomésticos e eletrônicos e o sistema de iluminação artificial da casa.

Portanto, para o cálculo da previsão de consumo mensal de equipamentos por 12 meses da casa foram considerados os parâmetros de uso e potência de equipamentos

descritos por Sudbrack (2017). O consumo mensal por equipamentos considerado fixo da residência foi 333,9 kWh, e o consumo anual por equipamentos, 4006,8 kWh.

Para o cálculo de consumo do sistema de iluminação artificial, foram considerados o padrão de uso da iluminação artificial e as áreas de cada ambiente (SUDBRACK, 2017). O consumo mensal relativo ao sistema de iluminação artificial é, portanto, de 74,27 kWh, ou seja 891,24 kWh anuais.

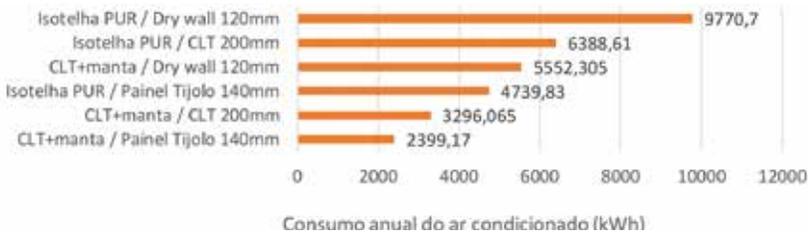
As somas dos valores acima totalizam 408,17 kWh mensais. O consumo anual, portanto, é de 4898,04 kWh, e, considerando a área da residência de 108 m², tem-se 45,35 kWh/m²/ano. Considera-se, ainda, o consumo mensal por pessoa de 102 kWh.

5.2.2 Consumo energético do sistema de climatização artificial

Como visto no item das simulações térmicas e análise de conforto térmico dos usuários, de acordo com os parâmetros da norma ASHRAE 55-2013 para o conforto adaptativo para ambientes naturalmente ventilados controlados pelo usuário, nenhuma das combinações de parede e cobertura se encaixou na zona de conforto aceitável para 80% dos usuários para todas as horas do ano. Para garantir o conforto térmico dos usuários, foi necessário, portanto, estimar o consumo de energia elétrica resultante do sistema de condicionamento artificial de ar para resfriamento das temperaturas internas quando estas ultrapassassem o limite superior de aceitabilidade proposto pela norma.

Para esta estimativa, foi considerada a potência de cada aparelho, determinada anteriormente de acordo com as características e área do ambiente, e levando-se em conta a quantidade de horas do ano em que cada ambiente apresentou temperaturas operativas acima dos limites superiores de conforto, ou seja, desconforto por calor. Os resultados são apresentados para cada combinação, com as cargas separadas por ambiente (SUDBRACK, 2017), e em seguida, os valores são somados, gerando um valor de consumo anual para a casa toda. A Figura 13 apresenta um resumo do consumo energético (kWh) por ar-condicionado ao longo do ano para cada combinação de materiais, em ordem crescente em relação ao consumo.

Figura 13: Estimativa simplificada do consumo de energia elétrica do ar-condicionado para cada combinação de cobertura e parede analisadas



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 132).

5.2.3 Consumo energético total

Somando-se os valores de consumo de energia elétrica por equipamentos e iluminação (valores fixos) e os valores de consumo de energia elétrica dispensados na climatização artificial da casa (variável de acordo com o desempenho de conforto térmico para cada combinação de materiais), tem-se um panorama mais completo dos dados de consumo da casa. Pode-se então comparar caso a caso e identificar os percentuais de consumo energético atribuídos a cada uso.

A Figura 14 traz esse comparativo, mostrando em amarelo o consumo energético gerado pelo uso de equipamentos eletrodomésticos e eletrônicos, e, em azul, o consumo energético gerado pelo uso do sistema de iluminação artificial. Esses dois valores de consumo são os mesmos para todas as combinações de materiais. Em laranja, apresenta-se a variação no consumo de energia elétrica gerado pelo condicionamento artificial da casa, que varia para cada combinação em função da diferença de horas de desconforto por calor que cada uma apresentou nas simulações térmicas dos ambientes.

A combinação de materiais de parede e cobertura que se mostrou mais eficiente foi a de cobertura em placa de CLT (*Cross Laminated Timber*) com 200 mm de espessura e paredes em Pannel de Tijolos Cerâmicos de 140 mm de espessura. Para essa combinação, a casa apresentou um consumo anual de 7297 kWh, ou seja, 67,56 kWh/m² ao ano.

A combinação que se mostrou menos eficiente foi a de cobertura em Isotelha PUR de 100 mm de espessura e paredes em Drywall de 120 mm de espessura. Para essa combinação, a mesma casa apresentou um consumo anual de 14668,74 kWh, equivalentes a 135,82 kWh/m² ao ano.

Figura 14: Consumo energético total para cada combinação simulada



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 134).

Tabela 12: Percentuais de consumo energético

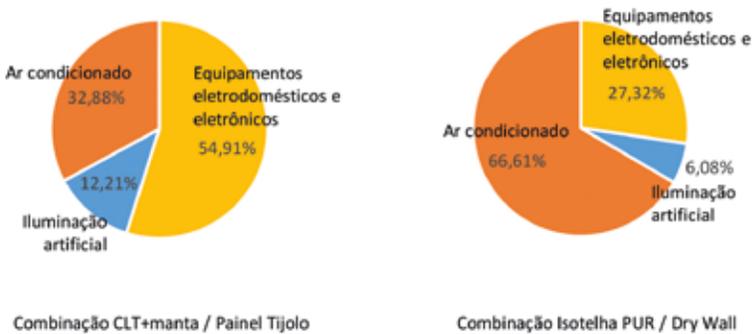
Combinação material de cobertura/material de parede	Percentual equipamentos	Percentual iluminação	Percentual ar-condicionado
CLT+manta / Paineis Tijolo	54,91%	12,21%	32,88%
CLT+manta / CLT	48,90%	10,88%	40,22%
Isotelha PUR / Paineis Tijolo	41,57%	9,25%	49,18%
CLT+manta / Dry Wall	38,34%	8,53%	53,13%
Isotelha PUR / CLT	35,50%	7,90%	56,60%
Isotelha PUR / Dry Wall	27,32%	6,08%	66,61%

Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 135).

A diferença entre o menor e o maior consumo total vai de 7.297 kWh anuais até 14.668,74 kWh anuais. Quando analisados os consumos caso a caso, o percentual de consumo energético relativo ao condicionamento artificial do ar varia entre 32,88% e 66,61%, conforme a Tabela 12. Ou seja, o consumo energético total chega a ser maior em mais que o dobro em função da especificação dos materiais opacos para a envoltória.

Comparando os percentuais de consumo relativos ao ar-condicionado entre o valor mais baixo e o valor mais alto, a Figura 15 mostra o quanto a especificação de materiais de construção pode influenciar na variação do consumo de energia elétrica da casa pré-fabricada analisada.

Figura 15: Comparação entre percentuais de consumo de energia elétrica nas combinações CLT+manta / Painel Tijolo e Isotelha PUR / Drywall

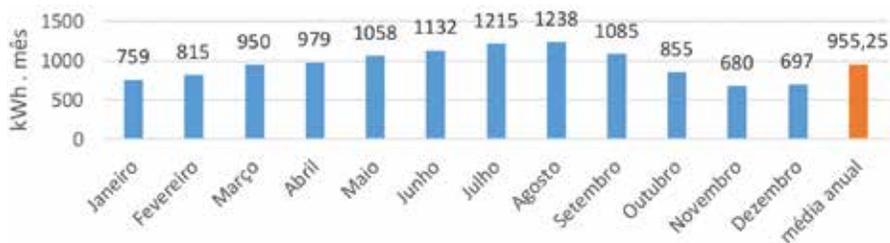


Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 136).

5.3 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

Os resultados obtidos através da simulação com o *software* PVsyst versão 6.2.1 mostram a potência produzida pelo sistema de módulos fotovoltaicos ao dia em cada mês, e os totais mensais. Os totais mensais de produção do sistema são representados na Figura 16. É possível verificar no gráfico que os valores de radiação solar são mais altos nos meses de junho a setembro, e isso se reflete na maior produção de energia nesses meses. O total anual de energia produzida é de 11,463kWh.

Figura 16: Dados de saída do sistema de produção mensal



Fonte: Adaptado de PVsyst (2016).

6. Resultados e discussão

A compreensão do comportamento e influência de cada uma das decisões de projeto é de extrema importância para o desempenho térmico e conforto do usuário nos ambientes internos de uma edificação. Sendo algumas variáveis de projeto fixas (orientação, porosidade, percentual de aberturas, proteção de aberturas, fator solar dos vidros), foi possível identificar como e quanto cada uma das variáveis relacionadas aos materiais de paredes e coberturas influenciam nos índices de conforto adaptativo e no consumo energético da casa pré-fabricada analisada.

A avaliação de conforto térmico baseou-se na norma ASHRAE 55-2013 por ser uma norma que se aplica a ambientes naturalmente ventilados e que trata do conceito de conforto adaptativo. Para o projeto avaliado, nenhuma das combinações de materiais satisfaz o limite normativo de 80% dos usuários satisfeitos. No entanto, é importante lembrar que, por se tratar de casas pré-fabricadas que podem ser construídas em vários terrenos e várias orientações solares diferentes, a casa considerada para as simulações térmicas foi posicionada de modo a ter as fachadas com maior percentual de aberturas envidraçadas para Norte e Oeste, podendo ser considerada como a pior situação de orientação. O conceito de grau hora excedente, tanto para resfriamento quanto para aquecimento, é um parâmetro interessante que permite comparar as várias combinações. No entanto, esta avaliação só é válida quando se comparam os mesmos ambientes, de modo que tenham variáveis fixas como a

orientação solar, área de piso e de cobertura, percentual de aberturas na fachada, porosidade quanto à ventilação, entre outros fatores.

Nota-se um número de horas expressivo de desconforto por frio. Estas horas ocorrem principalmente nas madrugadas, e nos ambientes com vedações opacas voltadas para o Sul. Estes resultados comprovam a importância da estratégia de inércia térmica para o clima de Brasília, que principalmente no período da seca (inverno), contribui para que as temperaturas internas tenham amplitude menor que as externas. Percebe-se que as aberturas voltadas para Norte (quarto 3) estão bem sombreadas, mas isso faz com que as horas de frio sejam prolongadas no período do inverno, o que requer o uso de materiais isolantes nas paredes. Já as aberturas voltadas para oeste (quartos 1 e 2) não estão tão bem sombreadas, mas fazem com que o conforto térmico no inverno seja melhor.

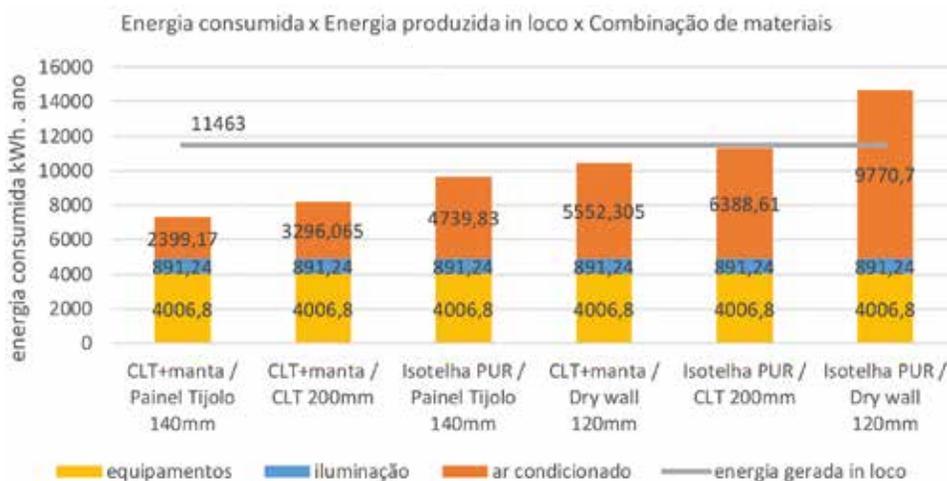
Da análise do consumo energético por uso final da residência, percebe-se que o ar-condicionado representa 40% a mais da energia consumida com os demais equipamentos eletrodomésticos e eletrônicos da casa.

De modo geral, percebe-se que para cada material utilizado as estratégias em relação às aberturas podem ser diferentes, de maneira a gerar balanços térmicos diferentes. Para materiais isolantes ou com baixa inércia térmica, deve-se posicionar as aberturas envidraçadas para Leste, de modo a esquentar o quanto antes o ambiente e elevar as temperaturas internas no inverno. Assim, durante a tarde, as paredes opacas isolantes isolam o calor externo. Para materiais com maior inércia térmica, as aberturas devem ser protegidas de modo a não deixar o sol entrar nas horas mais quentes, ou o calor não sairá.

Tem-se, por fim, o resultado de energia elétrica produzida pelos módulos fotovoltaicos ao longo do ano. Ao se analisar uma comparação entre a energia elétrica produzida na casa e a energia elétrica consumida em cada uma das combinações de materiais de parede e cobertura, pode-se verificar qual dessas combinações poderia resultar em uma casa de balanço energético nulo, e em quais delas não seria possível alcançar esse resultado.

A Figura 17 apresenta esse comparativo, mostrando, em amarelo, o consumo energético gerado pelo uso de equipamentos eletrodomésticos e equipamentos eletrônicos, e, em azul, o consumo energético gerado pelo uso do sistema de iluminação artificial. Esses dois valores de consumos são os mesmos para todas as combinações de materiais. Em laranja, mostra-se a variação no consumo de energia elétrica gerado pelo condicionamento artificial da casa, que varia para cada combinação em função da diferença de horas de desconforto por calor que cada uma apresentou nas simulações térmicas dos ambientes. A linha cinza, por sua vez, representa a produção de energia elétrica *in loco* através do sistema de módulos fotovoltaicos. Esse dado também é constante para todas as alternativas de combinações de materiais.

Figura 17: Comparativo dos totais anuais entre energia elétrica consumida em cada combinação de materiais e a energia produzida por módulos fotovoltaicos



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 140).

A Figura 17 mostra que para as combinações que ultrapassam a linha cinza, que é a constante do valor de energia elétrica produzida, não foi possível alcançar o balanço energético nulo. De um total de seis combinações de materiais, apenas uma não pode ser considerada adequada para alcançar resultados de consumo energético inferiores aos da produção de eletricidade pelos dos painéis fotovoltaicos para o clima de Brasília.

7. Considerações finais

Os resultados obtidos na simulação de produção de energia elétrica fotovoltaica mostram que em cinco das seis combinações é possível atender à demanda de eletricidade da residência unifamiliar estudada, com um sistema de módulos fotovoltaicos instalado em parte da cobertura da edificação. Atualmente, as Resoluções Normativas nº 482 e nº 687 (ANEEL, 2012; 2015) não permitem a comercialização da energia elétrica excedente produzida *in loco*, mas, para essas combinações de materiais em que a produção fotovoltaica excede os valores de consumo, seria possível também que a energia gerada fosse utilizada para outras finalidades, como para a recarga de carros elétricos ou para a iluminação pública.

Das seis combinações de materiais abordadas neste capítulo, uma não atingiu o balanço energético nulo. Uma delas apresentou valores de consumo energético muito próximos do valor simulado para geração de energia, podendo, portanto, ser considerada casa de balanço energético nulo. As demais quatro combinações apresentaram um número menor de horas excedentes por calor, resultando em um consumo energético mais baixo. Estas podem ser consideradas casas de balanço energético positivo, pois produzem mais energia do que consomem durante o período de um ano. Duas das seis combinações se destacaram por apresentar consumo ainda mais baixo, podendo ser consideradas as combinações mais adequadas às casas pré-fabricadas de balanço energético positivo para a cidade de Brasília: Cobertura em painel CLT, parede em painel de tijolos cerâmicos e parede em painel CLT, que combinados entre si representam os melhores resultados considerando-se o consumo energético final da casa.

Analisando-se os resultados de consumo de energia elétrica relacionados ao conforto térmico dos usuários para o clima de Brasília, viu-se que as definições de projeto têm impacto direto aos percentuais de horas de conforto nos ambientes, e consequentemente, impactam também no consumo energético final da casa. A combinação de materiais de parede e cobertura que se mostrou mais eficiente foi a de

cobertura em placa de CLT (*Cross Laminated Timber*) com 200 mm de espessura e paredes em Pannel de Tijolos Cerâmicos de 140 mm de espessura. Para esta combinação a casa apresentou um consumo anual de 7297 kWh, ou seja, 67,56 kWh/m² ao ano, e pode ser comparado a valores de consumo em casas ZEB com valores semelhantes no cenário internacional. Já a combinação que se mostrou menos eficiente foi a de cobertura em Isotelha PUR de 100 mm de espessura e paredes em *Drywall* de 120 mm de espessura. Para essa combinação, a mesma casa apresentou um consumo anual de 14668,74 kWh, equivalentes a 135,82 kWh/m² ao ano, valor mais distante das médias de casas ZEB citadas anteriormente.

Por fim, levando-se em consideração o clima de Brasília, os resultados deste capítulo mostram que não foi possível proporcionar, por meio do projeto proposto por Sudbrack (2017), uma solução em que os ambientes internos se encontrassem totalmente dentro da zona de conforto de acordo com os parâmetros de avaliação da ASHRAE 55-2013. Porém, os resultados das simulações de geração de energia são mais do que suficientes para abastecer 83% das combinações de materiais de cobertura e paredes propostos, considerando-se a instalação de painéis em uma área inferior à metade da área de cobertura da casa. Logo, conclui-se que é possível projetar casas pré-fabricadas de balanço energético nulo para o clima de Brasília, e que também é possível, para este clima, projetar casas pré-fabricadas que produzem mais energia elétrica do que consomem.

A pesquisa apresenta também algumas limitações, como, por exemplo, a simulação energética dos modelos para a obtenção de resultados de consumo relativos à climatização dos ambientes. O *software* oferece sistemas complexos de condicionamento de ar em sua aba HVAC, mas o dimensionamento e a calibragem do modelo para garantir que os resultados sejam corretos são complexos e demandam conhecimento específico sobre o assunto. Além disso, as modelagens dos sistemas de condicionamento de ar pedem uma temperatura máxima, para que, a partir do momento em que a temperatura operativa atingir esse limite, seja considerado o acionamento do sistema artificial. No entanto, este estudo avaliou justamente os limites

adaptativos de temperaturas máximas suportadas pelos usuários, e seria contraditório adotar uma mesma temperatura para simular o ano todo. Outra limitação foi o acesso às informações técnicas dos materiais utilizados nas simulações, principalmente no que diz respeito às propriedades térmicas. Muitos dos fabricantes não possuem catálogos técnicos oficiais, e outros trazem em seus catálogos informações incompletas, ou apenas a menção de que o desempenho térmico do material foi aprovado pela NBR 15575 – 2013, mas sem mencionar para que localidade, por exemplo.

Conclui-se, assim, que este estudo tem potencialidades de desenvolvimento em futuras pesquisas em diversas frentes. Uma possibilidade é utilizar os materiais mais apropriados encontrados neste capítulo e aplicar a metodologia utilizada variando outros fatores de projeto, como a porosidade da casa; os percentuais de aberturas envidraçadas e tipos de vidro; as proteções solares; a orientação solar; enfim, analisar o impacto de cada alteração de projeto na análise conforto térmico para edificações ventiladas naturalmente.

Pode-se afirmar também que outra possibilidade de desenvolvimento do tema é avaliar a melhora do conforto térmico partindo de soluções mais simples, como aumentar a velocidade do ar por ventilação mecânica ou introduzir outros tipos de sistemas de condicionamento de ar menos impactantes que o ar-condicionado, o que permitiria verificar, de forma mais gradual, o aumento no consumo de energia através de soluções mais simples, e muitas vezes menos onerosas. Isso poderia ser avaliado mediante a construção de um protótipo, em que seriam feitas medições e comparações aos resultados das simulações. O estudo pode, ainda, ser realizado para diferentes cidades do país, uma vez que uma mesma casa pré-fabricada pode ser construída em localidades diversas, e apontar quais as combinações de materiais seriam mais adequadas para o clima de cada cidade.

Pode-se ainda realizar um levantamento de custos de investimento e de custos ambientais e ciclo de vida dos diferentes materiais. Uma análise mais aprofundada, considerando-se a viabilidade econômica e o custo ambiental, poderia resultar em um cálculo de *payback*, em que se verificaria se a solução proposta é viável.

Por fim, pode ser realizado um estudo no âmbito do planejamento urbano, em que se proponha que o excedente de energia elétrica gerado por áreas residenciais possa suprir a necessidade de áreas comerciais ou industriais, por exemplo.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa n° 482, de 17 de Abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, 19 set. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acesso em: 6 jul. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa n° 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos procedimentos de distribuição – PRODIST. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2 dez. 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 6 jul. 2016.

ALVIM, Leila Guedes. *Avaliação do desempenho e do conforto térmico de uma edificação ventilada naturalmente seguindo as normas brasileiras de desempenho térmico e a ASHRAE 55*. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ASHRAE. ASHRAE - 55 2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineersw, Inc. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações*. Rio de Janeiro, 2005.

CLARK, Joe. *Energy simulation in building design*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE BRASÍLIA (CEB). *Dados primários fornecidos para fins acadêmicos*. Brasília, fevereiro de 2016.

DE DEAR, Richard. J.; BRAGER, Gail. S. Thermal Comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, v. 34, n. 6, p. 549-561, 2002.

DE VECCHI, Renata *et al.* ASHRAE 55 Adaptive model application in hot and humid climates: the Brazilian case. *Architectural Science Review*, v. 58, n.1, p. 93-101, 2014.

DOE. Building Energy Software Tools Directory. United States Department of Energy. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/. Acesso em: 20 maio 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Avaliação da Eficiência energética para os próximos 10 anos (2012-2021)*. Rio de Janeiro, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Demanda de energia 2050*. Rio de Janeiro, 2014.

GOULART, Solange; LAMBERTS, Roberto; FIRMINO, Samanta. *Dados Climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras*. PW ed., São Paulo, dez. 1997.

HENSEN, Jan. L. M.; LAMBERTS, Roberto. *Building performance simulation for design and operation*. Oxon: Spon Press, 2011.

IEA. Solution sets and net zero energy buildings: a review of 30 net ZEBs case studies worldwide. Excerpt from: IEA Task 40 / Annex 52 towards net zero energy solar buildings. Paris, France: International Energy Agency, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Arquivos climáticos 2016*. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>. Acesso em: 20 jan. 2017.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. *Eficiência energética na arquitetura*. Rio de Janeiro: Eletrobras/PROCEL, 2014.

LAMBERTS, Roberto *et al.* *Towards a Brazilian standard on thermal comfort*. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC, 2013.

OLESEN, Bjarne W. The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings. *Energy and Buildings*, v. 39, n. 7, p. 740-749, 2007.

PVSYST. Software for the Study and Simulation of Photovoltaic Systems, 2016.

ROMERO, Marcelo de Andrade; REIS, Lineu Belico dos. *Eficiência energética em edifícios*. [S.l: s.n.], 2012.

SORGATO, Márcio José. *A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais*. 2015. 258 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2015.

SILVA, Caio Frederico e. *Tecnologias ambientais: uso da simulação computacional na reabilitação sustentável*. Reabilita - curso de pós-graduação *lato sensu* em reabilitação ambiental sustentável arquitetônica e urbanística, 2014.

SUDBRACK, Larissa Olivier. *Casa zero: diretrizes de projeto para casas pré-fabricadas de balanço energético nulo em Brasília*. 2017. 214 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

TORCELLINI, Paul *et al.* *Zero energy buildings: a critical look at the definition*. California: ACEEE Summer Study, 2006.

VOSS, Karsten; MUSALL, Eike. *Net Zero Energy Buildings: International projects of carbon neutrality in buildings*. Munique: Green Books, 2013.



CAPÍTULO 7

Considerações sobre a pauta para governança da eficiência energética no Brasil

Tássia Latorraca, Raquel Naves Blumenschein e Maria Vitória Duarte Ferrarri

Este capítulo apresenta a questão da eficiência energética (EE) sob a ótica da governança do uso da energia elétrica para alcançar o máximo potencial do desempenho energético dos ambientes construídos. Introduce uma visão sistêmica sobre o uso da energia elétrica no país. Para tanto, sinaliza gargalos e pontos de alavancagem para o fortalecimento da política de eficiência energética que impacta diretamente o panorama do ambiente construído.

Apresentam-se aqui os resultados de uma pesquisa desenvolvida no âmbito do projeto de pesquisa Resiliência Urbana desenvolvido nos últimos anos e coordenado pelo Centro de Excelência de Comunidades Integradas Sustentáveis do BRE TRUST/UnB. Neste estudo, foi desenvolvida uma ferramenta de avaliação que mapeia a integração de vetores, como os agentes, as ações e os instrumentos relacionados às políticas nacionais para promoção da eficiência energética, tendo como base diretrizes e critérios para uma boa governança.

As considerações traçadas neste capítulo estão em sinergia com o eixo condutor deste livro, fundamentadas no argumento de que o uso de ferramentas simplificadas e das simulações computacionais dialogam com diversas linhas de pesquisas e perfis profissionais, provocando reflexões e oferecendo subsídios para embasar pautas científicas e governamentais, diretrizes e estratégias nas mais diversas áreas do conhecimento, para que se consiga um ambiente construído com mais qualidade e sustentabilidade.

1. Conceituando governança

O atual momento brasileiro, caracterizado por crise econômica resultante de variáveis econômicas, políticas e ambientais (SACCARO JÚNIOR, 2016), justifica a crise energética pela qual o país passa. A partir disso, Lamberts, Dutra e Pereira (2014) apontam que é necessário aumentar a eficiência no uso da energia, uma vez que é muito caro produzir energia para desperdiçá-la.

Segundo a IEA (2010), para aumentar a EE, deve-se enfrentar o desafio de combinar fatores tecnológicos, os mecanismos de mercado e as políticas públicas, as quais têm influência nas ações dos consumidores finais de energia.

Governos, partes interessadas em eficiência energética e o setor privado devem trabalhar juntos para promover as melhorias de eficiência energética na dimensão necessária e no momento oportuno para que haja um desenvolvimento econômico sustentável [...] A experiência demonstra que as políticas de eficiência energética têm maior possibilidade de êxito quando se estabelece um sistema efetivo de governança da eficiência energética [...] Afetando desde os marcos jurídicos e as instituições que formulam e implementam políticas até as partes interessadas que participam da implementação no mercado, a governança da EE é um aspecto complexo, mas crítico, do sistema de implantação de eficiência energética. (IEA, 2010, p. 1).

Com vistas ao fortalecimento da governança para a EE no Brasil, neste capítulo é apresentada uma ferramenta de avaliação da governança do setor de energia elétrica, desenvolvida no âmbito do Projeto de pesquisa Resiliência Urbana, coordenado pelo Centro de Excelência de Comunidades Integradas Sustentáveis do BRE TRUST/UnB.

O *Institute on Governance* (Canada, 2002) conceitua a governança como o processo pelo qual sociedades ou organizações tomam decisões importantes, determinam os agentes envolvidos nas resoluções e lidam com os recursos financeiros.

Biermann (2007) assegura que a governança amplia as formas de regulação, que, oposta à hierarquização tradicional do Estado, implica uma forma de autorregulação por parte dos diferentes agentes, traz uma cooperação entre os setores público e privado na resolução de problemas sociais e cria novas formas de política, o que ele denominada de “multinível”. A governança não se limita apenas aos governos e estados, ela está ligada a articulações entre agentes sociais, políticos e instituições estatais ou não estatais.

Quanto à governança da EE, Jollands e Ellis (2009) definem-na como:

[...] o uso da autoridade política, de instituições e de recursos pelos responsáveis pelas tomadas de decisão e [pelos] gestores que implementam ações para o alcance de uma melhor eficiência energética.¹ (JOLLANDS; ELLIS, 2009, p. 93, tradução nossa).

Definir uma boa governança em matéria de EE envolve complexidades, principalmente porque há muita diversidade no contexto da estrutura governamental. A maneira mais simples de se avaliar a eficácia de uma governança de EE é examinar seus dados de saída e/ou seus resultados. A IEA (2010, p. 16) defende que, ao analisar a governança da EE, devem-se considerar as seguintes metas:

- Conferir autoridade suficiente para implementar políticas e programas de EE;
- Construir um consenso político sobre os objetivos e a estratégia da EE;

¹ “[...] use of political authority, institutions and resources by decision-makers and implementers to achieve improved energy efficiency.”

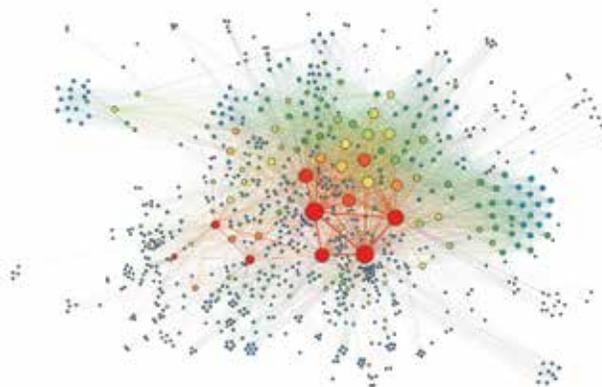
- Criar parcerias eficazes para o desenvolvimento e a implementação de políticas;
- Atribuir e criar responsabilidade financeira;
- Mobilizar os recursos necessários para a implementação da política de EE;
- Estabelecer um meio para supervisionar os resultados.

2. Metodologia utilizada: ferramenta para a análise da governança baseada no Gephi

A ferramenta de análise da governança empregada baseia-se na proposta apresentada por Blumenschein *et al.* (2016), associada às variáveis de governança da EE identificadas pelo método da IEA (2010):

- a) Mapeamento da governança, conforme método de análise de Blumenschein *et al.* (2016), utilizando o *software* Gephi de análise de redes. De acordo com os autores, entender a governança requer entender como a integração de agentes, ações e instrumentos potencializa a identificação de estratégias de fortalecimento da resiliência, que depende da eficiência em diversos setores (BLUMENSCHNEIN *et al.*, 2016, p. 17);

Figura 1: Modelo de visualização em Gephi por algoritmos múltiplos



Fonte: WIKIMEDIA COMMONS (2018).

- b) Identificação das variáveis principais da governança da EE pela IEA (2010), segundo: i) quadros facilitadores; ii) arranjos institucionais; e iii) mecanismos de coordenação.

O Gephi é um *software* livre, colaborativo e com inúmeras aplicações em áreas como a das ciências biológicas e da economia (HD.BR, 2013, [s.p.]). Ele apresenta um resultado visual das relações em forma de grafos (Figura 1), os quais são compostos por objetos e seus relacionamentos. Os objetos são constituídos por pontos chamados *vértices* ou *nós*; os relacionamentos são compostos por linhas conectoras, denominadas *arestas*, representando a conexão entre eles.

Figura 2: Fluxograma do método utilizado



Fonte: Elaboração dos autores (2017).

O resultado visual é uma rede alimentada por um banco de dados gerado por dois componentes básicos: uma lista de objetos que compõem a rede e uma lista das relações entre esses objetos. O uso do Gephi permite a percepção de como ocorre a disposição de grandes quantidades de informação (SILVA; SILVA, 2016, p. 1). Por ser um mapa visual, possibilita o levantamento de observações por meio da forma pela qual os grafos se organizam.

O método considera uma visão sistêmica que integra ações, agentes e instrumentos da governança e cumpre os passos metodológicos identificados na Figura 2. Por meio dele, um pesquisador poderá ser capaz de levantar os dados disponíveis de um determinado tema, seja sobre as normas técnicas vigentes, seja sobre as bases de dados institucionais ou outros estudos publicados, para isso basta utilizar o Gephi, um *software* livre e de fácil acesso.

3. Mapeamento e diagnóstico da governança do setor de energia elétrica para a eficiência energética no Brasil

Apresenta-se a seguir o resultado do levantamento e da análise dos elementos que compõem a governança do setor de energia elétrica para a EE no Brasil, isto é, a interação entre os agentes, as ações e os instrumentos presentes na política de EE do país. Dessa maneira, é exposta uma fotografia de como esses instrumentos se relacionam: 1) a hierarquia entre os agentes (Figura 3); 2) as relações entre os agentes e os instrumentos (Figura 4); 3) as relações entre os instrumentos e as ações (Figura 5); e 4) as relações entre as ações e os agentes (Figura 6). No levantamento foram considerados todos os agentes envolvidos de forma direta ou indireta na questão da EE no país, ou seja, desde os agentes implementadores de políticas públicas (agentes de implementação), passando pelos agentes responsáveis pelos recursos financeiros (requisitos de recurso) e agentes responsáveis por todo o caminho da energia elétrica (agentes de geração, transmissão e distribuição) até os consumidores finais. Todos estão identificados no Quadro 1 na coluna dos agentes.

Quadro 1: Identificação dos agentes

(continua)

Sigla	Nome	Agente	Tipo de Agente
PR	Presidência da República	Agente de Implementação	Poder Executivo Federal
Secr. Fed. Contr. Int. Casa Civil	Secretaria Federal de Controle Interno da Casa Civil da Presidência da República	Agente de Implementação	Secretaria da Presidência da República
MME	Ministério de Minas e Energia	Agente de Implementação	Órgão
MEC	Ministério da Educação	Agente de Implementação	Órgão
MPOG	Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão	Agente de Implementação	Órgão
MI	Ministério da Integração Social	Agente de Implementação	Órgão
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação	Agente de Implementação	Órgão
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior	Agente de Implementação	Órgão
MRE	Ministério das Relações Exteriores	Agente de Implementação	Órgão
MF	Ministério da Fazenda	Requisito de Recurso	Órgão
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social	Requisito de Recurso	Empresa Pública
CAIXA	Caixa Econômica Federal	Requisito de Recurso	Empresa Pública
DDE/MME	Departamento de Desenvolvimento Energético	Agente de Implementação	Departamento do MME
SEE/MME	Secretaria de Energia Elétrica	Agente de Implementação	Secretaria do MME

Quadro 1: Identificação dos agentes

(continua)

Sigla	Nome	Agente	Tipo de Agente
SPE/MME	Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético	Agente de Implementação	Secretaria do MME
SOF/MPOG	Secretaria de Orçamento Federal	Agente de Implementação	Secretaria do MPOG
SLTI/MPOG	Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação	Agente de Implementação	Secretaria do MPOG
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética	Agente de Implementação	Órgão do MME
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	Agente de Implementação	Agência Reguladora e de Fiscalização
CCEE	Câmara de Comercialização da Energia Elétrica	Agente de Implementação	Sociedade civil de direito privado
Eletrobrás	Eletrobrás	Agente de Implementação	Sociedade de economia mista e capital aberto
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico	Agente de Implementação	Órgão
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia	Agente de Implementação	Autarquia
ANP	Agência Nacional do Petróleo	Agente de Implementação	Órgão
CONFEA	Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia	Agente de Implementação	Autarquia
IAB	Instituto dos Arquitetos do Brasil	Agente de Implementação	Associação sem fins lucrativos

Quadro 1: Identificação dos agentes

(conclusão)

Sigla	Nome	Agente	Tipo de Agente
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção	Agente de Implementação	Associação sem fins lucrativos
Abradee	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica	Agente de Implementação	Sociedade civil de direito privado

Fonte: Elaboração dos autores (2017).

3.1 Principais instituições que promovem a eficiência energética no Brasil e suas áreas de atuação

Apresenta-se a seguir a estrutura da governança do setor de energia elétrica para a EE no Brasil.

As cinco maiores instituições que promovem a EE do país foram identificadas e estão listadas a seguir:

1. Ministério de Minas e Energia (MME), representante do Poder Executivo federal;
2. Ministério da Fazenda (MF), que delimita os recursos financeiros para efetuar as políticas demandadas;
3. Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão (MPOG), responsável por grande parte dos principais instrumentos de gestão e planejamento;
4. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável por regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo geral;
5. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), por produzir padrões de gestão e qualidade de referência no país, configurando uma base técnica sólida que auxilia toda a cadeia produtiva.

O Quadro 2 apresenta as instituições que promovem a EE e seus respectivos setores.

Quadro 2: Áreas de atuação das agências implementadoras de eficiência energética

	Transversal	Edificações	Equipamentos/ iluminação	Transporte	Indústria	Serv. de utilidade pública
MME	X	X	X	X	X	X
MF	X	X	X			X
MPOG						
ANEEL	X				X	
INMETRO		X	X	X	X	

Fonte: Elaboração dos autores (2017).

3.2 Relações hierárquicas entre agentes

A Figura 3 mostra a hierarquia organizacional dos agentes que compõem a cadeia produtiva da energia elétrica no Brasil.

A estrutura hierárquica da Figura 3 sugere uma boa governança do setor de energia elétrica para a EE por estar estruturada em bases governamentais, uma vez que a política de EE no Brasil, conforme a Lei n.º 10.295/2001, vem de uma base estatutária e, de acordo com a IEA (2016), essa característica confere status e permanência à organização de EE: o MME.

Outro fator crítico para o sucesso da governança da EE para a IEA (2016) é o fato de haver um quadro coerente de informação em escala setorial e política para a comparação dos recursos necessários para a implementação de políticas de EE. Portanto, na Figura 4, é demonstrada a conexão dos agentes que coordenam

A análise do grafo na Figura 4 permite verificar que há uma falta de conexão direta entre os agentes, os instrumentos ligados ao fornecimento, à comercialização e ao consumo de energia e os agentes e instrumentos governamentais que trabalham com a gestão e o planejamento energético do país. Quatro nós conectam as duas categorias observadas: 1) a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), representante das comercializadoras da energia no país; 2) o Operador Nacional do Sistema (ONS), que efetivamente controla a oferta de energia; 3) a Lei n.º 10.438/2002, que provê recursos para o desenvolvimento energético dos estados e dá outras providências, como a instalação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA); 4) a Secretaria do Ministério de Minas e Energia (SEE/MME), que coordena, orienta e contrata as ações do MME relacionadas às políticas do setor de energia elétrica. As universidades também não estão integradas de maneira sistêmica à rede existente.

Quanto aos agentes fornecedores de energia (agentes de geração, de transmissão e de distribuição), a IEA (2016) afirma que se deve considerar cuidadosamente as vantagens específicas de engajar as empresas de serviços de utilidade pública como implementadores de EE. Como demonstrado na Figura 4, tais agentes estão conectados aos agentes governamentais e de regulação de maneira hierárquica coerente, visto que devem seguir critérios técnicos e de comercialização direcionados pelas políticas advindas do governo. Dessa forma, conforme sugerido pela IEA (2016), há responsabilidade institucional dos atores governamentais e regulatórios com os fornecedores e comercializadores de energia.

3.3 Relações entre instrumentos e ações

A rede dos instrumentos e as ações que compõem a estrutura da governança do setor de energia elétrica para a EE evidenciam uma boa distribuição dos seus componentes (Figura 5), demonstrando a ligação entre os diversos instrumentos e seus desdobramentos em ações. No centro de toda a rede, identifica-se a Lei n.º 10.295/2001, que implanta a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia.

outras leis, outros decretos e demais instrumentos foram criados para detalhar melhor cada diretriz determinada. Cita-se como exemplos o Decreto n.º 4.131/2002, que dispõe de medidas emergenciais de redução do consumo de energia elétrica no âmbito da Administração Pública federal, e o Decreto n.º 4.145/2002, que estrutura o funcionamento do CNPE.

Observou-se, entretanto, uma lacuna na definição de metas para a EE. A IEA (2016) determina que as metas devem assegurar que os objetivos sejam apoiados por recursos e estejam em enquadramentos favoráveis para as suas realizações. Na Figura 5, notou-se que, geralmente, os instrumentos se desdobram em ações. Na maioria das vezes, essas ações incluem os mecanismos de coordenação governamental e as avaliações que, com as metas, fortalecem o alcance dos objetivos. No entanto, instrumentos de gestão e planejamento, como a Agenda 21 brasileira, o PNE 2030 e o PROPEE, baseiam-se somente em metas, não deixando claro como seus objetivos serão implementados.

As ações de avaliação observadas garantem que as abordagens de avaliação correspondem aos objetivos políticos e à concepção de seus programas, conforme previsto pela IEA (2016). Um exemplo seria a ação n.º 17, da IN SLTI/MPOG n.º 01/2010, a qual declara que se deve divulgar dados sobre planos e práticas de sustentabilidade ambiental na Administração Pública federal. Outro exemplo é a ação n.º 38, da Portaria MPOG n.º 23/2015, a qual estipula que os órgãos e as entidades deverão fornecer informações referentes ao consumo de energia elétrica e de água mensalmente por meio do Sistema do Projeto Esplanada Sustentável (SisPES). Ações de avaliação, como as exemplificadas, ocorrem poucas vezes nesse mapeamento, dado o baixo número da existência delas no país. Levanta-se a hipótese de que por elas serem efetuadas por poucas entidades, talvez, não sejam suficientes para gerar resultados que fortifiquem a cultura de EE que se procura implantar, conforme o PNE 2030.

Outro fato que deve ser ressaltado em relação às avaliações levantadas diz respeito à sua eficiência. A IEA (2016) define que essas avaliações devem se certificar

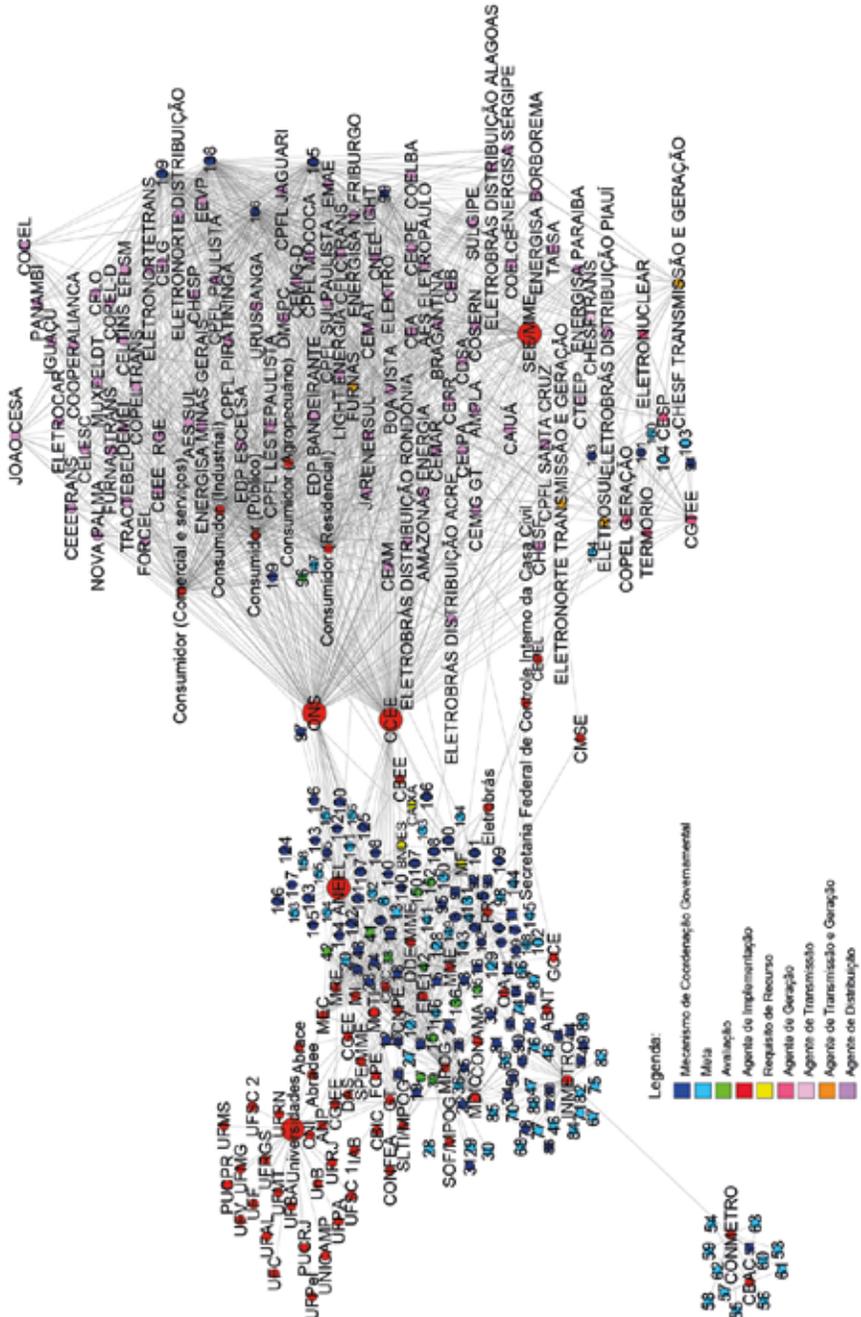
de que estudos estatísticos sejam realizados para incorporar o planejamento da avaliação na fase de qualquer política ou programa de EE.

Um problema que pode ser apontado deve-se ao fato de que os dados divulgados pelo Balanço Energético Nacional (BEN) não seguem os mesmos índices estatísticos utilizados pela IEA (2016). Após uma série de estudos, a IEA (2014) caracterizou indicadores de governança da EE que podem ser apanhados em qualquer país, independentemente de seu contexto; porém, quando aplicados, não podem ser considerados válidos de forma isolada. Portanto, em se tratando de políticas de EE e de como é feita a sua governança, acredita-se que, talvez, as avaliações aqui mapeadas não estejam sendo suficientemente incorporadas ao planejamento das políticas e dos programas identificados, uma vez que se percebe a falta de uniformização dos indicadores. Quanto ao grafo apresentado na Figura 6, verifica-se que os agentes fornecedores, comercializadores de energia e os consumidores estão afastados dos agentes governamentais.

Apesar de haver uma secretaria do MME, a SEE/MME, entre os agentes de fornecimento e consumo de energia, as ações que partem dos agentes responsáveis pelo fornecimento e pelo consumo de energia elétrica ficam a critério de basicamente dois agentes: a CCEE e o ONS. Levanta-se a hipótese de que o diálogo entre as partes se encontra restrito ao uso da energia e de sua tarifação. Visualmente, o fato é evidenciado no desenho da rede por meio do afunilamento das relações dos agentes governamentais e dos agentes fornecedores de energia.

Como são poucas as ações referentes aos agentes de fornecimento e consumo de energia, pode-se inferir que faltam ações mais específicas para o mercado e para o consumo de energia. Esse fator aponta uma lacuna importante a ser explorada em trabalhos futuros, pois, conforme observado por Laponche (1997), uma eficiente operação de mercado é essencial para o sucesso de uma política de EE. Segundo os autores, para ocorrer tal melhora, a atividade deve ser descentralizada e diversificada, abrangendo uma rede de parceiros, como empresas, autoridades locais, serviços governamentais, setor de serviços e famílias.

Figura 6: Panorama das relações entre agentes



Fonte: Elaboração dos autores (2017).

No desenho da rede, também é possível visualizar o distanciamento das universidades com o consumidor final e com os fornecedores e comercializadores de energia, o que pode indicar fragilidade na promoção de ações efetivas de EE e na inovação do país.

3.4 Limitações da pesquisa

A pesquisa aqui mencionada visou levantar o panorama geral das relações entre os diversos atores que agem na governança do uso da energia elétrica no Brasil para o alcance da EE. Estima-se que, ainda que não comprometam os resultados e análises, algumas limitações foram identificadas:

1. O levantamento dos dados que alimentaram o banco de dados foi feito para mapear todos os diplomas legais vigentes que tratam da questão da EE no Brasil até o ano de 2017, bem como os agentes envolvidos direta ou indiretamente na governança com responsabilidade legalmente estabelecida.
2. Os grafos apresentados no mapeamento da governança do setor de energia elétrica para a EE no Brasil expressam conexão entre organizações, não necessariamente relações hierárquicas. Nas conexões identificadas, agentes que, aparentemente, não têm qualquer relação com a EE foram computados nos grafos, se, na legislação levantada, eram mencionados. Foi o caso de agentes do Poder Executivo responsáveis pela execução do plano de governo em EE, mas que não tinham um papel delimitado no conteúdo do programa.
3. Por se tratar da governança do uso da energia elétrica, e não da energia consumida, foram investigados somente os aspectos gerais de geração, transmissão e consumo de energia. A pesquisa focou nas relações entre os diversos atores para compor um panorama das interações entre eles, bem como suas ações e instrumentos de EE no país. Dessa forma, a atuação específica de cada agente ficou fora do escopo da pesquisa.

4. Diretrizes para o fortalecimento da governança do setor de energia elétrica no Brasil para a eficiência energética

Por meio da análise do mapeamento e pelas diretrizes apontadas pela IEA (2016), foi possível estabelecer as principais diretrizes para uma pauta sobre governança, conforme mostra o Quadro 3.

Quadro 3: Diretrizes para o fortalecimento da governança do setor de energia elétrica no Brasil para a eficiência energética

(continua)

AGENTES
1. AGENTES DE IMPLEMENTAÇÃO:
1.1 No Brasil, os agentes de implementação vêm de uma base estatutária. Isso é importante, pois essa base confere <i>status</i> e permanência à organização de eficiência energética.
1.2 Novos projetos organizacionais estão surgindo, como serviços de eficiência energética e corporações de benefícios públicos.
1.3 Existem fortes competências técnicas, por meio de normas técnicas, regulamentos e instruções normativas, que exigem uma base técnica solidificada para a execução dos serviços de avaliação e implementação de eficiência energética. De acordo com a IEA (2016), esse fator é crítico para o sucesso da organização de eficiência energética.
2. REQUISITOS DE RECURSOS:
2.1 Deve-se constatar que há um quadro coerente de informação em escala setorial e política para a comparação dos recursos necessários para a implementação de políticas de eficiência energética.
3. AGENTES DE GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO:
3.1 Deve-se constatar que há vantagens específicas para engajar as empresas de serviços de utilidade pública como implementadores de eficiência energética.
3.2 No Brasil, há responsabilidade institucional dos atores governamentais e regulatórios apropriados.

Quadro 3: Diretrizes para o fortalecimento da governança do setor de energia elétrica no Brasil para a eficiência energética

(continuação)

AGENTES
4. O ENVOLVIMENTO ENTRE OS AGENTES DE IMPLEMENTAÇÃO:
4.1 Deve haver uma meta de engajamento para uma maior diversidade das partes interessadas. Esse quesito não foi cumprido pelo escopo deste livro e, de acordo com a IEA (2016), isso deve acontecer, uma vez que as partes têm diferentes interesses e preocupações.
5. HÁ COOPERAÇÃO ENTRE OS SETORES PÚBLICO E PRIVADO, NO SENTIDO DE:
5.1 O governo deve assumir a liderança, usando uma abordagem sistêmica de toda a cadeia energética. Algumas falhas foram apontadas na análise deste quesito, como a falta de comunicação das universidades com o mercado e com os consumidores finais.
5.2 O governo deve providenciar supervisão para assegurar que os objetivos políticos estejam sendo atingidos. Para isso, foi constatada a existência da Resenha Energética Brasileira e demais relatórios publicados pela EPE. No entanto, deve-se avaliar, em trabalhos futuros, se são suficientes.
5.3 Deve haver incentivo para o setor privado cooperar. Dessa forma, houve o levantamento da seguinte hipótese: os incentivos oferecidos pelo governo são suficientes? Essa questão deve ser analisada em trabalhos futuros.
INSTRUMENTOS
6. OS INSTRUMENTOS LEGAIS:
6.1 Devem incluir objetivos específicos com quantitativos e datas marcadas.
6.2 Devem atribuir responsabilidade pelo planejamento e pela implementação das ações de eficiência energética.
6.3 Devem fornecer financiamento e recursos. Esse quesito foi constatado no Brasil, porém, foi levantada a hipótese de avaliar se são suficientes e eficientes.
6.4 Devem incluir mecanismos de supervisão, tais como o monitoramento dos resultados e a elaboração de relatórios. No Brasil, foi constatado que apenas uma agência é responsável pelo levantamento de dados energéticos (EPE), e o monitoramento se dá por meio do MME. A análise levanta a hipótese de serem poucos agentes responsáveis por essa diretriz e que, talvez, deva haver maior diversidade no monitoramento dos resultados.

Quadro 3: Diretrizes para o fortalecimento da governança do setor de energia elétrica no Brasil para a eficiência energética

(conclusão)

INSTRUMENTOS
7. OS INSTRUMENTOS DE GESTÃO E DE PLANEJAMENTO:
7.1 Devem estar ligados a um quadro legislativo de eficiência energética. O Brasil apontou uma base legislativa sólida para a implantação da eficiência energética no país.
7.2 Devem estar ligados às políticas nacionais de desenvolvimento mais amplas. No Brasil, os instrumentos de gestão e planejamento estão todos conectados à Lei nº 10.295/2001, que traz a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia no país.
7.3 Devem ser reforçados por meio de ações de planejamento econômico. Para esse quesito, foi constatado que há relação entre os instrumentos econômicos e os instrumentos legais e de gestão.

Fonte: Elaboração dos autores (2017).

5. Considerações finais

Este capítulo apresentou o resultado de um mapeamento abrangente da cadeia da governança do setor de energia elétrica no Brasil – agentes, instrumentos e ações. Identificaram-se uma série de gargalos e de pontos de alavancagem para o fortalecimento do setor e estabeleceram-se diretrizes gerais.

Levantou-se a hipótese de haver falhas na conexão entre as partes interessadas em EE, como, por exemplo, a pouca ligação entre as universidades, os agentes fornecedores e os consumidores em geral. Mesmo havendo uma política de certificação de EE no Brasil, estima-se que não há bastante estímulo à inovação, pois verificou-se que há uma lacuna na relação dos instrumentos de gestão e planejamento com o mercado de energia no país, apesar das diversas cartilhas e manuais informativos direcionados à indústria, aos consumidores finais e aos demais setores.

Sobre os instrumentos econômicos, constatou-se que os mecanismos de financiamento de EE provavelmente são suficientes para financiar os custos de implementação dessas políticas, uma vez que os financiamentos estão sob o controle da agência implementadora, conforme estabelecido pelos instrumentos legais levantados.

Para haver uma efetiva governança da gestão da energia elétrica no Brasil, as ações de avaliação são fundamentais. A análise realizada demonstrou que, apesar de as avaliações corresponderem aos objetivos políticos e à concepção de seus programas, quando são comparadas às demais ações, elas estão em menor número, talvez por serem efetuadas por poucas entidades e, conseqüentemente, não serem suficientes para gerar resultados que contribuam para o fortalecimento da cultura de EE que se procura implantar.

Pondera-se que os resultados obtidos sinalizam possibilidades para a consulta e a aplicação de diretrizes na gestão pública a respeito da EE e do uso final da energia elétrica. Destaca-se, no entanto, à medida que vão surgindo novos agentes e que novas ações vão sendo implementadas, o banco de dados do levantamento vai sendo complementado, contribuindo assim para o dinamismo do cenário da governança, que, por sua vez, também vai se alterando.

Referências

BIERMANN, Frank. Earth system governance' as a crosscutting theme of global change research. *Global Environmental Change*, v. 17, p. 326-337, 2007.

BLUMENSCHNEIN, Raquel Naves *et al.* Resiliência Urbana no Brasil – levantamento de dados e ferramenta de diagnóstico. *Relatório de Projeto e Pesquisa*. Universidade de Brasília (UnB), FAU/CDS/FGA/LACIS, Building Research Establishment – BRE, Brasília, Brasil, 2016.

BRASIL. Decreto n.º 4.131, de 14 de fevereiro de 2002. Dispõe sobre medidas de redução de consumo de energia elétrica no âmbito da administração pública federal. *Diário Oficial da União*, Brasília, 15 fev. 2002. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4131.htm. Acesso em: 13 de dez. 2016.

BRASIL. Decreto n.º 4.145, de 25 de fevereiro de 2002. Dispõe sobre a estrutura e o funcionamento do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Lex: *Diário Oficial da União*, Brasília, 26 fev. 2002. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4145.htm. Acesso em: 13 dez. 2016.

BRASIL. Lei n.º 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Lex: *Diário Oficial da União*, Brasília, 18 out. 2001b. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2001/lei-10295-17-outubro-2001-408176-publicacaooriginal-1-pl.html>. Acesso em: 1 set. 2014.

BRASIL. Lei n.º 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis n.º. 9.427, de 26 de dezembro de 1996, n.º. 9.648, de 27 de maio de 1998, n.º. 3.890-A, de 25 de abril de 1961, n.º 5.655, de 20 de maio de 1971, n.º. 5.899, de 5 de julho de 1973, n.º. 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Lex: *Diário Oficial da União*, Brasília, 29 abr. 2002. Disponível em: http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%2010.438-2002?OpenDocument. Acesso em: 1 set. 2014.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG). Instrução Normativa SLTI/MPOG n.º 01, de 19 de janeiro de 2010. Dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental na aquisição de bens, contratação de serviços ou obras pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.comprasnet.gov.br/legislacao/legislacaoDetalhe.asp?ctdCod=295>. Acesso em: 13 dez. 2016.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG). Portaria MPOG nº 23, de 12 de fevereiro de 2015. Estabelece boas práticas de gestão e uso de Energia Elétrica e de Água nos órgãos e entidades da Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional e dispõe sobre o monitoramento de consumo desses bens e serviços. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2015. Disponível em: http://www.tst.jus.br/documents/10157/12455710/MPOG+-+PORTARIA+N%C2%BA%2023_2015,%20DE+12_2_2015. Acesso em: 13 dez. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília. MME, EPE, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional 2016: ano base 2015*. Brasília. MME, EPE, 2016a.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional 2017: ano base 2016*. Brasília. MME, EPE, 2017.

GEPHI. Gephi Tutorial - *Quick Start*. Acesso em: 5 de mar. 2010.

GRANDJEAN, Martin. GEPHI – *Introduction to network analysis and visualization*. Disponível em: <http://www.martingrandjean.ch/gephi-introduction>. Acesso em: 28 de nov. 2016.

IEA/IBRD. *Energy efficiency governance*. Paris: OECD/IEA, 2010.

IEA/IBRD. *Energy efficiency indicators: fundamentals on statistics* Paris: OECD/IEA, 2014.

IEA/IBRD. *Energy Efficiency Indicators: Highlights*. OECD/IEA, Paris, 2016.

Institute on Governance (Canada). *Concept of Governance*. 2002. Disponível em: <http://www.iog.ca>. Acesso em: 19 abr. 2017.

JOLLANDS, Nigel; ELLIS, Mark. Energy efficiency governance – an emerging priority. *ECEEE 2009 Summer Study, Act! Innovate! Deliver! Reducing Energy Demand Sustainably*, p. 91-100, 2009.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. *Eficiência energética na arquitetura*. 3. ed. São Paulo: Eletrobras/PROCEL, 2014.

LAPONCHE, Bernard. Energy efficiency for a sustainable development. *International Conseil Énergie*, Paris, 1997.

LATORRACA, Tássia Fonseca. *O mapeamento da governança do setor de energia elétrica para a eficiência energética no Brasil*. 2017. 126 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, UnB, Brasília, 2017.

LATORRACA, Tássia Fonseca; BLUMENSCHNEIN, Raquel Naves; FERRARI, Maria Vitória Duarte. *O mapeamento da governança do setor de energia elétrica para a eficiência energética no Brasil*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, Brasil, 2017.

RHODES, Rod. Government and public administration. In: PIERRE, Jon. (Ed.). *Debating Governance: authenticity, steering and democracy*. Oxford: Oxford University Press, 2000. p. 54-88.

SACCARO JÚNIOR, Nilo Luiz. A conexão entre crise econômica e crise ambiental no Brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). *Boletim Regional, Urbano e Ambiental*, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11058/6499>. Acesso em: 20 nov. 2016.

SILVA, Edson Armando; SILVA Joseli Maria. Ofício, engenho e arte: inspiração e técnica na análise de dados qualitativos. *Revista Latino-Americana de Geografia e Gênero*, Ponta Grossa/PR, v. 7, n. 1, p. 132-154, jan./jul. 2016.

WIKIMEDIA COMMONS. *Social network visualization. Graph containing 800 vertices and 10.000 edges. Color = Betweenness centrality*. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:SlvrKy#/media/File:SocialNetworkAnalysis.png>. Acesso em: 10 ago. 2018.

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

Este livro aborda conceitos, tecnologias e métodos relacionados aos aspectos energético, higrotérmico e lumínico, apresentando como pano de fundo o uso de programas de simulação computacional, diagramas e ferramentas simplificadas para estudos analíticos, aplicados ao espaço construído em diferentes climas. Na primeira parte do livro, “*Inputs* – conforto, vento e luz”, o Capítulo 1 apresenta a ferramenta alemã de simulação computacional ENVI-met e o seu potencial na análise do microclima urbano; o Capítulo 2 mostra as variáveis climáticas e os arquivos climáticos utilizados nas simulações higrotérmica; o Capítulo 3 aborda os programas de simulação aplicados à ventilação natural; e o Capítulo 4 trata da complexidade dos estudos de iluminação e a necessidade de avaliar várias dimensões, simultaneamente. Na segunda parte, “*Outputs* – ambiente construído e energia”, o Capítulo 5 ensina a identificar o potencial de aproveitamento das envoltórias para integrar sistemas de geração de energia; o Capítulo 6 traz a análise de uma casa pré-fabricada de balanço energético nulo; e o Capítulo 7 insere, à guisa de conclusão, uma visão sistêmica sobre o uso da energia elétrica no país. O livro dialoga com diversos perfis profissionais, pois contempla temas atuais e inovadores para estudantes e profissionais de Arquitetura, Engenharia, Geografia, Planejamento Urbano e áreas relacionadas com a qualidade e sustentabilidade do ambiente construído.



EDITORA



UnB