

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LAILA SOUZA SANTOS

**REQUISITOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL NOS SISTEMAS DE
AVALIAÇÃO DE EDIFÍCIOS E IMPACTOS ENERGÉTICOS EM
EDIFICAÇÕES COMERCIAIS NO BRASIL**

**VITÓRIA
2012**

LAILA SOUZA SANTOS

**REQUISITOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL NOS SISTEMAS DE
AVALIAÇÃO DE EDIFÍCIOS E IMPACTOS ENERGÉTICOS EM
EDIFICAÇÕES COMERCIAIS NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Cristina Engel de Alvarez

**VITÓRIA
2012**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Santos, Laila Souza, 1981-
S237r Requisitos de iluminação natural nos sistemas de avaliação
de edifícios e impactos energéticos em edificações comerciais no
Brasil / Laila Souza Santos. – 2012.
120 f. : il.

Orientadora: Cristina Engel de Alvarez.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Edifícios comerciais. 2. Iluminação natural. 3.
Sustentabilidade. I. Alvarez, Cristina Engel de. II. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

**REQUISITOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL NOS SISTEMAS DE AVALIAÇÃO DE
EDIFÍCIOS E IMPACTOS ENERGÉTICOS EM EDIFICAÇÕES COMERCIAIS NO
BRASIL**

LAILA SOUZA SANTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Construção Civil.

Aprovada em 9 de julho de 2012 por:

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a Cristina Engel de Alvarez, Dr^a

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Orientadora

Prof^a Jussara Farias Fardin, Dr^a

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Examinadora interna

Prof^a Claudia Mariz de Lyra Barroso Krause, Ph.D

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Examinadora externa

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
VITÓRIA, 2012**

AGRADECIMENTOS

Neste espaço gostaria de deixar registrado o meu muitíssimo obrigada àqueles que estiveram envolvidos em minha vida acadêmica e pessoal durante o período de realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, muito obrigada, Prof^ª Dr^ª Cristina Engel de Alvarez, por ter me aceitado no Laboratório de Planejamento e Projetos da Ufes, me incentivado a ingressar no mestrado e pelas inúmeras orientações e revisões deste trabalho e de outros;

Aos membros da banca, agradeço a gentileza de aceitarem participar da avaliação desta dissertação. Obrigada também à Prof^ª Dr^ª Geilma Vieira pelos valiosos comentários na etapa de Qualificação;

Agradeço sinceramente aos colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil, sobretudo ao Dr. Ing. João Luiz Calmon e ao Dr. Fernando Avancini por terem compartilhado mais que conhecimento em engenharia e tecnologia, por serem grandes exemplos, por inspirarem tantas coisas boas que nem sei (!), e que carrego comigo sempre;

Aos amigos de longa data, por compreenderem a minha ausência em muitos eventos, muito obrigada e minhas promessas de compensação! Aos laços estreitados no ambiente do laboratório – Ana, Ana Carolina, Ana Clara, André, Bruna, Helena, Glyvani, Mariani, Priscila, Ramona, Reginaldo –, minha gratidão pela experiência e o tempo compartilhado. Poderia estender os agradecimentos a cada um deles, exemplificando como foram importantes nesse processo, mas eles sabem o motivo de estarem aqui;

Agradeço à vida a oportunidade de ter conhecido o colega e amigo Fernando Boechat e, com saudades, o exemplo dado por ele nesse período, sobretudo pelo equilíbrio com que conduzia compromisso e lazer;

Ofereço minha imensa gratidão à família e ao namorado pela confiança, presença e suporte, por acreditarem nas minhas escolhas, por se sentirem também desafiados pelos meus desafios, por comemorarem comigo cada passo dado;

À Capes, pela bolsa de estudos concedida.

REQUISITOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL NOS SISTEMAS DE AVALIAÇÃO DE EDIFÍCIOS E IMPACTOS ENERGÉTICOS EM EDIFICAÇÕES COMERCIAIS NO BRASIL

RESUMO

Nas últimas décadas, vários países passaram a conceder certificações a edifícios que apresentassem um suposto desempenho ambiental superior. No Brasil, a utilização de sistemas de avaliação de edifícios, originários em países com práticas construtivas, condições energéticas e geoclimáticas próprias, tem gerado uma série de críticas no meio acadêmico. Um exemplo seria a exigência, no Brasil, de que as edificações ditas sustentáveis devessem atender aos requisitos de iluminação natural de sistemas propostos para locais onde a disponibilidade de luz natural é consideravelmente inferior à existente no país e a demanda por aquecimento é real nos períodos de inverno.

O trabalho partiu da premissa de que a aplicação desses sistemas poderia incentivar a construção de edificações energeticamente ineficientes no país, pela introdução de luz natural excessiva nos interiores arquitetônicos. Assim, os objetivos consistiram em avaliar os impactos energéticos do atendimento aos requisitos de uso da luz natural estabelecidos por sistemas importados com possibilidade de aplicação no Brasil, tais como o AQUA, o BREEAM e o LEED. Os procedimentos metodológicos adotados incluíram a elaboração de modelos paramétricos com diversas orientações, percentagem de abertura nas fachadas (PAF), dispositivos de proteção solar (DPS) e ângulos de sombreamento. Esses modelos foram simulados nos softwares DIALux e DesignBuilder, em cinco cidades brasileiras, a fim de possibilitar a identificação dos modelos que atendem aos sistemas de avaliação de edifícios e a mensuração dos impactos energéticos desses, quando submetidos a diferentes condições de luminosidade da abóbada.

Os resultados obtidos permitiram identificar que as metodologias baseadas no fator de luz diurna (FLD) como indicador não favorecem a proposição de edificações energeticamente mais eficientes e que, de maneira geral, há pouco consenso no que se considera adequado para o desempenho luminoso, visto que apenas 1/3 dos modelos atendem simultaneamente aos sistemas de avaliação investigados. Desses, todos possuem PAF correspondentes a 100% e a instalação dos DPS, o que aumenta em média cerca de 20% o consumo energético dispendido com iluminação e climatização artificial nos modelos em comparação àqueles similares com PAF de 50%, indicando que as certificações não necessariamente representam melhorias no desempenho ambiental dos edifícios.

Palavras-chave: iluminação natural, eficiência energética, avaliação de sustentabilidade, simulação de edifícios.

DAYLIGHT REQUIREMENTS IN BUILDING ASSESSMENT SYSTEMS AND ENERGY IMPACTS IN COMMERCIAL BUILDINGS IN BRAZIL

ABSTRACT

In the last decades, many countries started certifying buildings with a supposed superior environmental performance. In Brazil, the use of building assessment systems originally developed in countries with their own construction practices, energy, geography and climate conditions, has generate a lot of criticism in academia. An example would be the exigency, in Brazil, that sustainable buildings were to meet the daylight requirements of assessment systems proposed for sites where the availability of daylight is considerably lower than it is in Brazil and where the demand for heating is real in winter times.

This work started from the premise that the application of these systems could encourage the construction of energy-inefficient buildings in Brazil, caused by the introduction of excessive daylight in architectural interiors. Thus, the aims here consisted of evaluating the energy impacts of meeting the daylight requirements set by imported systems with possible application in Brazil, such as AQUA, BREEAM and LEED. The methodological procedures included development of parametric models with different solar orientations, window-to-wall ratio (WWR), shading devices and protection angles. These models were simulated in DIALux and DesignBuilder softwares in five brazilian cities, in order to identify the models meeting the daylight requirements in building assessment systems and to measure their energy impacts when subjected to different brightness of the sky.

The results allowed to identify that methodologies based on daylight factor (DF) as an indicator of daylight use does not favor the proposition of more energy-efficient buildings and that, in general, there is little consensus on what is considered appropriate for luminous performance, since only one third of the models meet the requirements in all assessment systems investigated. Among them, all simuntaneously presented WWR of 100% and the use of shading devices, which increase the energy consumption spent with electric lighting and air conditioning by about 20% when compared to similar models with WWR of 50%, indicating that rating systems do not necessarily represent improvements in environmental performance of buildings.

Keywords: daylight, energy efficiency, sustainability assessment, building simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variáveis da abertura que interferem na iluminação no interior dos ambientes.....	21
Figura 2 – (a) Brises verticais da fachada da Associação Brasileira de Imprensa e (b) brises verticais e horizontais do edifício Gustavo Capanema, ambas no Rio de Janeiro.....	22
Figura 3 – Quantidade e distribuição da luz natural quando instalados brises horizontais.....	23
Figura 4 – Quantidade e distribuição da luz natural quando instaladas marquises com diferentes ângulos de proteção solar.....	23
Figura 5 – Quantidade e distribuição da luz natural quando instaladas prateleiras de luz.....	23
Figura 6 – Exemplos de diferentes tipos de céus.....	24
Figura 7 – (a) Distribuição de luminâncias em céu claro e (b) registro fotográfico de céu claro.....	25
Figura 8 - Distribuição de luminâncias em céu claro.....	25
Figura 9 – (a) Distribuição de luminâncias em céu encoberto e (b) registro fotográfico de céu encoberto.....	26
Figura 10 – Distribuição de luminâncias em céu encoberto.....	26
Figura 11 – Imagens de um céu parcialmente encoberto do dia 12/05/2004, sendo (a) às 13horas; e (b) às 15horas.....	27
Figura 12 – Componentes da luz natural que alcançam um ponto no interior do edifício.....	29
Figura 13 – Decréscimo do FLD com a profundidade.....	30
Figura 14 – Evolução do consumo de energia elétrica em países referenciais.....	35
Figura 15 – Evolução do crescimento populacional e da demanda de energia <i>per capita</i> no Brasil.....	36
Figura 16 – Crescimento do PIB e do consumo de energia elétrica por setor.....	36
Figura 17 – Exemplos de equipamentos consumidores de energia nas edificações.....	38
Figura 18 –Etiqueta nacional de conservação de energia em edifícios expedida pelo INMETRO.....	39
Figura 19 – Consumo de energia para ambientes de diversos tamanhos com geometria 2:1, orientação norte, em Florianópolis-SC.....	43
Figura 20 – Dados de saída em (a) curvas de isolux e em (b) gráficos de cinzento de um ambiente com prateleira de luz gerados a partir do <i>software DIALux</i>	52
Figura 21 – Dados de saída em (a) imagem renderizada e em (b) imagem em <i>false colour</i> de um ambiente com prateleira de luz gerados a partir do <i>software DIALux</i>	52
Figura 22 – Mapa do Brasil indicando as cidades selecionadas.....	68
Figura 23 – Corte esquemático do brise horizontal investigado.....	69
Figura 24 – Planta baixa esquemática do pavimento tipo do edifício modelo.....	70
Figura 25 – Em (a) gráfico de cinzento gerado pelo <i>DIALux</i> e em (b) medição de área no <i>software AutoCAD</i> . Modelo situado em Belém, orientação oeste, PAF de 100%, sem proteções solares, às 15h.....	74
Figura 26 – Em (a) gráfico de cinzento gerado pelo <i>DIALux</i> e em (b) medição de área no <i>software AutoCAD</i> . Modelo situado em Porto Alegre, orientação leste, PAF de 50%, sem proteções solares, às 15h.....	74
Figura 27 – Quantidade de modelos que atendem simultaneamente aos sistemas de avaliação de edifícios....	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Iluminâncias por classe de tarefas visuais.....	17
Quadro 2 – Síntese dos principais sistemas de avaliação de edifícios.....	46
Quadro 3 – Aplicações de avaliações de edifícios e vantagens oferecidas por sua implementação.....	47
Quadro 4 – Aspectos considerados pelos sistemas de avaliação de edifícios.....	48
Quadro 5 – Critérios e requisitos de luz natural estabelecidos pelo AQUA.	58
Quadro 6 – Critérios e requisitos de luz natural estabelecidos pelo BREEAM.....	60
Quadro 7 – Critérios e requisitos de luz natural estabelecidos pelas últimas versões do LEED.....	62
Quadro 8 – <i>Softwares</i> de simulação da iluminação.....	64
Quadro 9 – <i>Softwares</i> de simulação energética.....	65
Quadro 10 – Cidades selecionadas na investigação.....	67
Quadro 11 – Variáveis de teste e valores adotados na elaboração dos modelos.....	69
Quadro 12 – Valores estabelecidos para as variáveis de controle da iluminação natural.....	71
Quadro 13 – Valores estabelecidos para as variáveis de controle da envoltória e das características de ocupação do edifício.....	72
Quadro 14 – Resumo dos requisitos de luz natural a serem alcançados e condições das simulações.....	77
Quadro 15 – Avaliação dos modelos segundo a metodologia definida no AQUA.....	80
Quadro 16 – Avaliação dos modelos segundo a metodologia definida no BREEAM.....	82
Quadro 17 – Avaliação dos modelos segundo a metodologia definida no LEED 2009.....	85
Quadro 18 – Resultado e avaliação dos modelos segundo a metodologia do AQUA.....	111
Quadro 19 – Resultado e avaliação dos modelos segundo a metodologia do BREEAM.....	112
Quadro 20 – Resultado e avaliação dos modelos de Belém segundo a metodologia do LEED 2005 e LEED 2009.....	113
Quadro 21 – Resultado e avaliação dos modelos de Recife segundo a metodologia do LEED 2005 e LEED 2009.....	114
Quadro 22 – Resultado e avaliação dos modelos de Vitória segundo a metodologia do LEED 2005 e LEED 2009.....	115
Quadro 23 – Resultado e avaliação dos modelos de São Paulo segundo a metodologia do LEED 2005 e LEED 2009.....	116
Quadro 24 – Resultado e avaliação dos modelos de Porto Alegre segundo a metodologia do LEED 2005 e LEED 2009.....	117
Quadro 25 - Resultados das simulações do consumo energético em Belém e Recife.....	118
Quadro 26 – Resultados das simulações do consumo energético em Vitória e São Paulo.....	119
Quadro 27 – Resultados das simulações do consumo energético em Porto Alegre.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHS	Ângulo horizontal de sombreamento
AIJ	Área ideal de janela
ALD	Autonomia da luz diurna; o mesmo que DA
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
AVS	Ângulo vertical de sombreamento
BREEAM	Buiding Research Establishment Environmental Assessment Method
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CASBEE	Comprehensive
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
CLD	Coefficiente de luz diurna; o mesmo que DC
DPS	Dispositivos de proteção solar
DA	Daylight autonomy; o mesmo que ALD
DC	Daylight coefficient; o mesmo que CLD
DF	Daylight factor; o mesmo que FLD
FLD	Fator de luz diurna; o mesmo que DF
HK-BEAM	Hong Kong Building Environmental Assessment Method
HQE	Haute Qualité Environnementale
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IULN	Iluminância Útil da Luz Natural
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LPP	Laboratório de Planejamento e Projetos
PAF	Percentual de aberturas nas fachadas
PALN	Potencial de Aproveitamento da luz natural
PIB	Produto Interno Bruto
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
SBTool	Sustainable Building Tool
TRY	Test Reference Year
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Hipótese.....	14
1.2 Objetivos	14
1.3 Estrutura do trabalho.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Luz natural nas edificações	16
2.1.1 Conforto visual	16
2.1.2 Sistemas de iluminação natural	20
2.1.3 Disponibilidade de luz natural.....	23
2.1.4 Indicadores do uso de luz natural	28
2.2 A questão energética	34
2.2.1 Eficiência energética nas edificações	37
2.2.2 Estudos sobre as implicações energéticas do uso da luz natural em edificações.....	39
2.3 Sistemas de avaliação de edifícios	46
2.4 Simulação de edifícios	50
2.4.1 Simulações do desempenho da luz natural	51
2.4.2 Simulações do desempenho energético	54
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	56
3.1 Revisão bibliográfica.....	56
3.2 O edifício comercial artificialmente climatizado	57
3.3 Requisitos de uso da luz natural nos sistemas de avaliação de edifícios	58
3.3.1 Alta Qualidade Ambiental – AQUA	59
3.3.2 Building Research Establishment’s Environmental Assessment Method - BREEAM	61
3.3.3 Leadership in Energy and Environmental Design – LEED	62
3.4 Seleção dos <i>softwares</i> de simulação	64
3.4.1 <i>Softwares</i> de iluminação natural	65
3.4.2 <i>Softwares</i> de desempenho energético	66
3.5 Seleção das localidades	67
3.6 Elaboração dos modelos paramétricos	69
3.6.1 Variáveis de teste.....	69
3.6.2 Variáveis de controle	71
3.7 Processo de simulação.....	74
3.7 Cálculo de área e análise dos resultados	74

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1 Análise preliminar dos requisitos da luz natural.....	77
4.2 Análises quanto ao atendimento aos requisitos de luz natural.....	80
4.2.1 No sistema AQUA	80
4.2.2 No sistema BREEAM	83
4.2.3 No sistema LEED	84
4.3 Análises do consumo energético.....	88
4.3.1 Influência dos dispositivos de proteção solar (DPS)	91
4.3.2 Influência da orientação solar	91
4.3.3 Influência do percentual de abertura na fachada (PAF).....	93
4.3 Impactos energéticos do atendimento aos requisitos de iluminação natural	94
5 CONCLUSÕES.....	99
5.1 Limitações da pesquisa	102
5.2 Sugestões para pesquisas futuras.....	102
REFERÊNCIAS	104
APÊNDICE A – Resultados das simulações da luz natural.....	111
APÊNDICE B – Resultados das simulações do consumo energético.....	118

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, vários países passaram a conceder certificações ou selos a edifícios que apresentassem um suposto desempenho ambiental superior, a exemplo do ocorrido na Inglaterra, pioneira no desenvolvimento de sistemas de avaliação ambiental de edifícios. No Brasil, a utilização de sistemas de avaliação desse tipo, com origens em outros países, tem gerado uma série de revisões e críticas no meio acadêmico (SILVA, 2003; SILVA, 2007; SOUZA, 2008).

Sistemas internacionais de avaliação da sustentabilidade de edifícios, tais como o americano *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) e o *Alta Qualidade Ambiental* (AQUA) – adaptação brasileira para o francês *Haute Qualité Environnementale* (HQE) –, começaram a ser divulgados e aplicados no contexto nacional nos últimos anos (GBCB, 2011; FUNDAÇÃO, 2012), com pequenas adaptações em relação aos originais propostos para suas tradições sócio-culturais, práticas construtivas, poder econômico e, sobretudo, condições energéticas e geoclimáticas particulares.

Um exemplo de uma eventual inadequação da aplicação de sistemas importados no contexto brasileiro seria a exigência de que as edificações ditas sustentáveis devessem atender aos requisitos de iluminação natural de sistemas de avaliação propostos para locais onde a disponibilidade de luz natural é consideravelmente inferior à existente no país e a demanda por aquecimento é uma necessidade real nos períodos de inverno.

Assim, o uso desses sistemas, tais como são, na avaliação de edificações brasileiras leva a alguns questionamentos que direcionam o desenvolvimento desse estudo: os indicadores de uso da luz natural recomendados por sistemas importados de avaliação de edifícios aplicáveis no Brasil são adequados às distintas condições geoclimáticas encontradas no país? Essas metodologias estão, de fato, colaborando para a obtenção de conforto visual e favorecendo a eficiência no uso de energia elétrica em edifícios comerciais? Ou as recomendações para o uso de luz natural são excessivas e inadequadas por prejudicar o conforto térmico e a eficiência energética?

Essa pesquisa procurou responder a essas questões, discutindo as relações entre o atendimento aos requisitos de iluminação natural propostos pelos sistemas de avaliação de sustentabilidade

em edifícios e o desempenho de modelos supostamente certificados nesses critérios por meio de simulações computacionais, além de avaliar o desempenho energético proporcionado pelos sistemas de iluminação natural utilizados em edificações comerciais artificialmente climatizadas no Brasil.

1.1 Hipótese

Considerando-se que:

- O aproveitamento da luz natural nos ambientes interiores pode reduzir a demanda por iluminação artificial;
- A luz natural é uma das mais eficientes fontes de iluminação e que os sistemas de iluminação natural, quando bem projetados, permitem reduzir o ganho térmico para fins de iluminação em comparação com sistemas artificiais; e que
- O acionamento dos sistemas de condicionamento de ar está relacionado com o incremento de carga térmica causada pelos sistemas de iluminação artificial e por sistemas de iluminação natural que permitem a entrada excessiva da luz;

É possível inferir que os sistemas de avaliação de sustentabilidade importados, atualmente utilizados no Brasil, recomendem o uso de iluminação natural excessiva para a realidade nacional, sobretudo entre os trópicos, onde a disponibilidade de luz é maior que nos países de origem de tais sistemas, podendo incentivar equivocadamente a proposição de edificações que ofereçam risco potencial de ofuscamento e alta demanda por condicionamento de ar.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consistiu em investigar os impactos no desempenho energético de edificações comerciais artificialmente climatizadas provocados pelo atendimento aos requisitos de iluminação natural estabelecidos por sistemas de avaliação de edifícios em uso no Brasil.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Revisar a literatura disponível acerca dos sistemas de avaliação de edifícios e dos impactos energéticos do uso da luz em edificações;

- Caracterizar o edifício comercial artificialmente climatizado e elaborar modelos paramétricos que o represente;
- Aprofundar o estudo a respeito de *softwares* de simulação de edifícios e selecionar instrumentos adequados à pesquisa;
- Realizar simulações computacionais do desempenho luminoso e energético dos modelos propostos; e
- Identificar os modelos que atendem aos requisitos de uso da luz natural expressos nos sistemas de avaliação de edifícios aplicáveis no Brasil, mensurando-se os impactos energéticos nos mesmos.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos, assim distribuídos:

- o **Capítulo 1** apresenta a introdução ao tema, contexto da pesquisa, justificativas, hipótese, objetivos e estrutura do trabalho;
- o **Capítulo 2** corresponde à revisão bibliográfica acerca dos benefícios e implicações energéticas do uso da luz natural nas edificações, dos sistemas de avaliação de sustentabilidade, bem como das simulações computacionais de edifícios;
- o **Capítulo 3** descreve as etapas dos procedimentos metodológicos adotados na pesquisa;
- o **Capítulo 4** apresenta os resultados da aplicação dos procedimentos descritos no capítulo anterior, discute e analisa os dados obtidos; e
- no **Capítulo 5** são feitas as considerações finais do trabalho, com as principais conclusões e constatações a respeito dos resultados, além de apresentar as limitações da pesquisa e indicações para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica que embasou o trabalho. Nela estão descritos os principais conceitos e fundamentos necessários à compreensão do trabalho, as investigações científicas, referenciais teóricos, normas técnicas, ferramentas acadêmicas e de mercado que apresentam interferências relevantes com o tema de estudo e o estado da arte a respeito dos impactos energéticos decorrentes do uso da luz natural nos interiores das edificações.

2.1 Luz natural nas edificações

Os conceitos abordados em relação à temática da luz natural passam, necessariamente, pelo entendimento do que é conforto visual, pelo conhecimento das variáveis dos sistemas de iluminação que influenciam no desempenho visual e energético das edificações e a disponibilidade de luz natural na abóbada celeste, bem como dos indicadores do uso de luz natural que subsidiam a entrada de dados no posterior processo de simulação.

2.1.1 Conforto Visual

Os espaços arquitetônicos que atendem às exigências humanas de conforto ambiental são entendidos como os ambientes que oferecem luz, som e calor de maneira adequada. Segundo Vianna e Gonçalves (2007), quanto maior o esforço do usuário em adaptar-se ao seu ambiente visual, maior será a sensação de desconforto, e assim, as edificações devem ser concebidas prevendo-se uma reduzida necessidade de adaptação do indivíduo ao ambiente.

O conforto visual, especificamente, é alcançado quando é oferecido um conjunto de condições nas quais o ser humano pode visualizar adequadamente os objetos com o máximo de acuidade e precisão visual requeridos à tarefa, com o mínimo de esforço, reduzidos riscos de acidentes e prejuízos à visão (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997).

Para Corbella e Yannas (2003), o conforto visual é obtido quando o usuário vê bem; quando o nível ou quantidade de luz está adequado ao que ele precisa ver; quando não há distúrbios visuais ou incômodos - como os reflexos, por exemplo -; e quando não há contrastes ou luminosidade excessiva que o obrigue a forçar os músculos da visão.

Quando um ambiente não atende a esses requisitos, o usuário experimenta o desconforto visual. Os efeitos do repetido esforço humano em se adaptar a um ambiente visual que não lhe oferece boas condições de visão, vão desde o cansaço visual, a falta de atenção ou concentração, a queda do rendimento e produtividade no trabalho, até a fadiga, irritabilidade e dores de cabeça, podendo favorecer, inclusive, o aumento dos índices de acidentes de trabalho (VIANNA; GONÇALVES, 2007, ERG *et al.*, 2008).

2.1.1.1 Níveis de iluminância

Para favorecer uma boa visão é necessário oferecer uma quantidade de luz adequada à tarefa visual que se desempenha. Embora o olho humano tenha uma grande capacidade de adaptação às condições de iluminação oferecidas (VIANNA; GONÇALVES, 2007), enxergando sob níveis de iluminância que vão de aproximadamente 0,1 lux a 100.000 lux – referências correspondentes aos níveis de iluminância fornecidos pela luz da Lua e do Sol, respectivamente (SCHMID *et al.*, 2005, VIANNA; GONÇALVES, 2007) –, a realização de tarefas sob condições de iluminação que se aproximam desses extremos são bastante inapropriadas.

Na primeira metade do século XX, alguns estudos mostraram que a acuidade visual está associada diretamente à iluminância, que é a quantidade de luz que incide sobre uma unidade de área (COSTA, 2000). Os níveis de iluminância recomendados para o bom desempenho das diferentes tarefas visuais foram empiricamente determinados por meio de testes, tabelados e publicados, no Brasil, pela NBR 5413 – Iluminância de Interiores (ABNT, 1992). A referida norma estabelece os níveis de iluminância que devem ser utilizados em cada ambiente, segundo as tarefas visuais realizadas em seu interior (Quadro 1).

Quadro 1 - Iluminâncias por classe de tarefas visuais.

Classe	Iluminância	Tipo de atividade
A Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples	50 – 75 – 100	Orientação simples para permanência curta
	200 – 300 – 500	Tarefas com requisitos visuais limitados, trabalho bruto de maquinaria, auditórios
B Iluminação geral para área de trabalho	500 – 750 – 1000	Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios
	1000 – 1500 – 2000	Tarefas com requisitos especiais, gravação manual, inspeção, indústria de roupas
C Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis	2000 – 3000 – 5000	Tarefas visuais exatas e prolongadas, eletrônica de tamanho pequeno
	10000 – 15000 – 20000	Tarefas visuais muito especiais, cirurgia

Fonte: ABNT, 1992.

Os valores de iluminância definidos na norma se referem aos níveis de iluminação artificial a serem providos no plano de trabalho, entretanto, são utilizados também como referência nas pesquisas sobre luz natural, embora atualmente os valores definidos na NBR 5413 encontrem-se em processo de revisão, conforme NBR ISO 8995-1 (ABNT, 2010).

2.1.1.2 *Equilíbrio de luminâncias*

Se por um lado os níveis de iluminância tratam da quantidade de luz que incide sobre uma determinada superfície, a luminância, ao contrário, é uma grandeza fotométrica associada à luz direcionada a partir das superfícies em direção ao olho do observador.

Segundo Costa (2000), a luminância é um dos conceitos mais abstratos da luminotécnica. O autor exemplifica que, ao realizar uma leitura, a percepção das letras se dá pela diferença entre as refletâncias das letras pretas (10%) em contraste com o fundo branco do papel (85%), ou seja, para uma mesma quantidade de luz que chega à superfície do livro, a luminância das letras é perceptivelmente menor que a luminância do fundo. Nos casos em que as luminâncias de figura e fundo são similares, como a linha de costura e o tecido, a observação do contraste é mais difícil e, por isso, a tarefa visual demanda mais luz, ou maiores níveis de iluminância.

Assim, o homem percebe o mundo através dos contrastes das luminâncias, que são função da quantidade de luz que chega a uma superfície e a refletância da mesma, além da posição onde se coloca o observador. Tanto a ausência de contrastes quanto os contrastes excessivos são inadequados para o conforto visual e, portanto, o ideal é que os ambientes ofereçam algum grau de uniformidade de iluminação nos planos de trabalho, já que o desconforto visual pode ser o resultado do esforço dos olhos em se adaptar muito rapidamente a uma ampla variação de luminosidades (IEA, 2000).

A uniformidade das luminâncias também está associada ao acionamento da iluminação artificial e ao consumo de energia elétrica e é, por vezes, mais importante que a quantidade de luz, por estar associada à percepção de claridade (ERG *et al.*, 2008). As variações excessivas da quantidade de luz dão um aspecto irregular à iluminação e, ainda que os olhos se adaptem às partes mais iluminadas, as áreas menos iluminadas parecerão mais escuras do que realmente são (HOPKINSON *et al.*, 1966 *apud* BROWN; DEKAY, 2004). Alguns estudos indicam, inclusive, que os usuários mais afastados das janelas percebem os contrastes entre a sua área de trabalho e as partes mais próximas às aberturas e, por conseqüência, tendem a acionar o sistema de iluminação artificial, na tentativa de equilibrar essas diferenças, embora

muitas vezes sua área de trabalho já ofereça quantidade de luz suficiente para a realização da sua atividade visual (ERG *et al.*, 2008).

Nesses casos, para quantificar a uniformidade da iluminação oferecida num ambiente, são usadas relações entre as iluminâncias ou as luminâncias, tais como a máxima/média ou média/mínima, num plano de trabalho horizontal, não sendo recomendadas, por exemplo, relações superiores a 10:1 entre as luminâncias máxima e mínima (IEA, 2000). Assim, ambientes que oferecem uma iluminância média adequada e, simultaneamente, baixos índices de uniformidade, podem conter regiões com iluminação excessiva e/ou insuficiente, sendo, portanto inadequadas do ponto de vista do conforto visual e do consumo de energia.

É importante considerar que, devido à grande dificuldade em se trabalhar com a luminância, que varia segundo a posição do observador, muitos autores preferem trabalhar com um conceito bastante similar, ou seja, a uniformidade de iluminâncias, considerando-se que, a partir da adoção de superfícies com valores de refletância não extremos, uma uniformidade de iluminâncias geraria também um ambiente com certa uniformidade de luminâncias, e consequentes contrastes adequados, mais agradáveis à visão.

Matematicamente, a uniformidade de iluminâncias (U) é determinada através da relação entre a iluminância mínima ($E_{MÍN}$) de uma superfície e a média aritmética das iluminâncias ($E_{MÉD}$) nesta superfície (GARROCHO; AMORIM, 2006), como mostra a expressão:

$$U = E_{MÍN}/E_{MÉD} \quad (1)$$

2.1.1.3 Controle do ofuscamento

Quando o processo de adaptação da visão aos contrastes não ocorre normalmente, experimenta-se uma sensação de desconforto ou perda de visibilidade, denominada ofuscamento (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997). O ofuscamento é o desconforto causado por um grande brilho no campo visual (CORBELLA; YANNAS, 2003) que é percebido quando as suas distintas partes ultrapassam o grau de contraste aceitável (ERG *et al.*, 2008).

A princípio, quanto maior a quantidade de luz disponível, melhor será a acuidade visual e as atividades dos usuários nesse espaço poderão ser desenvolvidas com maior precisão, já que maiores níveis de iluminância nos planos de trabalho favorecem a distinção de detalhes, texturas e cores. Entretanto, a melhoria da visão com o aumento nos níveis de iluminância não

é ilimitada. Além das questões relacionadas ao consumo excessivo de energia para manutenção dos níveis de iluminação em patamares superiores aos necessários, vários estudos demonstraram que a partir de uma determinada quantidade luz, o incremento nos níveis de iluminância passa a não trazer melhorias para a acuidade visual, favorecendo as sensações indesejáveis de ofuscamento (VIANNA; GONÇALVES, 2007).

Ambientes agradáveis do ponto de vista do conforto visual estão associados não somente aos níveis de iluminação e aos índices de uniformidade da luz oferecidos nos ambientes, mas também à ausência de ofuscamento (ERG *et al.*, 2008) e portanto, os projetos devem garantir que a luz direta do sol – que possui intensidades extremamente altas –, não incida diretamente sobre os planos de trabalho no interior (BROWN; DEKAY, 2004). A visualização de grandes porções da abóbada celeste, bem como a penetração da luz direta do Sol nos interiores arquitetônicos, são fontes potenciais de ofuscamento, que podem ser minimizados com a utilização de dispositivos de proteção solar (DPS) adequados, tais como beirais, brises, marquises, prateleiras de luz, dentre outros. O controle do ofuscamento é, portanto, um benefício não só para o conforto visual, mas também para a eficiência energética, na medida em que reduz a entrada excessiva de radiação solar.

2.1.2 *Sistemas de iluminação natural*

A radiação proveniente do Sol, ou simplesmente luz natural, pode ser dividida em luz direta e luz difusa. A luz direta é a parcela dessa radiação que atinge diretamente a Terra. Suas intensidades dependem da altura solar e do ângulo de incidência dessa luz nas superfícies receptoras, sendo muitas vezes mais altas que as intensidades da luz difusa. A parcela difusa da radiação solar sofre uma série de interferências em seu trajeto até alcançar as superfícies do planeta, porque se difundiu com a penetração da luz na atmosfera (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997).

É correto afirmar que a luz natural é um recurso renovável e abundante em regiões intertropicais ao longo de todo o ano. Além da importância fundamental que representa para a manutenção da saúde humana, a utilização de luz natural é fortemente recomendada nos interiores arquitetônicos por favorecer a salubridade dos ambientes, fornecer luz de qualidade e reduzir ou eliminar a necessidade por iluminação artificial durante o dia (ERG *et al.*, 2008).

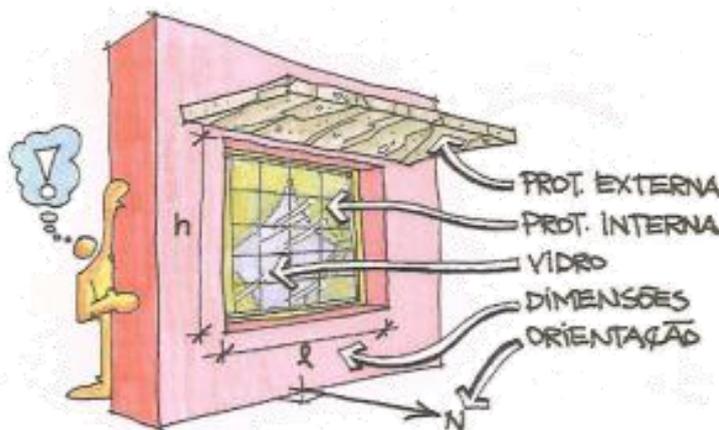
Segundo Boyce (1998) *apud* IEA (2000), as reações das pessoas nos ambientes internos sugerem que a presença de luz natural está associada às necessidades humanas de ver bem os

espaços e as tarefas e de experimentar estímulos ambientais. Estudos mostram que os usuários tendem também a aceitar maiores variações na iluminação quando os espaços possuem acesso a luz natural (IEA, 2000; ERG *et al.*, 2008) e, inclusive, toleram níveis de iluminância natural bem mais baixos que os da luz artificial, particularmente em tarefas de leitura sob condições em que a luz natural vai diminuindo, ao final do dia, até chegar a níveis tão baixos quanto 50 lx (BAKER, 2000 *apud* NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

Em estudos realizados pelo *Lawrance Berkeley National Laboratory* (Estados Unidos), foi permitido aos usuários de escritórios controlarem manualmente a intensidade da iluminação elétrica e as venezianas para criarem seus ambientes visuais. As iluminâncias medidas compreenderam o intervalo de 840 lx a 2146 lx no período da manhã e 782 lx a 1278 lx no período da tarde, indicando que os ocupantes preferem, ou ao menos toleram níveis mais altos que aqueles controlados pelo sistema automático (VINE *et al.*, 1998 *apud* NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

Assim, os sistemas de iluminação natural correspondem ao conjunto de elementos que condicionam a entrada e o direcionamento da luz solar nos interiores (Figura 1), tais como as dimensões e posição da abertura, o tipo de vidro, os ângulos de sombreamento horizontal (AHS) e vertical (AVS) e o tipo de dispositivos de proteção solar (DPS), etc.

Figura 1 – Variáveis da abertura que interferem na iluminação no interior dos ambientes.



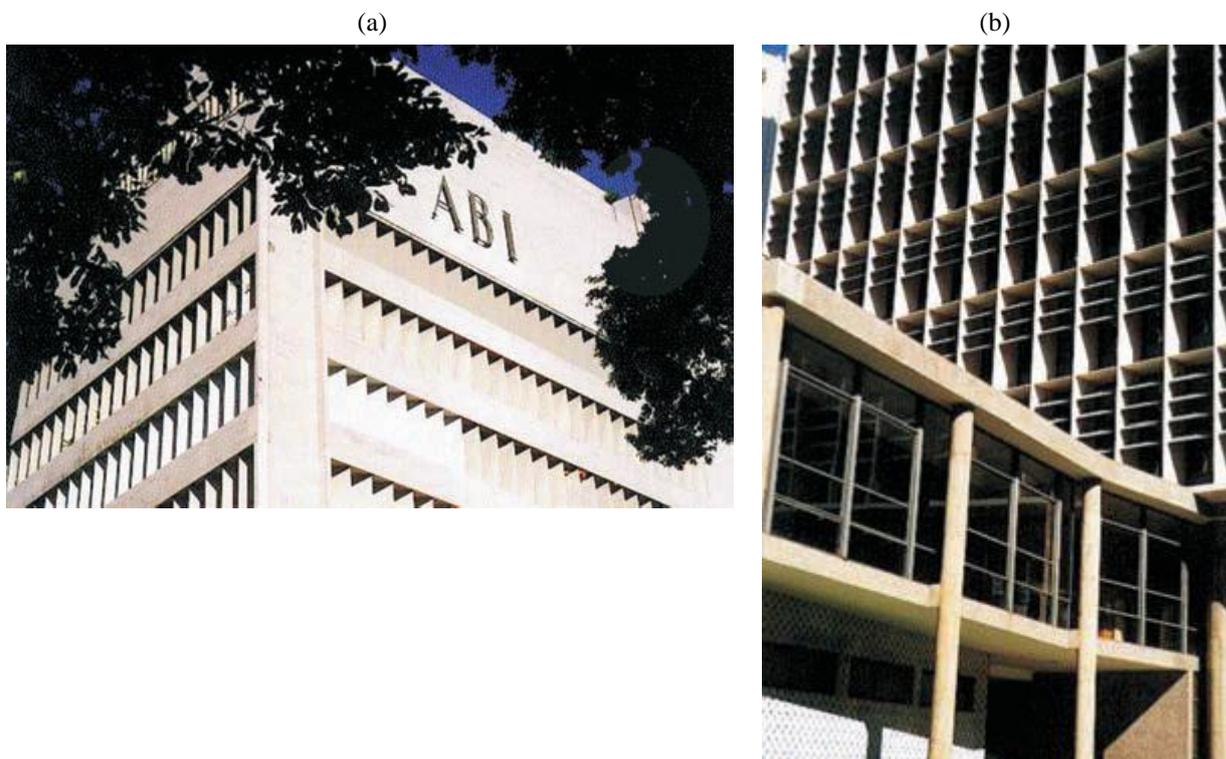
Fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997, p.65.

Em geral, quanto maiores forem as dimensões das aberturas, maior a quantidade de iluminação natural introduzida no ambiente interno. A posição das aberturas também possui relação com a entrada da luz: aberturas mais altas e/ou próximas ao teto permitem a entrada de luz nas porções mais centrais do ambiente, o que favorece a distribuição da luz nos interiores, ao passo que as aberturas centralizadas verticalmente fornecem iluminação nas porções mais próximas à abertura (VIANNA; GONÇALVES, 2007). Por outro lado, aberturas

junto ao piso oferecem pequena contribuição nos níveis de iluminância no plano de trabalho, pois até alcançá-lo, a luz sofre inúmeras e sucessivas reflexões que reduzem sua intensidade.

Para direcionar a luz natural proveniente do sol e do céu, sombrear as aberturas e/ou reduzir a entrada de iluminação excessiva, alguns elementos sombreadores, ou dispositivos de proteção solar, podem ser instalados junto às aberturas. Esses são recursos importantes para prevenir o ofuscamento e o incremento de carga térmica nos interiores (VIANNA; GONÇALVES, 2007, CORBELLA; YANNAS, 2003) e, portanto, estão associados tanto ao desempenho luminoso quanto energético das edificações. Dentre os exemplos de dispositivos de proteção solar mais tradicionalmente estudados estão os brises horizontais, verticais ou associados (Figura 2 e Figura 3), a marquise (Figura 4), e a prateleira de luz (Figura 5).

Figura 2 – (a) Brises verticais da fachada da Associação Brasileira de Imprensa e (b) brises verticais e horizontais do edifício Gustavo Capanema, ambas no Rio de Janeiro.

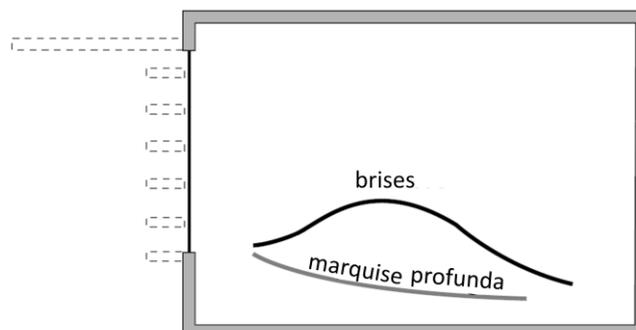


Fonte: GONÇALVES; VIANNA; MOURA, 2011, p. 176 e 177.

O potencial de sombreamento desses dispositivos é função, dentre outros, do ângulo formado entre a extremidade do dispositivo de proteção solar e o ponto inferior e central da abertura. Esse ângulo corresponde à porção da abóbada celeste que deixará de “ser vista” por esse ponto. O aumento do ângulo de sombreamento horizontal (AHS) provoca a diminuição dos níveis de iluminância natural no interior, mas também promove a diminuição dos contrastes e uniformiza a distribuição da luz no ambiente. Por conseqüência, reduz-se a probabilidade de ofuscamento e, em regiões mais próximas dos trópicos, auxilia consideravelmente na

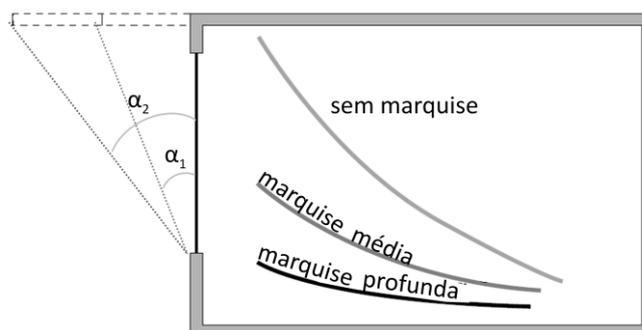
eficiência energética das edificações por minimizar a demanda por climatização artificial. As Figura 3, Figura 4 e Figura 5 mostram o efeito da instalação de diferentes tipos de dispositivos de proteção solar (DPS) na distribuição da luz nos interiores arquitetônicos.

Figura 3 – Quantidade e distribuição da luz natural quando instalados brises horizontais.



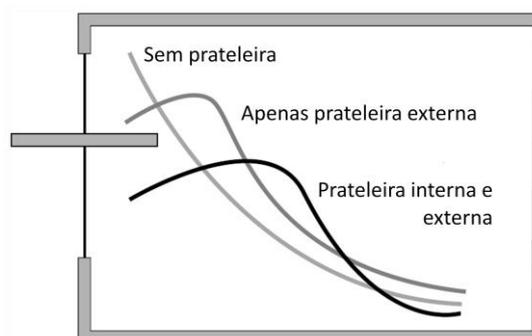
Fonte: Traduzido e adaptado de O'CONNOR *et al.*, 1997, p. 3-3.

Figura 4 – Quantidade e distribuição da luz natural quando instaladas marquises com diferentes ângulos de proteção solar.



Fonte: Traduzido e adaptado de O'CONNOR *et al.*, 1997, p.3-3.

Figura 5 – Quantidade e distribuição da luz natural quando instaladas prateleiras de luz.



Fonte: Traduzido e adaptado de O'CONNOR *et al.*, 1997, p. 3-4.

2.1.3 Disponibilidade de luz natural

Gonçalves, Vianna e Moura (2011) apontam diversos aspectos que influenciam na disponibilidade de luz natural. O movimento aparente do sol estabelece variações nos níveis de luminosidade natural, modificando-se com a época do ano, hora do dia, qualidade do ar, nebulosidade do céu, latitude, orientação e a configuração morfológica do entorno, quando

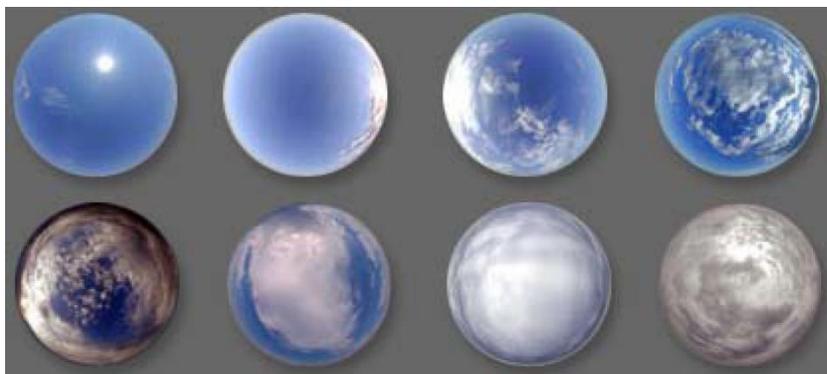
este existir. Segundo Souza (2003), a iluminância externa disponível depende da distribuição de luminâncias no céu e varia ao longo do dia e do ano, além de se alterar também com a latitude e com a quantidade e o tipo de nuvens, de névoa ou poeira suspensa na atmosfera.

A luz proveniente do sol – fonte primária de luz natural – se propaga na atmosfera ao sofrer sucessivas reflexões que, por fim, convertem a abóbada celeste em fonte secundária de luz natural. A iluminação produzida pelo céu depende do seu brilho ou luminância, cuja distribuição e intensidades variam segundo diversos parâmetros meteorológicos, sazonais e geométricos, caracterizando uma complexa especificação (PEREIRA, 2009). A NBR 15.215 – 2 (ABNT, 2005a) classifica os tipos de céu segundo a quantidade de nuvens, da seguinte forma:

- Céu claro: inexistência de nuvens e baixa nebulosidade;
- Céu parcialmente encoberto: condição climática intermediária que ocorre entre os céus padronizados como céu claro e encoberto; e
- Céu encoberto: nuvens preenchem toda a superfície da abóbada celeste.

A Figura 6 mostra as variações nas características da abóbada celeste, que modifica não apenas o seu aspecto visual – com ocorrências que variam desde o céu claro, azul e livre de nuvens ao céu encoberto e cinza –, mas também na quantidade de luz que fornece. Por isso é necessário caracterizar a distribuição de luminâncias das abóbadas a partir de céus padronizados, denominados modelos de céu, que serão usados para as aplicações de simulação de luz natural em interiores (PERRAUDEAU, 1988 *apud* PEREIRA, 2009; MARDALJEVIC, 2006 *apud* PEREIRA, 2009).

Figura 6 – Exemplos de diferentes tipos de céus.



Fonte: MARSH *apud* PEREIRA, 2006.

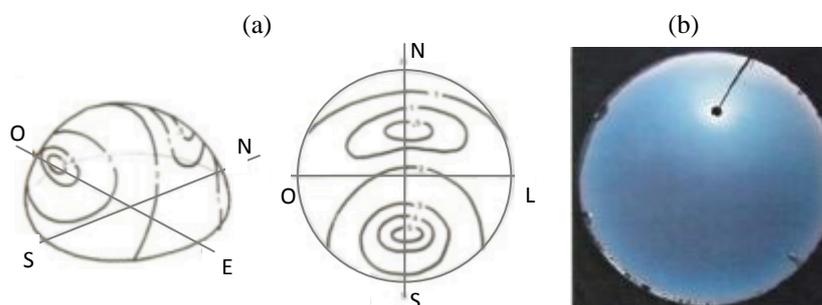
Os modelos de céu são aproximações da realidade definidas por expressões algébricas que levam em conta a latitude e as propriedades atmosféricas e horárias locais. Atualmente,

embora sejam quinze os modelos de céu padronizados pela *Commission Internationale de l'Eclairage*¹ (CIE), na maioria das simulações computacionais da luz natural são aplicados os modelos de céu claro e céu encoberto, face à complexidade de se determinar o comportamento dinâmico da luminância da abóbada celeste para os céus intermediários (PEREIRA, 2009). Perez *et al.* (1990) também propuseram um modelo de céu que tem sido utilizado sobretudo na simulação energética de edificações. As principais características desses modelos estão descritas na seqüência.

2.1.3.1 Céu claro

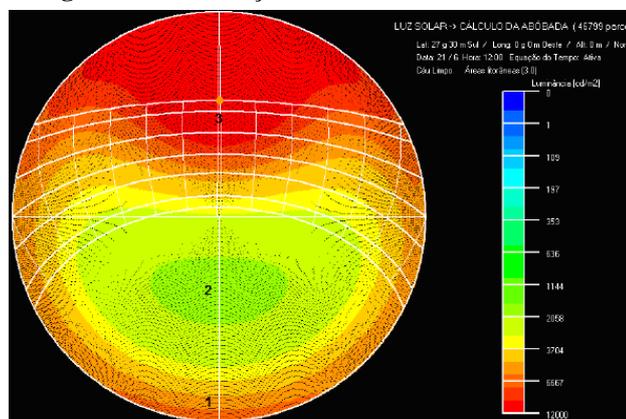
É o céu caracterizado pela ausência de nuvens e por possuir distribuição de luminâncias bastante desuniforme. Sua porção mais escura se encontra a 90° da posição do sol e sua parte mais brilhante ao redor dele. Tende ainda, a ser mais brilhante próximo à linha do horizonte que no zênite (Figura 7 e Figura 8). A luminância de qualquer ponto da abóbada é correlacionada com a luminância do zênite, em função da posição do ponto considerado, e com relação ao zênite e ao Sol (PEREIRA, 2009).

Figura 7 – (a) Distribuição de luminâncias em céu claro e (b) registro fotográfico de céu claro.



Fonte: (a) MOORE, 1991 *apud* PEREIRA, 2006, p. 20 e (b) PEREIRA, 2009, p.14.

Figura 8 - Distribuição de luminâncias em céu claro.



Fonte: APOLUX, 2007 *apud* PEREIRA, 2009, p.14.

¹ Comissão Internacional de Iluminação, com sede na França.

2.1.3.2 Céu encoberto

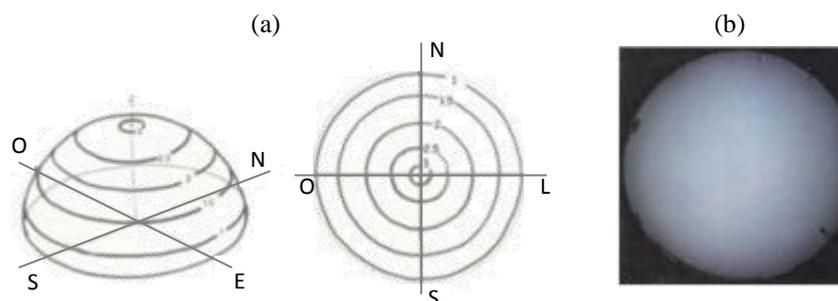
Segundo Ghisi e Tinker (2005), o modelo de céu encoberto apresenta o horizonte mais escuro que o zênite. Nele, os efeitos da posição solar são desprezíveis, a luminância do céu é simétrica em relação ao zênite e varia gradativamente à medida que se afasta do horizonte (Figura 9 e

Figura 10 – Distribuição de luminâncias em céu encoberto.

), sendo a iluminância vertical a mesma para todas as orientações (LI, 2010).

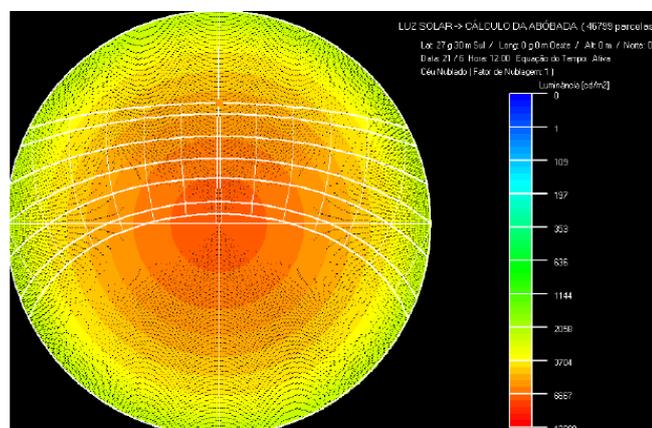
Por excluir toda a iluminação direta, o céu encoberto costuma subestimar os níveis de iluminância em ambientes iluminados lateralmente (TREGENZA, 1980 *apud* GHISI; TINKER, 2005).

Figura 9 – (a) Distribuição de luminâncias em céu encoberto e (b) registro fotográfico de céu encoberto.



Fontes: (a) MOORE, 1991 *apud* PEREIRA, 2006, p.21 e (b) PEREIRA, 2009, p. 16.

Figura 10 – Distribuição de luminâncias em céu encoberto.



Fonte: APOLUX, 2007 *apud* PEREIRA, 2009, p.14.

2.1.3.3 Céu parcialmente encoberto

A condição de céu parcialmente encoberto é bastante comum em regiões tropicais e subtropicais, todavia o conhecimento a respeito desse tipo de céu é bastante limitado, principalmente no que se refere aos tipos de nuvens, o grau de cobertura e a frequência das diversas tipologias (PEREIRA, 2006).

Segundo a NBR 15215-2 (ABNT, 2005a), esse modelo representa uma condição intermediária entre o céu claro e o céu encoberto. Nele, a distribuição das luminâncias é definida segundo a altura solar, assim como no céu claro, porém o sol e a auréola ao seu redor não são considerados nessa distribuição (PEREIRA, 2006). Por variar muito em curtos intervalos de tempo e por caracterizar-se por uma sobreposição de céu claro e nuvens de diferentes tamanhos e formas, o céu parcialmente encoberto apresenta grande complexidade e difícil padronização (FIUZA, 2008).

Como exemplo disso, Vianna e Gonçalves (2007) apresentam duas imagens de uma abóbada celeste registradas com intervalos de duas horas (FIGURA 11). Essas imagens ilustram a variabilidade das condições de iluminação fornecidas por esse tipo de céu e dão uma idéia da dificuldade em se determinar um modelo matemático que o represente adequadamente.

FIGURA 11 – Imagens de um céu parcialmente encoberto do dia 12/05/2004, sendo (a) às 13horas; e (b) às 15horas.



Fotos: Bruna Luz e Luciana Schwandner. Fonte: VIANNA; GONÇALVES, 2007, p. 23C.

2.1.3.4 O céu de Perez *et al.* (1990)

O modelo de céu de Perez *et al.* (1990) não é vinculado a uma condição de céu específica, tampouco pode ser representado por uma única imagem. Utilizando informações

representativas de vários climas, os autores desenvolveram, empiricamente, um modelo capaz de prever as quantidades de luz natural disponíveis sob quaisquer condições de céu.

Segundo Perez *et al.* (1990), a caracterização das intensidades e distribuição das luminâncias no céu compreende componentes específicos, numerosos e geralmente caros para serem obtidos diariamente e, por isso, foi necessário contar com modelos de conversão que utilizassem dados acessíveis diariamente. Dessa forma, o modelo de céu estabelecido pelos autores utilizou dados da geometria solar, além de informações meteorológicas amplamente disponíveis sobre a radiação solar, tais como a radiação solar global, a radiação solar direta e a temperatura de ponto de orvalho.

Utilizando-se esses dados, o método permite indicar o ângulo do sol com o zênite, a claridade e o brilho do céu e a quantidade de vapor de água na atmosfera, obtendo-se assim informações importantes para a simulação da iluminação, como a iluminância global, direta e difusa, além da iluminância que atinge as superfícies de qualquer orientação, a luminância do zênite e a distribuição angular das luminâncias do céu (PEREZ *et al.*, 1990).

2.1.4 Indicadores do uso de luz natural

Sabe-se que, nos interiores arquitetônicos, as iluminâncias fornecidas pela luz natural diminuem rapidamente com o aumento da distância das aberturas (NABIL; MARDALJEVIC, 2006). Quanto mais próximo das aberturas, maiores os níveis de iluminação natural e quanto mais profundo o ambiente, maior o contraste entre as áreas próximas às janelas e as áreas mais afastadas (BROWN; DEKAY, 2004).

Assim, torna-se perceptível que o desafio de um bom projeto de iluminação natural é oferecer níveis suficientes de iluminação em profundidade nos ambientes e durante o máximo período de tempo (IEA, 2000, BROWN; DEKAY, 2004), a fim de favorecer a distribuição da luz, o controle do ofuscamento e a redução da necessidade de acionamento do sistema de iluminação artificial complementar no período diurno.

O conceito de indicador aqui adotado corresponde à conceituação expressa em Donnelly *et al.* (2007). Segundo os autores, os indicadores consistem em uma medida, geralmente quantitativa, que pode ser usada para comunicar e ilustrar fenômenos complexos. Os indicadores fornecem geralmente uma idéia de importância ou tornam perceptíveis uma tendência ou fenômeno que não é imediata ou facilmente detectável, como um sinal que torna

algo conhecido com um certo grau de certeza e cujo significado se estende além do que é efetivamente medido para um fenômeno de interesse maior.

Na avaliação do desempenho da iluminação natural é recomendado o uso de alguns indicadores, como o fator de luz diurna (FLD) e o coeficiente de luz diurna (CLD) que, apesar de haverem sido propostos há algumas décadas, continuam sendo utilizados na avaliação de projetos até hoje. Esses indicadores e outros mais recentes, propostos com o mesmo fim, são apresentados e discutidos na sequência.

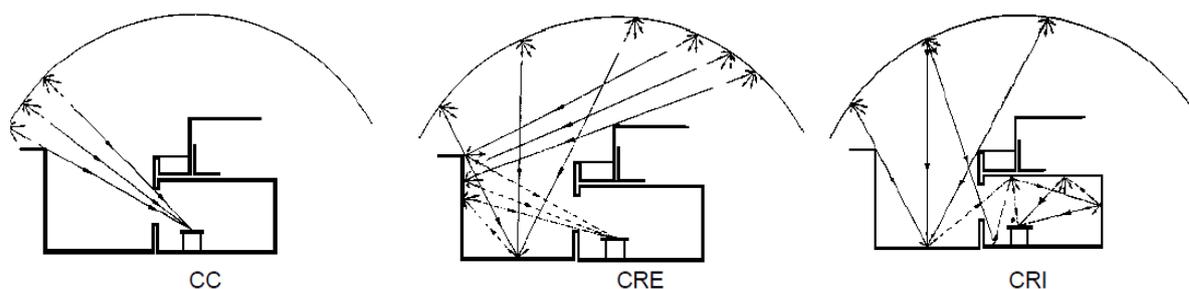
2.1.4.1 Fator de luz diurna (FLD) ou Daylight factor (DF)

O fator de luz diurna (FLD), ou *daylight factor* (DF), foi criado para contornar o problema da variação na disponibilidade da luz natural (PEREIRA, 2006) e é definido como a razão entre a iluminância interna de um determinado ponto no interior e a disponibilidade de luz natural num plano horizontal exterior. Seus valores, expressos em percentagens, são determinados a partir de cálculos baseados num céu encoberto desobstruído (LI, 2010) e, por considerar essa condição de céu, o FLD é insensível à variação da orientação do edifício (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

O FLD também pode ser entendido como a soma de três componentes (ABNT, 2005b, GHISI; TINKER, 2005), ilustradas na Figura 12:

- a componente de luz advinda diretamente da abóbada celeste (CC);
- a componente refletida nas superfícies externas que penetram pelas aberturas (CRE); e
- a componente refletida nas superfícies internas do ambiente e que são direcionadas ao ponto considerado (CRI).

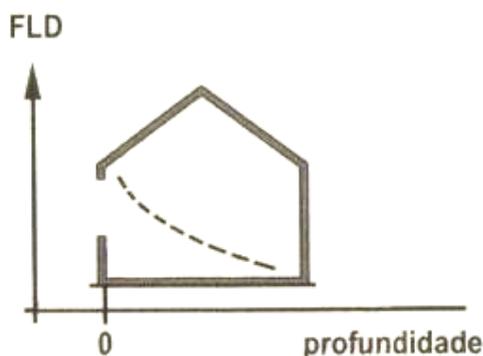
Figura 12 – Componentes da luz natural que alcançam um ponto no interior do edifício.



Fonte : SOTERAS, 1985 *apud* ABNT, 2005b, p.4.

Este indicador é função da área e posição das aberturas, das refletâncias das superfícies, do nível de transmissão das vidraças, ou seja, das variáveis arquitetônicas, e demonstra a quantidade de luz difusa que adentra os interiores arquitetônicos (BROWN; DEKAY, 2004, VIANNA; GONÇALVES, 2007), diminuindo à medida em que o ponto se afasta das aberturas (Figura 13).

Figura 13 – Decréscimo do FLD com a profundidade.



Fonte: CORBELLA; YANNAS, 2003, p. 245.

Segundo a NBR 15.215-3 (ABNT, 2005b, p. 2):

Assim, o DF pode ser utilizado como critério para comparar o desempenho de diferentes sistemas de iluminação natural e ser facilmente convertido em iluminâncias internas, multiplicando-o por uma iluminância externa apropriada.

Assim, na avaliação de ambientes utilizando o FLD, é importante considerar que cada um dos pontos no interior terá sempre um único valor. O que irá variar é o valor absoluto dos níveis de iluminância no ponto considerado, que aumentam ou diminuem ao longo do dia e do ano, conforme a disponibilidade de luz exterior (LI, 2010).

A abordagem do FLD, entretanto, não é flexível o suficiente para prever as variações dinâmicas da luminosidade do céu ao longo do dia e do ano (NABIL; MARDALJEVIC, 2005 *apud* LI, 2010). Li (2010) aponta três principais dificuldades no uso do FLD como indicador: a) a questão do acesso a um plano horizontal desobstruído; b) a variabilidade das condições de céu; e c) para um ambiente iluminado por aberturas laterais, a medição externa é afetada por áreas do céu que podem contribuir muito pouco para os níveis de iluminação no interior. Porque o método não inclui a luz direta do sol, a iluminância total nos ambientes é frequentemente subestimada, sobretudo em edificações que utilizam estratégias de luz natural baseadas na luz solar direta refletida, como o caso das prateleiras de luz e átrios (PEREIRA, 2006).

Ainda assim, segundo Nabil e Mardaljevic (2006), apesar da ausência de realismo e da idealização que o fator de luz diurna pressupõe, tanto projetistas quanto alguns referenciais e normas ainda utilizam esse indicador. Os autores acrescentam que, meio século após a sua proposição, o FLD persiste como forma de avaliação dominante, mais pela sua simplicidade inerente do que por sua capacidade de representar uma realidade.

Foi em função dessas dificuldades, que o conceito original do fator de luz diurna foi estendido para incluir outras condições de céu.

2.1.4.2 Coeficiente de luz diurna (CLD) ou Daylight coefficient (DC)

Segundo Li (2010), as iluminâncias no interior de um ambiente não são exatamente proporcionais à iluminância externa. Elas dependem da exata distribuição das luminâncias do céu naquele instante, porque cada ponto no interior recebe luz proveniente apenas de certas áreas do céu e as iluminâncias no ambiente não são igualmente sensíveis às variações dessa distribuição (LI, 2010).

Tregenza e Waters (1983 *apud* LI, 2010) desenvolveram o conceito de coeficiente de luz diurna (CLD), ou *daylight coefficient* (DC), que considera as modificações na luminâncias do céu e oferece uma forma mais efetiva de calcular a iluminância interior, sob várias condições de céu e posições do sol. Assim, o CLD depende da geometria do ambiente, das condições do exterior, das refletâncias das superfícies e da transmitância das aberturas (LI, 2010).

Algumas pesquisas utilizando o CLD foram conduzidas e este indicador se mostrou de acordo com as informações obtidas em medições (LI; LAU; LAM, 2004 *apud* LI, 2010; LI; TSANG, 2005 *apud* LI, 2010) e, embora as avaliações envolvendo o CLD consumam normalmente mais tempo que aquelas que utilizam o FLD, seu método é considerado mais preciso (LI, 2010).

2.1.4.3 Potencial de Aproveitamento da Luz Natural (PALN)

O PALN, apresentado na tese de Souza (2003), consiste num índice que mede o potencial de conservação de energia elétrica dado por um sistema de iluminação que integra luz natural e artificial. O indicador representa a percentagem de horas, dentro do horário de utilização do ambiente, em que a iluminação natural poderá substituir ou complementar a luz artificial (AMORIM, 2000 *apud* TOLEDO, 2008).

A metodologia proposta por Souza (2003) considera três tipos de estratégias de controle: liga/desliga, três passos² e dimerização. Segundo o autor, o potencial de economia de energia despendida em iluminação artificial é função das estratégias de controle adotada, mas também da iluminância de projeto, do sistema de iluminação natural (PAF, DPS, AHS, AVS, fator solar dos vidros) e da profundidade do ambiente.

Quanto menor a iluminância de projeto, maior é o potencial de economia de energia, porque um pequeno valor de iluminância pode ser facilmente alcançado pela luz natural, reduzindo-se a necessidade de acionamento da iluminação artificial. De maneira similar, o aumento na profundidade do ambiente aumenta a necessidade de uso da iluminação artificial, reduzindo-se o PALN (SOUZA, 2003). O sistema dimerizável é o que proporciona o maior PALN, dentre as estratégias de controle analisadas pelo autor, já que a dimerização permite que o sistema artificial forneça a quantidade exata de luz artificial que possibilite alcançar a iluminância de projeto quando somado à iluminação natural.

No cálculo do PALN, é considerada a probabilidade de ocorrência dos três principais tipos de céu padrão CIE – céu claro, céu parcialmente encoberto e céu encoberto – durante um ano na região em que se realiza a análise. Este indicador é expresso por meio de um valor percentual único que representa todo o ambiente, diferente dos demais indicadores, que oferecem um valor específico para cada ponto no seu interior.

2.1.4.4 *Autonomia da luz diurna (ALD) ou Daylight autonomy (DA)*

A autonomia da luz diurna (ALD), designado pela literatura internacional como *daylight autonomy* (DA), é expresso como uma percentagem das horas do ano trabalhado que atingem ou ultrapassam a iluminância de referência, geralmente 500 lx. A ALD é conceitualmente semelhante ao PALN, embora considere apenas o percentual de horas, no período de ocupação de uma edificação, em que a iluminação artificial pode ser substituída pela luz natural (CARLO; PEREIRA; LAMBERTS, 2004), ou seja, o período em que a luz natural é suficiente para atender às necessidades dos ocupantes. A principal diferença entre a ALD e os índices anteriores é o tipo de céu considerado, ou seja, o céu de Perez *et al.* (1990).

Os autores Nabil e Mardaljevic (2006) apontam que a autonomia da luz natural é de utilidade restrita porque falha em dar significância às iluminâncias abaixo da referência (por exemplo,

² O interruptor de três passos, segundo Souza (2003), é utilizado em luminárias que possuem duas lâmpadas. Assim, existem três opções de acionamento: duas lâmpadas acesas; duas lâmpadas apagadas; e apenas uma lâmpada acesa, quando a luminária passa a fornecer 50% do fluxo luminoso total.

500 lx), mas que são conhecidamente valorizadas pelos ocupantes e apresentam o potencial de dispensar toda ou parte da iluminação artificial complementar. Além disso, tal como o PALN, a ALD não leva em conta as iluminâncias que excederam o limite superior recomendado. Isso é importante porque altos níveis de iluminância estão fortemente associados ao desconforto visual e aos ganhos térmicos excessivos (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

2.1.4.5 Iluminância útil da luz natural (IULN) ou *Useful daylight illuminance (UDI)*

A mesma informação de iluminâncias utilizada para determinar o ALD pode ser processada para informar a IULN, que indica a percentagem das horas do ano em que a denominada iluminância útil é alcançada. As iluminâncias úteis são definidas por aquelas que estão no intervalo de 100 lx e 2000 lx, limites definidos pelos autores com base numa revisão abrangente de informações recentes em áreas de estudo do comportamento dos usuários sob condições de luz natural (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

Parte-se do princípio de que se a iluminância natural apresenta níveis muito baixos, ela pode não contribuir para a percepção do ambiente visual e se, ao contrário, apresenta níveis muito altos, pode gerar desconfortos (NABIL; MARDALJEVIC, 2006). Assim, os autores defendem o uso da IULN como indicador de luz natural e afirmam que, segundo a revisão por eles realizada:

- Iluminâncias inferiores a 100 lx são normalmente consideradas insuficientes;
- Iluminâncias no intervalo de 100 lx a 500 lx são consideradas efetivas como única fonte de iluminação ou em conjunto com a luz artificial;
- Iluminâncias no intervalo de 500 lx a 2000 lx são freqüentemente percebidas como desejáveis ou, ao menos, toleráveis; e
- Iluminâncias superiores a 2000 lx comumente produzem desconforto térmico ou visual, ou ambos.

Tanto a ALD quanto a IULN são expressos em termos de percentagem no ano trabalhado (NABIL, MARDALJEVIC, 2006) e apresentam um valor para cada ponto no interior. Para esses autores, o IULN oferece os meios de comunicar as características significantes da análise climática de forma concisa e inteligível. Além disso, a IULN fornece uma avaliação mais informativa e abrangente das condições de luz natural que aquelas obtidas a partir do ALD (NABIL, MARDALJEVIC, 2006). Apesar disso, segundo os pesquisadores, o conceito

de IULN é ainda muito recente e demanda estudos adicionais a fim de determinar se o alcance de altos níveis de IULN são realmente um indicador do baixo consumo de energia para fins de iluminação na maioria dos edifícios e os seus impactos na demanda por condicionamento de ar.

2.2 *A questão energética*

Nas últimas décadas o mundo intensificou o debate acerca da questão energética, graças à crise internacional do petróleo, ocorrida em meados da década de 1970. Naquele período, os países dependentes do recurso, sobretudo Estados Unidos e Europa, passaram por dificuldades decorrentes da elevação dos preços do petróleo ao passo que as nações cuja matriz energética se baseava em fontes renováveis – como o Brasil, que possuía energia elétrica produzida principalmente por usinas hidrelétricas – foram relativamente menos influenciadas por tal crise (MME, 2008).

Apesar da crise não ter gerado um problema energético da mesma magnitude para o Brasil naquele momento, o consumo de energia elétrica veio crescendo a passos mais largos que a produção, chegando inclusive, em meados da década de 80 do século passado, a superá-la (DIEESE, 2001). Esse crescimento da demanda, associado tanto à ausência de investimentos na infraestrutura do setor energético brasileiro quanto a um longo período de chuvas abaixo da média, provocou o racionamento de energia elétrica (DIEESE, 2001), que ficou conhecido como o “apagão” de 2001, com impactos negativos para a economia nacional e punições àqueles que não alcançassem o percentual de economia estabelecido.

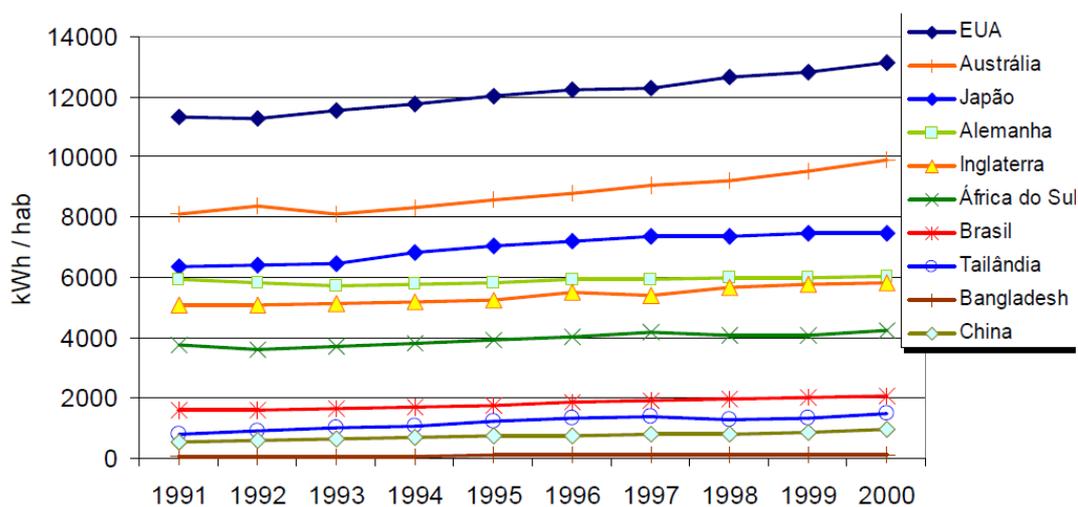
Os benefícios associados à adoção de energia proveniente de fontes renováveis são, muitas vezes, justificados por questões ambientais, como a redução das emissões de carbono e dos impactos ambientais associados à produção e armazenamento da energia, mas guardam também motivos de ordem econômica, ao serem minimizadas as possibilidades de crises futuras decorrentes da falta desses recursos.

Embora grande parte da energia elétrica consumida no país seja produzida a partir de fontes renováveis – com 76% da energia elétrica advinda de usinas hidrelétricas em 2009 –, sabe-se que o Brasil possui uma capacidade instalada de cerca de 33% do seu potencial hidrelétrico (MME, 2010) e a expansão da geração hidrelétrica tem encontrado fortes entraves associados à preservação do ambiente (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007, CARLO, 2008). Essa limitação incentiva a construção de novas usinas geradoras, tais como as termelétricas –

com alta produção de CO₂ proveniente da queima de combustíveis – e as nucleares – das quais a segurança tem sido tema de discussões recentes após os acidentes naturais ocorridos no Japão (CRISE..., 2011; GOZI, 2011). Algumas previsões indicam que a participação da energia hidrelétrica na oferta de eletricidade – que era de 90% em 2005 –, cairá para níveis pouco superiores a 70% em 2030 (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Atualmente diversos países têm se esforçado no sentido de frear o aumento do consumo de energia *per capita* e, nesse contexto, o Brasil apresenta um consumo de energia por habitante ainda bastante baixo em comparação ao consumo de países desenvolvidos, conquanto crescente, com um aumento de 24% entre 1991 e 2000, conforme demonstra a Figura 14 (LAMBERTS *et al.*, 2007).

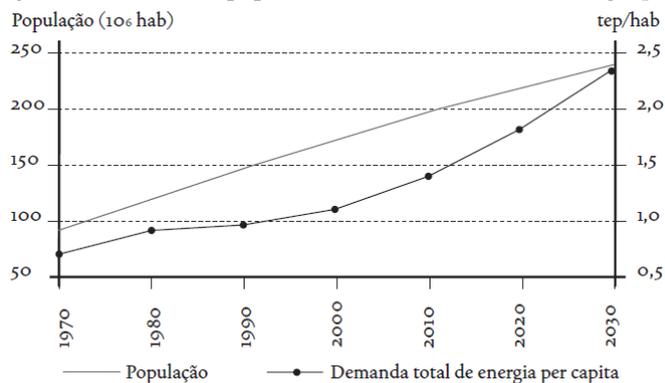
Figura 14 – Evolução do consumo de energia elétrica em países referenciais.



Fonte: LAMBERTS; CARLO, 2004 *apud* LAMBERTS *et al.*, 2007.

Esse crescimento do consumo de energia está associado ao aumento da população e ao aumento do Produto Interno Bruto – PIB (Figura 15). Entre 1970 e 2000, a população brasileira aumentou mais de 80% ao passo que a demanda por energia primária quase triplicou, com projeções que indicam forte crescimento da demanda de energia nos próximos anos (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Figura 15 – Evolução do crescimento populacional e da demanda de energia *per capita* no Brasil.

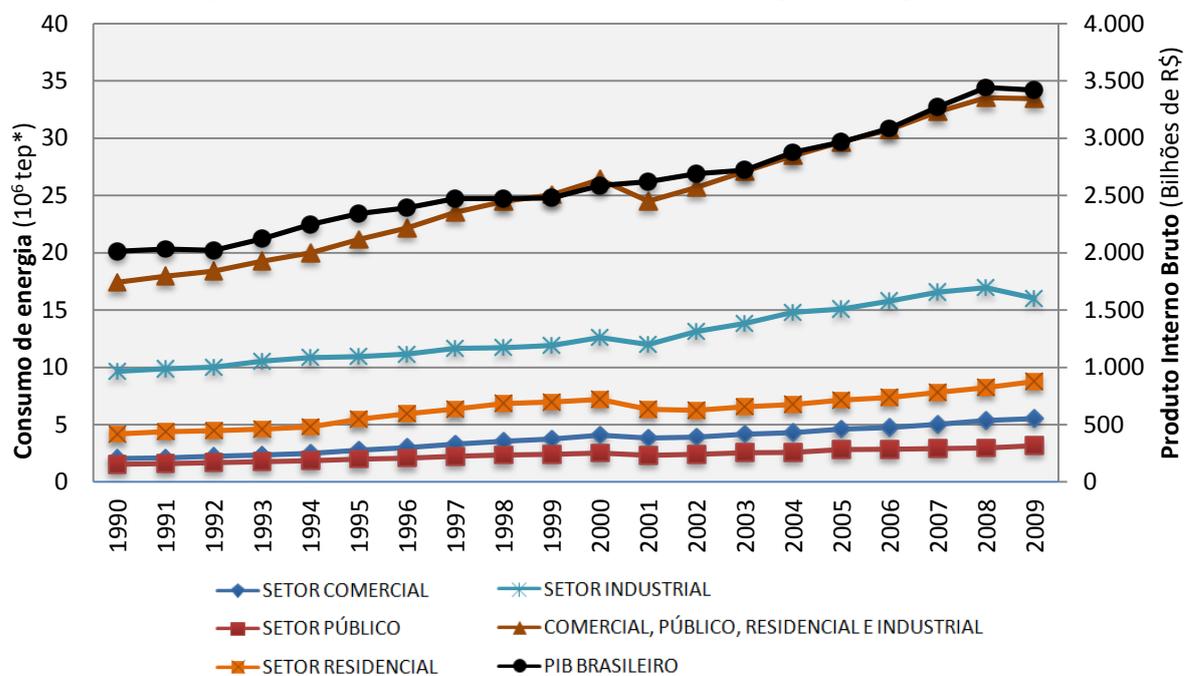


*tep: toneladas equivalentes de petróleo.

Fonte: EPE *apud* TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007.

A Figura 16 mostra o consumo de energia elétrica por setor no intervalo de 20 anos compreendidos entre 1990 e 2009 e a relação entre o aumento do consumo de energia com o crescimento do PIB. Os gráficos indicam um consumo ascendente ao longo do período, com intervalos curtos de redução no consumo de energia, correspondentes ao ano de 2001 – por consequência do apagão –, e no ano de 2009, influenciado pela queda de consumo no setor industrial que provocou uma queda no PIB. Observa-se que o consumo total de energia tem aumentado mais rapidamente que o PIB, o que indica a necessidade de adoção de estratégias para a racionalização do uso da energia no país.

Figura 16 – Crescimento do PIB e do consumo de energia elétrica por setor.



*tep: toneladas equivalentes de petróleo.

Fonte: Extraído e adaptado de MME, 2005, MME, 2010, IBGE *apud* BCB, 2011.

2.2.1 Eficiência energética nas edificações

Uma das estratégias que podem ser adotadas para minimizar o aumento da demanda de energia e amenizar os prejuízos decorrentes da sua geração é a utilização eficiente dos recursos, ou eficiência energética, que é a obtenção de um mesmo serviço com reduzido consumo de energia (LAMBERTS, DUTRA, PEREIRA, 1997). Assim, uma edificação energeticamente eficiente é aquela que, para garantir o atendimento às exigências de conforto térmico e visual dos ocupantes, gasta menos energia que uma edificação de referência.

Segundo Carlo (2008), até 2001 não havia normas ou legislação a respeito de eficiência energética em edificações no Brasil. Após o racionamento de energia ocorrido em 2001 foi criada a Lei 10.295, que trata da Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, regulamentada pelo Decreto nº 4059 de 19 de dezembro de 2001, que estabeleceu que deveriam ser criados “níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país, bem como as edificações construídas” (BRASIL *apud* CARLO, 2008, p. 4). Foi a partir deste decreto que se formou o “Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações no País” com o objetivo de propor uma forma de regulamentar as edificações brasileiras com vistas ao uso racional da energia elétrica (BRASIL, 2001 *apud* CARLO, 2008).

Segundo Lamberts, Ghisi e Ramos (2006), o desempenho térmico e energético de um edifício é consequência de decisões projetuais, sobretudo aquelas tomadas nas fases iniciais de concepção do projeto, tais como a volumetria, orientação das fachadas, as áreas, o posicionamento e sombreamento das aberturas, os sistemas construtivos de paredes e coberturas, dentre outros. Essas decisões possuem uma estreita relação com o clima do local em que a edificação se insere, entretanto, existem também equipamentos consumidores de energia elétrica cujo consumo está dissociado do local de implantação. O consumo de energia desses equipamentos depende da eficiência elétrica dos mesmos e do tempo de utilização, e são representados pela iluminação artificial, computadores, impressoras, conforme mostra a Figura 17 (PEDRINI, 2011).

Figura 17 – Exemplos de equipamentos consumidores de energia nas edificações.



Fonte: PEDRINI, 2011, p.16

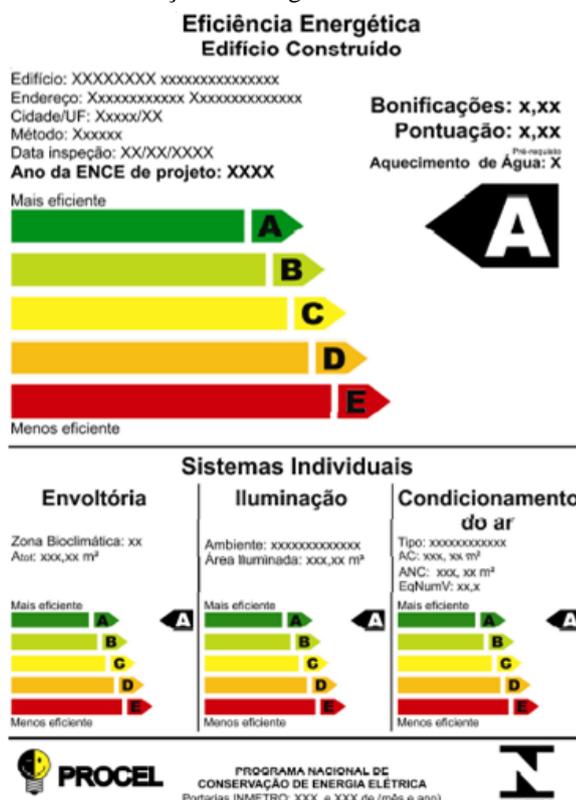
Em sua tese de doutorado, Carlo (2008) buscou definir equações matemáticas que pudessem prever o consumo energético das edificações não-residenciais, dando origem à metodologia expressa no programa conhecido como “PROCEL Edifica”, que em um primeiro momento permitiu a avaliação apenas das edificações comerciais, públicas e de serviços, mas que atualmente possui metodologia específica para avaliação da eficiência energética em edificações residenciais (INMETRO, 2012). A etiqueta de eficiência energética do PROCEL Edifica expedida pelo INMETRO representa o esforço brasileiro em reduzir o consumo de energia elétrica por meio de uma regulamentação, a princípio voluntária, do desempenho energético das edificações.

O regulamento técnico da qualidade para eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos (RTQ-C) foi embasado em análise de regressão múltipla das variáveis que influenciam no consumo de energia total nessas edificações a partir de um levantamento realizado em mais de mil edifícios brasileiros, localizados em 14 cidades, a fim de estabelecer equações capazes de prever o consumo energético desse grupo de edifícios com base em informações disponíveis em fase de projeto, considerando-se o local de implantação (SIGNOR; WESTPHAL; LAMBERTS, 2001, CARLO, 2008).

O RTQ-C, método aplicável aos edifícios comerciais, classifica as edificações quanto ao desempenho energético da envoltória, do sistema de iluminação artificial e sistema de condicionamento de ar (Figura 18) conforme o nível de eficiência, avaliando-o de A até E, sendo A o mais eficiente e E o menos eficiente. Nas equações de desempenho energético da envoltória desses edifícios, são consideradas variáveis influenciadas pela radiação solar tais como a absorvância e transmitância térmica da envoltória, a área e sombreamento da abertura e o fator solar dos vidros, dentre outros aspectos da edificação, de ordem geométrica

(INMETRO, 2010a). Essa relação entre a radiação solar (condição climática local) e o desempenho da edificação só é medida atualmente no PROCEL em termos de carga térmica, ou seja, uma mesma edificação comercial consumirá mais energia para fins de condicionamento de ar quanto mais quente for o clima local (PEDRINI, 2011).

Figura 18 –Etiqueta nacional de conservação de energia em edifícios comerciais expedida pelo INMETRO.



Fonte: INMETRO, 2010b, p. 15.

Os benefícios para eficiência energética proporcionados pela introdução de luz natural nas edificações comerciais e a conseqüente redução na demanda por iluminação artificial complementar ainda não são abordados de forma abrangente na versão atual do RTQ-C. Entretanto, vários estudos em âmbito nacional e internacional têm sido realizados no intuito de oferecer esclarecimentos a respeito do potencial de redução de consumo energético dado pelo uso da luz natural nos interiores arquitetônicos.

2.2.2 Estudos sobre as implicações energéticas do uso da luz natural em edificações

Apesar dos benefícios oferecidos pela introdução da luz natural nos interiores arquitetônicos, sua utilização nos edifícios deve ser feita cautelosamente. Segundo Corbella e Yannas (2003), toda a energia empregada para iluminar se transforma em energia térmica ao final do processo e, assim, os esforços em aumentar os níveis de iluminação nos interiores, por meio da

proposição de grandes aberturas envidraçadas, por exemplo, podem gerar um incremento indesejável de carga térmica nas edificações.

Para garantir o conforto térmico necessário à manutenção das atividades humanas nas edificações, o calor excedente em edificações comerciais, é normalmente retirado dos interiores pelos sistemas de condicionamento de ar que, por sua vez, são grandes consumidores de energia, responsáveis, no Brasil, por cerca de 47% do consumo de energia elétrica em edificações comerciais atendidas em alta tensão (CORREIA *apud* CARLO, 2008). Isso significa que as vantagens proporcionadas pelo uso da luz natural são aparentemente conflitantes com os ganhos térmicos provenientes da radiação solar, sobretudo em regiões tropicais.

Entretanto, se por um lado a iluminação natural excessiva pode aumentar o consumo energético, por outro, o provimento de quantidades adequadas de luz natural nos interiores pode estar associado à redução no consumo de energia em função de dois aspectos: a) a luz natural substitui a luz artificial – com benefícios econômicos, além de favorecer a saúde e o bem-estar dos ocupantes; e b) reduz os ganhos térmicos provenientes da dissipação de calor dos equipamentos do sistema de iluminação artificial.

A correta aplicação de estratégias de iluminação natural é capaz de aumentar significativamente a qualidade da iluminação nos interiores arquitetônicos e, paralelamente, reduzir o consumo de energia de edifícios. Em virtude das recentes preocupações econômicas e ambientais dadas pelo impacto do uso da energia elétrica, a utilização de luz natural nas edificações se tornou uma estratégia fortemente recomendada pelos sistemas de avaliação de edifícios e intensamente investigada por universidades e pesquisadores em todo o mundo.

Pesquisadores belgas avaliaram o impacto da economia com iluminação no consumo total de energia em edifícios de escritório provenientes do uso da luz natural, por meio de simulações computacionais da iluminação natural e do consumo energético. Os autores elaboraram protótipos de edifícios com nove diferentes configurações de fachadas, voltadas para as quatro orientações principais e utilizaram três diferentes combinações de coeficientes de reflexão das superfícies internas. Dados horários do consumo com iluminação artificial foram calculados no *software Superlink* e usados como *inputs* no *software TRNSYS*, que calculou o consumo de energia para um ano inteiro (BODART; HERDE, 2002). O estudo realizado por eles não investigou os efeitos do uso de dispositivos de proteção solar.

Esse estudo permitiu determinar os principais parâmetros arquitetônicos que influenciam o consumo com iluminação artificial: o fator de transmissão do vidro; a posição, área e orientação das aberturas; a refletância das superfícies internas; o sistema de acionamento da luz artificial; e a largura do ambiente – quanto mais largo, menor o consumo por unidade de área, em todas as orientações (BODART; HERDE, 2002). Os mesmos autores investigaram também os impactos das refletâncias e concluíram que, quanto mais altas, maior é o potencial de economia de energia para fins de iluminação artificial e que quanto menos luz os sistemas de iluminação natural deixam passar, menores são os seus efeitos na demanda por iluminação artificial. Concluíram, ainda, que o uso da luz natural pode reduzir de 50% a 80% o consumo com iluminação artificial, em um ambiente de 2,7 m x 5,4 m, ocupado 10 horas por dia, com fator de transmissão dos vidros de 61% e sem dispositivos de proteção solar (BODART; HERDE, 2002).

No Brasil, Carlo, Pereira e Lamberts (2004) investigaram o efeito das propriedades térmicas e óticas dos envidraçados da envoltória e o sistema de acionamento da iluminação artificial em protótipos de edificações, a fim de avaliar o equilíbrio entre a iluminação natural e as cargas térmicas para proposição de parâmetros de eficiência energética no código de obras do Recife. Os modelos apresentaram diferentes áreas de abertura nas fachadas (67% e 100%), voltadas para as quatro orientações principais, com diferentes fatores solar dos vidros (cinco valores) em diferentes horas e dias e sob diferentes condições de céu (claro, parcialmente encoberto e encoberto).

Foram simulados 720 casos no *software* Apolux, que realiza simulações estáticas, utilizando-se o PALN (SOUZA, 2003) como indicador de uso da iluminação natural. A probabilidade de ocorrência de cada tipo de céu foi simplificada obtida a partir do ano climático de referência e as simulações energéticas dos modelos foram realizadas no VisualDOE (CARLO; PEREIRA; LAMBERTS, 2004). Dentre os resultados obtidos por Carlo, Pereira e Lamberts (2004), destaca-se que alguns dispositivos de proteção solar ajudaram na distribuição da luz natural nos interiores e aumentaram, por consequência, o PALN do ambiente, como é o caso de dois diferentes sistemas de iluminação natural investigados pelos autores: um sistema com vidros de baixo fator solar e outro com vidros de alto fator solar sombreados por brises. Esses sistemas proporcionaram a penetração de cargas térmicas equivalentes, embora tenham fornecido condições de iluminação natural distintas. “Percebe-se então que a opção de sombreamento com brises proporciona maiores iluminâncias em comparação com a opção de uso de vidros com fatores solar mais baixos” (CARLO; PEREIRA; LAMBERTS, 2004, p. 7).

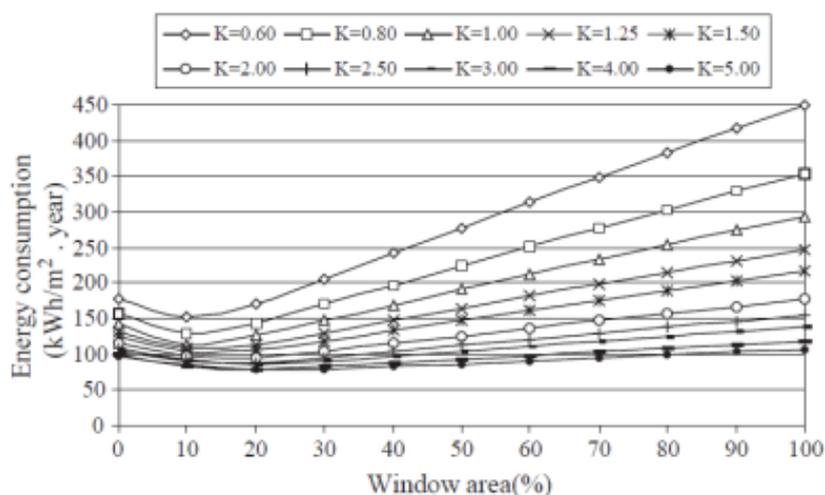
Ghisi e Tinker (2005) apresentaram o conceito de área ideal de janela (AIJ) e apresentaram uma metodologia para prever o potencial de economia de energia em iluminação considerando situações em que há uma integração da luz natural com a artificial, ou seja, quando a luz artificial é usada apenas para complementar a natural. A área ideal de janela (AIJ) corresponde ao percentual de abertura na fachada (PAF) cujo consumo de energia é o mais baixo, porque permite um balanço entre a quantidade de luz natural e as cargas térmicas introduzidas na edificação (GHISI; TINKER, 2005).

O estudo realizado por Ghisi e Tinker (2005) avaliou protótipos de edificações de dez diferentes dimensões (índice do ambiente - K^3) e cinco geometrias (1:1; 1:1,5; 1,5:1; 1:2 e 2:1), variando-se as áreas envidraçadas de 0% a 100%, com incrementos a cada 10%. Não foram investigados os efeitos dos dispositivos de proteção solar ou do fator solar dos vidros. O consumo energético dos modelos na cidade de Leeds (Reino Unido) e Florianópolis (SC) considerou as características construtivas e de ocupação padrão em cada uma dessas cidades e foi determinado por meio de simulações computacionais no *software VisualDOE* para edificações condicionadas artificialmente e sem proteções solares nas aberturas. O potencial de economia em iluminação foi avaliado para cada ambiente usando um método baseado no FLD.

O potencial de economia em iluminação abrangeu um intervalo de 10,8% a 44% para os protótipos simulados considerando-se uma iluminância horizontal externa de 5.000 lx (Leeds, Reino Unido) e de 20,6% a 86,2% para uma disponibilidade de 10.000 lx (Florianópolis-SC, Brasil). Os dados obtidos a partir das simulações foram plotados em gráficos que relacionam a área de janela com o consumo de energia, como mostra a Figura 19. O ponto de consumo mais baixo correspondeu à área ideal de janela.

³ O índice do ambiente é expresso pela letra K e é calculado em função das dimensões do ambiente e da altura do plano de trabalho ao teto (ABNT, 2005).

Figura 19 – Consumo de energia para ambientes de diversos tamanhos com geometria 2:1, orientação norte, em Florianópolis-SC.



Fonte: GHISI; TINKER, 2005.

Os resultados da metodologia aplicada por Ghisi e Tinker (2005) permitiram constatar, dentre outros, que quanto menores os ambientes e maiores a sua largura, maior é o potencial de economia de energia para iluminação, graças à luz natural que atinge diretamente as superfícies do plano de trabalho através das janelas. Em geral, ambientes com maiores larguras tendem a oferecer maior economia de energia com iluminação devido à integração da luz natural e artificial. Ambientes mais estreitos tendem a consumir menos energia graças às reduzidas trocas térmicas pelas janelas. Isso mostra que os ambientes cuja largura é maior que profundidade (geometrias 1,5:1 e 2:1) podem apresentar maiores níveis de iluminação natural, mas não necessariamente experimentam o menor consumo de energia. Pelo mesmo motivo, quanto maior o ambiente, menor é o consumo de energia por unidade de área (GHISI; TINKER, 2005).

Ainda no mesmo ano, estudos publicados por Ghisi, Tinker e Ibrahim (2005) deram continuidade à pesquisa anterior, ao compararem, em protótipos de edificações condicionadas artificialmente e sem proteções solares nas aberturas, as áreas ideais de janela para eficiência energética – determinadas por meio da metodologia proposta por Ghisi e Tinker (2005) – com as recomendações da literatura internacional para provimento de vistas para o exterior. A pesquisa verificou, ainda, o aumento percentual no consumo de energia decorrente da adoção de janelas de áreas diferentes da denominada área ideal de janela e os impactos da geometria dos ambientes no consumo de energia.

O estudo permitiu constatar que, na maioria dos casos, as AIJ's são menores que as áreas mínimas para garantir vista para o exterior em Florianópolis, tendência que foi observada para

outras sete capitais brasileiras consideradas na análise. Os ambientes de geometria profunda (1:1,5 e 1:2), entretanto, tenderam a apresentar, ao contrário, AIJ's maiores que a área mínima recomendada para garantir as vistas do exterior. Segundo Ghisi, Tinker e Ibrahim (2005), essa análise evidencia um conflito entre a AIJ e as recomendações da literatura quanto às vistas para o exterior.

Outras observações realizadas pelos autores incluíram a constatação de que quanto menores as dimensões do ambiente (menor índice do ambiente - K), maiores são os impactos no consumo de energia relacionado à adoção de áreas de janela diferentes da área ideal de janela. Como exemplo, esses impactos podem ser representados por incrementos no consumo de energia da ordem de 150% quando PAF's de 80% são adotados em ambientes cuja AIJ é 10%, como no caso de um ambiente em Florianópolis, de geometria 2:1, com $K=0,60$ e abertura orientada a norte. Ghisi, Tinker e Ibrahim (2005) concluíram que o consumo de energia aumenta quando também é aumentada a relação área de fachada e volume da sala ou a área de janela e área de piso. O consumo de energia por unidade de área diminui em ambientes mais profundos (GHISI; TINKER; IBRAHIM, 2005).

Estudos realizados por Didoné e Pereira (2010) propuseram uma metodologia para avaliar a eficiência energética de edificações contornando-se o problema no módulo de iluminação natural do *EnergyPlus*, que tende a superestimar os níveis de iluminância em profundidade nos ambientes (RAMOS; GHISI, 2010; DIDONÉ; PEREIRA, 2010). Os autores realizaram aquilo que eles chamaram de simulações integradas, ou seja, simulações dinâmicas da luz natural, com o *software Daysim*, cujos dados de saída, referentes às informações horárias da análise anual da iluminação natural, foram usados como dados de entrada no *software EnergyPlus*, para cálculo do consumo energético.

O estudo aplicou as simulações integradas para investigação do desempenho de modelos paramétricos com diferentes valores para profundidade, pé-direito, PAF, fator solar dos vidros, e ângulo de proteção solar vertical e horizontal nas quatro orientações. Assim, identificou os parâmetros mais adequados para a economia de energia a partir do aproveitamento da luz natural, comparando-se o desempenho dos modelos paramétricos ao desempenho de modelos básicos, representativos de baixa eficiência energética. Os modelos de baixa eficiência consideraram a iluminação artificial ligada durante todo o período de ocupação e os demais modelos consideraram seu acionamento apenas para complementar a iluminação natural. A análise do desempenho da luz natural foi realizada por meio da

comparação das porções de área do ambiente que atenderam a níveis pré-estabelecidos para a autonomia da luz diurna (ALD).

Essa pesquisa identificou uma tendência de redução no consumo de iluminação natural quando se aumenta a relação entre área de fachada e área piso, e uma tendência de redução no consumo do ar condicionado quando diminui a relação entre a área de fachada e o volume do modelo, confirmando a relação entre os parâmetros geométricos e o consumo de energia, apontado e discutido por Ghisi, Tinker e Ibrahim (2005).

Ainda, o uso do controle do sistema de iluminação artificial, acionado apenas quando necessário para complementar a luz natural, proporcionou uma redução no consumo de energia para fins de iluminação em todos os modelos investigados e reduziu o consumo de energia com o ar condicionado. A redução final variou de 12% a 52% (GHISI; TINKER; IBRAHIM, 2005).

De maneira geral os estudos que vêm sendo realizados nos últimos anos avaliam, ainda que de forma superficial, o efeito dos dispositivos de proteção solar (DPS) e os ângulos de sombreamento (AHS e AVS) no desempenho luminoso e energético simultaneamente. As pesquisas acerca do desempenho energético de protótipos de edificações que utilizam a luz natural ainda carecem de informações complementares e mais precisas a respeito do impacto dos diferentes dispositivos de proteção solar (DPS) e dos ângulos de sombreamento (AHS e AVS) por eles proporcionados.

2.3 Sistemas de avaliação de edifícios

As recentes discussões internacionais acerca do desenvolvimento sustentável, associados ao reconhecimento de que a construção civil é um dos principais consumidores de recursos e causadores de impactos ambientais, desencadearam o aparecimento de sistemas de avaliação do desempenho ambiental das edificações.

O primeiro sistema desse tipo a ser lançado foi o *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM), desenvolvido no Reino Unido em 1990 (BALDWIN *et al.*, 1990 *apud* SILVA, 2003) por uma parceria entre pesquisadores do *Building Research Establishment* (BRE) e do setor privado com a indústria, visando determinar e verificar o desempenho ambiental de edifícios ingleses (SILVA, 2003). Além de fornecer orientação e alternativas para minimizar os efeitos indesejáveis dos edifícios no

ambiente e de promover a qualidade no ambiente interno das edificações, outros objetivos do sistema apontados por Baldwin *et al.* (*apud* SILVA, 2003) foram:

- Distinguir edifícios de menor impacto ambiental no mercado;
- Encorajar práticas ambientais de excelência no projeto, operação, gestão e manutenção de edificações;
- Definir critérios e padrões, indo além daqueles exigidos por lei, normas e regulamentações; e
- Conscientizar proprietários, ocupantes, projetistas e operadores quanto aos benefícios de edifícios com menores impactos ambientais.

Com propósitos semelhantes e inspirados pelo pioneirismo inglês, outras instituições, em diversos países, desenvolveram seus próprios sistemas de avaliação de edifícios, destacando-se, dentre eles, os sistemas apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Síntese dos principais sistemas de avaliação de edifícios.

País	Sistema	Instituição	Observações
Reino Unido	BREEAM (<i>BRE Environmental Assessment Method</i>)	<i>Building Research Establishment</i> – BRE	Sistema pioneiro, desenvolvido em 1990 (SILVA, 2003)
Estados Unidos	LEED (<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>)	<i>United States Green Building Council</i> – USGBC	Sistema lançado em 1999 baseado no BREEAM (USGBC, 2001 <i>apud</i> SILVA, 2003)
Internacional	SBTool (<i>Sustainable Building Challenge</i>)	<i>International Initiative for a Sustainable Built Environment</i> – iiSBE	Sistema proposto com a intenção de ser adaptado a diferentes contextos (SILVA, 2003). Até 2006 foi denominada GBTool (SOUZA, 2008)
Hong Kong	HK-BEAM (<i>Hong Kong Building Environmental Assessment Method</i>)	HK-BEAM Society	Lançado em 1996 e baseado no BREEAM (HK-BEAM SOCIETY, 2004)
Japão	CASBEE (<i>Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency</i>)	<i>Institute for Building Environment and Energy Conservation</i> – IBEC (JSBC, 2010)	A versão de 2002 foi baseado na GBTool (JSBC, 2002 <i>apud</i> SILVA, 2003)
França	HQE (<i>Haute Qualité Environnementale</i>)	Certivéa - <i>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment</i> (CSTB)	(FCAV, 2007)
Austrália	Green Star	<i>Green Building Council of Australia</i> – GBCA	Baseado no BREEAM e no LEED (GBCA, 2005)
Brasil	AQUA (Alta Qualidade Ambiental)	Fundação Carlos Alberto Vanzolini - FCAV	Adaptação do francês HQE para a realidade brasileira (FCAV, 2007)
África do Sul	Green Star SA	<i>Green Building Council of South Africa</i> – GBCSA	Lançado em 2008 e baseado no australiano Green Star (GBCSA, 2012)

De modo geral, os sistemas de avaliação ambiental de edifícios consistem basicamente em uma listagem de critérios de desempenho ambiental, associados ou não a pré-requisitos (itens de caráter obrigatório), aos quais os edifícios sob avaliação deveriam minimamente atender. A avaliação de um empreendimento segundo as metodologias apresentadas por esses sistemas gera uma pontuação final correspondente à somatória dos pontos dos critérios alcançados ou, em alguns casos, à ponderação de pesos e pontuações de diferentes critérios (SILVA; SILVA; AGOPYAN, 2003; SOUZA, 2008)

A adoção desses sistemas é normalmente feita em caráter voluntário e confere, conforme a pontuação final ou nível de desempenho alcançado, uma certificação ou “selo” ao empreendimento. Para Silva (2003), uma das vantagens oferecidas pela utilização dos sistemas de avaliação de edifícios é, dentre outras, o reconhecimento, pelo mercado, das empresas e profissionais que adotam práticas mais sustentáveis. O Quadro 3 lista aplicações e vantagens, identificados por Silva (2000 *apud* SILVA, 2003), da implementação dos sistemas de avaliação ambiental de edifícios.

Quadro 3 – Aplicações de avaliações de edifícios e vantagens oferecidas por sua implementação.

Aplicações da avaliação de edifícios	Vantagens oferecidas
Instrumentos para divulgação mercadológica	Melhoria da imagem/reconhecimento pelo mercado de empresas e profissionais que adotam práticas de projeto e construção mais sustentáveis
Suporte à introdução de sistemas de gestão ambiental	Aquecimento do mercado para edifícios e produtos de construção com maior desempenho ambiental
Especificação do desempenho ambiental de edifícios	Embasamento da definição e o entendimento do que é um edifício sustentável
Auxílio a projeto	
Estabelecimento de normas de desempenho ambiental	Acesso facilitado a financiamentos, acesso a novos mercados ou fortalecimento do nicho atual, perspectiva de negócios no longo prazo
Auditorias ambientais	Redução dos custos no longo prazo (uso de recursos financeiros e naturais) e maior lucratividade, qualidade do ambiente interno e satisfação dos clientes, redução de riscos (inclusive financeiros)

Fonte: SILVA, 2000 *apud* SILVA, 2003; SILVA, 2003.

Com relação à abrangência dos sistemas de avaliação de edifícios, Souza (2008) realizou um estudo em diferentes sistemas e apresentou um quadro sintetizando os aspectos por eles avaliados (Quadro 4).

Quadro 4 – Aspectos considerados pelos sistemas de avaliação de edifícios.

Métodos	BREEAM	LEED	CASBEE	Green Star
Aspectos avaliados	Gestão			Gerenciamento
	Saúde e conforto	Sítios sustentáveis	Ambiente interno	Qualidade do ambiente interno
	Uso de energia	Uso eficiente de água	Qualidade dos serviços	Energia
	Transporte	Energia e atmosfera	Ambiente externo (ao edifício) no terreno	Transporte
	Uso de água	Materiais e recursos		Água
	Uso de materiais	Qualidade do ambiente interno	Energia	Materiais
	Uso do solo	Inovação e processo de projeto	Recursos e materiais	Uso do solo e ecologia
	Ecologia local		Ambiente fora do terreno	Emissões
	Poluição			Inovação

Fonte: Adaptado de SOUZA, 2008.

Aqui, destaca-se que todos os sistemas apresentados por Souza (2008) contemplaram critérios associados aos aspectos “saúde e conforto” ou “qualidade do ambiente interno”, dentro dos quais, um rápido levantamento de critérios que compõem essa categoria nos diferentes sistemas permitiu verificar que a existência de preocupações quanto ao uso de luz natural nos interiores arquitetônicos é unanimidade (GBCA, 2005, FCAV, 2007, USGBC, 2005, USGBC, 2009, BRE, 2009, BRE, 2011, JSBC, 2010).

Entretanto, a forma como os critérios de luz natural têm sido abordados nesses sistemas tem sido alvo de questionamentos. Nabil e Mardaljevic (2006), por exemplo, investigaram o desempenho da luz natural de três diferentes sistemas: dois deles possuíam as aberturas sombreadas e o terceiro era desprovido de dispositivos de proteção solar. Apenas o último atendeu aos requisitos da luz natural estabelecidos pela metodologia de avaliação do sistema LEED⁴, embora tenha apresentado altos níveis de iluminância nas áreas mais próximas do perímetro da edificação, sugerindo a presença de ofuscamento e incremento de carga térmica no interior. Os outros dois apresentavam valores mais altos para as iluminâncias úteis da luz natural (IULN), sugerindo melhorias para o conforto visual e a eficiência energética, mas não atendiam aos requisitos desse sistema de avaliação.

Em um estudo acerca do ambiente visual proporcionado nos interiores de um edifício certificado pelo sistema LEED nos Estados Unidos, os autores registraram que, embora tenham reportado, de maneira geral, uma considerável satisfação visual, quando investigadas

⁴ Os autores não consideraram a necessidade de instalação de estratégias para controle do ofuscamento nesse sistema, como será visto adiante.

as causas de eventuais insatisfações, as respostas dos ocupantes apontaram que os reflexos da luz natural na tela nos computadores, a dificuldade de se operar os dispositivos de sombreamento e o excesso de luz natural foram as três causas de desconforto mais frequentes. Como as fachadas mais extensas do edifício estão orientadas a leste-oeste, o ofuscamento foi a maior questão para se alcançar o conforto visual. Os elementos de sombreamento nessas fachadas não funcionaram adequadamente provavelmente graças à sua pequena escala em relação ao tamanho das aberturas (HUA; OSWALD; YANG, 2011).

Se mesmo no local para onde o sistema de avaliação foi desenvolvido encontram-se falhas na metodologia de avaliação, é provável que a utilização dos mesmos em regiões geoclimáticas diferentes traga prejuízos ainda maiores. Silva, Silva e Agopyan (2003) destacam que as exigências para atendimento aos requisitos de iluminação natural propostas pelo LEED, por exemplo, refletem as latitudes pouco favoráveis dos países do hemisfério norte, mas não encontrariam dificuldades em serem alcançadas por edifícios brasileiros que atendam às exigências mínimas dos códigos de edificações. Para eles, um nível de exigência baixo como esse permite que a pontuação das edificações atinjam o limite superior das escalas de desempenho e o emprego de estratégias de iluminação natural não agreguem resultado ao item (SILVA, SILVA, AGOPYAN, 2003).

2.4 Simulação de edifícios

A simulação computacional é um instrumento utilizado para estimar, dentre outros, o desempenho luminoso e termo-energético de edificações. Os primeiros *softwares* destinados a esse fim foram desenvolvidos na década de 70 do século passado e funcionavam em computadores do tipo *mainframe* (MENDES *et al.*, 2005). A partir dos anos 90, com a popularização dos microcomputadores pessoais, o aumento da capacidade de processamento e memória e o envolvimento de grupos de pesquisa e empresas no desenvolvimento de interfaces compatíveis com o sistema operacional *Windows*, houve um aumento no número de usuários e de estudos realizados com as ferramentas computacionais (MENDES *et al.*, 2005).

Atualmente, a maioria dos usuários dessas ferramentas está ainda concentrada em centros de pesquisas de universidades e institutos na maioria dos países, com pouca transferência de tecnologia para o setor de projetos de arquitetura e engenharia. A exceção, entretanto, é observada na Alemanha, onde essas novas tecnologias já começam a ser utilizadas nos escritórios de projetos, com o desenvolvimento de edificações com altos níveis de eficiência energética (MENDES *et al.*, 2005).

No Brasil, a atividade de simulação se iniciou na década de 80, a princípio na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), sendo seguidas mais adiante pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Universidade Federal do Paraná (UFPR). Contudo, o marco da consolidação, no Brasil, do uso dos instrumentos computacionais para análise do desempenho de edifícios foi a realização, em agosto de 2001, da sétima edição da Conferência da Associação Internacional para a Simulação do Desempenho de Edificações (IBPSA), no Rio de Janeiro (MENDES *et al.*, 2005).

Vantagens como a possibilidade de controlar todas as variáveis dos modelos para análise do desempenho de sistemas, de visualização e comparação entre alternativas de projetos, sem a necessidade da construção de protótipos – com prováveis economias de tempo e recursos financeiros – bem como a oportunidade de análise de soluções por um período de tempo mais longo (LIMA, 2003 *apud* PEREIRA, 2006) ou mais aderido ao uso final (verões, períodos diurnos etc), são atrativos que têm contribuído para tornar o uso das ferramentas uma prática mais comum e os motivos pelos quais esse tipo de procedimento foi adotado na pesquisa.

Embora tenha havido algumas iniciativas para incentivar o uso dessas tecnologias no Brasil, os principais entraves à sua implementação são a complexidade das ferramentas existentes, a falta de *softwares* nacionais, as interfaces não amigáveis – que demandam uma grande quantidade de dados de entrada (MENDES *et al.*, 2005) –, os manuais incompletos (CHRISTAKOU, 2004) e a falta de confiança nos *softwares* existentes quando aplicados à realidade brasileira.

2.4.1 Simulações do desempenho da luz natural

Segundo Christakou (2004), a maioria dos *softwares* de visualização de modelos arquitetônicos tridimensionais não produz resultados matematicamente precisos. Pelo contrário, esses instrumentos costumam gerar imagens cuja imprecisão é usualmente observada na representação da iluminação, sobretudo a da luz natural.

As imagens não fisicamente fundamentadas produzidas por esses *softwares*, geralmente são complementadas por uma “luz ambiente”, utilizada para iluminar as áreas em sombra da cena, o que afasta a representação da realidade do espaço arquitetônico (WARD, 1998 *apud*

CHRISTAKOU, 2004). Essa manipulação, embora por vezes ofereça uma imagem que se parece a uma fotografia, falha em gerar resultados baseados na aplicação dos conceitos físicos da luz, não é capaz de prever a qualidade e a quantidade de luz no espaço (CHRISTAKOU, 2004) e, portanto, não possui validade como instrumento de predição da luz natural, ou seja, como simulação.

As simulações computacionais fundamentadas no comportamento físico da luz são realizadas por *softwares* que utilizam algoritmos capazes de calcular os valores das grandezas físicas da luz, tais como as iluminâncias e luminâncias, num dado ponto do interior, sob determinada condição de céu predefinida – no caso das simulações estáticas – ou durante o curso de um ano inteiro – nas simulações dinâmicas (REINHART, 2005 *apud* PEREIRA, 2006).

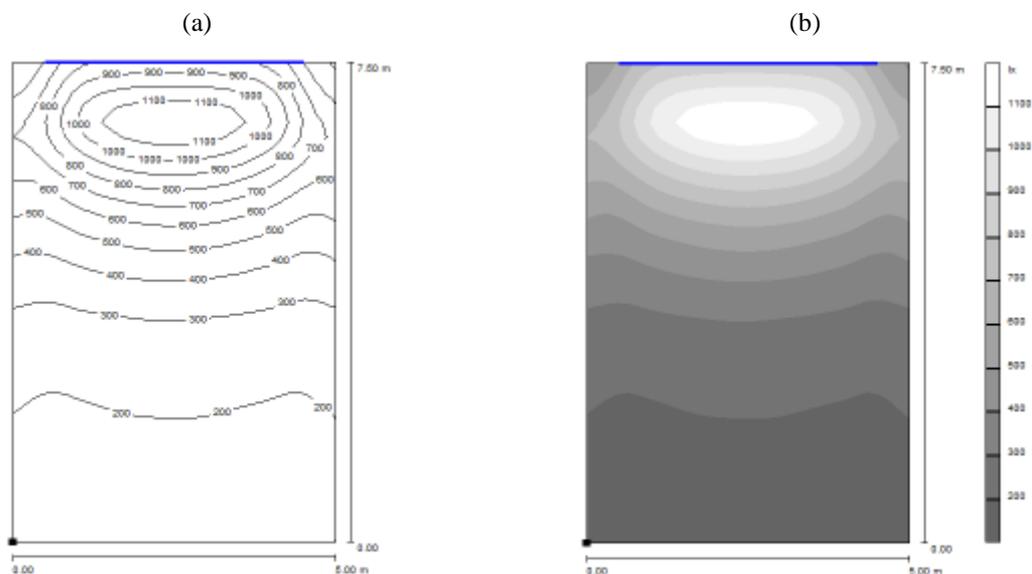
Os algoritmos mais utilizados no cálculo da iluminação são a radiosidade (*radiosity*) e o método do raio traçado (*ray-tracing*). O método da radiosidade está relacionado com a reflexão das superfícies difusoras, que são a maioria em um ambiente real. O *ray-tracing*, ou método do raio traçado, pode ser entendido como a “perseguição ao traçado deixado por um determinado raio luminoso” (CLARO, 1998) e está relacionado, sobretudo, com a reflexão nas superfícies especulares ou refletoras. *Softwares* conceitualmente atualizados utilizam o algoritmo da radiosidade na abordagem inicial e o complementam com o algoritmo *ray-tracing* (CLARO, 1998).

A maioria dos *softwares* de iluminação realiza simulações estáticas da luz natural, que são aquelas que utilizam modelos de céu padronizados, tais como o céu claro, o céu parcialmente encoberto e o céu encoberto. Para se proceder a uma análise global do desempenho dos sistemas de iluminação nas simulações estáticas, é importante realizar uma série de simulações da iluminação natural em diferentes horários e dias do ano, sob diferentes tipos de céu, considerando-se os horários de ocupação da edificação e a probabilidade de ocorrência dos tipos de céu no local, a fim de se conhecer o desempenho de determinado sistema sob diferentes condições quanto à disponibilidade de luz natural.

Os principais dados de entrada (*inputs*) em *softwares* de simulação estática correspondem à latitude do local; geometria do ambiente; à área, posição e orientação das aberturas; à transmissão luminosa dos elementos translúcidos; e às propriedades de refletância e coeficientes de manutenção (limpeza) das superfícies. Os principais dados de saída (*outputs*) fornecidos são os níveis de iluminâncias e luminâncias, fator de luz diurna, imagens

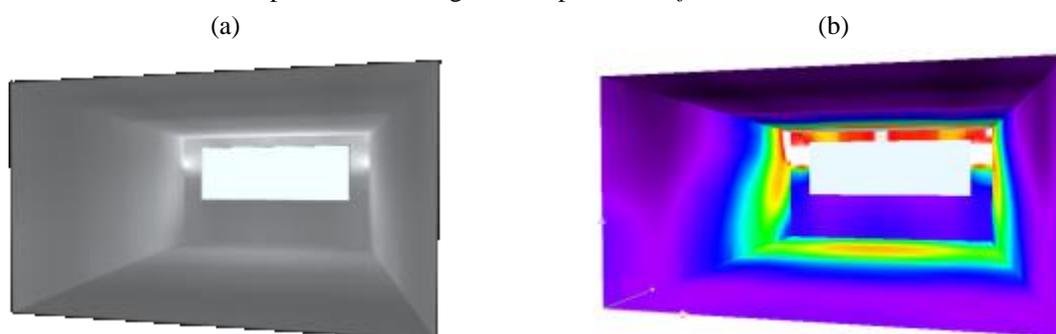
renderizadas do espaço arquitetônico, curvas de isolux, gráficos de cinzento e imagens em *false colour* (Figura 20 e Figura 21).

Figura 20 – Dados de saída em (a) curvas de isolux e em (b) gráficos de cinzento de um ambiente com prateleira de luz gerados a partir do *software DIALux*.



Fonte: A autora.

Figura 21 – Dados de saída em (a) imagem renderizada e em (b) imagem em *false colour* de um ambiente com prateleira de luz gerados a partir do *software DIALux*.



Fonte: A autora.

Nas simulações dinâmicas, além dos dados de entrada apontados anteriormente, é necessário importar o arquivo climático do ano de referência do local onde se realiza o estudo. Aqui, o modelo de céu utilizado é o de Perez *et al.* (1990), que converte os dados horários da radiação solar e outros dados meteorológicos em distribuição de luminâncias no céu. Os resultados das simulações dinâmicas podem incluir informações sobre o desempenho dos sistemas ao longo do ano, tais como valores de ALD e IULN.

Quanto à confiabilidade dos programas de previsão da luz natural, pode-se dizer que um modelo computacional somente será útil se os resultados obtidos pela previsão forem muito próximos dos existentes em ambiente real (CHRISTAKOU, 2004). Foi com o objetivo de avaliar a precisão dos resultados das ferramentas computacionais de iluminação natural que,

em 2006, a *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) divulgou o relatório CIE 171:2006.

O método proposto é constituído de vários testes aos quais os *softwares* precisam responder com certa precisão. Graças à sua simplicidade, a utilidade desses testes foi provada, demonstrando os pontos fortes e fracos dos programas ao definir o domínio das suas aplicabilidades. Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2005), os resultados dos testes que compõem o método permitem concluir sobre a precisão e capacidade dos programas em simular ou não os diferentes aspectos da propagação da luz separadamente, além de serem, essas verificações, úteis tanto para os desenvolvedores dos programas – que podem identificar e corrigir erros inesperados –, quanto para os usuários, que desejam saber mais sobre o programa que utilizam ou querem utilizar.

2.4.2 Simulações do desempenho energético

A partir da introdução de dados climáticos, das variáveis arquitetônicas, dos padrões de uso e ocupação do edifício, dos limites de conforto térmico e visual adotados, dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar utilizados na edificação, dentre outros, os *softwares* de simulação energética estimam o consumo de eletricidade da edificação para fins de condicionamento de ar e iluminação e oferecem, ainda, uma série de informações complementares para análise do desempenho térmico da edificação.

Os dados de entrada referentes à edificação se referem à geometria, às propriedades dos materiais – transmitância e absorvância de elementos opacos, fator solar e transmissão luminosa dos vidros, refletância das superfícies internas, etc. –, às informações referentes ao padrão de uso e ocupação da edificação – tipo de atividade realizada em seu interior, horários de ocupação – e aos sistemas e equipamentos instalados – sistema de iluminação e de climatização artificial.

As informações climáticas são utilizadas “para representar a influência do ambiente externo sobre a edificação” (RAMOS, 2008) e introduzidas nos *softwares* por meio da importação de um arquivo climático com dados horários de um ano de referência, denominado *Test Reference Year* (TRY), além de outros formatos, como as extensões CSV, TMY, EPW, etc. Os dados utilizados nesses arquivos são normalmente obtidos em estações meteorológicas de aeroportos e precisam ser tratados para serem utilizados pelos programas de simulação (RAMOS, 2008). As variáveis contidas nesses arquivos são: temperatura de bulbo seco,

temperatura de bulbo úmido, temperatura de solo, velocidade do vento, direção do vento, pressão barométrica, quantidade de nuvens, tipo de nuvens, altura das nuvens e radiação solar. Os arquivos com os dados climáticos de uma série de cidades brasileiras foram tratados e estão disponíveis no *site* www.labeee.ufsc.br/downloads, do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC (LABEEE, 2012).

A credibilidade dos resultados fornecidos pelos instrumentos computacionais de simulação energética de edificações pode ser avaliada pelo *BESTest*, um método utilizado pelos desenvolvedores e alguns usuários de *softwares* com a finalidade de testar e diagnosticar, dentre outros, as capacidades de simulação da envoltória externa dos edifícios. O método avalia o projeto e as ferramentas de análise relativas à sua habilidade de modelar adequadamente a dinâmica da envoltória dos edifícios, além de revelar as forças e fraquezas de um *software* de uma maneira metodológica (USDOE, 2011). Observa-se que investigações científicas independentes do *BESTest* também têm apresentado resultados de validação desses *softwares*.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esse capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento da pesquisa, que foram planejados em oito etapas não necessariamente sequenciais cronologicamente e consistiram em:

- I. Revisão bibliográfica;
- II. Recorte e caracterização do edifício comercial condicionado;
- III. Requisitos de iluminação natural nos sistemas de avaliação de edifícios;
- IV. Seleção dos *softwares* de simulação;
- V. Seleção das localidades;
- VI. Elaboração dos modelos;
- VII. Processo de simulação; e
- VIII. Cálculo de áreas e avaliação dos resultados.

3.1 Revisão bibliográfica

A primeira etapa dos procedimentos metodológicos consistiu na revisão bibliográfica, cujos principais resultados foram apresentados nos capítulos precedentes. Essa etapa se fundamentou em uma série publicações internacionais, sobretudo em artigos científicos disponíveis na base de dados da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e em publicações nacionais, tais como teses, dissertações e artigos científicos de revistas da área. Assim, foram estabelecidos os principais aspectos a serem abordados para o aprofundamento do tema e definição de objetivos e metodologia, com ênfase nos seguintes assuntos:

- Luz natural e eficiência energética nas edificações;
- Sistemas de avaliação de edifícios; e
- Simulação computacional de edifícios.

3.2 O edifício comercial artificialmente climatizado

A segunda etapa dos procedimentos metodológicos concentrou-se em realizar o recorte do objeto: o edifício comercial climatizado artificialmente. Neste trabalho, a tipologia de edifícios comerciais condicionados foi adotada em função dos seguintes aspectos:

- Apresenta maior número de métodos e resultados de avaliações (SILVA, 2003), destacando-se, dentre eles, os dos sistemas de avaliação de edifícios;
- Seus padrões de uso são mais facilmente identificáveis (SILVA, 2003), com ampla literatura disponível sobre aspectos como números de ocupantes, atividades desenvolvidas, horários de ocupação, etc., o que favorece a elaboração de modelos mais representativos e coerentes com a prática nacional;
- Graças ao alto custo de operação em longo prazo nesse tipo de edificação, o interesse por avaliações ambientais tende a ser potencializado neste segmento, sobretudo pela valorização sofrida por imóveis com eventual bom desempenho (SILVA, 2003). Em avaliações ambientais, incluem-se as avaliações de desempenho luminoso e energético; e
- No Brasil, o setor comercial e público respondeu por 26% do consumo de eletricidade em 2009 (MME, 2010). Nesse grupo têm participação considerável os edifícios de escritórios, sobretudo face à reprodução de modelos arquitetônicos importados e inadequados ao clima nacional (SILVA, 2003), tal como o Estilo Internacional, que ignora as particularidades do clima local e depende dos sistemas artificiais para propiciar condições de conforto nos interiores.

O edifício comercial artificialmente climatizado considerado nesse trabalho corresponde a uma torre de dez pavimentos tipo sobre pilotis. A quantidade de pavimentos proposta consistiu em uma forma de minimizar a influência da radiação recebida diretamente pela cobertura – elemento cujos impactos não são objeto dessa investigação e aumentariam sensivelmente o consumo de energia por unidade de área caso fosse proposto um modelo com poucos pavimentos – e o tempo requerido para as simulações –, considerando-se que quanto mais complexo o modelo, maior é a quantidade de tempo demandado para se processarem os cálculos.

A torre sobre pilotis foi adotada considerando-se que o pavimento abaixo do primeiro pavimento tipo é desprovido de envoltória e destinado, por exemplo, à guarda de veículos e,

portanto, não condicionado, excluindo-se, dessa forma, as influências da temperatura do solo no consumo de energia.

Outros aspectos referentes à caracterização do edifício comercial artificialmente climatizado encontram-se posteriormente descritos e justificados no item 3.6.

3.3 Requisitos de uso da luz natural nos sistemas de avaliação de edifícios

Na terceira etapa dos procedimentos metodológicos realizou-se uma revisão crítica e um levantamento dos requisitos de iluminação natural estabelecidos pelos sistemas de avaliação de edifícios. Embora internacionalmente já exista uma série de sistemas de avaliação de edifícios que se propõem a avaliar a qualidade e a sustentabilidade de edificações, os sistemas de avaliação de edifícios investigados na pesquisa corresponderam àqueles que já apresentam esforços de certificação no contexto nacional, ou seja, AQUA, o BREEAM e o LEED (GBCB, 2011, SELO..., 2012, CERTIFICAÇÃO..., 2012, FUNDAÇÃO, 2012.).

Embora o BREEAM não tenha ainda sido utilizado em edificações comerciais no país, o sistema de avaliação inglês foi aqui incluído por já ter certificado um empreendimento habitacional no país e já existirem, no mercado nacional, empresas licenciadas para atuar no processo de certificação de edifícios sulamericanos, e inclusive brasileiros, segundo essa metodologia (CERTIFICAÇÃO..., 2012).

Assim, essa etapa teve o objetivo de identificar os critérios, os procedimentos de avaliação e as marcas de referência utilizados nos sistemas de avaliação ambiental de edifícios no Brasil. Isso definiu algumas condições no processo de simulação – condição de céu, dia e hora do ano, altura do plano de trabalho, etc. – e favoreceu a verificação do atendimento aos critérios de luz natural em paralelo à análise do desempenho energético dos modelos propostos.

Destaca-se que o recorte realizado nos sistemas de avaliação de edifícios deu ênfase aos aspectos associados ao uso da luz natural nos ambientes de permanência prolongada, ou seja, à quantidade de luz natural recomendada nos espaços de trabalho. Quando o sistema apresentou mais de um método para verificação do atendimento ao critério, foi destacado o método de simulação.

3.3.1 Alta Qualidade Ambiental – AQUA

O levantamento dos requisitos de luz natural propostos pela metodologia do AQUA permitiu identificar que o sistema possui cinco critérios de avaliação da iluminação natural. De acordo com o desempenho da edificação em determinado critério, esse sistema permite avaliar o edifício em *bom*, *superior* ou *excelente* (FCAV, 2007), conforme exposto no Quadro 5:

Quadro 5 – Critérios e requisitos de luz natural estabelecidos pelo AQUA.

Critério	Nível de desempenho	Requisitos mínimos para atendimento ao critério
Acesso à luz natural	Bom	Todos os ambientes de permanência prolongada devem dispor de acesso à luz natural
	Excelente	Atender ao nível <i>bom</i> , além de dispor de acesso à luz natural nos outros espaços no edifício – sala de reunião, espaço de alimentação, etc.
Acesso às vistas externas	Bom	Todos os ambientes de permanência prolongada devem dispor de acesso às vistas do exterior em todos os ambientes de permanência prolongada e em mais 40% dos outros espaços no edifício
	Excelente	Todos os ambientes de permanência prolongada devem dispor de acesso às vistas do exterior em todos os ambientes de permanência prolongada e em mais 60% dos outros espaços no edifício
Iluminância natural mínima	Bom	Escritórios e salas de aula devem atender a um FLD $\geq 1,5\%$ em 80% desses espaços. Demais ambientes devem atender a um FLD $\geq 1,0\%$
	Superior	Escritórios e salas de aula devem atender a um FLD $\geq 2,0\%$ em 80% desses espaços. Demais ambientes devem atender a um FLD $\geq 1,5\%$
	Excelente	Atender ao nível <i>superior</i> , além de atender a um FLD mínimo de 1% e evitar a localização de estações de trabalho nas fachadas desconfortáveis devido a iluminâncias naturais excessivas
Acesso à luz natural nas áreas de circulação	Superior	Áreas de recepção devem dispor de luz natural
	Excelente	Atender ao nível <i>superior</i> , além de oferecer luz natural em 50% das áreas de circulação
Controle do ofuscamento	Bom	Oferecer soluções satisfatórias no tratamento dos ambientes muito sensíveis ao ofuscamento
	Superior	Identificar os ambientes sensíveis e muito sensíveis ao ofuscamento, estudar as condições de ofuscamento e apresentar soluções satisfatórias
	Excelente	Atender ao nível <i>superior</i> e dispor de elementos de proteção solar móveis

Fonte: FCAV, 2007.

Considerando-se que o modelo de edifício investigado nesse estudo apresenta uma série de ambientes de trabalho iguais e com aberturas para o exterior – conforme será apresentado posteriormente –, o critério de *acesso à luz natural* e de *acesso às vistas externas* foram

simplesmente atendidos, embora, pela sua estrutura, não permitam a mensuração dos seus impactos diretos no desempenho das edificações. Essa mensuração é possível no critério *de iluminância natural mínima*, em que são requeridas quantidades mínimas de luz natural no interior dos ambientes, por meio do FLD.

O referencial técnico de certificação do AQUA acrescenta que, quando são propostos ambientes de uso intermitente ou quando estão previstos planos de trabalho verticais, os valores recomendados para o FLD podem ser reduzidos em 0,5% (FCAV, 2007). Embora em edifícios de escritórios uma grande quantidade dos espaços de trabalhos faça uso de microcomputadores, a redução do FLD indicada no referencial não será utilizada para fins de verificação de atendimento a esse sistema, para que se possa proceder uma análise da situação mais crítica para edificações entre trópicos, ou seja, aquela em que são recomendadas quantidades superiores de luz natural. Ainda, segundo a metodologia proposta, o FLD deve ser calculado utilizando-se simulações com o céu encoberto e se aplica até uma profundidade correspondente a 1,5 vezes a altura da janela ao piso (FCAV, 2007).

O critério *acesso à luz natural nos ambientes de circulação* tampouco representa um aspecto relevante no presente estudo, visto que esses espaços são relativamente reduzidos em edifícios de escritórios e geralmente desprovidos de climatização artificial, com menores impactos no desempenho final das edificações. Assim, esse critério não foi utilizado na avaliação dos modelos.

Quanto ao *controle do ofuscamento*, o procedimento de avaliação foi considerado pouco transparente ou claro. Segundo o referencial do AQUA, ambientes onde estão previstos planos de trabalho verticais e áreas de projeção são considerados ambientes “muito sensíveis ao ofuscamento” (FCAV, 2007), entretanto, o sistema não esclarece o que são “ambientes sensíveis” ao ofuscamento, tampouco indica o que seriam “soluções satisfatórias” nesses casos.

Ainda, quanto à recomendação de utilizar dispositivos de proteção solar (DPS) móveis para a obtenção de um nível de desempenho classificado como “excelente” quanto ao *controle do ofuscamento*, é importante destacar que a instalação desses dispositivos não necessariamente está associada a uma melhoria no desempenho. O controle do ofuscamento, como anteriormente mostrado, está relacionado à redução dos níveis de iluminância excessiva nas áreas próximas às aberturas e das áreas visíveis da abóbada celeste e, assim, é possível que dispositivos fixos bem projetados sejam adequados em muitos casos. Obviamente, os DPS

móveis, como recomendado, permitem um maior controle do ambiente visual, entretanto, esse aspecto tem sido alvo de críticas por muitos trabalhos acadêmicos, pois, se por um lado eles permitem aos usuários a adequação do seu ambiente visual à posição solar e às suas preferências e necessidades, por outro, nem sempre os usuários operam adequadamente os mesmos (SOUZA, 2008), o que pode comprometer o desempenho final do sistema de iluminação natural.

3.3.2 *Building Research Establishment's Environmental Assessment Method - BREEAM*

O levantamento dos requisitos de luz natural propostos pela metodologia do BREEAM (BRE, 2011) identificou que o sistema possui três critérios de avaliação da luz natural, no qual cada critério corresponde a um crédito na pontuação final do empreendimento. Um crédito extra por desempenho exemplar é dado aos empreendimentos que ofereçam desempenho superior no critério de *iluminância natural mínima*, conforme é indicado no Quadro 6:

Quadro 6 – Critérios e requisitos de luz natural estabelecidos pelo BREEAM.

Critério	Créditos disponíveis	Requisitos mínimos para atendimento ao critério
Iluminância natural mínima ⁵	1 crédito	Ambientes de trabalho devem atender a um FLD \geq 2% em 80% desses espaços. Devem alcançar também um $U_{MÍN} \geq 0,4$ ou um $FLD_{MÍN} \geq 0,8\%$
	1 crédito extra por desempenho exemplar	Ambientes de trabalho devem atender a um FLD \geq 3% em 80% desses espaços. Devem alcançar também um $U_{MÍN} \geq 0,4$ ou um $FLD_{MÍN} \geq 1,2\%$
Acesso às vistas externas	1 crédito	Todas as estações de trabalho devem estar posicionadas a no máximo 7m de distância de aberturas que permitam o acesso às vistas externas. As aberturas devem ter área $\geq 20\%$ da parede que a contém
Controle do ofuscamento	1 crédito	Ambientes de trabalho devem incluir estratégias para controle do brilho, tais como beirais baixos, persianas, brises ou projeto bioclimático que forneça sombreamentos para o alto sol de verão e baixo sol de inverno

Fonte: BRE, 2011.

O critério *acesso às vistas externas* não permite a associação direta com eventuais impactos no desempenho das edificações, a exemplo do comentário feito sobre o critério equivalente no AQUA.

⁵ Os critérios foram traduzidos para coincidir com os nomes dos critérios do AQUA, a fim de padronizar a linguagem e facilitar a comparação entre os diferentes sistemas.

Segundo a metodologia proposta pela versão anterior do BREEAM, se um empreendimento possui seis salas, 80% dessas salas, ou seja, cinco, devem atender aos requisitos para atendimento a esse critério. O número de ambientes deve ser arredondado para o número inteiro imediatamente superior ao valor calculado (BRE, 2009). A forma de avaliação da percentagem de área a atender os requisitos de luz natural não é bem esclarecida na versão aqui investigada (BRE, 2011) e portanto considerou-se a informação disponível na versão anterior deste referencial, conforme em BRE, 2009.

3.3.3 Leadership in Energy and Environmental Design – LEED

O LEED é o sistema de avaliação de edifícios utilizado há mais tempo no país. Sua versão de 2005 (USGBC, 2005) estabelecia quantidades mínimas de iluminância a ser alcançada em considerável porção de área dos ambientes de trabalho. A versão mais recente, lançada em 2009 (USGBC, 2009), introduziu uma modificação importante na sua metodologia de avaliação, sobretudo para edificações entre trópicos, ao definir limites máximos de iluminância natural. Essa pesquisa incluiu, portanto, as metodologias propostas pelas duas versões desse sistema, conforme mostra o Quadro 7, a fim de verificar o impacto dessa mudança na identificação dos modelos que atendem à metodologia.

Quadro 7 – Critérios e requisitos de luz natural estabelecidos pelas últimas versões do LEED.

Critério	Créditos disponíveis	Requisitos mínimos para atendimento ao critério
LEED 2005 (USGBC, 2005)		
Iluminância natural mínima	1 crédito	Ambientes de trabalho devem alcançar um nível de iluminação natural correspondente a 270lux ⁶ em 75% desses espaços. A simulação deve ser feita em condições de céu claro, ao meio dia, no equinócio a 75cm ⁷ do piso. Todas as aberturas requerem um dispositivo para controle do ofuscamento, que podem ser elementos fixos de sombreamento externos, prateleiras de luz, persianas, etc.
	1 crédito extra por desempenho exemplar	Ambientes de trabalho devem alcançar os requisitos acima em 95% desses espaços
Acesso às vistas externas	1 crédito	Ambientes de trabalho devem permitir uma linha direta de visão para o ambiente externo através de superfícies envidraçadas compreendidas entre 75 e 225cm do piso em 90% desses espaços
LEED 2009 (USGBC, 2009)		
Iluminância natural mínima	1 crédito	Ambientes de trabalho devem alcançar um nível de iluminação natural correspondente a um mínimo de 270lux e um máximo de 5400lux em 75% desses ambientes. Áreas com níveis de iluminação fora desse intervalo não atendem ao critério. A simulação deve ser feita em condições de céu claro, no equinócio, às 9h e às 15h. Todas as aberturas requerem um dispositivo para controle do ofuscamento, que podem ser elementos fixos de sombreamento externos, prateleiras de luz, persianas, etc. Projetos que incorporem dispositivos de sombreamento automatizados para controle do ofuscamento precisam demonstrar que atendem apenas aos níveis de iluminância mínimos
	1 crédito extra por desempenho exemplar	Ambientes de trabalho devem alcançar os requisitos acima em 95% desses espaços
Acesso às vistas externas	1 crédito	Ambientes de trabalho devem permitir uma linha direta de visão para o ambiente externo através de superfícies envidraçadas compreendidas entre 75 e 225cm do piso em 90% desses espaços

Fonte: USGBC, 2005, USGBC, 2009.

A exemplo do comentário feito sobre os procedimentos de avaliação do critério *acesso às vistas externas* do AQUA e do BREEAM, sua estrutura não permite a associação direta com eventuais impactos no desempenho das edificações e foram, por isso, excluídas de análise detalhada nesse trabalho.

Segundo o LEED (USGBC, 2005; USGBC, 2009), na metodologia de avaliação da *iluminância natural mínima*, a seleção de uma estratégia para controle do ofuscamento em cada abertura é obrigatória para o atendimento ao crédito e, segundo a metodologia, o tipo de estratégia selecionada não afeta os cálculos de iluminação natural. O sistema lista ainda uma

⁶ 1footcandle = 10,8lux.

⁷ 1' = 2,5cm.

série de dispositivos que podem ser usados com essa finalidade: prateleiras de luz, elementos de sombreamento externos, venezianas, persianas ajustáveis, etc.

Quanto à área dos ambientes de trabalho a alcançar os requisitos para o atendimento ao crédito, a metodologia do LEED considera que a soma de todas as áreas dos ambientes de trabalho com iluminâncias adequadas – aquelas que atendem aos requisitos estabelecidos – dividida pela área total dos ambientes de trabalho deve ser superior a 75% (USGBC, 2005; USGBC, 2009) para que se alcance um crédito, e superior a 95%, para alcançar um crédito extra, dentre cinco possíveis créditos no total, correspondentes à categoria que se refere às inovações em projeto.

3.4 Seleção dos *softwares* de simulação

A quarta etapa dos procedimentos metodológicos deu ênfase à seleção dos instrumentos utilizados na pesquisa. Ainda que os *softwares* de simulação energética informem também os níveis de iluminância proporcionados pela luz natural e disponíveis no interior, a literatura consultada mostra que esses valores são apontados em uma quantidade muito reduzida de pontos (CARLO; PEREIRA; LAMBERTS, 2004, RAMOS, 2008) e são utilizados apenas para o acionamento do sistema de iluminação artificial complementar. Isso justifica que, para uma identificação dos modelos que atendem aos requisitos de luz natural, em paralelo à avaliação do desempenho energético dos modelos, é preciso lançar mão de *softwares* específicos de simulação da iluminação, a exemplo da metodologia adotada para as simulações nos estudos de Carlo, Pereira e Lamberts (2004).

Além disso, os *softwares* que utilizam o motor de cálculo do *EnergyPlus*, como o *DesignBuilder*, tendem a superestimar a quantidade de luz natural em profundidade nos ambientes (RAMOS; GHISI, 2010), subestimando o consumo de energia para fins de iluminação artificial. Daí a necessidade de proceder às simulações em duas etapas: simulações da iluminação natural e simulações energéticas.

Os critérios de seleção dos instrumentos computacionais a serem utilizados no trabalho foram:

- A experiência requerida para sua utilização;
- A confiabilidade dos resultados (validação); e
- A possibilidade de acesso ao *software*.

3.4.1 Softwares de iluminação natural

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (USDOE, 2011) lista em sua página oficial na *internet* uma relação de quase 400 *softwares* de simulações de edificações agrupados por temas, com informações a respeito da confiabilidade dos resultados, requisitos do sistema, quantidade de usuários, forças e fraquezas da ferramenta, dentre outros. Foram destacados dessa lista alguns dos *softwares* de simulação da iluminação que têm sido utilizados em investigações científicas, conforme demonstra o Quadro 8.

Quadro 8 – *Softwares* de simulação da iluminação.

<i>Software</i>	Interface	Gratuito	Validado ⁸	Observações
AGI 32	-	Não	Não	Validações básicas disponíveis sob solicitação
DAYLIGHT	+	Sim	Não	<i>Software</i> novo em versão beta
DAYSIM	-	Sim	Sim	Baseado no <i>Radiance</i>
DIALUX	+	Sim	Sim	Validado de acordo com a CIE 171:2006
ECOTECH	+	Não	Não	
RADIANCE	-	Sim	Sim	Validado por uma série de trabalhos científicos
LIGHTSCAPE	+	Não	Não	Não usa os céus padrão CIE. Inadequado para predição da luz natural. Comercialização descontinuada
RELUX VISION	+	Sim	Não	Baseado no <i>Radiance</i> .

Notas:

+ pouca experiência requerida e/ou interface amigável.

- alguma experiência requerida e/ou interface pouco amigável.

Fonte: USDOE, 2011, CHRISTAKOU, 2004.

O *Radiance*, desenvolvido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (Estados Unidos), é um dos *softwares* que vêm sendo utilizados com maior frequência pelos pesquisadores em âmbito internacional. Seus resultados já foram testados e validados por trabalhos científicos e são considerados bastante precisos. Segundo Christakou (2004), o *Radiance* ainda guarda suas raízes acadêmicas e, embora seja um *software* gratuito, a complexidade do instrumento é um impedimento à sua ampla utilização. São apenas pouco mais de 200 usuários no mundo (USDOE, 2011).

O *Daysim*, desenvolvido na última década pelo *National Research Council Canada* (Ontário, Canadá), é um *software* de simulação dinâmica da luz natural que utiliza os motores de

⁸ Os *softwares* de simulação da iluminação baseados em motores de cálculos de instrumentos validados, bem como aqueles que se propõem a apresentar uma interface amigável para esses *softwares* foram também considerados validados.

cálculo do *Radiance*. Tal qual o *Radiance*, é um *software* gratuito, utilizado por poucas centenas de usuários e requer o mesmo nível de conhecimento para ajustar os parâmetros de simulação do *Radiance* (USDOE, 2011), sendo ambos, portanto, avaliados como pouco recomendáveis para a realização da pesquisa.

O *software DIALux* é uma ferramenta de cálculo gratuita, desenvolvida na Alemanha e disponível em 25 idiomas, incluindo o português. É considerada útil tanto para projetos de arquitetura quanto de iluminação técnica e é por isso utilizada por uma grande quantidade de profissionais, sobretudo profissionais da área de iluminação. O *software* possui interface amigável, apresenta bons dados de saída e resultados validados pelo relatório da CIE 171:2006 (USDOE, 2011). Mais recentemente, tem sido utilizado também em investigações científicas (DE ROSA *et al.*, 2009; MOESEKE; GOETGHEBUER, 2009; RYCKAERT *et al.*, 2010; SPYROPOULOS; BALARAS, 2011).

3.4.2 Softwares de desempenho energético

No diretório de ferramentas de simulação de edifícios disponível no site do *U. S. Department of Energy*, são listados cerca de 120 *softwares* para a predição do desempenho energético de edifícios, dos quais os mais utilizados em trabalhos acadêmicos encontram-se descritos no quadro 9.

Quadro 9 –*Softwares* de simulação energética.

<i>Software</i>	Interface	Gratuito	Validado ⁹	Observações
DESIGN BUILDER	+	Não	Sim	Utiliza o motor de cálculo do <i>EnergyPlus</i>
DOE-2	-	Não	Não	Precursor do <i>EnergyPlus</i>
ECOTECH	+	Não	Não	
ENERGYPLUS	-	Sim	Sim	Testado e validado pelo BESTest
ESP-r	-	Sim	Sim	Validado por estudos científicos
VISUALDOE	+	Não	Não	Interface gráfica do DOE2.1-E

Notas:

+ pouca experiência requerida e/ou interface amigável.

- alguma experiência requerida e/ou interface pouco amigável.

Fonte: USDOE, 2011, CARLO; PEREIRA; LAMBERTS, 2004.

⁹ Os *softwares* de simulação energética baseados em motores de cálculos de instrumentos validados, bem como aqueles que se propõem a apresentar uma interface amigável para esses *softwares* foram também considerados validados.

O *EnergyPlus* é um instrumento computacional para simulação do consumo de energia de edifícios baseado nos recursos dos seus antecessores - BLAST e DOE-2 - e validado pelo método *BESTest* (USDOE, 2011). Apesar de utilizar dados de entrada e saída em formato de texto e não apresentar interface amigável (USDOE, 2011) – aspectos que dificultam a sua interpretação e utilização pela maioria dos envolvidos nos processos de produção de edifícios –, uma considerável parte das pesquisas realizadas internacionalmente (REINHART; WIENOLD, 2011), e inclusive no Brasil (CARLO, 2008, DIDONÉ; PEREIRA, 2010), têm utilizado essa ferramenta, graças à razoável confiabilidade dos resultados que gera.

É importante considerar que, quando a quantidade de luz admitida é subestimada, entende-se que haverá um incremento no uso de energia para fins de iluminação artificial. Por outro lado, se é superestimada, os resultados não irão incluir parte do consumo com iluminação artificial complementar necessária para atingir os níveis estabelecidos em projeto. Embora não forneçam resultados em iluminação natural precisos, os *softwares* de simulação energética disponíveis, tais como o *EnergyPlus* e o *DesignBuilder*, são considerados bastante confiáveis para prever o consumo energético de edificações.

Porém, face às complexidades expostas na manipulação do *EnergyPlus*, o instrumento computacional eleito para as simulações do desempenho energético neste estudo foi o *software DesignBuilder*. O *DesignBuilder* oferece uma interface amigável para o *EnergyPlus*, com bancos de dados de materiais de construção e *feedback* visual dos elementos simulados por meio da visualização do modelo tridimensional (USDOE, 2011), aspectos que minimizam o problema de aprendizagem e operação do simulador e que, por isso, favorecem o desenvolvimento da pesquisa em tempo.

Além disso, o programa tem sido utilizado em pesquisas científicas em âmbito nacional (VENÂNCIO, 2007; BERNABÉ, 2012) e internacional (TRONCHIN; FABBRI, 2008, RAHMAN; RASUL; KHAN, 2010, ALAJMI, 2012) e, embora não seja gratuito, há licenças de uso disponíveis para uso em pesquisas desse tipo no Laboratório de Planejamento e Projetos (LPP-Ufes), onde se desenvolveu considerável parte da pesquisa.

3.5 Seleção das localidades

A etapa seguinte dos procedimentos metodológicos incluiu a seleção das localidades a serem investigadas na pesquisa. Foi realizado um levantamento das cidades cujos arquivos climáticos estavam disponíveis no site do LABEEE e constatado que, até meados de 2011,

pouco menos de 20 cidades possuíam arquivos climáticos com dados tratados passíveis de serem utilizados em simulações computacionais para cálculo do consumo energético em edificações (LABEEE, 2011). No entanto, mais recentemente, outros arquivos foram incluídos e atualmente constam os arquivos climáticos de 411 cidades no Brasil, dos quais foram selecionados, num primeiro momento, os das capitais dos estados (LABEEE, 2012).

Considerando-se que a latitude é um dos principais aspectos que influenciam na disponibilidade de luz natural (VIANNA; GONÇALVES, 2007), a simulação de modelos situados em cidades com diferentes parâmetros para essa variável é fundamental na obtenção de uma amostra representativa do desempenho dos modelos de edificações quando submetidos a diferentes condições de luminosidade da abóbada. Assim, foram inicialmente selecionadas as capitais mais próxima e mais afastada da Linha do Equador, sendo elas Belém e Porto Alegre. Além dessas, outras três capitais foram selecionadas e encontram-se justificativas no Quadro 10.

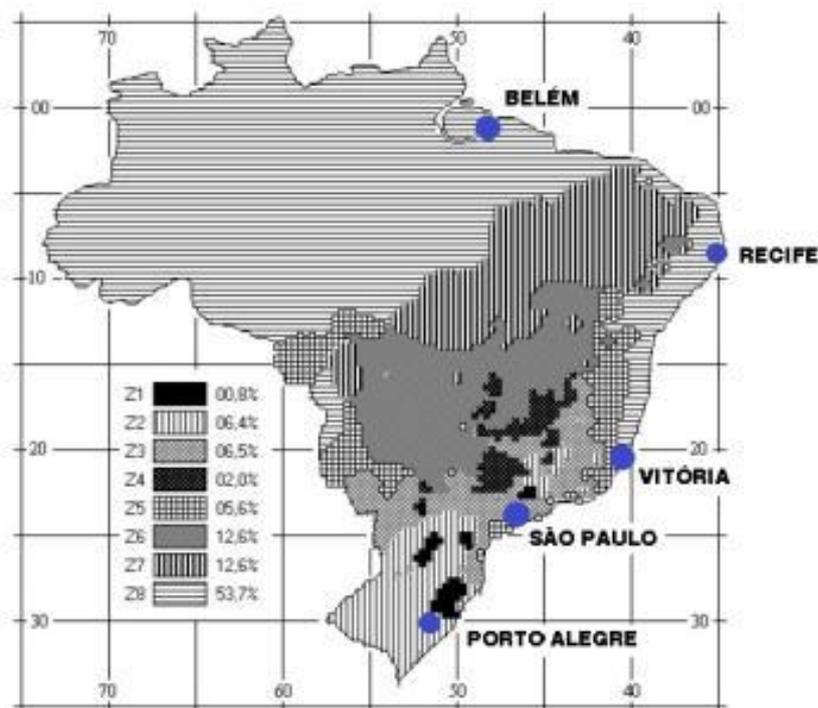
Quadro 10 – Cidades selecionadas na investigação.

Cidade	Latitude	Zona Bioclimática	Tipo de céu mais frequente	Justificativa
Belém	01°23' S	ZB 08	Encoberto	Capital mais próxima da linha do Equador. Apesar da cidade de Macapá estar localizada mais próxima da linha do Equador, seus dados só foram disponibilizados em 2012
Recife	08°08' S	ZB 08	Parcialmente nublado	Embora Maceió (Lat. 09°31' S) represente uma posição mais equidistante entre Belém e Vitória, em termos de latitude, considerou-se mais adequada a investigação de Recife graças à sua maior população, importância econômica e possibilidade de aplicação ou aproveitamento dos resultados da pesquisa
Vitória	20°16' S	ZB 08	Parcialmente nublado	Cidade que apresenta esforços no desenvolvimento de ferramenta para avaliação de empreendimentos adaptada ao contexto regional (SOUZA, 2008)
São Paulo	23°37' S	ZB 03	Parcialmente nublado	Cidade que abriga o maior número de empreendimentos certificados no país (GBCB, 2011)
Porto Alegre	30°00' Sul	ZB 03	Parcialmente nublado	Capital mais afastada da linha do Equador

Fontes: GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998, ABNT, 2005d, VIANNA; GONÇALVES, 2007.

O mapa representado na Figura 22 indica apresenta a divisão das zonas bioclimáticas definidas pela NBR 15.220-3 (ABNT, 2005d) e a localização das cidades selecionadas na investigação.

Figura 22 – Mapa do Brasil indicando as cidades selecionadas.



Fonte: Adaptado de ABNT, 2005d.

3.6 *Elaboração dos modelos paramétricos*

Esta etapa apresenta as variáveis que influenciam no desempenho final dos modelos paramétricos, agrupando-as em variáveis de teste – aquelas cujos impactos no desempenho energético das edificações foram aqui investigados – e em variáveis de controle – aquelas que sabidamente impactam no desempenho das edificações, mas que foram fixadas neste estudo, a fim de permitir a mensuração e análise das variáveis anteriores.

3.6.1 *Variáveis de teste*

Considerando-se que a iluminação natural está associada à admissão de calor pelas superfícies transparentes da envoltória, as variáveis selecionadas para análise são aquelas que estão associadas às fases preliminares no processo de projeto – de maior influência no consumo energético das edificações (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006) – e que impactam simultaneamente nos dois aspectos investigados no trabalho: a) desempenho luminoso do sistema (admissão e distribuição da luz nos interiores); e b) consumo energético da edificação.

Nas últimas décadas, sistemas de iluminação natural mais avançados que usam elementos translúcidos de alta tecnologia, têm sido avaliados em uma série de trabalhos acadêmicos e os resultados têm mostrado melhorias para a entrada da luz natural e a distribuição da luz nos

ambientes com entrada de calor minimizada, inclusive quando instalados em aberturas zenitais (GARROCHO; AMORIM, 2004, GARROCHO; AMORIM, 2006).

Neste trabalho, entretanto, são investigados sistemas tradicionalmente utilizados nas edificações e instalados em aberturas verticais. Assim, foram selecionadas para investigação as seguintes variáveis: orientação solar; percentual de aberturas nas fachadas (PAF); existência de dispositivo de proteção solar (DPS); e o ângulo horizontal de sombreamento (AHS) por ele proporcionado, conforme indicados no Quadro 11.

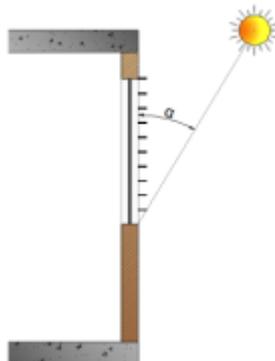
Quadro 11 – Variáveis de teste e valores adotados na elaboração dos modelos.

Variável de teste		Valor
Orientação solar (OS)		Norte (N)
		Sul (S)
		Leste (L)
		Oeste (O)
Sistemas de iluminação natural	Percentual de aberturas na fachada (PAF)	50%
		100%
	Dispositivo de proteção solar (DPS)	Sem dispositivos de proteção solar (SP)
		Brises horizontais (BH)
	Ângulo horizontal de sombreamento (AHS)	15°
		30°
45°		

Fonte: A autora.

A Figura 23 mostra um corte esquemático da tipologia de dispositivo de proteção solar investigado na pesquisa, o brise de lâminas horizontais, em número de 10 e perpendiculares à fachada, considerando-se que os ângulos (AHS) foram fixados em 15°, 30° e 45°.

Figura 23 – Corte esquemático do brise horizontal investigado.

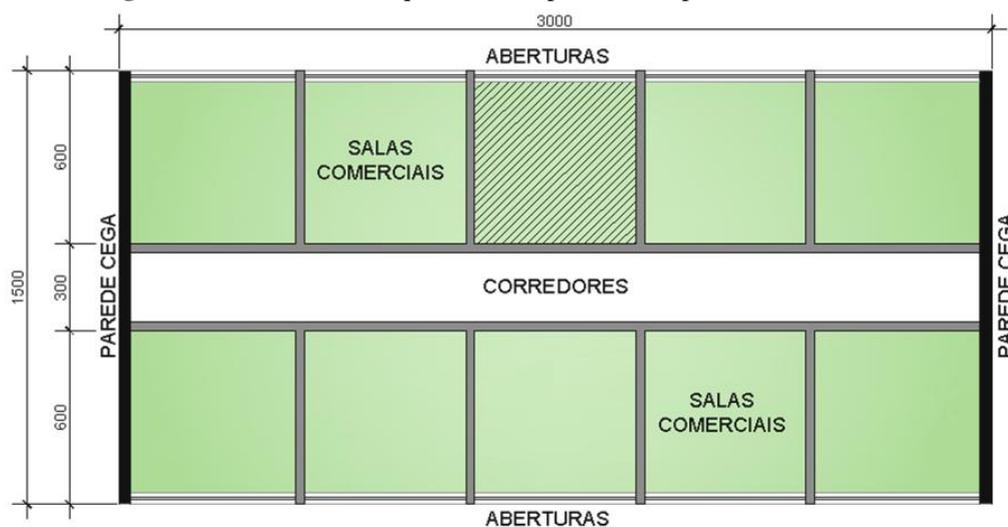


Fonte: A autora.

As aberturas foram posicionadas em lados opostos nas maiores fachadas dos modelos. Pelo fato do *DIALux* realizar simulações em ambientes individuais, tomou-se a sala central

posicionada em determinada fachada como ambiente representativo daquele lado do edifício, conforme ambiente hachurado na Figura 24. Assim, em cada localidade, os sistemas de iluminação natural foram simulados quatro vezes, correspondendo às quatro principais orientações. Ao contrário do *software* de iluminação natural, o *DesignBuilder* possibilita a modelagem do edifício por completo e, por isso, em cada localidade, os sistemas de iluminação natural foram simulados duas vezes: na orientação norte-sul e na orientação leste-oeste.

Figura 24 – Planta baixa esquemática do pavimento tipo do edifício modelo.



Fonte: A autora.

A porção de área dos ambientes que atendem a determinado nível de desempenho da luz natural incluem a consideração de que metade das salas é orientada em uma direção e que a outra metade é orientada na direção oposta.

3.6.2 Variáveis de controle

Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) realizaram um levantamento de informações sobre os edifícios comerciais construídos em diferentes regiões climáticas do Brasil, com o objetivo de diagnosticar aspectos gerais referentes à envoltória, à eficiência energética e ao desempenho térmico dessas edificações. O estudo realizado pelos autores permitiu identificar, dentre outros, que as características da envoltória de edifícios comerciais são bastante comuns nas diferentes regiões do país, o que indica que tem havido pouca adequação da arquitetura às condições climáticas do local de inserção. Isso reforça a possibilidade de ser utilizado um mesmo modelo arquitetônico para representar edifícios em diferentes cidades no país.

Quanto à sua relação com o entorno, os modelos paramétricos definidos para o estudo desconsideraram os efeitos das edificações vizinhas, a fim de se avaliar o desempenho dos sistemas de iluminação natural de forma independente das variáveis urbanas (SANTOS *et al.*, 2010). As variáveis da iluminação natural que definiram o modelo de edificação utilizado nas simulações, bem como as justificativas para adoção dos valores para elas definidos encontram-se descritos no Quadro 12.

Quadro 12 – Valores estabelecidos para as variáveis de controle da iluminação natural.

Variável	Valor	Justificativa
Altura do pé direito (m)	2,70	Utilizado por Didoné e Pereira (2010)
Fator de caixilhos	0,8	Padrão do <i>software DIALux</i> para esquadrias metálicas móveis.
Fator de transmissão à radiação visível do vidro	88%	O vidro comum incolor liso 6mm é o mais aplicado em edificações comerciais (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006). Ghisi <i>et al.</i> (2005) utilizaram valores de 88% para o fator de transmissão luminosa deste material.
Fator de poluição (manutenção das aberturas)	0,80	Padrão do <i>software DIALux</i> .
Fator de reflexão das superfícies internas	Piso: 20% Paredes: 50% Teto: 70%	Padrão do <i>software DIALux</i> para fator de reflexão das superfícies internas.
Refletância do piso externo	20%	Em simulações da iluminação, refletâncias de 20% são sempre adotadas para o solo (LI, 2010)
Fator de reflexão do vidro	8%	Padrão do <i>software DIALux</i> para reflexão do vidro comum.
Refletância dos dispositivos de proteção solar	70%	Cores claras (ABNT, 2005c)

Fonte: A autora.

Ressalta-se que as simulações do consumo energético não incluem gastos com elevadores, bombas, equipamentos de casa de máquinas, dentre outros, sendo considerados neste trabalho apenas os dispêndios associados à iluminação artificial e ao ar condicionado das salas comerciais. O Quadro 13 apresenta as demais variáveis de controle da envoltória e das características de ocupação do edifício a serem utilizadas nas simulações do desempenho energético, além das justificativas para adoção dos valores para elas definidos.

Quadro 13 – Valores estabelecidos para as variáveis de controle da envoltória e das características de ocupação do edifício.

Variável	Valor	Justificativa
Gabarito	10 pavimentos	Gabarito definido e justificado conforme item 3.2 dos procedimentos metodológicos
Forma do pavimento tipo	Retangular	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) e Bernabé (2012)
Dimensões da planta	30x15m	Dimensões utilizadas por Bernabé (2012)
Quantidade de salas por pavimento	10	Divisão definida e justificado conforme item 3.2 dos procedimentos metodológicos
Absortância dos elementos opacos das fachadas	0,6	Segundo Lamberts, Ghisi e Ramos (2006), 45% das fachadas de edifícios comerciais pesquisadas pelos autores apresentaram absortâncias variando entre 0,5 e 0,7
Transmitância térmica das vedações externas	2,478W/m ² K	O material mais utilizado nas paredes externas de edificações comerciais é o bloco cerâmico de 6 furos, com espessura final de 15cm (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006). No <i>DesignBuilder</i> foram inseridos dados correspondentes a blocos cerâmicos de espessura igual a 9cm com revestimentos de argamassa de 2,5cm em ambos os lados
Transmitância térmica dos vidros	5,801W/m ² K	Padrão do <i>DesignBuilder</i> para vidro comum incolor liso de 6mm
Transmitância térmica da cobertura	4,167 W/m ² K	A laje impermeabilizada de 10 cm é o sistema de cobertura mais utilizado em edificações comerciais no país (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006). Foi utilizada a transmitância padrão do <i>software</i> para laje de concreto de 10cm e camada de material asfáltico impermeabilizante de 2cm
Fator metabólico	0,9	A maioria das salas em edifícios comerciais são utilizadas como consultórios de odontologia, escritórios de advocacia e contabilidade (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006). Fator metabólico padrão do <i>DesignBuilder</i> para atividades leves de escritório
Densidade de ocupação	0,07 pessoas/ m ²	Em sua simulações, Didoné e Pereira (2010) consideraram 16m ² /pessoa. O <i>DesignBuilder</i> entretanto utilizada a unidade de m ² /pessoa e arredonda os valores para a segunda casa decimal
Horário de ocupação	Ocupação total: 8h às 12h e 14h às 18h. Ocupação reduzida: 12h às 14h	Horários de ocupação total utilizados por Ghisi e Tinker (2005) e Bernabé (2012)
Carga de iluminação	20 W/m ²	Padrão do <i>DesignBuilder</i>
Carga dos equipamentos	10W/m ²	Em sua simulações, Didoné e Pereira (2010) consideraram 9,7W/m ² . O <i>DesignBuilder</i> arredonda esses valores para números inteiros
Temperatura de controle	24°C	Temperatura limite para acionamento do sistema de ar condicionado, sem aquecimento no período do inverno, conforme prática comum adotada no Brasil (GHISI; TINKER, 2005)

Quadro 13 – Valores estabelecidos para as variáveis de controle da envoltória e das características de ocupação do edifício.

UR de controle	Entre 40% e 60%	Utilizados por Bodart e Herde (2002)
Nível de iluminação de referência	500lx	Recomendado pela NBR 5413 (ABNT, 1992) para ambientes de trabalho. Utilizado em simulações realizadas por Bodart e Herde (2002) e Carlo, Pereira e Lamberts (2004)
Sistema de acionamento da iluminação artificial	Interruptores convencionais de dois passos	Sistema comumente adotado em edifícios comerciais
Sistema de ar condicionado	<i>Split</i> , sem renovação do ar	Foi adotado um sistema <i>split</i> com coeficiente de <i>performance</i> de 3,52 (BERNABÉ, 2012). Demais indicadores do sistema seguiram o padrão do <i>DesignBuilder</i> para <i>split</i> sem renovação do ar

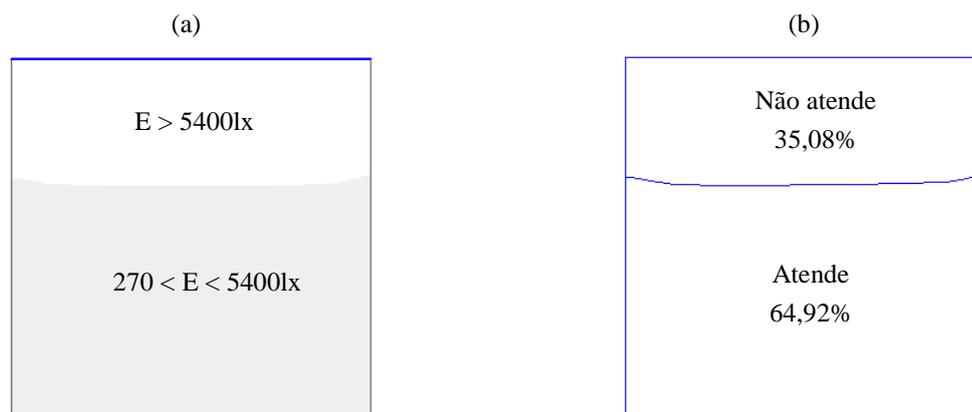
3.7 Processo de simulação

A sétima etapa dos procedimentos metodológicos correspondeu à modelagem do edifício nos *softwares* eleitos e constituiu-se nas simulações propriamente ditas. Foram realizadas 160 simulações no *software DIALux* – com cálculos de aproximadamente 10 minutos de duração por modelo – e 80 no *software DesignBuilder* – com cálculos cuja duração variou de três a doze horas por modelo, dependendo da sua complexidade e da capacidade de processamento do computador utilizado.

3.8 Cálculos de área e análise dos resultados

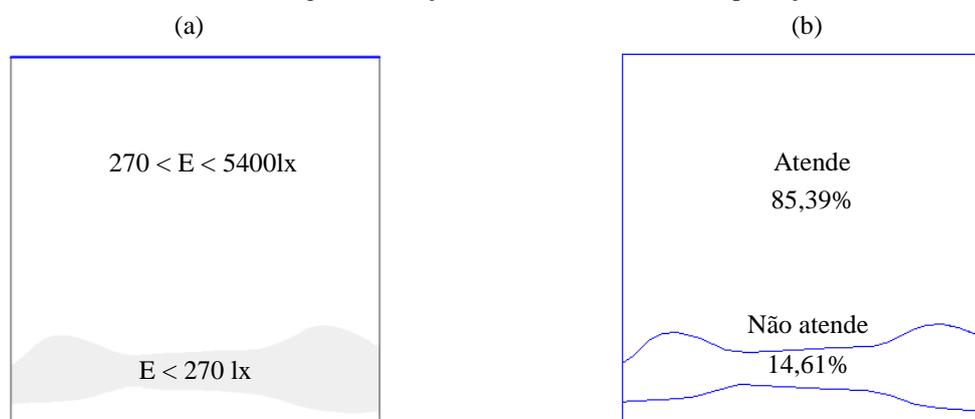
Visto que o *software DIALux* não fornece os resultados das áreas dos ambientes compreendidas em determinado nível de iluminâncias, necessário para verificação do atendimento à metodologia do LEED, os dados de saída deste *software* precisaram ser tratados. Os gráficos de cinzento gerados pelo programa permitem o ajuste das curvas de isolux. Após a realização do ajuste para os níveis identificados na metodologia do LEED – 270 lx e 5400 lx – os gráficos de cinzento foram exportados em formato pdf e inseridos na área de trabalho do *software AutoCAD*. Neste programa, a imagem foi escalada e as curvas de isolux contornadas com o comando *spline* para terem suas áreas mensuradas com comando específico na sequência. As Figura 25 e Figura 26 ilustram os resultados desse procedimento.

Figura 25 – Em (a) gráfico de cinzento gerado pelo *DIALux* e em (b) medição de área no *software AutoCAD*. Modelo situado em Belém, orientação oeste, PAF de 100%, sem proteções solares, às 15h.



Fonte: A autora.

Figura 26 – Em (a) gráfico de cinzento gerado pelo *DIALux* e em (b) medição de área no *software AutoCAD*. Modelo situado em Porto Alegre, orientação leste, PAF de 50%, sem proteções solares, às 15h.



Fonte: A autora.

Após o procedimento das simulações da luz natural, do cálculo de áreas e das simulações energéticas, os modelos foram avaliados segundo os sistemas de avaliação de edifícios no que diz respeito aos requisitos de iluminação natural e a partir daí foi realizada a análise dos resultados. Essa análise foi realizada em quatro etapas, a saber:

- **Análise preliminar dos requisitos de luz natural:** fundamentada na literatura consultada, essa etapa compreende uma análise crítica dos indicadores, requisitos de iluminação natural e metodologias de avaliação estabelecidos pelos sistemas de avaliação de sustentabilidade, independente dos resultados das simulações;
- **Análises quanto ao atendimento aos requisitos de luz natural:** analisa os resultados obtidos com as simulações da luz natural em termos de atendimento ou não aos requisitos de iluminação natural expressos em cada um dos sistemas de avaliação de edifícios investigados;

- **Análises do desempenho energético:** analisa os resultados obtidos com as simulações do desempenho energético e estabelece relações de causa e efeito entre as alterações nas variáveis e o consumo energético nos modelos, sobretudo para fins de iluminação e climatização artificial; e
- **Impactos energéticos do atendimento aos requisitos de iluminação natural:** estabelece as relações entre o atendimento aos sistemas de avaliação de edifícios e os resultados do consumo energético nos modelos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo apresenta a análise proporcionada pela revisão dos requisitos de luz natural expressos nos sistemas de avaliação de edifícios e apresenta e discute os dados obtidos a partir da aplicação dos procedimentos metodológicos estabelecidos no capítulo anterior.

4.1 Análise preliminar dos requisitos de luz natural

Esse item apresenta algumas considerações a respeito dos diferentes procedimentos para avaliação do atendimento aos requisitos de iluminação natural propostos pelos sistemas de avaliação de sustentabilidade sob investigação. O levantamento permitiu concluir que os critérios com maior potencial de impacto no desempenho energético das edificações são os critérios de *iluminância natural mínima*, por estarem associados à mensuração da quantidade de luz que adentra os ambientes. As demais condições básicas que definiram as simulações da luz natural e os requisitos a serem alcançados para obtenção de pontuação específica foram sintetizados no Quadro 14.

Os requisitos de luz natural nos sistemas de avaliação como o AQUA e o BREEAM utilizam metodologias baseadas no conceito do FLD, um indicador que ignora a orientação do edifício e a latitude do local, e pode, por isso, indiretamente incentivar a proposição de edificações menos eficientes quanto ao consumo de energia em regiões onde a disponibilidade de luz é muito intensa. Isso quer dizer que os empreendimentos que almejam uma certificação irão encontrar as mesmas dificuldades, independente de onde se instalem e que a orientação solar da edificação não irá influenciar no atendimento aos requisitos.

A metodologia proposta pelo AQUA pode ainda ser discutida por se basear no valor que esse indicador adquire até uma determinada distância – função da altura do piso ao topo da abertura – em relação às aberturas. Considerando-se que um bom projeto de iluminação natural é capaz de direcionar a luz em profundidade nos ambientes, a vinculação entre a altura da abertura e a distância limite até onde os níveis de iluminação devem ser medidos não avaliam, de fato, quão eficiente é o sistema em iluminar as áreas mais distantes das aberturas e reduzir a demanda por iluminação artificial.

Ainda sobre esse aspecto, a metodologia deixa dúvidas na avaliação de edifícios menos convencionais, nas casos em que existam, por exemplo, aberturas de diferentes formatos, dimensões e posicionadas em duas ou mais paredes de um mesmo ambiente.

Quadro 14 – Resumo dos requisitos de luz natural a serem alcançados e condições das simulações.

Sistema	Indicador	Marcas de referências	Tipo de céu	Hora e dia do ano	Altura do plano de trabalho
AQUA	FLD e FLD _{MÍN}	Bom: FLD \geq 1,5% em 80% dos ambientes	Encoberto	Não indica. Considerou-se o equinócio de 21 de setembro às 12h	Não indica. Considerou-se 75cm.
		Superior: FLD \geq 2% em 80% dos ambientes			
		Excelente: FLD \geq 2% e FLD _{MÍN} \geq 1% em 80% dos ambientes.			
BREEAM	FLD _{MÉD} , U, FLD _{MÍN}	1 crédito: FLD _{MÉD} \geq 2% em 80% dos ambientes; e U \geq 0,4 ou FLD _{MÍN} \geq 0,8%, considerando todos os ambientes	Encoberto	Não indica. Considerou-se o equinócio de 21 de setembro, às 12h	70cm
		2 créditos: FLD _{MÉD} \geq 3% em 80% dos ambientes; e U \geq 0,4 ou FLD _{MÍN} \geq 1,2%, considerando todos os ambientes			
LEED 2005	E _{MÍN}	1 crédito: E _{MÍN} \geq 270lx em 75% das áreas dos ambientes; e Possuir dispositivos de proteção solar	Claro	Equinócio às 12h. Considerou-se 21 de setembro.	75cm
		2 créditos: E _{MÍN} \geq 270lx em 95% das áreas dos ambientes; e Possuir dispositivos de proteção solar			
LEED 2009	E _{MÍN} , E _{MÁX}	1 crédito: 5400lx \geq E \geq 270lx em 75% das áreas dos ambientes; e Possuir dispositivos de proteção solar	Claro	Equinócio, às 9h e 15h. Considerou-se 21 de setembro.	Não indica. Considerou-se 75cm.
		2 créditos: 5400lx \geq E \geq 270lx em 95% das áreas dos ambientes; e Possuir dispositivos de proteção solar			

Fonte: FCAV, 2007, USGBC, 2005, USGBC, 2009 e BRE, 2011.

O método de avaliação do AQUA sugere também que um mesmo sistema de iluminação natural possa ser suficiente para garantir a pontuação em ambientes de geometrias pouco ou muito profundas, o que pode ser inadequado tanto por questões de eficiência energética quanto de saúde dos ocupantes, considerando-se a porção de área que estaria dependente da iluminação artificial e a quantidade de usuários que eventualmente não usufruiriam dos benefícios proporcionados pela luz natural. É certo que, em ambientes pouco profundos, as

paredes opostas às aberturas tendem a contribuir para a elevação dos níveis de iluminação na região considerada pelo sistema, favorecendo a obtenção do crédito, porém a parcela de contribuição desse elemento nos níveis de iluminação ao final é bastante reduzida se considerarmos que as iluminâncias diminuem exponencialmente com a distância.

Por outro lado, os requisitos expressos no LEED utilizou metodologia própria: mensurou a área dos ambientes que atingem determinado nível de iluminância natural mínima, um parâmetro que é função da latitude, da orientação, da hora e do dia, dentre outros, o que permite inferir que um mesmo modelo pode ser adequado em uma localidade e inadequado em outra, o que, a princípio, é mais coerente dada a inegável influência da luz no consumo energético das edificações. A padronização do tipo de céu é uma simplificação de difícil resolução quando se utilizam simulações estáticas da luz natural. Sabe-se que a grande maioria das capitais no país apresenta mais frequentemente o tipo de céu parcialmente encoberto, um tipo de céu de difícil caracterização e padronização.

Com relação aos dispositivos de proteção solar para controle do ofuscamento, a metodologia do LEED oferece uma lista de estratégias aceitas como proteções solares – dentre elas, as persianas internas, que pouco influenciam no consumo energético já que se posicionam na porção interna das edificações – e indica que sua instalação é necessária para alcançar o crédito, mas não afeta os cálculos da luz natural. Esse procedimento é questionável por não corresponder às conclusões expostas nas investigações científicas sobre luz natural e eficiência energética nas edificações, podendo o atendimento ao crédito não estar necessariamente associado a uma melhoria do desempenho da iluminação.

Outro problema em não considerar o efeito dos DPS no cálculo da luz natural decorre da impossibilidade de mensurar a capacidade de um sistema de iluminação natural de direcionar a luz em profundidade, já que os modelos são simulados sem as estratégias de iluminação natural.

Apesar dessas dificuldades terem se mantido na versão do LEED 2009, algumas novidades foram introduzidas na nova metodologia e pareceram beneficiar a identificação dos ambientes que reduzem o ofuscamento e o consumo energético em comparação com a metodologia do LEED 2005. A nova versão estabeleceu, além do limite inferior, um limite superior para a quantidade de luz disponível nos interiores das edificações e solicitou medições dos níveis de iluminação natural em situações mais extremas quanto à luminosidade da abóbada celeste: às 9h e às 15h. Obviamente, essa aparente melhoria somente é real, ou seja, capaz de equacionar a demanda por iluminação natural com os objetivos de eficiência energética, quando os

limites de iluminância (270 lx e 5400 lx) são adequados às condições climáticas e de luminosidade da abóbada do local de implantação.

Além das divergências entre os indicadores utilizados nos sistemas investigados, constatou-se também que não houve um consenso na abordagem metodológica dos sistemas de avaliação a respeito da porção do edifício que deve atingir o requisito estabelecido. Para o AQUA e o BREEAM, 80% do total de ambientes de trabalho deve atender aos requisitos propostos em seus sistemas (FCAV, 2007, BRE, 2011). Subentende-se, então, que 20% dos demais ambientes não necessariamente precisa ter preocupações com essa questão. Maiores detalhes de como aplicar a metodologia a edifícios de planta livre não são esclarecidos, tampouco são dadas informações a respeito da proporcionalidade das áreas dos ambientes que atendem e não atendem aos parâmetros indicados nesses referenciais. Dessa forma o sistema permite pontuar uma edificação que possua, eventualmente, oito pequenos ambientes adequadamente iluminados pela luz natural e outros dois ambientes maiores, sem acesso a níveis suficientes de iluminação natural. Isso mostra que alguns sistemas falham em dar informações precisas aos projetistas ou permitem fornecer a pontuação corresponde a projetos de desempenho questionável.

A respeito da porção do edifício a ser considerado, as versões aqui apresentadas do LEED propõem que 75% da área total destinada a ambientes de trabalho deve atender aos seus requisitos (USGBC, 2005, USGBC, 2009), o que permite que haja uma compensação entre ambientes com maior e menor porção de área iluminada, desde que, no total, uma área mínima dos ambientes de trabalho seja adequadamente iluminada. Essa abordagem consiste em uma forma de avaliação mais facilmente adaptável, por exemplo, a edifícios de planta livre ou que possuam múltiplas e diferentes aberturas em um mesmo ambiente.

4.2 Análises quanto ao atendimento aos requisitos de luz natural

Após a análise preliminar dos requisitos de luz natural, foram executadas as simulações computacionais da luz natural para verificação do atendimento aos sistemas de avaliação de edifícios. O resultado do desempenho dos modelos foram divididos por sistema e são apresentados na sequência.

4.2.1 No sistema AQUA

A metodologia de avaliação do desempenho da luz natural definido pelo AQUA utilizou o FLD como indicador e, por isso, o resultado dos modelos não é afetado pela sua latitude, o

que significa dizer que cada um dos modelos atende ou não aos requisitos deste sistema de maneira independente da cidade em que esteja implantado.

O Quadro 15 apresenta os modelos simulados e a avaliação do atendimento ou não aos requisitos estabelecidos pelo AQUA. No apêndice A encontram-se descritos os resultados das simulações com os valores alcançados pelos indicadores.

É importante citar que cada um dos modelos, quando expostos às diferentes latitudes e avaliados quanto ao desempenho da luz natural, apresentou o mesmo valor de FLD até a distância especificada no AQUA para atendimento ao requisito de luz natural. Isso é óbvio porque o indicador utilizado pelo referencial expressa uma porcentagem da luz natural disponível no interior arquitetônico, que não varia em função da latitude e sem importar-se com os valores absolutos da iluminância no ambiente. Um edifício que atende aos requisitos do referencial em Porto Alegre, por exemplo, também irá atendê-lo em Belém ou nas demais cidades, segundo o AQUA, levando à conclusão equivocada de que uma mesma solução arquitetônica para o sistema de luz natural poderia ser aceitável em qualquer latitude.

Quadro 15 – Avaliação dos modelos segundo a metodologia definida no AQUA.

Características do modelo				Avaliação segundo o AQUA				
Orientação	PAF	DPS	AHS	Belém	Recife	Vitória	São Paulo	Porto Alegre
Norte-Sul	50%	SP	0	Bom				
Norte-Sul	50%	BH	15°	Não atende				
Norte-Sul	50%	BH	30°	Não atende				
Norte-Sul	50%	BH	45°	Não atende				
Leste-Oeste	50%	SP	0	Bom				
Leste-Oeste	50%	BH	15°	Não atende				
Leste-Oeste	50%	BH	30°	Não atende				
Leste-Oeste	50%	BH	45°	Não atende				
Norte-Sul	100%	SP	0	Excelente				
Norte-Sul	100%	BH	15°	Bom				
Norte-Sul	100%	BH	30°	Bom				
Norte-Sul	100%	BH	45°	Bom				
Leste-Oeste	100%	SP	0	Excelente				
Leste-Oeste	100%	BH	15°	Excelente				
Leste-Oeste	100%	BH	30°	Bom				
Leste-Oeste	100%	BH	45°	Bom				

Fonte: A autora.

Por ser fundamentado em um céu encoberto ou uniforme, conceitualmente, o FLD tampouco é influenciado pela orientação e isso pode ser parcialmente observado no Quadro 15: modelos iguais, com diferentes orientações, obtêm o mesmo resultado na avaliação. As simulações realizadas com o *software DIALux*, entretanto, apresentaram pequenas variações nesse

indicador quando modificou-se o parâmetro orientação. Essas variações foram responsáveis pelo fato do modelo LO_100_BH_15 ter alcançado um desempenho diferente do modelo NS_100_BH_15 na avaliação segundo a metodologia descrita no referencial do AQUA. Acredita-se que esse pequeno erro tenha origem em imprecisões nos algoritmos deste *software*.

A análise do resultado da avaliação dos modelos investigados segundo a metodologia proposta no AQUA permitiu constatar que os modelos com percentuais de abertura na fachada iguais a 50% somente foram considerados *bons* quando não possuíam dispositivos de proteção solar. Os demais modelos com PAF 50%, ainda que com ângulos de sombreamento modestos como 15°, não atendem aos requisitos deste sistema porque reduzem a entrada de luz natural a níveis insuficientes para atendimento ao crédito.

Por outro lado, quando aumentou-se o PAF para 100%, todos os modelos foram considerados, no mínimo, *bom*, destacando-se que, sempre que não possuíam dispositivos de proteção solar, foram considerados *excelentes*. Foram também considerados *excelentes* os modelos com orientação leste-oeste, com PAF de 100% e brises horizontais com ângulo de proteção igual a 15°, conforme justificado anteriormente.

Essas constatações fortaleceram a hipótese de que os modelos pontuados pelo AQUA quanto ao atendimento aos requisitos de iluminação natural conflitam com os interesses de eficiência energética, pois, segundo a literatura consultada, edificações entre trópicos, orientadas a norte-sul, com menores percentagens de aberturas nas fachadas e dispositivos de proteção solar com ângulos de sombreamento horizontal maiores tendem a reduzir o consumo de energia. Em contraposição a isso, essa metodologia considera que edificações sem dispositivos de proteção solar apresentariam melhor qualidade ou desempenho ambiental.

A mensuração da redução do consumo proporcionado pela instalação dos dispositivos de proteção solar nas diversas latitudes será apresentada posteriormente. Contudo, esse é um resultado que desde o princípio pode ser indesejável, porque a necessidade de atendimento a esse requisito especificamente pode levar os projetistas a reduzirem o ângulo de proteção solar, a fim de atender a um critério de luz natural, eventualmente delegando em segundo plano os objetivos de redução do consumo energético.

4.2.2 No sistema BREEAM

Embora o AQUA e o BREEAM se utilizem do FLD como indicador, suas metodologias de análise diferem em algumas particularidades. O AQUA avalia o valor do FLD até determinada distância da abertura ao passo que o BREEAM baseou-se no FLD médio do ambiente, associando-o ainda ao FLD mínimo ou à uniformidade mínima dos níveis de iluminação no ambiente para conferir créditos. Por isso, assim como no AQUA, cada modelo obteve a mesma avaliação, de forma independente da localidade.

Quanto à orientação, os resultados das avaliações não foram influenciados pelas supostas imprecisões dos algoritmos de cálculo da iluminação natural e, assim, modelos iguais com diferentes orientações obtiveram a mesma avaliação final. O Quadro 16 ilustra essa questão ao apresentar os modelos simulados e o resultado da avaliação segundo a metodologia expressa no BREEAM. O apêndice A apresenta os valores alcançados pelos indicadores em cada um dos modelos.

Quadro 16 – Avaliação dos modelos segundo a metodologia definida no BREEAM.

Características do modelo				Avaliação segundo o BREEAM				
Orientação	PAF	DPS	AHS	Belém	Recife	Vitória	São Paulo	Porto Alegre
Norte-Sul	50%	SP	0	1 crédito				
Norte-Sul	50%	BH	15°	Não atende				
Norte-Sul	50%	BH	30°	Não atende				
Norte-Sul	50%	BH	45°	Não atende				
Leste-Oeste	50%	SP	0	1 crédito				
Leste-Oeste	50%	BH	15°	Não atende				
Leste-Oeste	50%	BH	30°	Não atende				
Leste-Oeste	50%	BH	45°	Não atende				
Norte-Sul	100%	SP	0	2 créditos				
Norte-Sul	100%	BH	15°	1 crédito				
Norte-Sul	100%	BH	30°	1 crédito				
Norte-Sul	100%	BH	45°	1 crédito				
Leste-Oeste	100%	SP	0	2 créditos				
Leste-Oeste	100%	BH	15°	1 crédito				
Leste-Oeste	100%	BH	30°	1 crédito				
Leste-Oeste	100%	BH	45°	1 crédito				

Fonte: A autora.

Apesar de distintas, essas duas formas de avaliar os modelos geraram resultados de avaliação quase que idênticos:

- modelos com PAF de 50% somente contabilizam um crédito se não possuírem dispositivos de proteção solar. Os demais modelos com PAF 50% não atendem ao BREEAM; e
- modelos com PAF de 100% contabilizam ao menos um crédito. Se não possuírem dispositivo de proteção solar, contabilizam dois créditos.

O único modelo no BREEAM que apresentou diferença quanto ao desempenho da luz natural em comparação com o AQUA foi o modelo leste-oeste com PAF de 100% e brises horizontais com ângulos de proteção de 15°, que obteve apenas um crédito. Análises mais aprofundadas das diferenças entre a avaliação da luz natural segundo as metodologias do AQUA e do BREEAM demandariam a elaboração e simulação de uma série de novos modelos, incluindo outros tipos de DPS e ambientes de geometria profundas.

As constatações a respeito do impacto energético do atendimento aos requisitos de luz natural definidos por esse sistema são os mesmos apresentados anteriormente para o sistema AQUA.

4.2.3 No sistema LEED

Independente da cidade de implantação, quando avaliados segundo o LEED 2005, todos os modelos atingiram um percentual 100% da área dos ambientes com iluminâncias superiores a 270 lx ao meio dia sob condições de céu claro, no equinócio, comprovando o que fora sugerido por Silva, Silva e Agopyan (2003): níveis de exigência baixos como esses permitem que as edificações atinjam facilmente o limite superior das escalas de desempenho, garantindo pontuação equivalente ao critério sem que o sistema de iluminação natural confira melhorias à edificação.

É certo que, segundo a metodologia expressa pela versão de 2005, mesmo para os modelos com dispositivos de proteção solar, são computados os valores de iluminância dos modelos sem esses dispositivos. Assim, foram pontuados com dois créditos todos os modelos investigados, obviamente com a exceção daqueles que não possuíam DPS.

Esse resultado é importante e parcialmente devido à geometria do ambiente adotado nas simulações, de proporções 1:1, que sabidamente favorecem a entrada de luz natural e, por consequência, o aumento do ganho térmico. A ciência de que os ambientes de proporções 1:1 atendem mais facilmente aos requisitos de luz natural do sistema, quase que de forma independente do sistema de iluminação natural adotado, poderia levar os projetistas a uma

“despreocupação” com a seleção dos sistemas de aberturas nos projetos em que são propostos ambientes com essa geometria. Isso pode ser prejudicial na busca pela eficiência energética e pela própria “sustentabilidade” das edificações, já que as certificações são emitidas para empreendimentos que atendam a um número mínimo de critérios independentes e escolhidos pelo empreendedor conforme sua conveniência. Provavelmente por consequência de constatações como essas – ou talvez pela verificação de que edificações certificadas e pontuadas nesse critério estariam apresentando elevado consumo energético com condicionamento de ar – é que foram propostas as alterações expressas no LEED 2009.

Quando avaliados segundo a nova metodologia do sistema, os mesmos modelos apresentaram resultados distintos quando submetidos à avaliação nas diferentes cidades. Outro importante resultado é consequência direta de simplificações na metodologia de avaliação e diz respeito ao fato de que vários modelos com mesma latitude, orientação e percentual de abertura na fachada ganhem exatamente a mesma pontuação na avaliação da luz natural, independentemente do ângulo de sombreamento proporcionado pelo dispositivo de proteção solar adotado. Isso permite que sistemas de iluminação natural com dispositivos de proteção solar exagerados – aqueles em que a luz natural é reduzida até o ponto em que o gasto energético com iluminação artificial é maior que a economia proporcionada pela redução da necessidade de acionamento de sistema de climatização – sejam igualmente pontuados.

O Quadro 17 mostra a avaliação geral dos modelos segundo a metodologia do LEED 2009. No apêndice A são apresentadas as percentagens de área dos ambientes simulados que atendem aos requisitos estabelecidos por esse sistema.

Em Belém, todos os modelos com orientação norte-sul adquiriram dois créditos, independente da área de abertura, desde que dispusessem de dispositivos de proteção solar. Os modelos com orientação leste-oeste computaram apenas um crédito. Os resultados de iluminância dados pelas simulações dos ambientes orientados a leste, às 9h, e a oeste, às 15h, quando analisados individualmente, apresentaram consideráveis porções do ambiente – da ordem de 28% a 36% – com iluminâncias superiores a 5400 lx, o que reduziu o percentual de área com iluminâncias consideradas adequadas, após o cálculo do pavimento por inteiro.

Quadro 17 – Avaliação dos modelos segundo a metodologia definida no LEED 2009.

Características do modelo				Avaliação segundo o LEED 2009				
Orientação	PAF	DPS	AHS	Belém	Recife	Vitória	São Paulo	Porto Alegre
Norte-Sul	50%	SP	0	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende
Norte-Sul	50%	BH	15°	2 créditos	1 crédito	1 crédito	1 crédito	1 crédito
Norte-Sul	50%	BH	30°	2 créditos	1 crédito	1 crédito	1 crédito	1 crédito
Norte-Sul	50%	BH	45°	2 créditos	1 crédito	1 crédito	1 crédito	1 crédito
Leste-Oeste	50%	SP	0	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	15°	1 crédito	Não atende	1 crédito	1 crédito	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	30°	1 crédito	Não atende	1 crédito	1 crédito	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	45°	1 crédito	Não atende	1 crédito	1 crédito	Não atende
Norte-Sul	100%	SP	0	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende
Norte-Sul	100%	BH	15°	2 créditos	2 créditos	1 crédito	1 crédito	1 crédito
Norte-Sul	100%	BH	30°	2 créditos	2 créditos	1 crédito	1 crédito	1 crédito
Norte-Sul	100%	BH	45°	2 créditos	2 créditos	1 crédito	1 crédito	1 crédito
Leste-Oeste	100%	SP	0	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	100%	BH	15°	1 crédito	Não atende	1 crédito	1 crédito	1 crédito
Leste-Oeste	100%	BH	30°	1 crédito	Não atende	1 crédito	1 crédito	1 crédito
Leste-Oeste	100%	BH	45°	1 crédito	Não atende	1 crédito	1 crédito	1 crédito

Fonte: A autora.

Em Recife, os ambientes com PAF de 50% orientados a leste apresentaram grande porção de área com iluminâncias excessivas pela manhã e com iluminâncias insuficientes à tarde, consequência da trajetória solar no céu durante o curso do dia. Quando o PAF aumentou para 100%, cerca de 50% da área dos ambientes orientados a oeste apresentaram iluminâncias superiores a 5400 lx à tarde. Por esse motivo, quando computado o pavimento integralmente, os modelos com orientação leste-oeste apresentaram 88% de sua área com iluminâncias adequadas às 9h, mas apenas 72% às 15h, não sendo suficiente, portanto, para alcançar o crédito. Quando os modelos foram orientados a norte-sul, as iluminâncias disponíveis no interior do ambiente se aproximaram dos limites estabelecidos pelo LEED 2009, o que permitiu que os modelos com PAF de 50% adquirissem um crédito e os modelos com PAF de 100%, dois créditos.

Nas cidades de Vitória e São Paulo, o resultado das avaliações da luz natural não apresentou diferenças ao final: todos os modelos com DPS ganharam um crédito. A homogeneidade desse resultado é reflexo da pequena variação de latitude entre as cidades – 20°16'S e 23°37'S respectivamente –, ou seja, a diferença de luminosidade da abóbada celeste em Vitória e São Paulo, sob condições de céu claro, a princípio, não é suficiente para alterar significativamente o percentual de área dos ambientes que atingem o intervalo de iluminâncias estabelecido na metodologia de avaliação desse sistema.

Contudo, é importante destacar que essas cidades apresentam climas distintos, localizam-se em zonas bioclimáticas diferentes e, por isso, quando localizado em cada uma dessas cidades, um mesmo modelo apresenta desempenho energético próprio. A simulação de todos os modelos sob o céu claro é, em parte, consequência da dificuldade em se estabelecer uma metodologia de avaliação que seja simultaneamente adequada, simples e rápida para atender às demandas de mercado e cientificamente precisa.

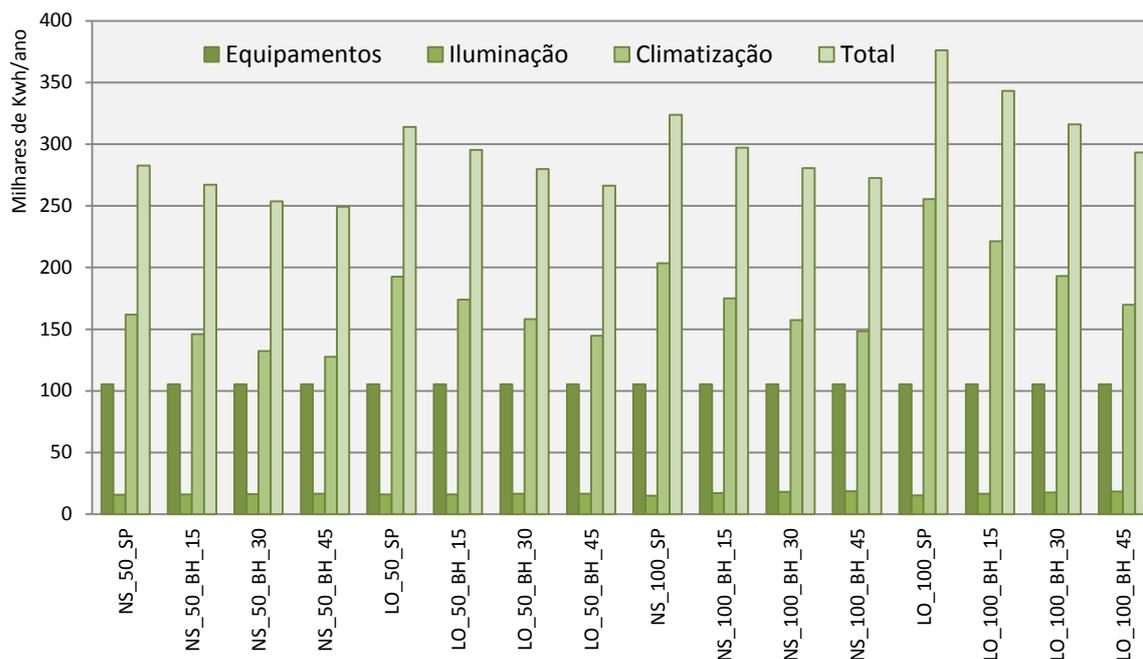
Em Porto Alegre, todos os modelos com DPS alcançaram um crédito, exceto os de orientação leste-oeste com PAF de 50%. Nesses casos, 32% da área dos ambientes orientados a leste ultrapassaram as iluminâncias superiores pela manhã e 15% não atingiu as iluminâncias mínimas à tarde. Quando orientados a oeste, 25% da área dos ambientes ultrapassaram as iluminâncias superiores à tarde e 26% não atingiram os níveis mínimos, pela manhã, impedindo que os modelos com essa orientação e percentual de abertura obtivessem o crédito.

Eventuais imprecisões nos resultados dados pelo *software DIALux* quando os resultados são medidos em iluminâncias não puderam ser estimados face à introdução da luz direta e de sua inerente complexidade direcional.

4.3 Análise do consumo energético

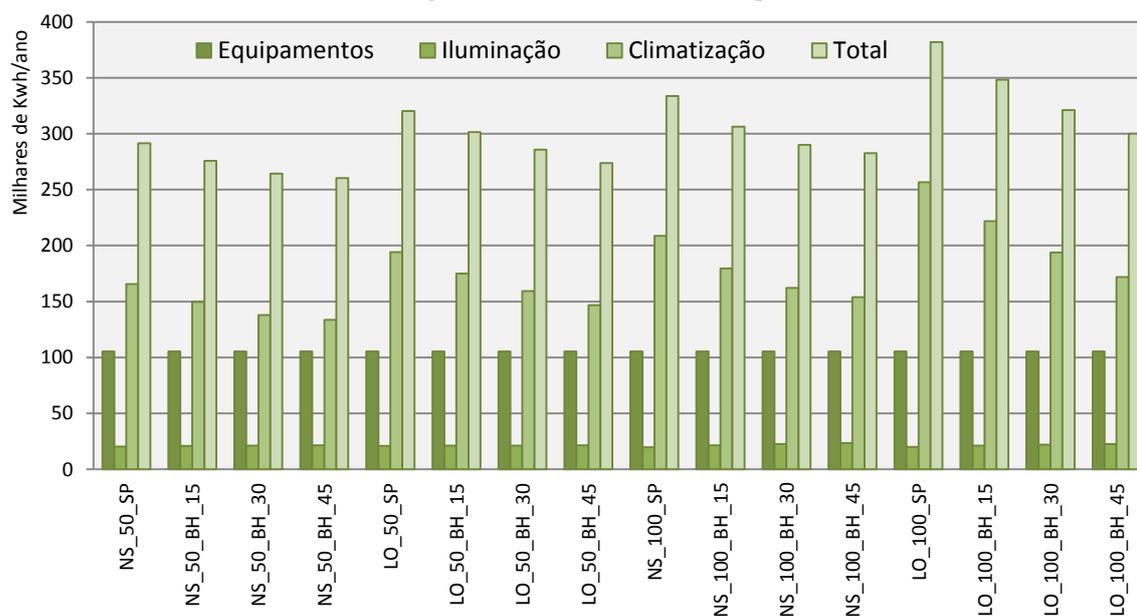
Após a análise dos modelos quanto ao atendimento aos requisitos de luz natural definidos nos sistemas de avaliação de edifícios, foram executadas as simulações computacionais do consumo energético. O resultado do consumo energético dos dezesseis modelos nas cinco cidades investigadas encontra-se representado pelos Gráfico 1 a Gráfico 5.

Gráfico 1 – Consumo energético dos modelos simulados para a cidade de Belém.

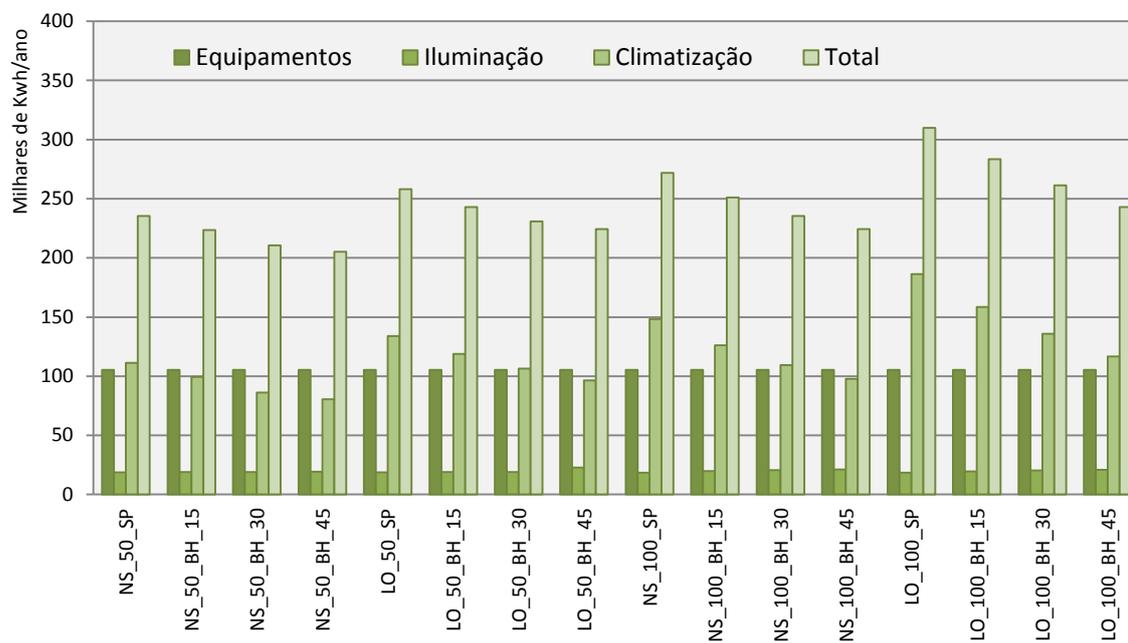


Fonte: A autora.

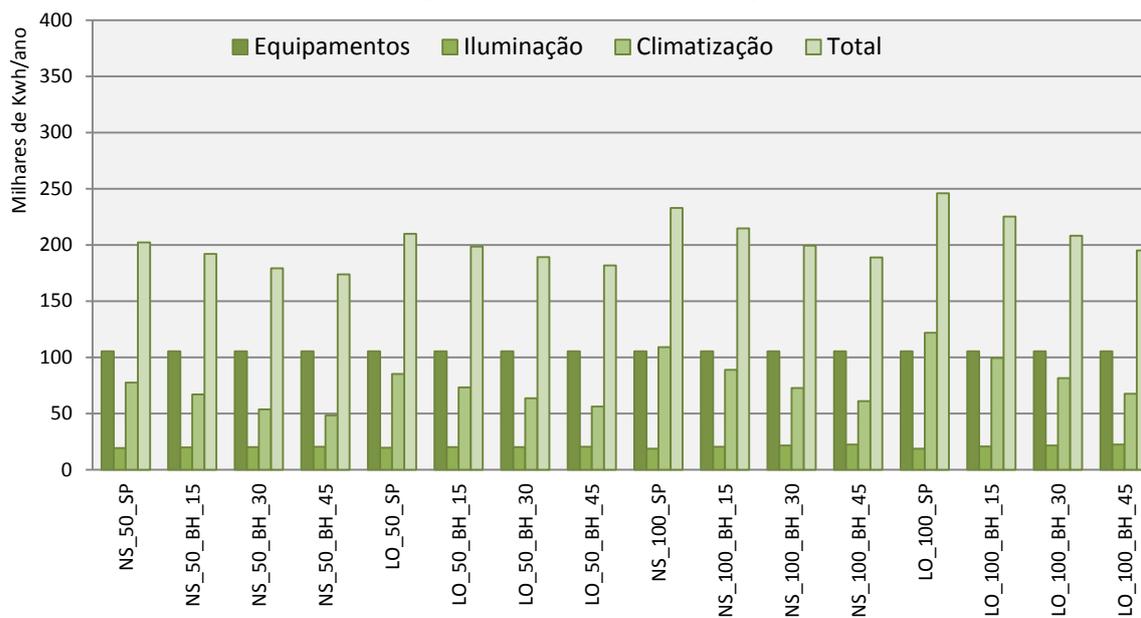
Gráfico 2 - Consumo energético dos modelos simulados para a cidade de Recife.



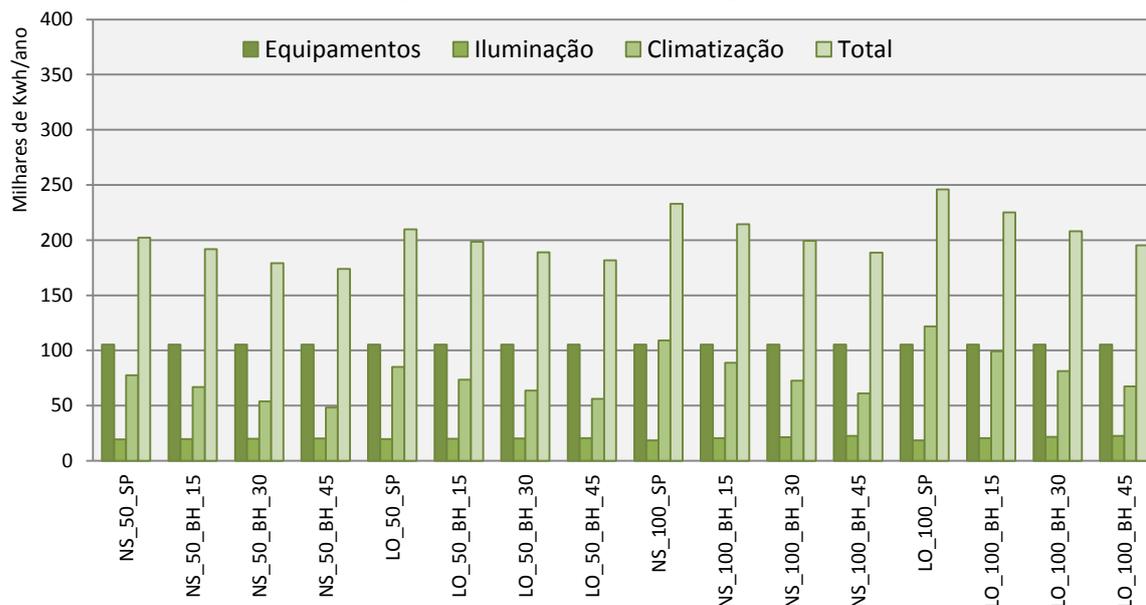
Fonte: A autora.

Gráfico 3 – Consumo energético dos modelos simulados para a cidade de Vitória.

Fonte: A autora.

Gráfico 4 – Consumo energético dos modelos simulados para a cidade de São Paulo.

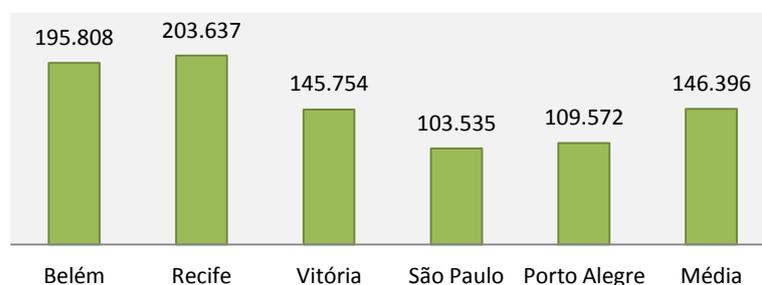
Fonte: A autora.

Gráfico 5 – Consumo energético dos modelos simulados para a cidade de Porto Alegre.

Fonte: A autora.

Os gráficos apresentados exibem perfis similares, indicando que as variáveis estudadas se comportaram da mesma maneira nas diferentes latitudes. Observou-se, em geral, uma tendência de diminuição do consumo final de energia elétrica com o aumento da latitude, embora tenha-se registrado em Recife um consumo energético final ligeiramente maior que em Belém, com uma média de 4%, e em Porto Alegre o consumo de energia registrado foi também superior ao de São Paulo, com um aumento médio de aproximadamente 6%.

O Gráfico 6 mostra o consumo médio com iluminação e ar condicionado nos 16 modelos em cada uma das cidades investigadas, de onde se destacam que as cidades com maior e menor demanda por energia elétrica são Recife e São Paulo, respectivamente.

Gráfico 6 – Consumo médio com iluminação e ar condicionado nas cidades investigadas em kwh/ano.

Fonte: A autora.

Os gráficos de 1 a 5 indicam também que o sistema de iluminação artificial tem uma parcela de contribuição menos expressiva no consumo geral dos modelos, variando de aproximadamente 9% em Belém a cerca de 20% em São Paulo. A orientação e o PAF

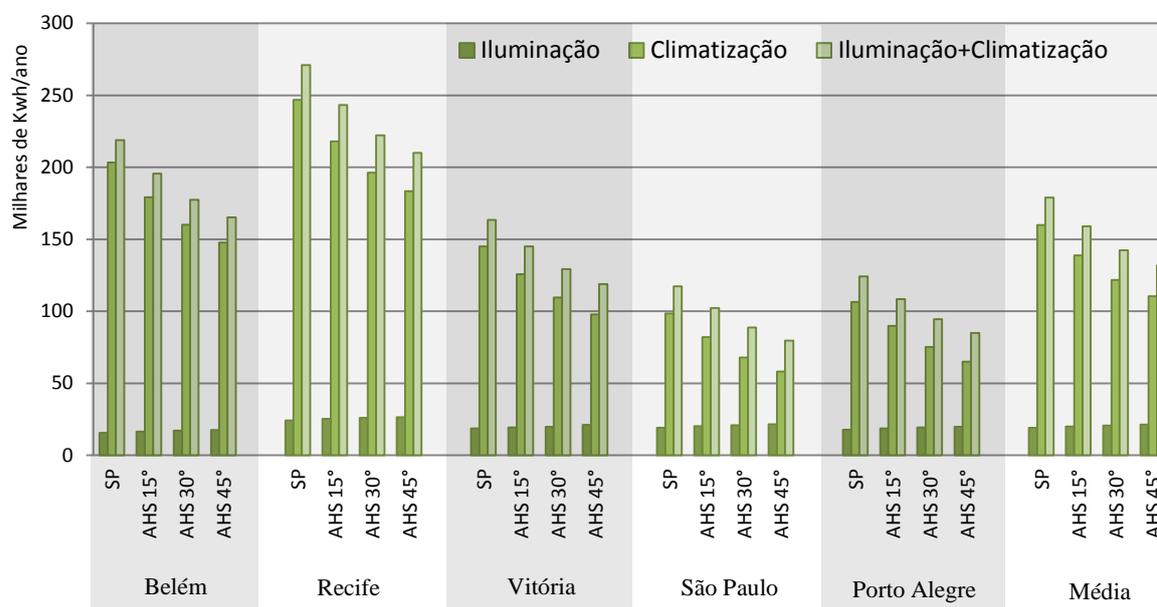
provocaram o aumento no consumo energético e a instalação dos DPS favoreceu a redução do consumo final. Esses aspectos convergem com os resultados encontrados nas demais investigações científicas a respeito do tema e foram abordados em maior profundidade nos itens subsequentes.

4.3.1 Influência dos dispositivos de proteção solar (DPS)

Sabe-se que existe um limite para o ângulo de sombreamento proporcionado pelos DPS a partir do qual o aumento no consumo com iluminação artificial ultrapassa a economia com o sistema de climatização. No entanto, em todos os casos simulados, a instalação desses dispositivos foi benéfica para alcançar os objetivos de eficiência energética e assim, o consumo final dos modelos acompanhou as variações da climatização artificial.

Apesar de terem provocado um pequeno aumento no consumo com iluminação, a instalação dos DPS influenciou sobremaneira o consumo para fins de climatização artificial, reduzindo-a em percentuais da ordem de aproximadamente 10%, quando instalados brises com AHS de 15°, até reduções de aproximadamente 34%, quando utilizados AHS de 45° (Gráfico 7).

Gráfico 7 - Influência média dos brises no consumo energético, agrupados por cidade e AHS.



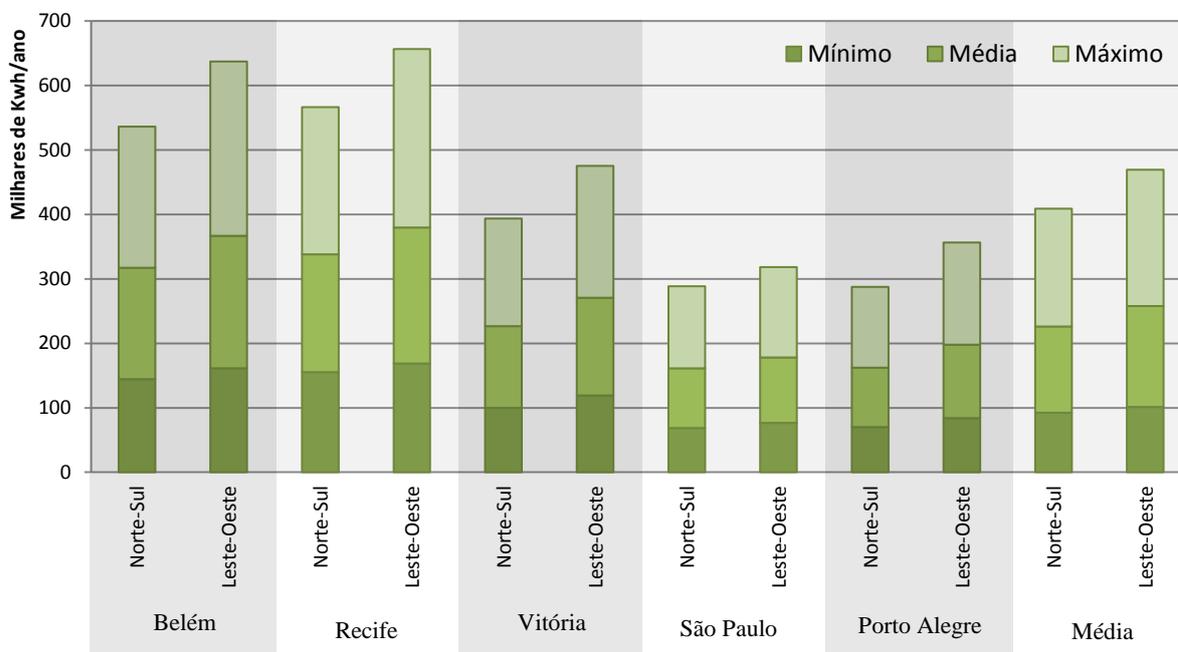
Fonte: A autora.

4.3.2 Influência da orientação solar

O consumo final dos modelos aumentou quando se alterou a orientação solar das aberturas de norte-sul para leste-oeste. O Gráfico 8 apresenta o consumo final médio dispendido com

iluminação e ar condicionado, agrupados por cidade. Valores mínimos e máximos, embora pouco relevantes nesse trabalho, são apresentados como informação adicional gerada naturalmente na pesquisa.

Gráfico 8 – Influência média da orientação no consumo energético, agrupados por cidade.



Fonte: A autora.

A alteração na orientação provocou um aumento médio no consumo final dos modelos correspondente a cerca de 19% em Belém; 16% em Recife; 19% em Vitória; 10% em São Paulo e 23% em Porto Alegre, gerando um acréscimo médio de cerca de 17% atestando a importância da correta orientação como estratégia de eficiência energética.

Dentre os modelos sem DPS, a alteração da orientação de norte-sul para leste-oeste acarretou um aumento médio no consumo de 19%. Nesse grupo, nenhum dos modelos atendeu ao LEED por não possuírem DPS, e a alteração da orientação não influenciou os resultados da avaliação segundo os sistemas de avaliação de edifícios: todos os modelos nesse grupo atendem ao AQUA e ao BREEAM. Dentre os modelos que instalaram os DPS, os modelos orientados a leste-oeste obtiveram um incremento médio de cerca de 17% em relação aos orientados a norte-sul.

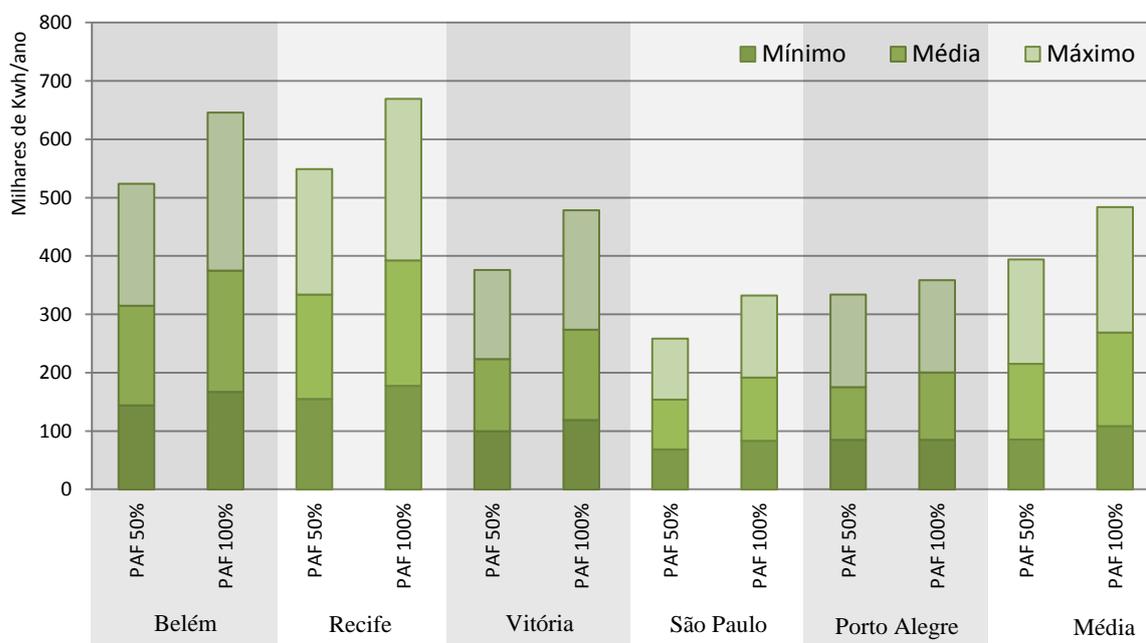
Dentre os modelos de orientação norte-sul, a instalação dos DPS propiciou uma redução média de aproximadamente 19% no consumo de energia e nos modelos leste-oeste, a instalação desses dispositivos reduziu o consumo final médio em cerca de 20%.

4.3.3 Influência do percentual de abertura na fachada (PAF)

O consumo final dos modelos aumentou quando o PAF passou de 50% para 100%. O Gráfico 9 apresenta o consumo final médio, mínimo e máximo dispendidos com iluminação e ar condicionado, agrupados por cidade.

O aumento médio no consumo final dos modelos correspondeu a aproximadamente 22% em Belém; 20% em Recife; 25% em Vitória; 27% em São Paulo e 27% em Porto Alegre, gerando um acréscimo médio de cerca de 24%, o que mostra que dentro do grupo de modelos investigados, é mais eficiente reduzir o PAF de 100% para 50% que orientar adequadamente as aberturas quando se objetiva reduzir o consumo de energia nos modelos.

Gráfico 9 – Influência média do aumento do PAF, agrupados por cidade.



Fonte: A autora.

Dentre os modelos sem DPS, o aumento do PAF aumentou o consumo final médio dos modelos em aproximadamente 29%. Dentre os modelos com DPS, o aumento do PAF provocou um aumento médio menor, mas ainda considerável, de cerca de 21%.

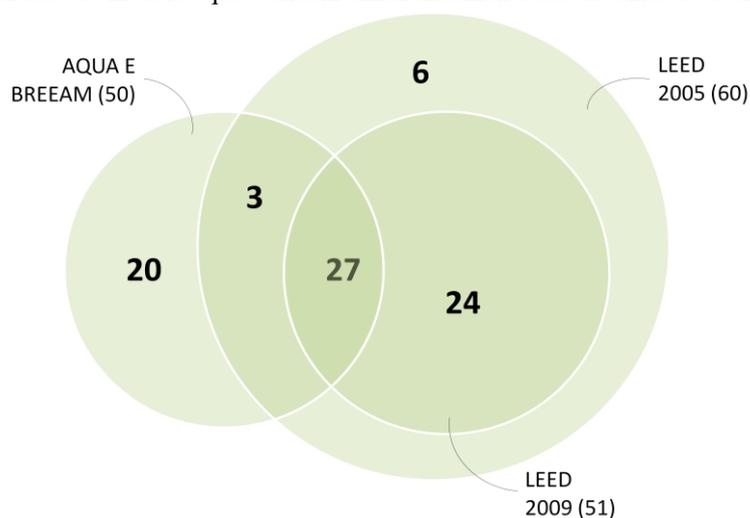
Dentre os modelos com PAF 50%, a instalação dos DPS reduziu o consumo médio em cerca de 17% ao passo que dentre os modelos com PAF 100%, o uso dos DPS reduziu o consumo em 22% na média, em relação aos modelos iguais, sem esses dispositivos.

4.4 Impactos energéticos do atendimento aos requisitos de iluminação natural

O consumo final de todos modelos simulados e o resultado das avaliações do desempenho da luz natural segundo o AQUA e o BREEAM (Gráfico 10), o LEED 2009 (Gráfico 11) e o LEED 2005 (Gráfico 12) são apresentados na sequência. Foi elaborado um único gráfico para representar os resultados do AQUA e do BREEAM porque os modelos alcançaram desempenhos correspondentes nesses sistemas, com a única exceção dos modelos com orientação leste-oeste, PAF de 100% e brises com AHS de 15° que, independentemente da cidade e, conforme discutido anteriormente, foram avaliados como *excelente* pelo AQUA e adquirem apenas 1 crédito no BREEAM. Esses modelos estão identificados com uma estrela no gráfico 10.

Uma das principais constatações derivadas da análise dos Gráfico 10, 11 e 12 diz respeito à falta de consenso no que se considera adequado quanto ao desempenho da luz natural (Gráfico 13). Dos oitenta modelos elaborados, apenas vinte e sete obtiveram alguma pontuação em todos os sistemas de avaliação de edifícios (Figura 27), destacando-se que todos esses possuem simultaneamente um PAF de 100% e dispositivos de proteção solar. Ainda, grande parte dos modelos que atendem ao AQUA e ao BREEAM – 25% do total – não atendem aos demais sistemas.

Figura 27 – Quantidade de modelos que atendem simultaneamente aos sistemas de avaliação de edifícios.



Fonte: A autora.

Gráfico 10 – Consumo final e avaliação do desempenho da luz natural segundo o AQUA e o BREEAM.

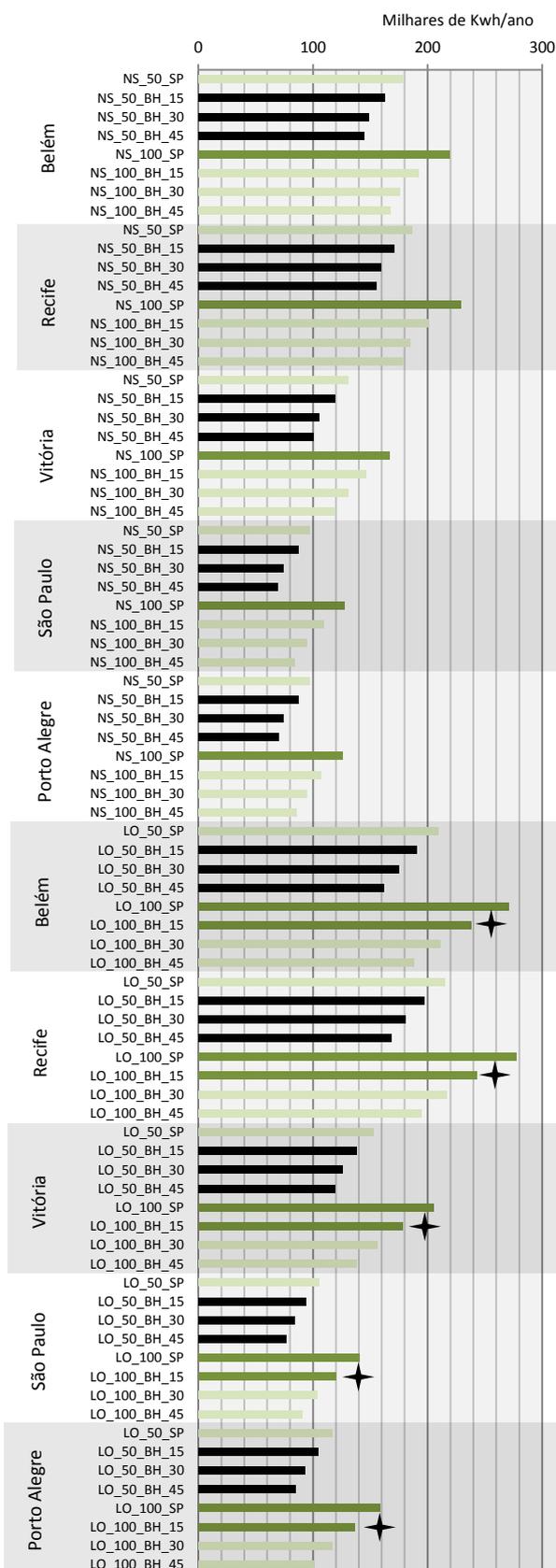
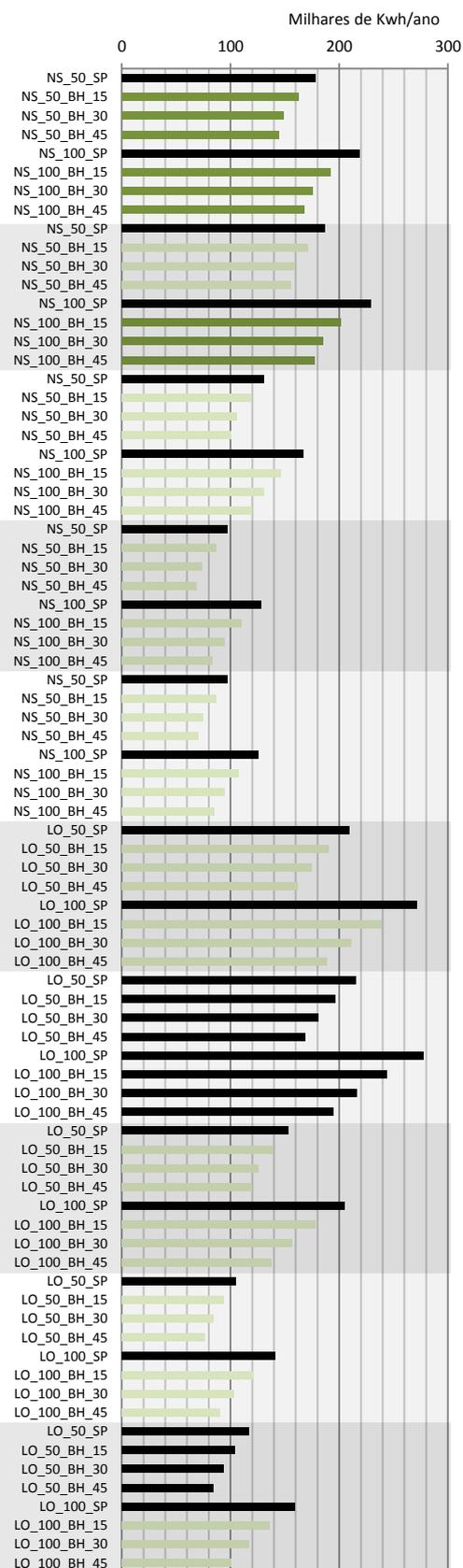


Gráfico 11 – Consumo final e avaliação do desempenho da luz natural segundo o LEED 2009.



Atende ao critério Desempenho exemplar Não atende

Fonte: A autora.

Gráfico 12 – Consumo final e avaliação do desempenho da luz natural segundo o LEED 2005.

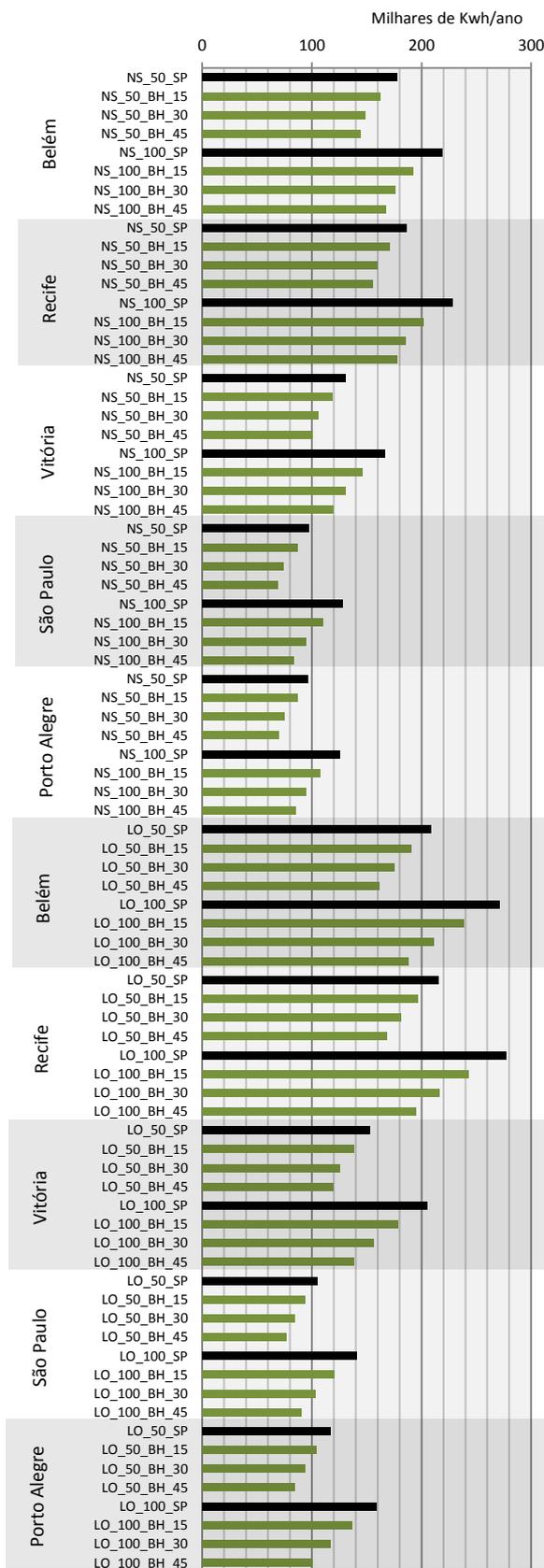
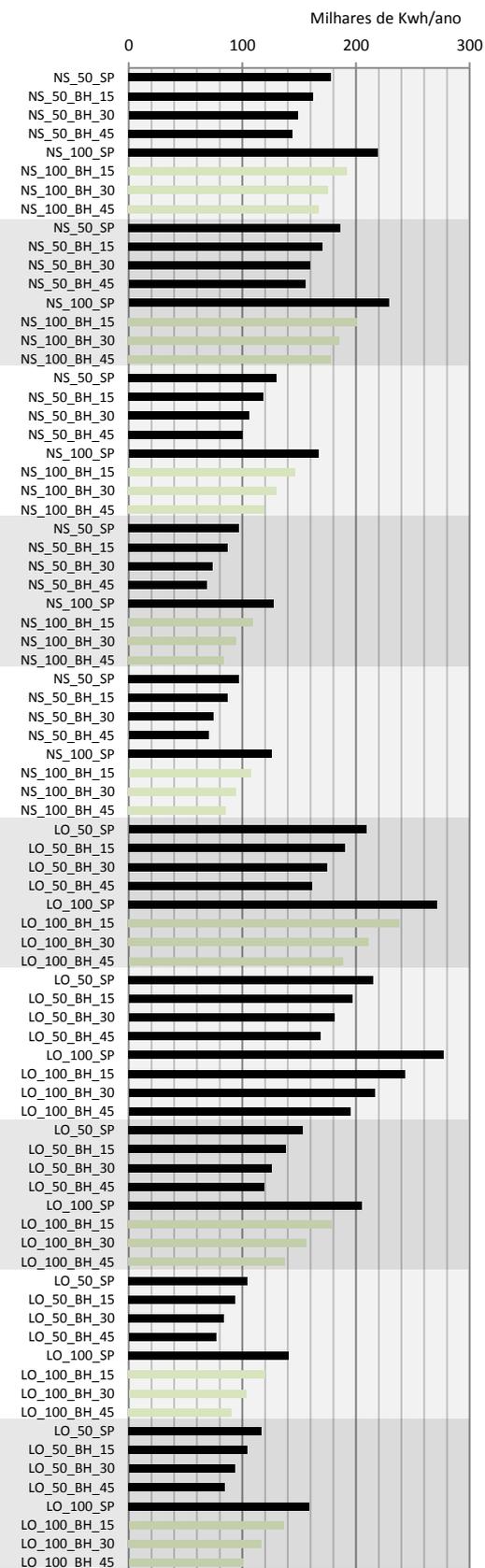


Gráfico 13 – Consumo final e identificação dos modelos que minimamente atendem a todos os sistemas.



Atende ao critério Desempenho exemplar Não atende

Fonte: A autora.

Entende-se que os sistemas de avaliação de edifícios deveriam ser capazes de indicar os modelos cujas características arquitetônicas, sobretudo as dos sistemas de iluminação natural, fossem capazes de propiciar bons ambientes visuais nos interiores e que essa identificação apontasse para um ponto de convergência nos diferentes sistemas, eventualmente com maior ou menor nível de exigência. No entanto, verificou-se o contrário: um mesmo modelo pode apresentar resultados de avaliações do desempenho da luz natural opostos conforme o sistema de avaliação utilizado para avaliá-lo.

Mais importante que apontar quais sistemas de avaliação de edifícios são capazes de avaliar o desempenho da iluminação de maneira mais precisa – e estendendo a possibilidade das divergências ocorrerem em outras categorias e em outros critérios dentro desses sistemas –, essas observações indicam que uma edificação certificada não necessariamente apresenta um melhor desempenho ambiental.

Quanto aos modelos de “desempenho exemplar”, não existem coincidências nos sistemas de avaliação de edifícios investigados – ocorrem apenas entre LEED 2005 e LEED 2009 (Gráfico 11 e Gráfico 12) – e a grande maioria dos modelos que atingem o nível de excelência no AQUA e no BREEAM não atendem às metodologias do LEED 2005 e 2009 por não possuírem dispositivos de proteção solar. Os primeiros são justamente os modelos que apresentam maior consumo energético quando comparados com modelos idênticos cujos sistemas de iluminação natural são providos de dispositivos de proteção solar, indicando que, no AQUA e no BREEAM o atendimento aos requisitos de iluminação natural pressupõe uma série de cuidados adicionais para reduzir o consumo energético e mantê-los em níveis aceitáveis.

Também foi possível verificar que as modificações introduzidas no LEED 2009, em relação à metodologia desse sistema na versão anterior, dificultaram sensivelmente a obtenção dos créditos por desempenho exemplar, que puderam ser obtidos apenas em Belém, nos modelos com orientação norte-sul e em Recife, com orientação norte-sul e PAF de 100%. A dificuldade em se obter a pontuação do LEED 2009 em Recife, por exemplo, é um aspecto positivo da metodologia estabelecida por esse sistema, pois corresponde a dizer que, para receber os créditos correspondentes ao projeto de iluminação natural nos edifícios dessa cidade, o projetista deverá propor soluções mais avançadas, já que soluções padronizadas representam a entrada de luz excessiva nas edificações nessa latitude.

Essas constatações são importantes para os empreendimentos que almejem alcançar uma certificação nessas cidades. Em Belém, não será necessário muito esforço para se obter dois créditos pelo LEED 2009: aparentemente, basta orientar a edificação adequadamente. Em Recife, vale a mesma recomendação, já que os modelos orientados a leste-oeste não atendem à metodologia, mas para alcançar o desempenho exemplar, é necessário ainda a edificação possua grandes percentuais de aberturas nas fachadas. Neste ponto a metodologia expressa no LEED também incentiva indiretamente a proposição de edificações menos eficientes no consumo energético para que se alcancem níveis de excelência quanto ao desempenho da iluminação natural.

Apesar disso, quando é realizada uma análise de maneira global, uma simples comparação visual dos gráficos 10 e 11 é suficiente para concluir que o sistema LEED possui uma maior tendência, em comparação aos outros sistemas, de impedir os modelos ineficientes de obterem o crédito, ao passo que o AQUA e o BREEAM tendem a considerar que os modelos menos eficientes propiciam melhores ambientes visuais. Os modelos com desempenho exemplar segundo o BREEAM e o AQUA são justamente os menos eficientes energeticamente em cada uma de suas cidades. Esses modelos não possuem dispositivos de proteção solar e, por isso correspondem, no LEED, aos modelos que não atendem a essa metodologia.

Em todos os modelos orientados a leste-oeste, o AQUA considerou *excelente* o desempenho do sistema de iluminação nos dois modelos mais energeticamente inadequados: os modelos com PAF de 100% sem proteções ou com proteções de apenas 15° confirmando portanto a hipótese de que o atendimento a alguns sistemas de avaliação de edifícios quanto aos requisitos de iluminação natural podem estar associados a incrementos no consumo com energia elétrica para fins de condicionamento de ar.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, os modelos de edificações comerciais artificialmente climatizadas, localizadas em cinco cidades brasileiras selecionadas pelas latitudes – Belém, Recife, Vitória, São Paulo e Porto Alegre –, com diferentes orientações, percentuais de abertura na fachada e a instalação ou não de brises horizontais com ângulos de sombreamento de 15°, 30° e 45° foram elaborados e posteriormente simulados através da adoção do *software DIALux* – para verificação do desempenho luminoso e avaliação dos requisitos de luz natural de sistemas de avaliação de edifícios em uso no país –, e com o *software DesignBuilder* – para verificação do desempenho energético.

A análise das metodologias estabelecidas pelos sistemas de avaliação de edifícios permitiu concluir que o atendimento aos requisitos de iluminação natural propostos estão, em maior ou menor grau, dissociados das preocupações com eficiência energética, seja pelos indicadores utilizados ou pelas aproximações ou imprecisões expressas nas metodologias de avaliação desses sistemas. Em alguns casos foram identificados, ainda, que os referenciais dos sistemas de avaliação de edifícios fornecem informações pouco claras ou insuficientes, dificultando o trabalho dos projetistas.

O aumento do consumo energético final nos modelos que atendem aos sistemas de avaliação de edifícios é ainda mais forte nos sistemas que se utilizam do fator de luz diurna (FLD) como indicador de desempenho, tal como o AQUA e o BREEAM. Os valores obtidos por esse indicador nos interiores arquitetônicos não variam com orientação ou latitude, aspectos extremamente influentes no consumo energético final dos modelos – alterações na orientação aumentaram o consumo médio em cerca de 17% e a diferença entre o consumo final médio da cidade menos consumidora de energia para a mais consumidora foi de aproximadamente 97%. Os requisitos desses sistemas exigem ainda grandes quantidades de luz no interior e não fazem exigências quanto à presença de dispositivos de proteção solar, o que permitiu identificar que os modelos que atendem a esses sistemas são justamente os modelos de maior consumo energético.

Nos sistemas AQUA e BREEAM, a obtenção de pontuação nos modelos que fazem uso de dispositivos de proteção solar é rara. A necessidade de atendimento aos requisitos de luz natural em sistemas que exigem introdução de um alto FLD nos ambientes pode levar os projetistas a reduzirem o ângulo de proteção solar, eventualmente delegando em segundo

plano os objetivos de redução do consumo energético ou exigindo-se que uma série de estratégias adicionais sejam incorporadas para que se mantenha o consumo energético final em níveis aceitáveis.

Quando os modelos foram avaliados segundo a metodologia estabelecida pelo LEED 2005, todos os modelos munidos de dispositivos de proteção solar atingiram pontuação correspondente a um desempenho exemplar. Isso é parcialmente devido à geometria investigada, de proporções 1:1. Acredita-se que a investigação de ambientes de geometria profundas possam levar a conclusões mais precisas a esse respeito. Houve, porém, uma sensível modificação na pontuação obtida pelos modelos, nas diferentes latitudes, ao aplicar-se a metodologia proposta pela versão do LEED 2009.

Segundo as metodologias dos sistemas LEED 2005 e 2009, dispositivos de proteção solar para controle do ofuscamento, obrigatórios para atendimento aos requisitos de luz natural, não afetam os cálculos da luz natural. Esse procedimento é uma simplificação bastante grosseira, não corresponde às conclusões expostas nas investigações científicas recentes por ignorarem os sombreamentos excessivos ou insuficientes proporcionados por essas estratégias, comprometendo a fidelidade na medição do desempenho luminoso. No LEED, embora não influencie no desempenho luminoso dos modelos, o ângulo de sombreamento utilizado impactou fortemente o consumo energético, reduzindo-o a percentuais da ordem de 10%, quando instalados brises com AHS de 15°, até reduções de aproximadamente 34%, quando utilizados AHS de 45°, atestando a importância dessas estratégias para se alcançar os objetivos de eficiência energética. Aqui, observa-se um forte distanciamento entre a avaliação dos aspectos de conforto visual e de eficiência energética proporcionados pelo uso da luz natural nas edificações.

Ainda a respeito do LEED, a utilização do céu claro nas simulações do desempenho da luz natural para verificação do atendimento a esse sistema, é uma simplificação que gera resultados pouco representativos das situações reais. Sabe-se que a grande maioria das capitais no país apresenta mais frequentemente o tipo de céu parcialmente encoberto, um tipo de céu de difícil caracterização e padronização, e que a cidade de Belém, por exemplo, onde o tipo de céu mais frequente é encoberto, atingiu um nível de desempenho luminoso considerado exemplar na grande maioria dos modelos avaliados pelo LEED 2009. Esses resultados, no entanto, não necessariamente correspondem à realidade que se verificaria no local, podendo incentivar a adoção de sistemas que não favorecem o ambiente visual dos ocupantes.

A questão da padronização do tipo de céu é uma questão de difícil resolução quando se utilizam simulações estáticas da luz natural. Provavelmente a ponderação dos níveis de iluminância obtidos nas simulações e a frequência de ocorrência do tipo de céu, a exemplo do indicador PALN, favorecesse a obtenção de resultados mais representativos. Isso certamente geraria a necessidade de uma série de simulações adicionais, o que tornaria mais complexo o procedimento para verificação do atendimento aos requisitos de iluminação natural e comprometeria a aplicabilidade de sistemas de avaliação de edifícios que objetivam atender à dinamicidade do mercado. Acredita-se que o desenvolvimento de pesquisas nessa área e a promoção das simulações dinâmicas da luz natural e as simulações integradas da luz natural e eficiência favoreçam a identificação dos modelos mais recomendados, de forma geral.

Uma das principais constatações do trabalho diz respeito à falta de consenso no que se considera adequado quanto ao desempenho da luz natural, já que apenas cerca de 1/3 dos modelos simulados conseguiram atender simultaneamente aos quatro sistemas de avaliação de edifícios investigados. Desses modelos, todos apresentaram simultaneamente um percentual de abertura nas fachadas de 100% e a instalação de dispositivos de proteção solar. Os modelos com essas características apresentaram um incremento médio superior a 20% no consumo energético quando comparados a modelos com PAF de 50% e a presença de dispositivos de proteção solar.

Entende-se, porém, que o projetista é responsável por gerenciar as decisões de projeto como um todo e de adotar os sistemas de aberturas mais adequados para dada condição considerando-se os efeitos para o conforto visual nos interiores e a necessidade de redução do consumo energético de forma global. Nesse sentido, pode-se dizer que os sistemas de avaliação de edifícios funcionam como simples certificações e não como referenciais da qualidade de edifícios porque falham em identificar as soluções mais adequadas e porque o atendimento a seus requisitos de luz natural não representam, necessariamente, uma melhoria do desempenho luminoso das edificações.

As constatações aqui expressas permitem inferir que o desempenho ambiental e energético de um edifício é função das escolhas para o projeto e de responsabilidade do projetista acima do atendimento ou não de critérios e de metodologias preestabelecidas, entendendo-se que, por vezes, o atendimento a alguns requisitos significa necessariamente o não atendimento a outro. Por fim, verificou-se também que alguns dos requisitos estabelecidos por esses sistemas são inadequados por não serem capazes, atualmente, de garantir a pontuação correspondente às

situações em que o projeto é capaz de resolver a dialética complexa de interações entre, por exemplo, luz e calor nas edificações.

Espera-se, contudo, que o desenvolvimento de pesquisas nessa área e a transferência de conhecimento da academia para as atividades corriqueiras no mercado da construção civil permitam que os sistemas de avaliação de edifícios incorporem metodologias mais precisas para uma avaliação mais confiável do desempenho das edificações.

5.1 Limitações da pesquisa

Destaca-se que alguns aspectos da metodologia podem haver interferido no resultado do desempenho alcançado pelos modelos, tais como:

- O uso apenas do método de simulação para verificação do atendimento ao crédito, quando alguns sistemas de avaliação de edifícios permitem a concessão do crédito a edifícios que verifiquem o atendimento aos requisitos de iluminação natural por meios prescritivos;
- As aproximações fornecidas pelos resultados do *software DIALux* sugerem pequenas imprecisões nos algoritmos; e
- Embora essa etapa tenha sido realizada com grande cautela e buscando o máximo de precisão, a determinação da área dos ambientes que atingem os parâmetros do LEED 2009 dependeu do aumento proporcionado pela utilização do comando *zoom* no *software AutoCAD*.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

- Realizar estudos similares utilizando-se de metodologias baseadas nas iluminâncias úteis da luz natural, com a realização de simulações dinâmicas da luz e/ou simulações integradas de iluminação e eficiência energética.
- Avaliar os resultados fornecidos por ambientes com geometrias mais profundas e em edificações do tipo planta livre.
- Analisar o desempenho de modelos que adotem tipos de vidros mais utilizados em edificações certificadas ou que utilizem sistemas de iluminação natural avançados em vez de utilizar dados de produtos mais frequentemente instalados em edificações convencionais.

- Testar a influência do fator solar dos vidros;
- Comparar os resultados obtidos nas simulações com o desempenho de edificações reais certificadas;
- Realizar estudos similares em edificações que atenderiam simultaneamente os requisitos de luz natural e de eficiência energética estabelecidos por essas metodologias a fim de verificar o desempenho final de eventuais proposições de forma global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAJMI, A. Energy audit of an educational building in a hot summer climate. **Energy and Buildings**, n. 47, p. 122-130, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5413**: Iluminância de interiores: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15215-2**: Iluminação natural – Parte 2: procedimento de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15215-3**: Iluminação natural – Parte 3: procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15.220-2**: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15.220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 8995-1**: Iluminação de ambientes internos de trabalho. ABNT, 2010.

BANCO CENTRAL DO BRASIL – BCB. **Indicadores econômicos consolidados**: produto interno bruto e taxas médias de crescimento, 30 mar. 2011. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/?INDECO>>. Acesso em 05 abr. 2011.

BERNABÉ, A. C. A. **A influência da envoltória no consumo de energia em edifícios comerciais artificialmente climatizados na cidade de Vitória-ES**. 130p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2012.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT GLOBAL – BRE GLOBAL. **BRE Environmental & Sustainability Standard**: BREEAM Offices 2008 Assessor Manual. BES 5055: ISSUE 3.0. BRE Global, 2009.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT GLOBAL – BRE GLOBAL. **BREEAM New Construction**: Non-Domestic Buildings. Technical Manual. SD5073 – 2.0:2011. BRE Global, 2011.

BODART, M.; HERDE A. D. **Global energy savings in offices buildings by the use of daylight**. Energy and Buildings, n. 34, p. 421-429, 2002.

BROWN, G. Z; DEKAY, M. **Sol, vento e luz: estratégias para o projeto de arquitetura.** Tradução Alexandre Salvaterra. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais.** 215p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

CARLO, J.C.; PEREIRA, F. O. R.; LAMBERTS, R. Iluminação natural para redução do consumo de energia de edificações de escritório aplicando propostas de eficiência energética para o código de obras do Recife. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, São Paulo. Anais.

Certificação de edifícios sustentáveis: BREEAM. Disponível em: <http://vivianecunha.com.br/portugues/images/breeam_pdf_print.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2012.

CHRISTAKOU, E. D. **A simulação computacional da luz natural aplicada ao projeto de arquitetura.** 147p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

CLARO, A. **Modelo vetorial esférico para radiosidade aplicado à iluminação natural.** 177p. Tese (Doutorado). Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas/EPS-CTC. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.

Crise no Japão levanta questões sobre energia nuclear, diz Hillary. Disponível em: <<http://www.folha.uol.com.br/mundo/>>. Acesso em: 05 abr. 2011.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos. Rio de Janeiro: Revan, 2003.

COSTA, G. J. C. **Iluminação econômica: cálculo e avaliação.** 2ª ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2000.

DE ROSA, A.; FERRARO, V.; IGAWA, N.; KALIAKATSOS, D.; MARINELLI, V. INLUX: a calculation code for daylight illuminance predictions inside buildings and its experimental validation. **Building and Environment**, n. 44, p. 1769-1775, 2009.

DESIGNBUILDER. **DesignBuilder Software** Ltd. 2005.

DIAL GMBH. **DIALux Light Building Software.** Versão 4.9.0.0. Alemanha, 2011. Disponível em: <<http://www.dial.de>>. Acesso em: 20 fev. 2011.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 139-154, out./dez., 2010.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONOMICOS - DIEESE. **A crise de energia – Possíveis impactos**. 2001. Disponível em: <<http://www.dieese.org.br/esp/energia.xml>>. Acesso em: 09 maio 2011.

DONNELLY, A.; JONES, M.; O'MAHONY, T. BYRNE, G. Selecting environmental indicator for use in strategic environmental assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, n. 27, 161-175, 2007.

ENERGY RESEARCH GROUP DE UNIVERSITY COLLEGE DUBLIN – ERG; CONSEJO DE ARQUITECTOS DE EUROPA – CAE; SOFTECH; SUOMEN ARKKITEHTILIITTO - SAFA. **Un vitruvio ecológico: principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2008.

FIUZA, J. M. **Influência de elementos de proteção solar horizontais aplicados a aberturas laterais, na admissão e distribuição da luz natural**. 184p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

FUNDAÇÃO CARLOS ALBERTO VANZOLINI – FCAV. **Referencial técnico de certificação "Edifícios do setor de serviços – Processo AQUA"**: Escritórios e Edifícios escolares. Versão 0. São Paulo: FCAV, 2007.

FUNDAÇÃO VANZOLINI. **Empreendimentos certificados**. Disponível em: <http://www.vanzolini.org.br/conteudo_77.asp?cod_site=77&id_menu=810>. Acesso em: 19 abr. 2012.

GARROCHO, J. S.; AMORIM, C.N.D. Luz natural e projeto de arquitetura: estratégias para iluminação zenital em centros de compras. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, São Paulo. Anais.

GARROCHO, J. S.; AMORIM, C.N.D. Iluminação natural em centros de compras:estratégias inovadoras para aberturas zenitais. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2006, Florianópolis. Anais.

GHSI, E.; TINKER, J. A. An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. **Building and Environment**, n° 40, p. 51-61, 2005.

GHSI, E.; TINKER, J. A.; IBRAHIM, S. H. Área de janela e dimensões de ambientes para iluminação natural e eficiência energética: literatura *versus* simulação computacional. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 4, p. 81-93, out./dez. 2005.

GONÇALVES, J.C.S.; VIANNA, N. S.; MOURA, N. C. **Iluminação natural e artificial**. Trabalho elaborado no âmbito do PROCEL EDIFICA - eficiência energética em edificações. Rio de Janeiro, 2011.

GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. 2ª edição. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.

GOZI, R. **Crise no Japão tende a inviabilizar energia nuclear.** Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/internacional,crise-no-japao-tende-a-inviabilizar-energia-nuclear,694570,0.htm>>. Acesso em: 05 abr. 2011.

GREEN BUILDING COUNCIL AUSTRALIA – GBCA. **Green Star Diffusion:** Architecture. Sydney: GBCA, 2005.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL – GBCB. **255 Empreendimentos registrados LEED no Brasil até 18/03/11.** Seção Empreendimentos LEED. Disponível em: <<http://www.gbcbrasil.org.br/pt/index.php?pag=certificacao.php>>. Acesso em: 05 maio 2011.

GREEN BUILDING COUNCIL SOUTH AFRICA - GBCSA. **Green Star SA - Office v1:** rating tool fact sheet. Disponível em < <http://www.gbcsa.org.za/greenstar/office.php>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

HK-BEAM SOCIETY. **HK-BEAM 4/04 ‘New Buildings’:** an environmental assessment for new buildings. Version 4/04. Hong Kong: HK-BEAM Society, 2004.

HUA, Y.; OSWALD, A.; YANG, X. Effectiveness of daylighting design and occupant visual satisfaction in a LEED Gold laboratory building. **Building and Environment**, n. 46, p. 54-64, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Portaria n.º 372, 17 set. de 2010.** Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. 2010a. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001599.pdf>>. Acesso em 02 maio 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Portaria n.º 395, 11 out. de 2010.** Requisitos da avaliação de conformidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. 2010b. Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001609.pdf> >. Acesso em: 02 maio 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012.** Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética edificações residenciais. 2012. Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/AC001788.pdf> >. Acesso em: 15 maio 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Daylight in Buildings:** a source book on daylighting systems and components. Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community Systems. California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Application of the CIE test cases to assess the accuracy of lighting computer programs**. Solar heating and cooling programme – Task 31. Annex 29: Daylighting Buildings in the 21st century. Apr. 2005.

JAPAN SUSTAINABLE BUILDING CONSORTIUM – JSBC. **CASBEE for New Construction** - Technical Manual 2010 Edition. Tokio: Institute for Building Environment and Energy Conservation – IBEC, 2010.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LABEEE. Seção Downloads. Arquivos climáticos para simulação energética de edificações para 17 cidades brasileiras (.BIN) e algumas cidades americanas (formato TMY2). Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads>>. Acesso em: 08 maio 2011.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LABEEE. Seção Downloads. Arquivos climáticos em formato EPW. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads>>. Acesso em: 8 abr. 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW, 1997.

LAMBERTS, R.; GHISI, R.; RAMOS, G. Impactos da adequação climática sobre a eficiência energética e o conforto térmico de edifícios de escritórios no Brasil. 49p. Florianópolis: LABEEE, 2006.

LAMBERTS, R.; GOULART, S.; CARLO, J.; WESTPHAL, F.; PONTES, R. Regulamentação de etiquetagem voluntária de nível de eficiência energética de edifícios comerciais e públicos. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. Anais.

LI, D. H. W. A review of daylight illuminance determinations and energy implications. **Applied Energy**, n. 87, p. 2109-2118, 2010.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME. A crise do petróleo e os biocombustíveis, 2008. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/Artigos/A_crise_do_petrleo_e_os_biocom bustxveis.pdf>. Acesso em 08 maio 2011.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - MME. Balanço Energético Nacional, 2010. Disponível em <<http://www.mme.gov.br>> Acesso em: 30 mar. 2011.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - MME. Balanço Energético Nacional, 2005. Disponível em <<http://www.mme.gov.br>> Acesso em: 06 abr. 2011.

MOESEKE, G. V.; GOETGHEBUER, T. Low energy and level of requirements: the example of flexibility in space planning. *In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE*, 26., 2009, Quebec City.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, n° 38, p. 905-913, 2006.

O'CONNOR J.; LEE, E.; RUBINSTEN, F.; SELKOWITZ, S. **Tips for daylighting with windows: the integrated approach**. Berkeley: LBNL, 1997.

PEDRINI, A. **Eficiência energética em edificações e equipamentos eletromecânicos**. Trabalho elaborado no âmbito do PROCEL EDIFICA - eficiência energética em edificações. Rio de Janeiro, 2011.

PEREIRA, D. C. L. **Modelos físicos reduzidos: uma ferramenta para avaliação da iluminação natural**. 246p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PEREIRA, R. C. **Avaliação de ferramentas de simulação de iluminação natural através de mapeamento digital de luminâncias da abóbada celeste e entorno**. 184p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. STEWART, R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, n. 5, p. 271-289, 1990.

RAHMAN, M.M.; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K. Energy conservation measures in an institutional building in sub-tropical climate in Australia. **Applied Energy**, n. 87, p. 2994 - 3004, 2010.

RAMOS, G. **Análise da iluminação natural calculada por meio do programa EnergyPlus**. 121p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

RAMOS, G.; GHISI, E. Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus programme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 14, p. 1948-1958, 2010.

REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The daylighting dashboard: a simulation-based design analysis for daylight spaces. **Building and Environment**, n. 46, p. 386-395, 2011.

RYCKAERT, W. R.; LOOTENS, C.; GELDOLF, F.; HANSLAER, P. Criteria for energy efficient lighting in buildings. **Energy and Buildings**, n. 42, p. 341-347, 2010.

SANTOS, L. S.; SOUZA, A. D. S.; ALVAREZ, C. E.; AMORIM, C. N. D. O potencial de uso da luz natural em edifício escolar para a situação de Vitória-ES. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 13., 2010, Canela. Anais.

SCHMID, A. L.; GENTILI, H. C.; ROSSI, G.G.; VALLES, A.; DOMBROWSKI, R. O ambiente visual noturno: eficiência energética, comodidade e acuidade visual na iluminação das cidades. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 11-12, p. 71-84, jan./dez. 2005. Editora UFPR.

Selo de certificação verde para construções chega ao Brasil. Disponível em: <<http://www.aecweb.com.br/aec-news/materia/3268/>>. Acesso em 11 abr. 2012.

SIGNOR, R.; WESTPHAL, F.; LAMBERTS, R. Regression analysis of electric energy consumption and architectural variables of conditioned commercial buildings in 14 Brazilian cities. *In: Seventh International IBPSA Conference, Building Simulation 2001, Proceedings...* Rio de Janeiro: IBPSA, 2001.

SILVA, V. G. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros:** diretrizes e base metodológica. 210 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SILVA, V. G. Sustainability assessment of buildings: would LEED lead Brazil anywhere? *In: CIB WORLD BUILDING CONFERENCE 2007: CONSTRUCTION FOR DEVELOPMENT. Proceedings.* Cape Town, South Africa: The International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), 2007.

SILVA, V. G.; SILVA, M. G.; AGOPYAN, V. Avaliação de edifícios no Brasil: da avaliação ambiental para avaliação de sustentabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 7-18, jul./set. 2003.

SOUZA, A. D. S. **Ferramenta ASUS:** proposta preliminar para avaliação da sustentabilidade de edifícios brasileiros a partir da base conceitual da SBTool. 169p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2008.

SOUZA, M. B. **Potencialidade de aproveitamento da luz natural através da utilização de sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica.** 208p. Tese (Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

SPYROPOULOS, G. N.; BALARAS, C. A. Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches: a case study. **Energy and Buildings**, n. 43, p. 770-778, 2011.

TOLEDO, B. G. **Integração de iluminação natural e artificial:** métodos e guia prático para projeto luminotécnico. 165p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

TOLMASQUIM, M.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma perspectiva. **Novos Estudos**, n. 79, p. 47-69, 2007.

TRONCHIN, L.; FABBRI, K. Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: comparison between software simulations and operating rating simulation. **Energy and Buildings**, n. 40, p. 1176-1187, 2008.

VIANNA, N. S.; GONÇALVES, J. C. S. **Iluminação e Arquitetura**. 3ª ed. São Paulo: Geros s/c Ltda, 2007.

VENÂNCIO, R. **A influência de decisões arquitetônicas na eficiência energética do Campus/UFRN**. 221 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007.

US DEPARTMENT OF ENERGY - USDOE. Building Energy Software Tools Directory. Energy efficiency & renewable energy, building technologies program. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/>. Acesso em: 19 fev. 2011.

US GREEN BUILDING COUNCIL – USGBC. **LEED-NC** - LEED® for New Construction. Reference Guide, Version 2.2. First edition. USGBC, 2005.

US GREEN BUILDING COUNCIL – USGBC. **Green building design and construction: LEED Reference guide for green building design and construction**. 2009 Edition. USGBC, 2009.

APÊNDICE A – Resultados das simulações da luz natural

Quadro 18 – Resultado e avaliação dos modelos segundo a metodologia do AQUA.

Características do modelo				Requisitos de luz natural		Avaliação AQUA	
Orientação	PAF	DPS	AHS	FLD _{MÍN}	FLD _{AQUA}	Ambiente simulado	Edifício integralmente
Norte	50%	SP	0	0,81	1,77	Bom	Bom
Sul	50%	SP	0	0,81	1,77	Bom	
Norte	50%	BH	15°	0,75	1,52	Bom	Não atende
Sul	50%	BH	15°	0,72	1,48	Não atende	
Norte	50%	BH	30°	0,71	1,32	Não atende	Não atende
Sul	50%	BH	30°	0,71	1,35	Não atende	
Norte	50%	BH	45°	0,60	1,11	Não atende	Não atende
Sul	50%	BH	45°	0,57	1,14	Não atende	
Leste	50%	SP	0	0,80	1,77	Bom	Bom
Oeste	50%	SP	0	0,81	1,74	Bom	
Leste	50%	BH	15°	0,73	1,55	Bom	Não atende
Oeste	50%	BH	15°	0,71	1,48	Não atende	
Leste	50%	BH	30°	0,67	1,38	Não atende	Não atende
Oeste	50%	BH	30°	0,68	1,32	Não atende	
Leste	50%	BH	45°	0,57	1,10	Não atende	Não atende
Oeste	50%	BH	45°	0,57	1,06	Não atende	
Norte	100%	SP	0	1,31	2,34	Excelente	Excelente
Sul	100%	SP	0	1,28	2,21	Excelente	
Norte	100%	BH	15°	1,21	2,07	Excelente	Bom
Sul	100%	BH	15°	1,19	1,97	Bom	
Norte	100%	BH	30°	1,15	1,88	Bom	Bom
Sul	100%	BH	30°	1,11	1,78	Bom	
Norte	100%	BH	45°	1,07	1,68	Bom	Bom
Sul	100%	BH	45°	1,04	1,51	Bom	
Leste	100%	SP	0	1,27	2,37	Excelente	Excelente
Oeste	100%	SP	0	1,27	2,34	Excelente	
Leste	100%	BH	15°	1,16	2,05	Excelente	Excelente
Oeste	100%	BH	15°	1,17	2,05	Excelente	
Leste	100%	BH	30°	1,08	1,89	Bom	Bom
Oeste	100%	BH	30°	1,11	1,89	Bom	
Leste	100%	BH	45°	1,00	1,65	Bom	Bom
Oeste	100%	BH	45°	1,01	1,64	Bom	

Quadro 19 – Resultado e avaliação dos modelos segundo a metodologia do BREEAM.

Características do modelo				Requisitos de luz natural			Avaliação BREEAM	
Orientação	PAF	DPS	AHS	FLD _{MÉD}	FLD _{MÍN}	FLD _{MÍN} /FLD _{MÉD}	Ambiente simulado	Edifício integralmente
Norte	50%	SP	0	3,59	0,84	0,233	1 crédito	1 crédito
Sul	50%	SP	0	3,59	0,83	0,231	1 crédito	
Norte	50%	BH	15°	2,49	0,75	0,301	Não atende	Não atende
Sul	50%	BH	15°	2,43	0,71	0,293	Não atende	
Norte	50%	BH	30°	1,86	0,70	0,377	Não atende	Não atende
Sul	50%	BH	30°	1,86	0,69	0,369	Não atende	
Norte	50%	BH	45°	1,32	0,60	0,457	Não atende	Não atende
Sul	50%	BH	45°	1,29	0,56	0,438	Não atende	
Leste	50%	SP	0	3,56	0,82	0,231	1 crédito	1 crédito
Oeste	50%	SP	0	3,58	0,84	0,235	1 crédito	
Leste	50%	BH	15°	2,47	0,74	0,300	Não atende	Não atende
Oeste	50%	BH	15°	2,47	0,75	0,301	Não atende	
Leste	50%	BH	30°	1,84	0,70	0,378	Não atende	Não atende
Oeste	50%	BH	30°	1,87	0,70	0,376	Não atende	
Leste	50%	BH	45°	1,29	0,59	0,456	Não atende	Não atende
Oeste	50%	BH	45°	1,33	0,59	0,445	Não atende	
Norte	100%	SP	0	5,73	1,33	0,232	2 créditos	2 créditos
Sul	100%	SP	0	5,72	1,31	0,229	2 créditos	
Norte	100%	BH	15°	4,11	1,23	0,298	2 créditos	1 crédito
Sul	100%	BH	15°	4,09	1,18	0,289	1 crédito	
Norte	100%	BH	30°	3,21	1,17	0,365	1 crédito	1 crédito
Sul	100%	BH	30°	3,18	1,13	0,356	1 crédito	
Norte	100%	BH	45°	2,46	1,11	0,449	1 crédito	1 crédito
Sul	100%	BH	45°	2,43	1,07	0,439	1 crédito	
Leste	100%	SP	0	5,71	1,30	0,228	2 créditos	2 créditos
Oeste	100%	SP	0	5,71	1,29	0,227	2 créditos	
Leste	100%	BH	15°	4,06	1,16	0,285	1 crédito	1 crédito
Oeste	100%	BH	15°	4,07	1,16	0,286	1 crédito	
Leste	100%	BH	30°	3,15	1,11	0,352	1 crédito	1 crédito
Oeste	100%	BH	30°	3,16	1,11	0,353	1 crédito	
Leste	100%	BH	45°	2,39	1,04	0,435	1 crédito	1 crédito
Oeste	100%	BH	45°	2,42	1,05	0,434	1 crédito	

Quadro 20 – Resultado e avaliação dos modelos de Belém segundo a metodologia do LEED 2005 e LEED 2009.

Características do modelo				Requisitos de luz natural				Avaliação	
Orientação	PAF	DPS	AHS	Possui DPS?	% área do ambiente			LEED 2005	LEED 2009
					E > 270lx às 12h	270lx < E < 5400lx às 9h	270lx < E < 5400lx às 15h		
Norte-Sul	50%	SP	0	Não	100,00%	100,00%	100,00%	Não atende	Não atende
Norte-Sul	50%	BH	15°	Sim	100,00%	100,00%	100,00%	2 créditos	2 créditos
Norte-Sul	50%	BH	30°	Sim	100,00%	100,00%	100,00%	2 créditos	2 créditos
Norte-Sul	50%	BH	45°	Sim	100,00%	100,00%	100,00%	2 créditos	2 créditos
Leste-Oeste	50%	SP	0	Não	100,00%	82,71%	84,46%	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	15°	Sim	100,00%	82,71%	84,46%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	50%	BH	30°	Sim	100,00%	82,71%	84,46%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	50%	BH	45°	Sim	100,00%	82,71%	84,46%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	100%	SP	0	Não	100,00%	98,45%	98,20%	Não atende	Não atende
Norte-Sul	100%	BH	15°	Sim	100,00%	98,45%	98,20%	2 créditos	2 créditos
Norte-Sul	100%	BH	30°	Sim	100,00%	98,45%	98,20%	2 créditos	2 créditos
Norte-Sul	100%	BH	45°	Sim	100,00%	98,45%	98,20%	2 créditos	2 créditos
Leste-Oeste	100%	SP	0	Não	100,00%	81,42%	82,46%	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	100%	BH	15°	Sim	100,00%	81,42%	82,46%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	BH	30°	Sim	100,00%	81,42%	82,46%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	BH	45°	Sim	100,00%	81,42%	82,46%	2 créditos	1 crédito

Quadro 21 – Resultado e avaliação dos modelos de Recife segundo a metodologia do LEED 2005 e LEED 2009.

Características do modelo				Requisitos de luz natural				Avaliação	
Orientação	PAF	DPS	AHS	Possui DPS?	% área do ambiente			LEED 2005	LEED 2009
					E > 270lx às 12h	270lx < E < 5400lx às 9h	270lx < E < 5400lx às 15h		
Norte-Sul	50%	SP	0	Não	100,00%	96,81%	93,23%	Não atende	Não atende
Norte-Sul	50%	BH	15°	Sim	100,00%	96,81%	93,23%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	50%	BH	30°	Sim	100,00%	96,81%	93,23%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	50%	BH	45°	Sim	100,00%	96,81%	93,23%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	50%	SP	0	Não	100,00%	89,20%	65,28%	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	15°	Sim	100,00%	89,20%	65,28%	2 créditos	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	30°	Sim	100,00%	89,20%	65,28%	2 créditos	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	45°	Sim	100,00%	89,20%	65,28%	2 créditos	Não atende
Norte-Sul	100%	SP	0	Não	100,00%	95,29%	96,78%	Não atende	Não atende
Norte-Sul	100%	BH	15°	Sim	100,00%	95,29%	96,78%	2 créditos	2 créditos
Norte-Sul	100%	BH	30°	Sim	100,00%	95,29%	96,78%	2 créditos	2 créditos
Norte-Sul	100%	BH	45°	Sim	100,00%	95,29%	96,78%	2 créditos	2 créditos
Leste-Oeste	100%	SP	0	Não	100,00%	87,94%	71,67%	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	100%	BH	15°	Sim	100,00%	87,94%	71,67%	2 créditos	Não atende
Leste-Oeste	100%	BH	30°	Sim	100,00%	87,94%	71,67%	2 créditos	Não atende
Leste-Oeste	100%	BH	45°	Sim	100,00%	87,94%	71,67%	2 créditos	Não atende

Quadro 22 – Resultado e avaliação dos modelos de Vitória segundo a metodologia do LEED 2005 e LEED 2009.

Características do modelo				Requisitos de luz natural				Avaliação	
Orientação	PAF	DPS	AHS	Possui DPS?	% área do ambiente			LEED 2005	LEED 2009
					E > 270lx às 12h	270lx < E < 5400lx às 9h	270lx < E < 5400lx às 15h		
Norte-Sul	50%	SP	0	Não	100,00%	94,53%	94,47%	Não atende	Não atende
Norte-Sul	50%	BH	15°	Sim	100,00%	94,53%	94,47%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	50%	BH	30°	Sim	100,00%	94,53%	94,47%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	50%	BH	45°	Sim	100,00%	94,53%	94,47%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	50%	SP	0	Não	100,00%	83,18%	78,54%	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	15°	Sim	100,00%	83,18%	78,54%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	50%	BH	30°	Sim	100,00%	83,18%	78,54%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	50%	BH	45°	Sim	100,00%	83,18%	78,54%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	100%	SP	0	Não	100,00%	92,96%	93,07%	Não atende	Não atende
Norte-Sul	100%	BH	15°	Sim	100,00%	92,96%	93,07%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	100%	BH	30°	Sim	100,00%	92,96%	93,07%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	100%	BH	45°	Sim	100,00%	92,96%	93,07%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	SP	0	Não	100,00%	82,74%	81,67%	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	100%	BH	15°	Sim	100,00%	82,74%	81,67%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	BH	30°	Sim	100,00%	82,74%	81,67%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	BH	45°	Sim	100,00%	82,74%	81,67%	2 créditos	1 crédito

Quadro 23 – Resultado e avaliação dos modelos de São Paulo segundo a metodologia do LEED 2005 e LEED 2009.

Características do modelo				Requisitos de luz natural				Avaliação	
Orientação	PAF	DPS	AHS	Possui DPS?	% área do ambiente			LEED 2005	LEED 2009
					E > 270lx às 12h	270lx < E < 5400lx às 9h	270lx < E < 5400lx às 15h		
Norte-Sul	50%	SP	0	Não	100,00%	93,31%	93,17%	Não atende	Não atende
Norte-Sul	50%	BH	15°	Sim	100,00%	93,31%	93,17%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	50%	BH	30°	Sim	100,00%	93,31%	93,17%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	50%	BH	45°	Sim	100,00%	93,31%	93,17%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	50%	SP	0	Não	100,00%	80,28%	78,25%	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	15°	Sim	100,00%	80,28%	78,25%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	50%	BH	30°	Sim	100,00%	80,28%	78,25%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	50%	BH	45°	Sim	100,00%	80,28%	78,25%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	100%	SP	0	Não	100,00%	92,59%	92,60%	Não atende	Não atende
Norte-Sul	100%	BH	15°	Sim	100,00%	92,59%	92,60%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	100%	BH	30°	Sim	100,00%	92,59%	92,60%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	100%	BH	45°	Sim	100,00%	92,59%	92,60%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	SP	0	Não	100,00%	81,85%	81,84%	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	100%	BH	15°	Sim	100,00%	81,85%	81,84%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	BH	30°	Sim	100,00%	81,85%	81,84%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	BH	45°	Sim	100,00%	81,85%	81,84%	2 créditos	1 crédito

Quadro 24 – Resultado e avaliação dos modelos de Porto Alegre segundo a metodologia do LEED 2005 e LEED 2009.

Características do modelo				Requisitos de luz natural				Avaliação	
Orientação	PAF	DPS	AHS	Possui DPS?	% área do ambiente			LEED 2005	LEED 2009
					E > 270lx às 12h	270lx < E < 5400lx às 9h	270lx < E < 5400lx às 15h		
Norte-Sul	50%	SP	0	Não	100,00%	83,14%	92,44%	Não atende	Não atende
Norte-Sul	50%	BH	15°	Sim	100,00%	83,14%	92,44%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	50%	BH	30°	Sim	100,00%	83,14%	92,44%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	50%	BH	45°	Sim	100,00%	83,14%	92,44%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	50%	SP	0	Não	100,00%	71,20%	80,20%	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	15°	Sim	100,00%	71,20%	80,20%	2 créditos	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	30°	Sim	100,00%	71,20%	80,20%	2 créditos	Não atende
Leste-Oeste	50%	BH	45°	Sim	100,00%	71,20%	80,20%	2 créditos	Não atende
Norte-Sul	100%	SP	0	Não	100,00%	93,89%	90,72%	Não atende	Não atende
Norte-Sul	100%	BH	15°	Sim	100,00%	93,89%	90,72%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	100%	BH	30°	Sim	100,00%	93,89%	90,72%	2 créditos	1 crédito
Norte-Sul	100%	BH	45°	Sim	100,00%	93,89%	90,72%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	SP	0	Não	100,00%	78,96%	83,85%	Não atende	Não atende
Leste-Oeste	100%	BH	15°	Sim	100,00%	78,96%	83,85%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	BH	30°	Sim	100,00%	78,96%	83,85%	2 créditos	1 crédito
Leste-Oeste	100%	BH	45°	Sim	100,00%	78,96%	83,85%	2 créditos	1 crédito

APÊNDICE B – Resultados das simulações do consumo energético

Quadro 25 - Resultados das simulações do consumo energético em Belém e Recife.

Características do modelo				Belém				Recife			
Orientação	PAF	DPS	AHS	Iluminação	Climatização	Consumo total	Consumo total por m ²	Iluminação	Climatização	Consumo total	Consumo total por m ²
Norte-Sul	50%	SP	0	15.694	161.741	177.435	39,43	20.484	165.552	186.035	41,34
Norte-Sul	50%	BH	15°	16.062	145.901	161.963	35,99	20.978	149.577	170.555	37,90
Norte-Sul	50%	BH	30°	16.274	132.173	148.447	32,99	21.232	137.861	159.093	35,35
Norte-Sul	50%	BH	45°	16.473	127.652	144.125	32,03	21.469	133.588	155.057	34,46
Leste-Oeste	50%	SP	0	16.001	192.677	208.679	46,37	20.866	194.085	214.951	47,77
Leste-Oeste	50%	BH	15°	16.079	174.076	190.155	42,26	21.190	175.095	196.285	43,62
Leste-Oeste	50%	BH	30°	16.449	158.120	174.569	38,79	21.304	159.236	180.540	40,12
Leste-Oeste	50%	BH	45°	16.499	144.726	161.225	35,83	21.574	146.802	168.376	37,42
Norte-Sul	100%	SP	0	15.120	203.552	218.672	48,59	19.686	208.730	228.416	50,76
Norte-Sul	100%	BH	15°	17.053	174.949	192.002	42,67	21.523	179.598	201.121	44,69
Norte-Sul	100%	BH	30°	18.058	157.339	175.397	38,98	22.621	162.225	184.846	41,08
Norte-Sul	100%	BH	45°	18.770	148.447	167.217	37,16	23.436	153.975	177.410	39,42
Leste-Oeste	100%	SP	0	15.336	255.550	270.886	60,20	19.959	256.756	276.714	61,49
Leste-Oeste	100%	BH	15°	16.675	221.361	238.036	52,90	21.098	221.815	242.913	53,98
Leste-Oeste	100%	BH	30°	17.573	193.176	210.749	46,83	22.033	193.926	215.959	47,99
Leste-Oeste	100%	BH	45°	18.352	169.724	188.076	41,79	22.729	171.886	194.615	43,25

Quadro 26 – Resultados das simulações do consumo energético em Vitória e São Paulo.

Características do modelo				Vitória				São Paulo			
Orientação	PAF	DPS	AHS	Iluminação	Climatização	Consumo total	Consumo total por m ²	Iluminação	Climatização	Consumo total	Consumo total por m ²
Norte-Sul	50%	SP	0	18.707	111.355	130.062	28,90	19.329	77.531	96.860	21,52
Norte-Sul	50%	BH	15°	18.920	99.438	118.359	26,30	19.761	66.918	86.679	19,26
Norte-Sul	50%	BH	30°	19.072	86.321	105.393	23,42	20.048	53.688	73.736	16,39
Norte-Sul	50%	BH	45°	19.204	80.662	99.866	22,19	20.349	48.187	68.535	15,23
Leste-Oeste	50%	SP	0	18.820	133.926	152.746	33,94	19.509	85.060	104.569	23,24
Leste-Oeste	50%	BH	15°	18.881	118.926	137.807	30,62	19.946	73.338	93.284	20,73
Leste-Oeste	50%	BH	30°	19.093	106.446	125.539	27,90	20.090	63.617	83.706	18,60
Leste-Oeste	50%	BH	45°	22.655	96.344	118.999	26,44	20.432	56.032	76.464	16,99
Norte-Sul	100%	SP	0	18.374	148.201	166.574	37,02	18.525	108.987	127.511	28,34
Norte-Sul	100%	BH	15°	19.739	126.141	145.880	32,42	20.422	88.828	109.250	24,28
Norte-Sul	100%	BH	30°	20.558	109.498	130.056	28,90	21.512	72.547	94.059	20,90
Norte-Sul	100%	BH	45°	21.217	97.840	119.057	26,46	22.499	60.994	83.493	18,55
Leste-Oeste	100%	SP	0	18.437	186.254	204.691	45,49	18.625	121.918	140.543	31,23
Leste-Oeste	100%	BH	15°	19.627	158.536	178.163	39,59	20.545	99.219	119.763	26,61
Leste-Oeste	100%	BH	30°	20.258	135.726	155.984	34,66	21.546	81.330	102.876	22,86
Leste-Oeste	100%	BH	45°	20.827	116.769	137.596	30,58	22.458	67.467	89.925	19,98

Quadro 27– Resultados das simulações do consumo energético em Porto Alegre.

Características do modelo				Porto Alegre			
Orientação	PAF	DPS	AHS	Iluminação	Climatização	Consumo total	Consumo total por m ²
Norte-Sul	50%	SP	0	18.147	78.336	96.483	21,44
Norte-Sul	50%	BH	15°	18.582	68.191	86.773	19,28
Norte-Sul	50%	BH	30°	18.866	55.378	74.245	16,50
Norte-Sul	50%	BH	45°	19.159	50.720	69.880	15,53
Leste-Oeste	50%	SP	0	18.110	98.249	116.359	25,86
Leste-Oeste	50%	BH	15°	18.478	85.564	104.042	23,12
Leste-Oeste	50%	BH	30°	18.587	74.508	93.095	20,69
Leste-Oeste	50%	BH	45°	18.850	65.285	84.135	18,70
Norte-Sul	100%	SP	0	17.396	107.907	125.302	27,84
Norte-Sul	100%	BH	15°	18.848	88.146	106.993	23,78
Norte-Sul	100%	BH	30°	19.954	74.097	94.052	20,90
Norte-Sul	100%	BH	45°	20.796	64.116	84.912	18,87
Leste-Oeste	100%	SP	0	17.418	141.200	158.617	35,25
Leste-Oeste	100%	BH	15°	18.924	117.004	135.927	30,21
Leste-Oeste	100%	BH	30°	19.796	96.811	116.607	25,91
Leste-Oeste	100%	BH	45°	20.582	79.856	100.437	22,32