

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RICARDO NACARI MAIOLI

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DISPOSITIVO
PRATELEIRA DE LUZ NO CONFORTO VISUAL EM
EDIFICAÇÃO COMERCIAL COM ENTORNO OBSTRUÍDO**

VITÓRIA
2014

RICARDO NACARI MAIOLI

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DISPOSITIVO
PRATELEIRA DE LUZ NO CONFORTO VISUAL EM
EDIFICAÇÃO COMERCIAL COM ENTORNO OBSTRUÍDO**

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

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

VITÓRIA

2014

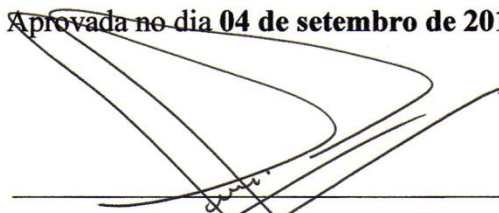
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DISPOSITIVO PRATELEIRA DE LUZ NO CONFORTO VISUAL EM EDIFICAÇÃO COMERCIAL COM ENTORNO OBSTRUÍDO

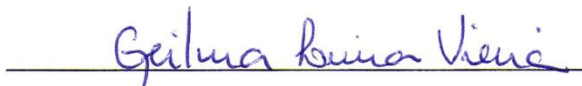
Ricardo Nacari Maioli

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

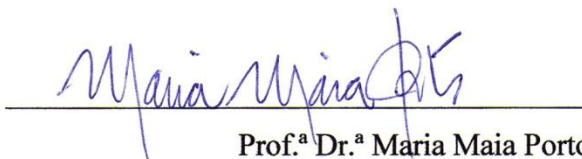
Aprovada no dia **04 de setembro de 2014** por:



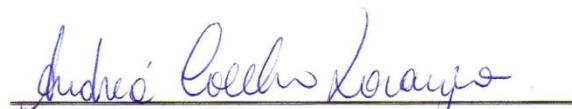
Prof.ª Dr.ª Cristina Engel de Alvarez
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Orientadora - UFES



Prof.ª Dr.ª Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Membro Interno - UFES



Prof.ª Dr.ª Maria Maia Porto
Doutora em Engenharia de Produção
Membro Externo - UFRJ



Prof.ª Dr.ª Andréa Coelho Laranja
Doutora em Ciências em Arquitetura
Membro Externo - UFES

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

M225a Maioli, Ricardo Nacari, 1978-
Avaliação da influência do dispositivo prateleira de luz no
conforto visual em edificação comercial com entorno obstruído /
Ricardo Nacari Maioli. – 2014.
133 f. : il.

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

1. Iluminação natural. 2. Edifícios – Iluminação de interiores –
Simulação por computador. 3. Energia elétrica – Conservação. 4.
Prateleira de luz (Arquitetura). I. Alvarez, Cristina Engel. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 624

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, a Prof^a. Dr^a Cristina Engel de Alvarez, pela oportunidade de frequentar o Laboratório de Planejamento e Projetos da UFES, pelas inúmeras orientações e revisões deste e de outros trabalhos, e principalmente, por ter me apoiado na escolha desse tema.

Aos membros da banca, agradeço a gentileza de aceitarem participar da avaliação desta dissertação e por compartilhar seus conhecimentos nessa ocasião.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, especialmente ao Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama, à Dr^a Geilma Vieira e à Dr^a Maristela Gomes da Silva.

Às professoras Cynthia Monconsini Loureiro Santos e Andréa Coelho Laranja pelas importantes contribuições na etapa de qualificação.

Às pesquisadoras Marília Fontenelle e Lilianne Queiroz pelo compartilhamento de informações e esclarecimento de dúvidas acerca do software utilizado nesta pesquisa.

Às novas amigas conquistadas ao longo do mestrado, sobretudo aos colegas Lorenzo, Aline, Juliana e Rubielly.

Aos colegas do LPP/UFES pelo compartilhamento de informações e pela prazerosa companhia nesses anos, em especial a André, Bruna, Amábeli, Greicikelly, Fabiana, Dielly, Bernardo, Karla, Stella, Wagner, Marcelo, Márcia e Edna. Agradeço também à Mariani pela coragem em me acompanhar na difícil tarefa de aprender um software através de tutoriais em língua estrangeira e pelas contribuições a esta pesquisa.

À minha irmã, sobrinhos, demais familiares e amigos, por compreenderem a minha ausência em alguns dos incontáveis eventos promovidos ao longo desse período.

Aos meus pais, pelo exemplo de vida.

À Larissa, pela companhia, apoio e carinho.

À Capes, pela bolsa de estudos concedida.

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DISPOSITIVO PRATELEIRA DE LUZ NO CONFORTO VISUAL EM EDIFICAÇÃO COMERCIAL COM ENTORNO OBSTRUÍDO

RESUMO

O aproveitamento da iluminação natural no interior dos ambientes é de fundamental importância quando são considerados o conforto visual do usuário e a eficiência energética do edifício. Entretanto, a alta luminosidade do céu tropical pode proporcionar para o usuário de um ambiente de trabalho, desconforto visual, térmico ou ambos, provocados pelo brilho intenso das aberturas e das superfícies internas e pela carga de calor excessivo. A tipologia mais comum das edificações observadas no país não apresenta soluções para estes problemas, visto que sua iluminação interior é feita através de janelas que proporcionam uma iluminação desuniforme no ambiente. Nas regiões tropicais, os elementos de proteção solar se apresentam como boas soluções para reduzir a incidência da radiação solar direta nas aberturas e os dispositivos redirecionadores de luz auxiliam numa distribuição mais uniforme no ambiente. Um elemento arquitetônico que cumpre as duas funções é a prateleira de luz. Visto que os centros urbanos estão se verticalizando a cada dia, e o acesso à luz natural, principalmente nos primeiros pavimentos, vem se tornando mais difícil, esta pesquisa objetiva investigar a influência das prateleiras de luz no aproveitamento de luz natural sob condições de obstrução do entorno. Devido à larga dimensão territorial do Brasil – que resulta em variações significativas na luminosidade da região –, o recorte do objeto considerou o desempenho de dois tipos de vidro combinados com duas geometrias de prateleira de luz ou sua ausência, em seis diferentes latitudes brasileiras e em quatro orientações distintas para um mesmo modelo de edifício de escritórios. Foi investigado o percentual de iluminância útil nos ambientes durante o ano e os níveis de luminâncias provenientes das aberturas com o auxílio do *software* Daysim. Os resultados analisados demonstram que a adoção desse dispositivo se mostrou eficaz em todas as orientações, sob condições de obstrução do entorno, auxiliando na diminuição do brilho excessivo nas superfícies internas e na uniformização da luz natural admitida, provendo maior conforto visual ao usuário.

Palavras-chave: iluminação natural, prateleiras de luz, entorno obstruído, simulação de edifícios.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF LIGHTSHELF IN VISUAL COMFORT IN COMMERCIAL BUILDING WITH EXTERNAL OBSTRUCTION

ABSTRACT

The use of daylight in the interior of buildings is fundamental when considering visual comfort and energy efficiency. However, the high brightness of the tropical sky in the work environment can provide to the user visual discomfort, heat, or both, caused by the intense brightness of the openings and the inner surfaces and the burden of excessive heat. The most common type of buildings observed in the country does not provide solutions to these problems, since its interior lighting is done via windows which provide a non-uniform lighting environment. In the tropics, the sun protection elements present themselves as good solutions to reduce the incidence of direct solar radiation in the openings and redirects light devices assist in a more uniform distribution in the environment. An architectural element that fulfills both functions is the lightshelf. Because urban centers continue to expand vertically, it is becoming more and more difficult to gain access to natural light, particularly on the first floor. Research aims to find a solution to the problem by trying to investigate the influence of light shelves on the use of natural light under conditions where surroundings are obstructed. Due to the large spatial extent of Brazil - which results in significant variations in the brightness of the region - the cutting of the object considered the performance of two types of glass combined with two geometries shelf light or its absence, in six different Brazilian latitudes and four different orientations for a given type of office building. The percentage of useful luminosity in environments during the year and the levels of luminance from the openings with the aid of software Daysim were investigated. The analyzed results show that the adoption of this device was effective in all directions, under conditions with surrounding obstruction, aiding in the reduction of glare on the internal surfaces and allowed standardization of natural light, providing greater visual comfort to the user.

Keywords: daylight, lightshelves, external obstruction, building simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de prateleiras de luz	31
Figura 2: Através do redirecionamento da luz recebida proveniente do piso externo ou de prateleira de luz, o teto se torna uma fonte indireta de luz.....	31
Figura 3: Diferentes geometrias das prateleiras de luz.....	33
Figura 4: Geometrias do teto curva, chanfrada e inclinado à esquerda e modelos físicos do teto curvo e chanfrado à direita.....	34
Figura 5: Resultado de simulação de uma sala de aula com duas camadas de proteção solar com um elemento vertical no componente superior.....	34
Figura 6: Vista externa do modelo em escala.....	35
Figura 7: Modelos de prateleiras côncavas e convexas.....	36
Figura 8: Trajeto dos raios solares, através do painel de vidro curvo, provenientes de altos ângulos (a) e baixos ângulos (b), em conjunto com a prateleira de luz plana.....	37
Figura 9: Corte esquemático de uma prateleira de luz adaptável. A porção externa com comprimento fixo (L) pode ser inclinada, enquanto a interna pode alterar o seu comprimento (W) deslocando-se a parte superior (A), sob a parte inferior (B) estática.....	38
Figura 10: Ao centro da imagem nota-se o ofuscamento devido ao reflexo do sol em edifício com fachada envidraçada composta por vidro reflexivo em Vitória-ES.....	43
Figura 11: Ao centro da imagem pode-se perceber o impacto do reflexo dos raios solares na vizinhança, causado por edifício em Vitória-ES, cuja fachada é composta por vidro reflexivo.....	43
Figura 12: Fluxograma das etapas metodológicas	49
Figura 13: Classificação dos tipos de céu, como céu claro, à esquerda, céu parcialmente encoberto, ao centro, e céu encoberto à direita.....	51
Figura 14: Edificação composta por torre de 10 pavimentos tipo sobre pilotis	53
Figura 15: Croqui esquemático do pavimento tipo	53
Figura 16: Mapa do Brasil com a identificação das cidades escolhidas para simulação.....	60
Figura 17: Cartas solares das localidades selecionadas geradas no software Analysis SOL-AR	61
Figura 18: Em cima, cortes com ângulo de proteção nas diferentes localidades; abaixo, suas respectivas máscaras solares, produzidas com a parcela do céu obstruída pela prateleira, geradas no software Analysis SOL-AR.....	62
Figura 19: Comparação entre a reflexão dos raios solares mais altos nas prateleiras curvas e planas..	62
Figura 20: Localização de edifícios no entorno imediato	63
Figura 21: Corte esquemático do edifício proposto indicando os pavimentos selecionados e seus respectivos ângulos de obstrução pela edificação à frente	65
Figura 22: Da esquerda para a direita, máscaras de obstrução referentes aos pavimentos 10°, 7°, 2° e modelo de referência, sem obstruções. Em cinza, áreas obstruídas pelo entorno; em branco, parcela desobstruída da abóbada celeste.....	65
Figura 23: Representação dos pontos de cálculo em planta e corte esquemáticos.....	71
Figura 24: Média horária dos níveis anuais de iluminância do modelo referente à cidade de Vitória, fachada Norte, sem prateleira, 2° pavimento. A área à esquerda do gráfico é representada a porção próxima a parede externa que contém a abertura, e à direita, a área referente à parede oposta à abertura	72
Figura 25: Representação em planta baixa simplificada dos ambientes simulados, graduados com os percentuais referentes aos níveis de iluminâncias insuficientes, à esquerda, e excessivos, à direita	74

Figura 26: Representação em planta baixa simplificada dos ambientes simulados, graduados com os percentuais referentes ao intervalo de iluminâncias útil, à esquerda, e ao Daylight Autonomy, à direita	76
Figura 27: Esboço representativo do modelo de prateleira de luz plana implantada na abertura lateral	77
Figura 28: Edifícios modelados sem dispositivo de proteção, à esquerda, com prateleira plana, ao centro e com prateleira curva, à direita	84
Figura 29: Máscara de sombra produzidas pelas prateleiras de luz das quatro fachadas dos modelos simulados para Belém	96
Figura 30: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de Belém	109
Figura 31: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de Recife	110
Figura 32: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de Brasília	112
Figura 33: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de Vitória	113
Figura 34: Níveis médios de iluminâncias do modelo Sul, 2º pavimento, sem dispositivo de proteção solar e vidro incolor	114
Figura 35: Níveis médios de iluminâncias do modelo Sul, 2º pavimento, com prateleira plana e vidro incolor	114
Figura 36: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de São Paulo.....	115
Figura 37: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de Porto Alegre	116

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Frequência de ocorrência dos tipos de céu no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Porto Alegre, no período de 8h às 18h	67
Gráfico 2: Frequência de ocorrência dos tipos de céu por hora do dia, no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Belém	68
Gráfico 3: Comparativo entre os índices médios de uniformidade dos modelos com e sem obstrução do entorno, separados por cidades e por pavimentos	78
Gráfico 4: Percentual de horas anuais dentro da faixa de iluminância insuficiente dos modelos com obstrução do entorno	79
Gráfico 5: Percentual de horas anuais dentro da faixa de iluminância insuficiente dos modelos sem obstrução do entorno	79
Gráfico 6: Comparativo entre percentual de iluminância útil dos modelos simulados com vidro incolor	80
Gráfico 7: Comparativo entre percentual de iluminância útil dos modelos simulados com vidro bronze	80
Gráfico 8: Comparativo entre os percentuais de horas anuais com iluminâncias acima de 2000 lux para os três pavimentos analisados	81
Gráfico 9: Comparativo entre os modelos simulados através do Daylight Autonomy	82
Gráfico 10: Comparativo da média da iluminância útil entre os modelos simulados	84
Gráfico 11: Índices de uniformidades médias dos modelos com prateleiras planas (CPP) e com prateleiras curvas (CPC).....	85
Gráfico 12: Comparativo entre percentuais de horas anuais dentro do intervalo de iluminância útil dos modelos com prateleira de luz curva	86
Gráfico 13: Comparativo entre percentuais de horas anuais dentro do intervalo de iluminância útil dos modelos com prateleira de luz plana	86
Gráfico 14: Comparativo sobre a uniformidade entre os dois tipos de vidro, o bronze, com transmissão à luz visível de 53% (TV 53%) e o incolor, com transmissão à luz visível de 90% (TV 90%), para todas as variáveis simuladas na segunda etapa metodológica.....	87
Gráfico 15: Comparativo entre o percentual de horas no intervalo de iluminância útil dos modelos simulados com os dois tipos de vidro propostos	89
Gráfico 16: Percentual de horas no intervalo de iluminância útil dos modelos simulados com o vidro bronze.....	90
Gráfico 17: Percentual de horas no intervalo de iluminância útil dos modelos simulados com o vidro incolor	90
Gráfico 18: Comparativo entre os índices médios de uniformidade dos modelos com prateleira curva (CPC), com prateleira plana (CPP) e sem prateleira (SP), separados por orientação da fachada	91
Gráfico 19: Comparativo entre os índices de uniformidade dos modelos simulados	92
Gráfico 20: Percentuais de horas anuais definidas pelo DA dos modelos simulados em Belém, Recife e Brasília	93
Gráfico 21: Percentuais de horas anuais definidas pelo DA dos modelos simulados em Vitória, São Paulo e Porto Alegre	93
Gráfico 22: Comparativo entre UDI e DA para os modelos simulados na cidade de Belém.....	94
Gráfico 23: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de Belém.....	95

Gráfico 24: Frequência de ocorrência dos tipos de céu no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Belém, no período de 8h às 18h	96
Gráfico 25: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de Belém	97
Gráfico 26: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de Recife	98
Gráfico 27: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de Recife	99
Gráfico 28: Frequência de ocorrência dos tipos de céu, por hora do dia, no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Recife, no período de 8h às 18h	99
Gráfico 29: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de Brasília	100
Gráfico 30: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de Brasília	101
Gráfico 31: Frequência de ocorrência dos tipos de céu por hora do dia, no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Brasília	101
Gráfico 32: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de Vitória	102
Gráfico 33: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de Vitória	103
Gráfico 34: Frequência de ocorrência dos tipos de céu no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Vitória, no período de 8h às 18h	103
Gráfico 35: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de São Paulo	104
Gráfico 36: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de São Paulo	105
Gráfico 37: Frequência de ocorrência dos tipos de céu, por hora, no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de São Paulo, no período de 8h às 18h	106
Gráfico 38: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de Porto Alegre	106
Gráfico 39: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de Porto Alegre	107
Gráfico 40: Frequência de ocorrência dos tipos de céu, por hora, no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Porto Alegre, no período de 8h às 18h	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Variáveis de teste para elaboração dos modelos	56
Quadro 2: Variáveis de controle, componentes e características do edifício	58
Quadro 3: Variáveis de uso e ocupação do edifício	58
Quadro 4: Variáveis de teste dos modelos de edifício, por etapa de simulação.....	59
Quadro 5: Siglas utilizadas nas simulações.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Requisitos para o planejamento da iluminação em relação à Iluminância mantida (E_m), índice limite de ofuscamento unificado (UGR_L) e índice de reprodução de cor mínimo (R_a).....	26
Tabela 2: Dados de saída do software Daysim, com resultado detalhado das simulações, onde cada linha da tabela representa um ponto de medição. As 3 primeiras colunas são referentes à localização do ponto e as demais, aos coeficientes e valores registrados	69
Tabela 3: Iluminância útil da luz natural (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).....	73
Tabela 4: DA médio das cidades referente a todos os modelos simulados na primeira etapa	83
Tabela 5: Resultados das cidades de Belém, Recife e Brasília referentes à primeira etapa de simulações.	127
Tabela 6: Resultados das cidades de Vitória, São Paulo e Porto Alegre referentes à primeira etapa de simulações.	128
Tabela 7: Índice de uniformidade dos modelos simulados na 1ª etapa de simulações.....	129
Tabela 8: Resultados das cidades de Belém e Recife referentes à segunda etapa de simulações.	130
Tabela 9: Resultados das cidades de Brasília e Vitória referentes à segunda etapa de simulações. ...	131
Tabela 10: Resultados das cidades de São Paulo e Porto Alegre referentes à segunda etapa de simulações.	132
Tabela 11: Índice de uniformidade dos modelos simulados na 2ª etapa de simulações.....	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
CPC	Com prateleira plana
CPP	Com prateleira curva
CSV	Comma Separated Values
DA	Daylight Autonomy
DAcon	Continuous Daylight Autonomy
DAm _{ax}	Maximum Daylight Autonomy
DF	Daylight Factor
DSP	Daylight Saturation Percentage
E _m	Iluminância mantida
FLD	Fator de Luz Diurna
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LPP	Laboratório de Planejamento e Projetos
NBR	Norma Técnica Brasileira
PAF	Percentual de abertura de fachada
R _a	Índice de reprodução de cor
SP	Sem prateleira
TRY	Test Reference Year
TV	Transmissão à luz visível
UDI	Useful Daylight Illuminances
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UGR _L	Índice limite de ofuscamento unificado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	CONFORTO VISUAL	23
2.2	SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL	27
2.2.1	As prateleiras de luz.....	30
2.3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS EDIFICAÇÕES	39
2.4	INFLUÊNCIA DAS OBSTRUÇÕES NO ENTORNO	42
2.5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EDIFÍCIOS	44
3	ABORDAGEM METODOLÓGICA	48
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	50
3.2	VARIÁVEIS DA ILUMINAÇÃO NATURAL NOS EDIFÍCIOS	50
3.3	RECORTE E CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO COMERCIAL.....	52
3.4	SELEÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> DE SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL	54
3.5	ELABORAÇÃO DOS MODELOS.....	55
3.5.1	Elaboração do modelo de referência.....	56
3.5.2	Elaboração dos demais modelos	59
3.6	SELEÇÃO DE LATITUDES	60
3.7	ELABORAÇÃO DAS VARIAÇÕES DOS MODELOS	61
3.8	TRATAMENTO DE DADOS PARA SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL.....	66
3.9	PROCESSO DE SIMULAÇÃO	68
3.10	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE UNIFORMIDADE E CÁLCULO DOS NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA INTERNA	71
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	77
4.1	PRIMEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES	77
4.1.1	Análise do impacto das obstruções.....	77
4.1.2	Análise da influência da transmissão luminosa dos vidros.....	79
4.1.3	Análise por pavimento	80
4.1.4	Análise por cidades	82
4.2	SEGUNDA ETAPA DE SIMULAÇÕES	84

4.2.1	Análise da influência das geometrias das prateleiras.....	85
4.2.2	Análise da influência da transmissão luminosa dos vidros.....	86
4.2.3	Análise por orientação	91
4.2.4	Análise por cidades	92
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS MELHORES RESULTADOS E O MODELO REFERÊNCIA..	108
4.3.1	Belém	109
4.3.2	Recife	110
4.3.3	Brasília	111
4.3.4	Vitória	112
4.3.5	São Paulo	114
4.3.6	Porto Alegre	115
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
6	REFERÊNCIAS.....	121
	APÊNDICE A – Resultado extraídos das simulações no <i>software</i> Daysim	127

1 INTRODUÇÃO

Há tempos o homem se preocupa com a necessidade de controlar a iluminação, seja em sua residência, em seu local de trabalho ou de convívio social. Desde o domínio do fogo, cujo uso, que além de outras funções trazia luminosidade para um determinado espaço, até os dias atuais, o ser humano tenta dominar a luz. Com o advento e posterior facilidade de acesso pela população à iluminação artificial no período da Revolução Industrial, o aproveitamento da luz natural nos edifícios pareceu ter ficado em segundo plano. Os projetistas dos edifícios de escritórios, cuja envoltória adquirira grandes áreas envidraçadas, estavam mais preocupados com a inserção dos novos materiais na construção do que com o consumo de energia dessa nova tipologia construtiva. Nesse período o desconforto ambiental do usuário do edifício era resolvido basicamente com sistemas artificiais de iluminação e climatização.

Entretanto, após a crise energética mundial na década de 70 do século passado, que trouxe como consequência as crises nacionais posteriores, e uma preocupação cada vez mais crescente com a degradação ambiental, a eficiência energética nas edificações passou a ganhar importância, tornando-se alvo de pesquisas em diversas regiões do planeta. Os edifícios passaram a ser repensados, pois o modelo adotado nesse período era um grande consumidor de energia. Começaram a ressurgir modelos de edifício bioclimáticos, consequentemente com maior eficiência energética (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014)

Além dessa questão, houve também uma mudança de pensamento quanto ao conforto do usuário interno do edifício e com suas condições de trabalho. As empresas passaram a adotar isso como uma premissa para seus funcionários, visto que um profissional em boas condições de trabalho, sem desconforto visual ou térmico, por exemplo, conseguia um rendimento superior em sua jornada, o que refletia diretamente na produção final e no lucro da empresa (KEELER; BURKE, 2010).

Sendo assim, novas e antigas estratégias arquitetônicas para proporcionar conforto ao usuário passaram a ser adotadas nos projetos e cada vez mais estudadas pela sociedade acadêmica. Uma dessas estratégias para atingir uma maior economia de energia nos edifícios e bem estar ao usuário é através do aproveitamento da luz natural. Entretanto, sua utilização de forma equivocada pode acarretar prejuízos energéticos e desconforto no ambiente, fatos observados em edificações cuja tipologia não é adequada ao clima do sítio.

O aproveitamento da luz natural alcançou novo patamar dentre os principais objetivos dos projetos dos edifícios graças às diversas certificações de sustentabilidade e eficiência energética que se multiplicaram pouco depois da crise energética do século passado (KEELER; BURKE, 2010). De um modo geral, essas certificações pontuavam melhor os projetos que contemplavam a admissão da luz natural em seus ambientes internos, mas ainda com a preocupação de reduzir os gastos energéticos com iluminação e climatização artificial. Esse aspecto pode ser observado sobretudo nos países tropicais, cujo céu proporciona altos índices de luminosidade e a radiação solar direta pode gerar o aquecimento excessivo do ambiente caso penetre pelos fechamentos transparentes.

Uma das estratégias arquitetônicas utilizadas para a captação da luz, mas com a devida proteção contra a radiação solar direta, são as prateleiras de luz. Esses dispositivos são elementos horizontais de controle e redirecionamento da luz solar implantados em uma abertura lateral (VIANNA; GOLÇALVES, 2007). Também conhecidos como bandejas de luz, esses elementos podem, ainda, proporcionar outras vantagens ao ambiente como o redirecionamento da luz natural para a porção da sala mais afastada da janela e, conseqüentemente, alcançar maior uniformização da iluminação natural no ambiente interno, dentre outras (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 2010).

Entretanto, apesar de ser uma estratégia eficiente, a captação da luz natural no meio urbano está ganhando novos desafios face à verticalização dos edifícios. Os centros urbanos e suas regiões comerciais têm gradativamente sua parcela visível da abóbada celeste reduzida nos níveis próximos ao solo. Essa característica pode diminuir significativamente a quantidade de luz admitida nos primeiros pavimentos ou alterar as características de sua captação (MESA; CORICA; PATTINI, 2011).

Com o intuito de contribuir para as investigações a partir do enfoque explanado, a presente dissertação pretende analisar, através de simulações em computador, o uso das prateleiras de luz como estratégia de proteção e redirecionamento da luz natural nos edifícios de escritórios inserido em um sítio cujo céu se encontra parcialmente obstruído por edificações do entorno.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo principal avaliar a influência das prateleiras de luz, como dispositivos de proteção contra a radiação solar direta e redirecionamento da luz natural na luz natural admitida, no conforto visual de um ambiente previamente definido em edifícios comerciais simulados sob condições de obstrução do entorno.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a revisão bibliográfica especialmente relacionada à temática iluminação e prateleiras de luz visando estabelecer os parâmetros desejáveis de análise;
- Selecionar o *software* adequado aos objetivos e à metodologia adotada para a pesquisa;
- Identificar e selecionar na literatura existente dois modelos de prateleiras de luz que alterem as características da admissão da luz natural pela envoltória dos edifícios;
- Identificar as principais características do comportamento da luz natural nos modelos referência e nos modelos com as intervenções propostas; e
- Identificar os modelos que melhor obtiveram desempenho luminoso e compará-lo ao simulado como modelo de referência.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

De uma forma geral, as edificações construídas atualmente na região metropolitana da Grande Vitória não levam em consideração os aspectos climáticos para a busca de soluções projetuais eficientes, sendo perceptível que esse fato também é recorrente em outras regiões do território brasileiro. Essa característica é observada em considerável parte dos edifícios comerciais, sejam eles mais antigos ou de produção recente, apesar do estudo da área de implantação e seus condicionantes climáticos serem – ou deveriam ser – premissas para o desenvolvimento de um projeto de arquitetura. É um princípio básico em arquitetura que a edificação planejada deva oferecer conforto térmico aos seus ocupantes, sejam quais forem as condições externas (FROTTA; SCHIFFER, 2003).

A adoção de tipologias arquitetônicas não condizentes com as condições climáticas locais, além do provável desconforto, pode acarretar gastos desnecessários com iluminação e condicionamento de ar. Edifícios, com grande parte da envoltória composta por vidro, por exemplo, são caracterizados pelo efeito estufa e, eventualmente, também pelo desconforto visual em seu interior causado pelos níveis elevados de luminosidade ou por contrastes excessivos (RIVERO, 1986; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O modelo adotado nessas edificações é reflexo da falta de interesse, por parte dos arquitetos, em projetar uma edificação adaptada às condições climáticas locais. Esses profissionais passaram então a desenhar edifícios em que a preocupação com o conforto ambiental interno era resolvida posteriormente, com o uso de equipamentos mecânicos. Entretanto, a tipologia da arquitetura composta por fachadas envidraçadas, como nos edifícios idealizados por Mies van der Rohe e depois copiados sem uma preocupação com o entorno, trazem consigo vários desconfortos para o ambiente interno (LAM, 1986).

Conforme Corbella e Yannas (2003), diferentemente de regiões com característica de céus com pouca luminosidade, nas regiões tropicais deve-se controlar a radiação solar direta, evitando assim os altos índices de iluminâncias, o ofuscamento, os altos contrastes e os ganhos térmicos no interior das edificações.

O principal fator de ganho térmico em um ambiente é a radiação solar que penetra pelos fechamentos transparentes (RIVERO, 1986; FROTTA; SCHIFFER, 2003; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Todavia, grande parte das edificações construídas na região tropical e com um céu caracterizado por altos índices de luminosidade, são projetadas a partir do conceito do “estilo internacional”, normalmente para satisfazer os anseios estéticos da sociedade, e eventualmente sofrendo pequenas adaptações para amenizar o impacto do clima, como por exemplo, a utilização de vidros refletivos. Estes por sua vez, são responsáveis por menores ganhos térmicos se comparados ao vidro comum, entretanto, podem reduzir consideravelmente a luminosidade natural no interior da edificação, além de distribuí-la de maneira desuniforme produzindo ainda, ofuscamento no entorno imediato.

Para um clima quente e com um céu com muita luminosidade, como é o caso das regiões tropicais e, conseqüentemente, de grande parte do território brasileiro, o desafio é introduzir a luz natural no ambiente de trabalho, sem causar desconforto. Para se reduzir o ganho térmico

e o desconforto nessas regiões não se pode contar apenas com o vidro, assim, o uso de elementos sombreadores se torna fundamental para o bom desempenho térmico da edificação (SANTOS, 2007). Nesse contexto, as proteções exteriores alcançam uma efetividade superior se comparadas às interiores, visto que estas absorvem parte da radiação que penetrou pelo vidro e a transformam em calor, que fica retido no ambiente (RIVERO, 1986; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Se forem adequadamente adotadas, as estratégias de projeto para proteção contra a radiação solar podem reduzir o ganho de carga térmica (PORTO; FONSECA, 2007) e a demanda energética dos edifícios (BROWN; DEKAY, 2004; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Essa ação, se adotada como um conceito relevante na elaboração dos projetos de arquitetura – assim como os condicionantes de segurança, por exemplo – levaria à redução da necessidade do país ou região de aumentar sua capacidade de geração elétrica (BROWN; DEKAY, 2004) e, conseqüentemente, minimizaria a produção de poluição proveniente de fontes combustíveis (CORBELLA; YANNAS, 2003).

É notório que o contato visual exterior e a exposição do ocupante à iluminação natural são benéficos à saúde (KEELER; BURKE, 2010), além do fato de que as pessoas preferem a luz natural em comparação com a luz artificial, para iluminar as suas áreas de trabalho (BAKER; STEEMERS, 2002; BOYCE, 2014). Dessa forma, nos edifícios de escritórios, cujo horário de funcionamento normalmente condiz com o horário em que há disponibilidade de luz natural na abóbada celeste, é interessante promover o aproveitamento dessa luminosidade e ainda o contato visual externo com a devida proteção contra o aquecimento dos ambientes.

Sendo assim, pode-se afirmar que uma das soluções arquitetônicas para melhorar a eficiência energética da edificação e, ainda, obter conforto visual para o usuário é através do uso das prateleiras de luz (BROWN; DEKAY, 2004; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi organizada em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

O **capítulo 1** refere-se à introdução, na qual é feita a contextualização da pesquisa, apresentando os objetivos, justificativa e a estrutura do trabalho.

O **capítulo 2** aborda a revisão bibliográfica dos temas abrangidos nessa pesquisa, como conforto visual do usuário, sistemas de iluminação natural presentes em edificações comerciais dentre os quais se encontram as prateleiras de luz, eficiência energética nas edificações, a influência das obstruções no entorno e simulação computacional dos edifícios.

No **capítulo 3** são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados, incluindo os parâmetros adotados para as simulações, visando à obtenção dos resultados.

O **capítulo 4** apresenta e analisa os resultados obtidos nas duas etapas de simulação, verificando a influência da aplicação do dispositivo prateleira de luz em edificações comerciais, com e sem obstrução no entorno, comparada aos dados obtidos da simulação de uma edificação padrão de uso comercial, que representa a tipologia adotada atualmente nos grandes centros brasileiros.

No **capítulo 5** são feitas as considerações finais, avaliando se os objetivos da pesquisa foram alcançados, indicando lacunas ou indicativos para a continuidade e aprimoramento da pesquisa em temas afins.

O **capítulo 6** apresenta a lista das referências utilizadas para o desenvolvimento do trabalho que foram citadas no decorrer do texto da dissertação.

Por fim, os dados gerados nas simulações serão apresentados por meio de **apêndices**.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A elaboração deste capítulo visa apresentar a síntese da revisão bibliográfica dos principais assuntos que são abordados no desenvolvimento do trabalho e, especialmente sobre o tema principal desta pesquisa que são as implicações decorrentes da utilização de prateleiras de luz como dispositivos de proteção e redirecionamento de luz natural em edifícios.

Através da revisão bibliográfica foi possível identificar a fronteira do conhecimento e suas lacunas, assim como avaliar os métodos e discussões de trabalhos sobre os temas pesquisados em diferentes regiões do globo e, ainda, identificar os centros de referência e os principais pesquisadores no Brasil e no exterior. Também possibilitou enfatizar o problema da inadequação de grande parte das edificações comerciais ao clima do sítio onde estão inseridas (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006), que além de outros fatores, prejudica o conforto visual do usuário.

2.1 CONFORTO VISUAL

Segundo Lima (2010), aproximadamente 85% da percepção humana é vinculada à informação visual, assim, este conforto se torna essencial para os usuários de um espaço. O conforto visual é um dos requisitos para se alcançar o conforto ambiental e, de acordo com Boyce (2014), uma das definições de conforto visual é que este simplesmente representa a ausência do desconforto visual. Entretanto, Zhang e outros (1996, apud Boyce, 2014) e Helander e Zhang (1997, apud Boyce, 2014), afirmam que a percepção de conforto e desconforto são independentes, ao invés de a ausência de uma representar a outra. O conforto visual não conta apenas com a satisfação de necessidades de iluminação fisiológicas, mas as reações subjetivas dos ocupantes são, ao menos, de igual importância (BAKER; STEEMERS, 2002).

As percepções de conforto podem estar relacionadas à estética e a sentimentos de bem-estar, que podem se alterar ao longo do tempo (BOYCE, 2014). Esse autor ainda sugere que, de forma equivocada, a maioria das recomendações exigidas por órgãos reguladores em relação à iluminação desejável são relativas à eliminação do desconforto visual, e não em promover seu conforto. Esta meta fica então a cargo dos designers de iluminação. Entretanto, segundo Faraco, Santos e Porto (2006), um bom projeto de iluminação deve oferecer, além do conforto, eficiência e prazer.

Outra definição encontrada na literatura pesquisada especifica o conforto como a interpretação dos estímulos físicos, objetivos e facilmente mensuráveis, por meio das sensações (VIANNA; GONÇALVES, 2007). Os autores caracterizam a quantidade e distribuição da luz no campo visual do usuário como um dos fatores que determinam o conforto do ambiente, fundamental para seu desempenho lumínico. Entretanto, na presente pesquisa serão investigados apenas os níveis de iluminação e sua distribuição no ambiente.

O conforto ambiental deveria ser uma premissa em todas as obras de arquitetura. Tão importante é o seu papel que a melhoria dos níveis de conforto exigidos no interior dos edifícios, segundo Perez-Lombard e outros (2008), é um dos principais motivos da tendência mundial de aumento na demanda de energia. Junto a essa exigência, tem-se o fato de que a população está ficando cada vez mais tempo no interior das edificações, o que exigiria um prolongamento das horas em que os gastos energéticos são utilizados para manter níveis satisfatórios de conforto ao usuário.

Quando se analisa um sistema de aproveitamento de luz natural para substituir ou complementar um sistema de iluminação elétrica, geralmente se pensa apenas nos custos de implantação desse sistema e seus benefícios tangíveis, tais como economia de energia elétrica. Existem também benefícios intangíveis que devem ser levados em consideração como a economia no sistema de resfriamento do ambiente, o efeito da luz natural no bem-estar do ser humano e a redução nas emissões de carbono. Esses dois últimos são mais difíceis de identificar ou quantificar (MAYHOUB; CARTER, 2011).

Existe uma preocupação cada vez maior com a saúde e a produtividade do ser humano e isso pode ser influenciado pelos ambientes internos iluminados naturalmente (HESCHONG, 2002; KEELER; BURKE, 2010; FREEWAN, 2010). Como grande parte dos custos de uma empresa são despesas com pessoal, principalmente em escritórios, qualquer benefício que acarrete no aumento de produtividade se torna bastante significativo (MAYHOUB; CARTER, 2011).

Estudos feitos em escolas norte-americanas mostraram que alunos com maior exposição à luz natural obtiveram melhor rendimento na escola, refletindo em notas em testes padrões de 7% a 18% maiores se comparados a alunos com menor exposição à luz natural. Embora os estudos não tenham sido confirmatórios da associação entre rendimento humano e luz natural, demonstraram a forte relação entre ambos (HESCHONG, 2002).

As vantagens do aproveitamento do potencial de iluminação solar são o custo zero; o fato de não ser poluente; e por ser uma fonte inesgotável (MESA; CORICA; PATTINI, 2011). Além das vantagens descritas, o ser humano em geral tem preferência pela luz natural, desde que esta não provoque desconforto (BOYCE, 2014).

Ao se projetar uma edificação para um clima tropical, deve-se ater ao fato de que a iluminância global do céu nessa região é alta e pode causar ofuscamento e desconforto às pessoas, principalmente quando o usuário de um ambiente – como de um escritório – olhar para o céu de alta luminosidade através da janela (LIM et al., 2012). Além disso, o céu tropical, apesar de ser predominantemente caracterizado por um céu intermediário com nuvens, quando estas não encobrem o sol, a radiação solar direta pode penetrar pelas janelas e acarretar manchas solares no interior do ambiente, gerando uma distribuição desuniforme da luz caracterizada por grandes contrastes, causando desconforto no usuário (LIM et al., 2012).

Problemas de alta luminosidade relacionados à exposição excessiva de luz natural em áreas periféricas do edifício têm que ser tratados com bastante atenção (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011). Exemplo dessa preocupação é que tipos avançados de vidros e sistemas inovadores de sombreamento e aproveitamento da luz natural têm sido estudados para controlar ganhos térmicos da radiação solar, reduzir o brilho intenso e criar ambientes internos de alta qualidade ambiental (TZEMPELIKOS; ATHIENITIS, 2007).

Todo projeto de arquitetura deve – ou deveria – controlar a luz, o som e o calor para tornar o ambiente confortável ao usuário, pois quanto maior o esforço de adaptação para desenvolver certas atividades, maior será a sensação de desconforto do usuário daquele espaço (VIANA; GONÇALVES, 2001). A uniformização dos níveis de iluminância dentro das salas de aula, por exemplo, é muito importante para salvaguardar a visão dos usuários daquele espaço (HO et al., 2008).

Os dispositivos de iluminação natural são utilizados para poupar energia, mas normalmente devem ser complementados com sistemas de iluminação elétrica para funcionarem e proporcionarem níveis adequados de iluminância (MAYHOUB; CARTER, 2011; BOYCE, 2014). Esses níveis indicam a quantidade mínima de luz incidente em uma superfície por unidade de área e cada atividade a ser desenvolvida num ambiente exigirá uma quantidade diferente de luz, dependendo da precisão da tarefa. Tarefas visuais que exigem maior precisão



necessitam de maiores níveis de iluminância para facilitar o seu desempenho, entretanto, altos índices também podem gerar desconforto (FARACO; SANTOS; PORTO, 2006).

No Brasil, as informações sobre procedimentos e determinação da iluminação natural para o interior dos edifícios, estão descrita na NBR 15215 (ABNT, 2005). Na NBR 15575 (ABNT, 2013), encontra-se a normalização sobre o desempenho das edificações habitacionais, onde são estipulados níveis requeridos de desempenho térmico do edifício, assim como iluminância natural e artificial nas habitações. No que se refere à iluminação natural, os níveis requeridos são baseados no Fator de Luz Diurna (FLD), que se trata da relação entre a disponibilidade da luz natural e a iluminância num certo ponto no interior do edifício, considerada para um céu parcialmente encoberto.

Ainda sobre as normas nacionais, os requisitos de iluminação estabelecidos para os locais de trabalho, objeto de estudo desta pesquisa, estão especificados na NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013). Para desempenhar cada tarefa ou atividade será demandada uma quantidade de *lux* através da iluminância mantida, uma limitação de ofuscamento e uma qualidade da cor (Tabela 1).

Tabela 1: Requisitos para o planejamento da iluminação em relação à Iluminância mantida (E_m), índice limite de ofuscamento unificado (UGR_L) e índice de reprodução de cor mínimo (R_a)

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$\overline{E_m}$ (lux)	UGR_L	R_a
Escritórios			
Arquivamento, cópia, circulação etc.	300	19	80
Escrever, teclar, ler, processar dados	500	19	80
Desenho técnico	750	16	80
Estações de projeto assistido por computador	500	19	80
Salas de reunião e conferência	500	19	80
Recepção	300	22	80
Arquivos	200	25	80

Fonte: ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013.

Os valores descritos na segunda coluna da Tabela 1 determinam a quantidade de luz mínima que deve ser obtido no plano de trabalho. Para atingir esses índices, os ambientes podem captar a luz proveniente do céu ou do sol através de diversos sistemas de iluminação natural, conforme a seguir sintetizado.

Conforme observado na Tabela 1, atividades comumente desenvolvidas em escritórios, como escrever, teclar, ler, desenvolver projetos assistidos por computador e ministrar conferência requerem iluminância mantida de 500 lux, nível adotado como referência nessa pesquisa.

2.2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Muitas edificações são utilizadas sem que a iluminação natural seja bem aproveitada mesmo que haja muita disponibilidade no céu local, seja em função dos condicionantes ambientais, seja por deficiência na concepção projetual. Entretanto, é notória a vantagem de se aproveitar a luz natural no interior das edificações, visto que a sua qualidade é muito superior que a da iluminação elétrica (KEELER; BURKE, 2010; LIM et al., 2012).

A preocupação em relação à captação da luz natural num clima tropical é que sua principal desvantagem é a alta densidade da radiação solar (LIM et al., 2012) e, diferentemente de regiões com característica de céus com pouca luminosidade, nas regiões tropicais deve-se controlar a radiação solar direta, para evitar altos índices de iluminâncias, ofuscamentos, altos contrastes e ganhos térmicos excessivos no interior das edificações (CORBELLA; YANNAS, 2003). Uma boa iluminação dos edifícios de hoje requer maximizar potencial de iluminação indireta do sol, bem como proporcionar sombreamento e controle de brilho (LAM, 1986).

Porém, em cada orientação – ou seja, em cada fachada do edifício – incide uma quantidade diferente de radiação solar e, consequentemente, de luz natural. Em virtude disso, o tamanho das janelas e o tipo de vidro escolhido devem ser levados em consideração de acordo com a orientação das aberturas. Nesse caso, para cada fachada pode ser calculado um tamanho ideal de aberturas para captar a luz natural. Janelas com áreas acima dessas dimensões podem trazer luminosidade e ganhos térmicos excessivos (TZEMPELIKOS; ATHIENITIS, 2007).

Em ambientes periféricos, ou seja, com aberturas laterais para o exterior, a proporção entre a área de janela e área de parede pode ter valores entre 30% e 40% para uma boa captação da luz natural (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011). Mesmo que os níveis de iluminância

externa sejam influenciados pela localização geográfica (MAYHOUB; CARTER, 2011), o aumento desta proporção não traz economia significativa na iluminação artificial e, ainda, pode trazer luminosidade excessiva, superaquecimento ou um uso abusivo de dispositivos de sombreamento (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011). Para climas quentes, a proporção entre a área de janela, a área de parede e a transmitância de sombreamento tendem a ser menores que em climas frios e com maiores economias de energia (TZEMPELIKOS; ATHIENTIS, 2007).

Outras características que também influenciam na quantidade de luz natural que pode ser aproveitada no interior das edificações são as condições ambientais e as do entorno construído, como as dimensões e proporções dos espaços externos, a radiação solar direta e a refletida nas edificações vizinhas e nas superfícies externas, a presença de árvores ou outros componentes do cenário urbano, além da altura do edifício (MESA; CORICA; PATTINI, 2011).

O consumo energético referente à iluminação artificial tem relação direta com a profundidade do ambiente, pois quanto maior a profundidade da sala, menor o alcance da luz natural e com isso, maior a necessidade de se acionar os sistemas artificiais de iluminação (DIDONÉ; PEREIRA, 2010).

No caso de edifícios de plantas profundas uma alternativa é a utilização de sistemas ópticos de iluminação natural para proporcionar maior economia de energia quando comparado a sistemas convencionais de captação da iluminação natural sem controles sensíveis (RUCK, 2006). Nesses edifícios, alguns sistemas inovadores de luz natural – como, por exemplo, painéis de redirecionamento de luz e dutos de luz – podem auxiliar no desempenho da iluminação natural dentro dos ambientes. Em pesquisa realizada em 35 edifícios de escritórios de Honk Kong, estimou-se que o uso apropriado de luz natural controlada tem potencial para economizar mais de 25% do total de energia elétrica utilizada (LI; TSANG, 2008).

Em edificações já construídas, mesmo as possibilidades de intervenção sendo mais limitadas do que nos edifícios ainda em fase de projeto, é possível criar soluções para o aproveitamento da luz natural, trazendo com isso melhor desempenho energético do edifício e, ainda, maior conforto ao usuário, sem grandes ou onerosas intervenções (LIM et al., 2012). A utilização de elementos de proteção solar é uma dessas soluções. Com o intuito de controlar a radiação

solar direta e evitar desconforto luminoso e o aporte desnecessário de calor, esses dispositivos são utilizados para proteção das aberturas contra a radiação solar direta, que podem ainda reduzir a transmitância das janelas, sobretudo no inverno, diminuindo as perdas de calor por convecção (SORGATO; VERSAGE; LAMBERTS, 2011).

Esses elementos influenciam diretamente o desempenho da luz natural no interior das edificações (PORTO; FONSECA, 2007; ALBUQUERQUE; AMORIM, 2012), mas podem ocasionar, entre outras consequências, a perda da qualidade visual do ambiente interno. Em alguns países de clima quente, a preocupação com o superaquecimento das edificações públicas através da radiação solar direta tem produzido proteções solares superdimensionadas, reduzindo a quantidade de luz natural necessária dentro dos ambientes (VIANA; GONÇALVES, 2001).

O uso inadequado de elementos sombreadores pode diminuir a quantidade de iluminação natural no interior do edifício (LIM et al., 2012). A consequência desse fato é a utilização permanente da iluminação elétrica, aquecendo o ambiente e, com isso, produzindo gastos desnecessários de energia (VIANA; GONÇALVES, 2001; TZEMPELIKOS; ATHIENITIS, 2007). O controle automático de proteções internas, como cortinas, que se movem em função da quantidade de luz exterior associado a um controle do sistema de iluminação elétrica é uma forma de reduzir substancialmente a demanda de energia com iluminação e condicionamento térmico do ambiente, dependendo das condições climáticas e orientação do edifício (TZEMPELIKOS; ATHIENITIS, 2007).

As propriedades dos dispositivos de proteção solar devem variar de acordo com a orientação. Esses elementos sombreadores devem ser parte integrante do projeto das aberturas de um edifício de escritórios para equilibrar os níveis de iluminação natural das salas e controlar os ganhos térmicos (TZEMPELIKOS; ATHIENITIS, 2007). Além disso, a temperatura operativa do ambiente é significativamente influenciada pelos dispositivos de proteção externos das aberturas, bloqueando a radiação solar direta antes desta penetrar pelas aberturas, evitando, conseqüentemente, o efeito estufa (SORGATO; VERSAGE; LAMBERTS, 2011).

Sendo assim, as proteções solares têm impacto significativo nos sistemas de aquecimento, resfriamento e iluminação do edifício e com isso, no conforto humano (TZEMPELIKOS; ATHIENITIS, 2007) e, se bem planejado, o sombreamento pode reduzir o consumo de

energia quando a edificação for condicionada artificialmente (SORGATO; VERSAGE; LAMBERTS, 2011).

Esse grande gasto energético dos edifícios para iluminar e condicionar termicamente os ambientes internos pode produzir o dióxido de carbono, que é prejudicial ao meio ambiente, caso a energia da região seja gerada através de fontes poluentes (FREEWAN, 2010). Entretanto, especialmente nos edifícios de escritórios, as estratégias integradas de iluminação natural apresentam grande potencial para melhorar sua eficiência energética (RAPHAEL, 2011), considerando que a luz natural é abundante e está disponível justamente no horário de utilização das edificações não-residenciais (DIDONÉ; PEREIRA, 2010). Além desse fato, um ambiente de trabalho iluminado pela luz natural tem grande influência no ser humano, podendo melhorar a saúde, o humor, o desempenho e consequentemente, a produtividade do usuário, sendo indiscutível sua importância (KEELER; BURKE, 2010; FREEWAN, 2010).

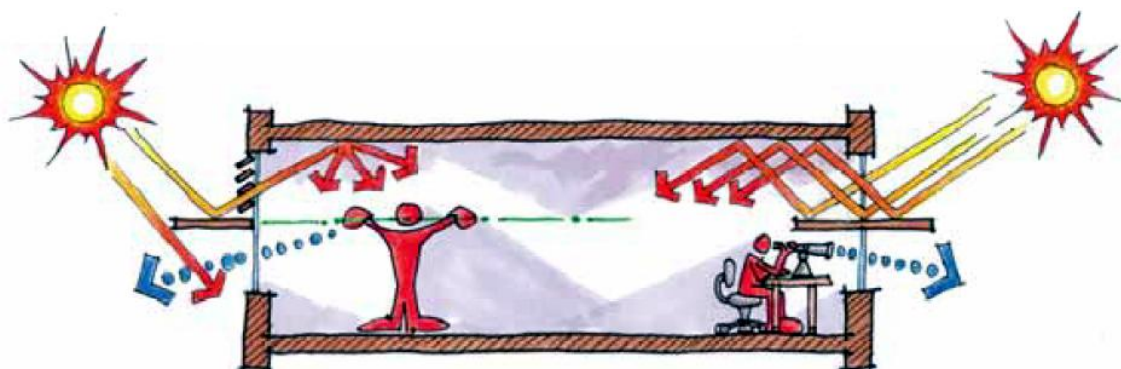
A economia de energia com sistemas integrados para aproveitamento da luz natural vão além da economia com a energia utilizada para iluminação elétrica, reduzindo também as cargas térmicas necessárias para refrigeração do ambiente devido à redução do calor proveniente das fontes de iluminação artificial (RAPHAEL, 2011). Especificamente em salas mais profundas com a presença de janelas em apenas um dos lados – tipologia usual em salas comerciais –, a necessidade de se manter a iluminação artificial acionada durante todo o período de ocupação a fim de se alcançar a iluminância mínima determinada por norma pode atingir uma área maior que 50% do ambiente (DIDONÉ; PEREIRA, 2010).

Seguindo a ideia de sombrear a abertura, redirecionar parte da luz incidente para o interior do edifício e, dessa forma, contribuir também para a redução dos gastos energéticos com iluminação, as prateleiras de luz – objetos de estudo desta pesquisa –, se apresentam como uma solução promissora.

2.2.1 As prateleiras de luz

Um dos sistemas de aproveitamento da iluminação natural em ambientes iluminados lateralmente, como no caso dos edifícios de escritórios, é a prateleira de luz (Figura 1). Este dispositivo é, geralmente, uma estrutura horizontal, posicionada acima da linha de visão, dividindo a abertura numa parte superior e outra inferior através da qual é possível manter ao contato visual com o exterior (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 2010).

Figura 1: Exemplos de prateleiras de luz

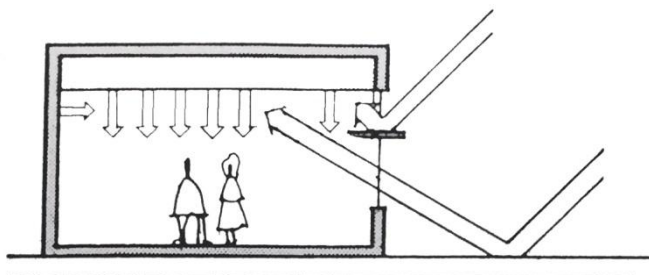


Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2014).

A prateleira pode ser interna, externa ou possuir os dois dispositivos. Pode ser executada com diversos materiais, mas sua superfície superior, para manter a função de redirecionar a luz, como ilustrado na Figura 1, deve conter um alto índice de reflexão. Suas dimensões devem ser projetadas de acordo com o ângulo do Sol, por isso, irão variar em diferentes latitudes e orientações (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 2010).

A função da prateleira de luz é bloquear a radiação solar direta que penetra na sala através da janela e redirecionar a luz que atinge sua superfície superior para o teto. Consequentemente, a luz refletida alcançará uma região mais afastada da abertura, uniformizando os níveis de iluminação no interior do ambiente (FREEWAN, 2010). De acordo com Lam (1986), nesse sistema o teto tem papel fundamental e será usado como a principal fonte de luz natural refletida, funcionando como fonte indireta de luz (Figura 2).

Figura 2: Através do redirecionamento da luz recebida proveniente do piso externo ou de prateleira de luz, o teto se torna uma fonte indireta de luz



Fonte: Lam (1986), p.76.

Segundo Ho e outros (2008) e Rosim (2008), essa melhor distribuição dos níveis de iluminância internos pode gerar uma economia significativa do consumo energético do

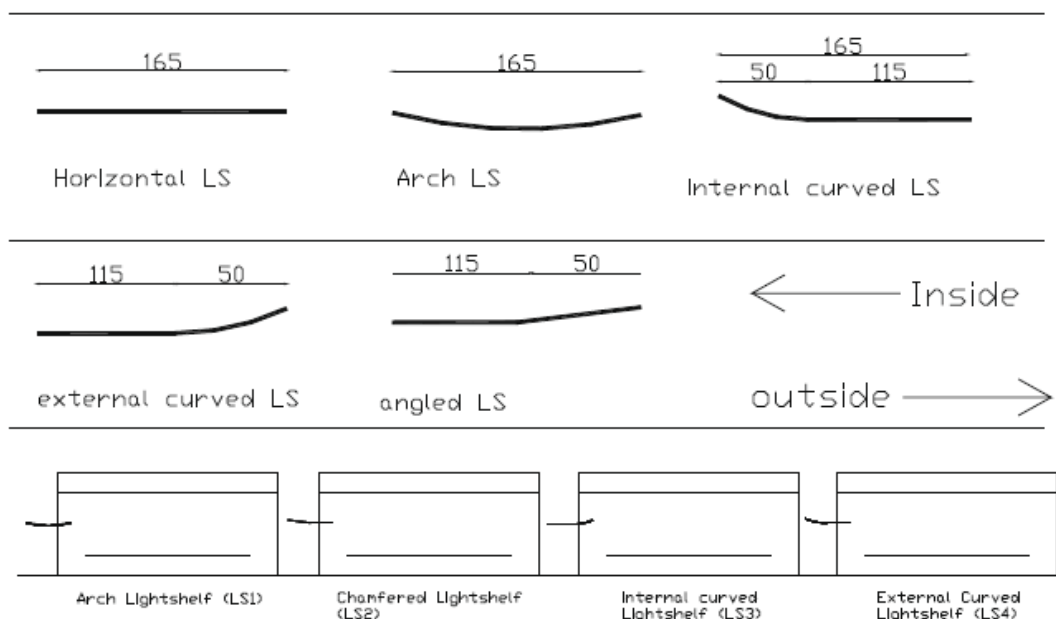
edifício, mesmo causando um pequeno aporte de calor, se comparados aos dispositivos de sombreamento horizontais de fachada. Ainda assim, esses ganhos térmicos se apresentam bem abaixo se comparados aos das fachadas de vidro sem dispositivos de proteção solar (FRANCO, 2007).

Além da uniformização da iluminação natural, cuja penetração no ambiente ocorre geralmente em apenas um dos seus lados, também é importante que se alcance o nível mínimo de iluminâncias para o desempenho da tarefa naquele espaço (HO et al., 2008), gerando ambientes mais agradáveis e proporcionando conforto visual ao usuário (ROSIM, 2008). Todavia, não se deve projetar um ambiente apenas para ser iluminado naturalmente, pois caso não haja disponibilidade de luz natural suficiente, deve-se fazer sua complementação com iluminação elétrica para não prejudicar a tarefa visual.

No entanto, com a utilização desses dispositivos, é possível manter grande parte das lâmpadas apagadas em momentos em que há grande quantidade de luz natural disponível e, ainda, manter um bom índice de uniformidade da iluminâncias mesmo com a presença da radiação solar direta incidindo na parede onde se encontram as janelas (HO et al., 2008). Os resultados de uma pesquisa realizada em um ambiente real em Milwaukee, nos Estados Unidos, comprovaram que as prateleiras de luz podem economizar, em média, 2 horas por dia de energia elétrica consumida com iluminação artificial, sem insatisfação significativa para o usuário (SANATI; UTZINGER, 2013).

A contribuição de luz natural no interior dos edifícios através da utilização de prateleiras de luz está também relacionada ao material de revestimento utilizado na sua superfície superior, sua geometria e orientação (FRANCO, 2007). O desempenho de uma prateleira de luz ainda pode ser melhorado em função de sua forma. Dos formatos pesquisados por Freewan (2010), o que melhor uniformiza a distribuição da luz, reduzindo sua intensidade na porção próxima à janela e aumentando sua presença na parte mais afastada da mesma é a prateleira de luz com a parte externa curva, aumentando o nível de iluminação natural em até 10% em comparação ao mesmo dispositivo com formato horizontal (Figura 3). Tanto as prateleiras de luz curvas quanto as chanfradas apresentaram desempenho superior quando comparadas a um modelo horizontal fixo (FREEWAN, 2010).

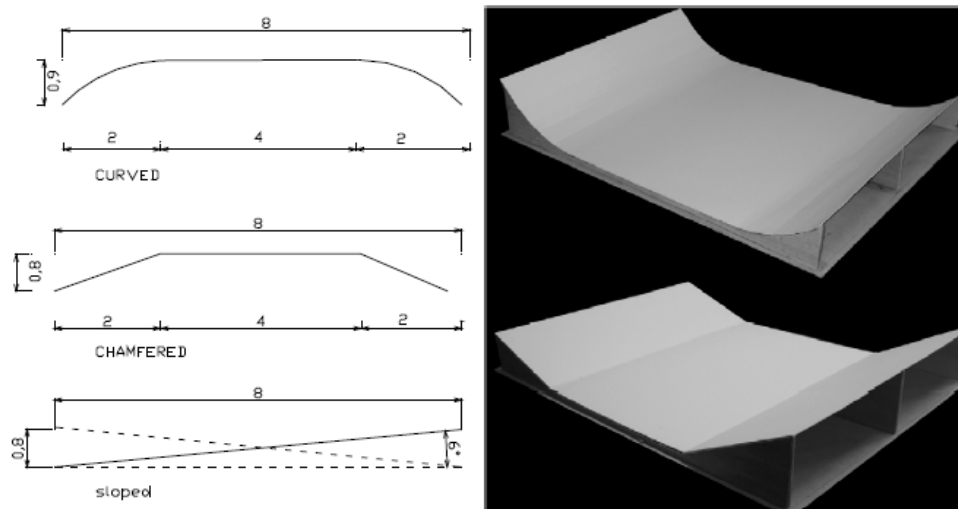
Figura 3: Diferentes geometrias das prateleiras de luz



Fonte: Freewan (2010).

Outros fatores que influenciam significativamente no desempenho das prateleiras de luz são a geometria do teto e os índices de reflexão das superfícies do ambiente, visto que grande parte da luz redirecionada é refletida principalmente no teto. Em virtude disso, ainda é possível aumentar o desempenho desses dispositivos quando se trabalha com um teto de geometria curva (FREEWAN, 2010). Esse fato foi comprovado no trabalho de Freewan, Shao e Riffat (2008), quando foi investigado o impacto da geometria do teto (Figura 4) no desempenho das prateleiras de luz, medido através da uniformidade da distribuição da luz e dos níveis de iluminâncias, em climas que apresentam céu com grande luminosidade. A geometria do teto que apresentou melhor desempenho foi a do teto em curva na parede da janela e na parede oposta.

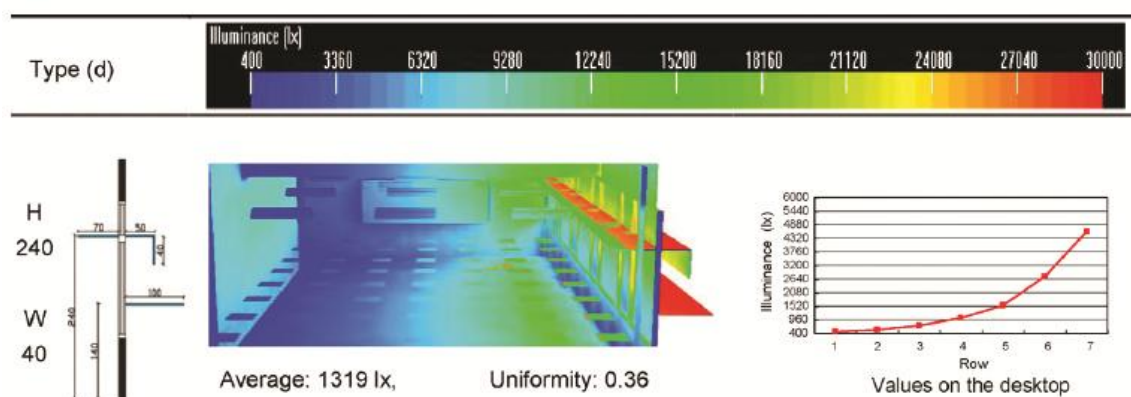
Figura 4: Geometrias do teto curva, chanfrada e inclinado à esquerda e modelos físicos do teto curvo e chanfrado à direita



Fonte: Freewan, Shao e Riffat (2008).

Na pesquisa de Ho et al. (2008), os dispositivos de sombreamento foram testados em diversas formas e composições e em cada uma delas o comportamento da luz redirecionada produziu uma taxa diferente de uniformização das iluminâncias dentro do ambiente. Porém, o dispositivo que melhor se comportou, obtendo um melhor índice de uniformização da iluminação natural para o caso do modelo de salas de aula de Taiwan, foi o composto por dois elementos horizontais, sendo que o elemento inferior era apenas externo e o superior era composto por uma parte interna e outra externa e continha um elemento vertical associado à sua extremidade externa, como modelo à esquerda apresentado na Figura 5.

Figura 5: Resultado de simulação de uma sala de aula com duas camadas de proteção solar com um elemento vertical no componente superior



Fonte: Adaptado de Ho e outros (2008).

Antes da disseminação do uso em *softwares* de simulação, as investigações sobre o uso das prateleiras de luz eram desenvolvidas no país através de monitoramento da iluminação natural em ambientes reais, como na pesquisa de Bormann (2003) ou em modelos em escala.

Modelos físicos em escala também já foram estudados por pesquisadores no país, verificando o desempenho de dispositivos de redirecionamento de luz em situações de céu real, como na pesquisa de Rosim (2008), realizada em Campinas-SP; e na pesquisa de Borba (2005), em Curitiba-PR (Figura 6). Os resultados das pesquisas comprovaram que, submetida a uma situação exterior real, a prateleira de luz proporcionou um melhor equilíbrio de iluminâncias se comparada a uma abertura lateral sem proteção, produzindo um ambiente mais agradável em relação ao conforto visual e com alta capacidade para economia de energia em virtude da redução da utilização de iluminação elétrica.

Figura 6: Vista externa do modelo em escala



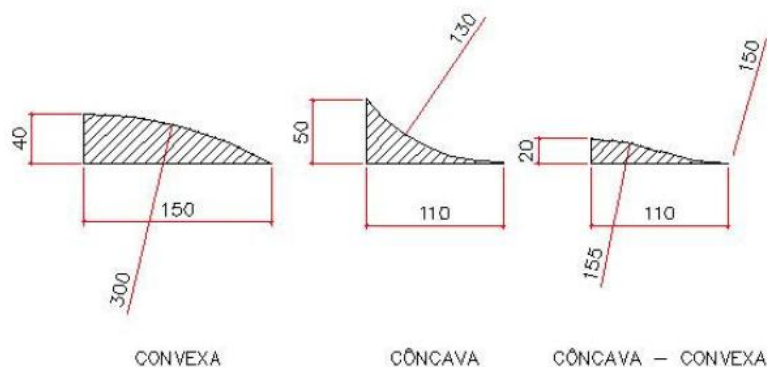
Fonte: Borba (2005)

Dentre os diversos modelos de dispositivos simulados na pesquisa de Rosim (2008), os que melhor distribuíram uniformemente a luz natural dentro do ambiente foram as prateleiras de luz brancas, quando comparadas à espelhada e à janela sem proteção. Entretanto, sua investigação se limitou a estudar dispositivos planos e brancos, mas com diferentes inclinações, além de um dispositivo plano espelhado.

Na pesquisa de Borba (2005), as prateleiras investigadas apresentavam diferentes soluções em sua geometria (Figura 7). Os modelos de prateleiras que obtiveram melhor desempenho

luminoso foram as côncavas, convexas e côncavas/convexas, visto que promoveram melhores níveis de iluminância e distribuição mais uniforme da luz no interior do ambiente estudado.

Figura 7: Modelos de prateleiras côncavas e convexas



Fonte: Borba (2005).

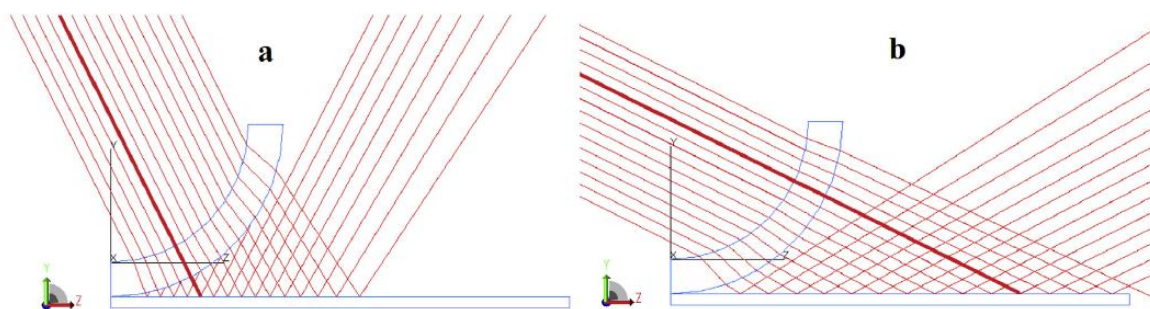
Ainda no Brasil, a pesquisa de Cândido, Torres e Cabús (2005), investigou o efeito das prateleiras de luz na uniformização da luz natural. Já na pesquisa de Araújo, Cavalcanti e Cabús (2005), os modelos simulados estudaram a influência dos dispositivos na uniformização da luz sob marquises. Nos dois trabalhos, cuja investigação se deu por meio do *software* de simulação *TropLux*, se constatou a eficiência da prateleira de luz para a uniformização da iluminação natural no interior dos edifícios.

Em sua pesquisa na Universidade Federal do Rio de Janeiro, Santos (2007) comparou o resultado de diferentes tratamentos de envoltória na avaliação da iluminação natural em escritórios de planta livre através de simulação no *software Desktop Radiance*. Duas plantas de edifício foram modeladas e neles foram simuladas salas com diferentes tipos de vidro e elementos sombreadores. Dentre as variações investigadas, o modelo com prateleira de luz interna e externa, com vidros de alta transmissão visível na parte superior e baixa na inferior da janela, apresentou melhor desempenho em relação à uniformidade da iluminação no interior e à maior utilização da luz natural.

Em pesquisa realizada por Xue, Mak, Cheung (2014) foi investigada a eficácia da prateleira de luz plana em conjunto com painéis de vidros côncavos, intitulados *meniscus glazing panel*, com diferentes faixas de ângulo de curvatura. O trabalho analisou o desempenho dessa proposta comparando-a com uma janela convencional. Foi observado que a secção curva do

painel poderia mudar a direção da luz e afetar o desempenho de iluminação natural em diferentes épocas do ano e diferentes ângulos de altura solar (Figura 8). Foi verificado que o sistema auxiliou na uniformidade da luz natural reduzindo sua intensidade na área próxima a abertura no período do verão, além de melhorar a uniformidade e os níveis de iluminância no inverno.

Figura 8: Trajeto dos raios solares, através do painel de vidro curvo, provenientes de altos ângulos (a) e baixos ângulos (b), em conjunto com a prateleira de luz plana



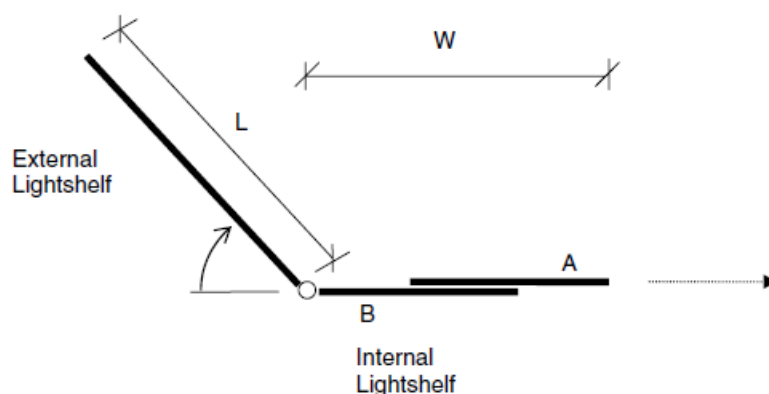
Fonte: Xue, Mak, Cheung (2014).

Franco (2007) estudou em sua pesquisa, dispositivos automáticos de redirecionamento de luz que auxiliam no aproveitamento da luz natural mesmo quando esta se apresenta com baixa disponibilidade na abóbada celeste e, ainda, melhoram o conforto e a acomodação visual do usuário do espaço. Esse aproveitamento é obtido inclinando-se a prateleira para aumentar a captação de luz solar difusa pela abertura, sem ser acionado a cada mudança brusca das características do céu, resultando em um baixo consumo de energia. Alguns modelos distintos foram testados, e obtiveram resultados diferentes e alguns insatisfatórios, como no caso da prateleira de luz horizontal com a superfície espelhada que não obteve contribuição significativa para melhorar o nível de luminosidade interna.

O ganho de calor para sistemas de prateleiras de luz automáticas ou fixas é quase o mesmo, mas a contribuição da quantidade de luz natural captada através de dispositivos como as prateleiras de luz automáticas pode ser aumentada se o sistema estiver orientado para a melhor posição naquele determinado momento, o que vai depender da localização do sol na abóbada, cuja trajetória varia de direção e altitude de acordo com os horários do dia e as estações do ano. Caso o dispositivo não esteja definido na sua melhor posição, ele pode oferecer desempenho inferior se comparado às prateleiras fixas (FRANCO, 2007).

Raphael (2011) também simula em seu trabalho sistemas de prateleiras de luz automatizadas e demonstra o potencial de economia de energia através desse sistema de automação e controle do edifício. É proposto um sistema que adapta sua geometria às condições ambientais externas, inclinando a porção externa do dispositivo e movendo horizontalmente a prateleira interna (Figura 9), configurando uma redução de 12% dos gastos com luz artificial se comparadas às prateleiras estáticas.

Figura 9: Corte esquemático de uma prateleira de luz adaptável. A porção externa com comprimento fixo (L) pode ser inclinada, enquanto a interna pode alterar o seu comprimento (W) deslocando-se a parte superior (A), sob a parte inferior (B) estática



Fonte: Raphael (2011).

O sistema de controle utilizado adapta a geometria do dispositivo em função de parâmetros pré-determinados baseados no mês, na hora e nas condições do céu. A grande vantagem é que esses valores podem ser pré-computados (RAPHAEL, 2011).

Apesar da existência de várias pesquisas sobre o tema, é possível observar nas edificações das cidades que essa não é uma solução amplamente utilizada. Esse fato pode ser observado na pesquisa de Fontoynt (1999), na qual dentre os 17 edifícios de escritórios analisados apenas 1 utilizava esse sistema. Esse fato foi observado inclusive em território brasileiro, em pesquisa apresentada pelo Ministério de Minas e Energia (MME), cujo relatório aponta que apenas 0,3% dos edifícios comerciais brasileiros pesquisados utilizam esse dispositivo e apenas 15,7% da amostra utilizam algum tipo de proteção externa (BRASIL, 2008). Mesmo a pesquisa tendo sido realizada há cerca de 6 anos, acredita-se que tal situação não deve ter sido alterada nos dias atuais, considerando principalmente que o último grande evento que

impulsionou mudanças significativas no comportamento dos usuários e nas soluções projetuais, segundo Carlo, Pereira e Lamberts (2004), foi a crise energética de 2001).

Em síntese, pode-se afirmar que os resultados das pesquisas até então desenvolvidas sobre o assunto apresentam as prateleiras de luz como uma solução promissora para melhorar a eficiência energética das edificações estudadas, especialmente considerando que as questões energéticas estão entre as preocupações prioritárias do mundo atual.

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS EDIFICAÇÕES

O consumo energético mundial está aumentando, assim como a busca por eficiência energética global através do uso de tecnologias oriundas de fontes renováveis, e pelas soluções denominadas “verdes”. Entretanto, tais medidas se mostram insuficientes quando se considera a finitude dos combustíveis fósseis em contrapartida à crescente globalização e consequente promoção do estilo de vida dos países desenvolvidos. Considerando ainda as consequências ambientais com a adoção de matrizes energéticas poluidoras, pode-se afirmar que a atual produção/consumo energético e os sistemas sócio-econômicos atuais são insustentáveis (PÉREZ-LOMBARD et al., 2008). Apesar da redução do impacto da construção civil no mundo não ser tarefa fácil, ações combinadas e simultâneas em diversos tópicos podem ser eficientes (FOSSATI, 2008). Uma dessas ações para se alcançar um desenvolvimento mais sustentável, é a redução do consumo de energia elétrica, principalmente daquela produzida pela queima de combustíveis não renováveis ou outros sistemas não renováveis, com a consequente redução da poluição produzida nesse processo (CUNHA, 2006).

Antes do amplo uso da lâmpada fluorescente e da eletricidade barata, nos anos 50 e 60 do século passado, a luz natural era a fonte primária de iluminação de escolas e escritórios (HESCHONG, 2002). Todavia, desde a primeira crise energética mundial nos anos 70, a energia passou a ser cada vez mais cara (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), e o cenário continua o mesmo, conforme pesquisas mais recentes, como a Heschong (2002). Em virtude disso, algumas características das edificações não residenciais foram repensadas, como por exemplo, os edifícios começaram a ser executados com tetos mais baixos e vidros mais escuros, para reduzir o volume do recinto e minimizar gastos com condicionamento térmico. Entretanto, essa nova característica das edificações acabou reduzindo drasticamente a

quantidade de luz natural em seu interior (HESCHONG, 2002). Para suprir essa escassez de iluminação, sistemas de iluminação artificial ficavam em funcionamento durante toda a jornada de trabalho, gerando altos gastos com energia.

A maioria dos países emergentes e desenvolvidos tem hoje políticas de eficiência energética e economia de energia, com campanhas para evitar o desperdício energético e reduzir as emissões de CO₂. No setor comercial, os edifícios de escritórios são os principais responsáveis por essas emissões e pelo consumo de energia (PÉREZ -LOMBARD et al., 2008). Entretanto, quando se pensa em economia de energia em edifícios já existentes, o desafio é reduzir gastos com iluminação para áreas centrais da edificação ou em ambientes muito profundos, onde a luz natural é escassa. Outro entrave são os horários prolongados de funcionamento das edificações comerciais, quando não há mais luz natural suficiente para auxiliar na iluminação das salas (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011).

Diversos são os fatores que podem influenciar na eficiência energética de uma edificação, como as características das janelas, as propriedades dos dispositivos de sombreamento, a refletância das superfícies internas, a altura do teto e das divisórias internas das estações de trabalho nos escritórios, entre outros (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011). Um fator significativo no consumo de energia de um edifício é o microclima que o envolve, estabelecendo uma interação entre a edificação, ou mesmo o ambiente natural em que está inserida (YANG et al., 2012). A orientação da edificação também tem grande influência no consumo energético médio de um ambiente. Um exemplo dessa afirmação pode ser encontrado na pesquisa de Santos (2012), na qual a alteração da orientação aumentou o consumo final do ambiente em cerca de 17% nos modelos simulados.

Algumas características do edifício contribuem para a quantidade e a distribuição de luz natural em seu interior, dentre elas estão a orientação, o tamanho e a distribuição das aberturas, que são definidas ainda em fase de projeto (MESA; CORICA; PATTINI, 2011).

Os edifícios até então desenvolvidos possuíam como característica marcante a presença de grandes áreas envidraçadas em suas fachadas, o que resultava em ganho de calor excessivo através da radiação solar e grandes cargas de resfriamento ou aquecimento dos ambientes (TZEMPELIKOS; ATHIENITIS, 2007). Como já explanado anteriormente, é possível reduzir

esses gastos, porém, o potencial de economia é diretamente ligado à latitude da cidade (VIANA; GONÇALVES, 2001).

A adoção de condicionamento térmico ativo (com consumo energético) de um ambiente vem aumentando a cada dia, seja pela redução no custo dos equipamentos individuais, seja pela ampliação do nível de exigência dos usuários. Em virtude disso, os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado tornaram-se responsáveis pelo consumo de quase 50% da energia consumida pelas edificações, o que corresponde a um valor entre 10 e 20% do consumo total de energia dos países desenvolvidos (PÉREZ-LOMBARD et al., 2008). Em edificações não-residenciais, os sistemas de iluminação artificial são responsáveis por uma parte considerável dos gastos com energia (VIANA; GONÇALVES, 2001).

O consumo energético total dos países em desenvolvimento também é alto e se o cenário de consumo de energia mundial não se alterar drasticamente, de acordo com as previsões da *Energy Information Administration* (EIA), antes de 2020 os países emergentes do Sudeste da Ásia, Oriente Médio, América do Sul e África irão ultrapassar os países desenvolvidos no consumo mundial de energia (PÉREZ -LOMBARD et al., 2008). Em contrapartida, existem soluções para minimizar o gasto energético mundial. A iluminação elétrica em edifícios de escritórios, por exemplo, tem um grande potencial para a economia de energia de uma região, seja com edificações novas ou *retrofit* de um edifício existente. Observa-se que uma redução de 50% dos gastos em energia elétrica utilizada para iluminação nas edificações europeias é possível, considerando-se uma meta realística de consumo de 10KWh/m² para futuros edifícios energeticamente eficientes, enquanto os gastos em 2011 na Suécia eram de 21KWh/m² (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011).

Uma maneira de se economizar energia em uma edificação já existente é a substituição de instalações de lâmpadas fluorescentes tubulares antigas, do tipo T12, por lâmpadas mais modernas e mais eficientes, do tipo T5, e reatores de alta frequência. Essa modificação no sistema de iluminação, segundo Dubois e Blomsterberg (2011), pode reduzir em mais de 40% os gastos energéticos com iluminação artificial. O uso combinado de sistemas modernos de lâmpadas e reatores, com luminárias mais eficientes, iluminação de tarefa diferente da iluminação geral do ambiente e dimerização das lâmpadas e outros sistemas de controle da luz, como sensores de presença, são soluções importantes que auxiliam na economia

energética de uma edificação e podem trazer economia de até 80% de energia elétrica se comparado às instalações antigas de iluminação (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011).

As análises dos sistemas integrados de iluminação, sombreamento e condicionamento térmico também devem ser feitas ainda na fase de projeto, quando as decisões críticas terão um impacto maior na eficiência energética de um edifício durante toda a sua vida útil (TZEMPELIKOS; ATHIENITIS, 2007). Entretanto, para uma análise mais precisa do comportamento da iluminação natural em um projeto a ser inserido em uma região com ocupação já consolidada, faz-se necessário um estudo da interferência do entorno na admissão dessa luz.

2.4 INFLUÊNCIA DAS OBSTRUÇÕES NO ENTORNO

Segundo Baker e Steemers (2002), a luz natural tem dois componentes – a luz direta do sol e a luz difusa do céu azul ou das nuvens, sendo que a luz solar direta é entre 5 e 10 vezes mais forte que a luz difusa. Entretanto, as obstruções presentes no sítio, como por exemplo as edificações do entorno imediato, afetam esses dois componentes, visto que bloqueiam uma parcela da abóbada. Estes elementos também recebem essa luz direta e difusa e a refletem para o entorno. Essa luz refletida pode contribuir para iluminar as regiões adjacentes no exterior dos edifícios e ainda ser admitida pelas aberturas dos ambientes localizados no entorno. Em resumo, a luz natural admitida num ambiente interno é uma combinação da luz do sol, do céu e de reflexões externas (LAM, 1986).

Laranja (2010) afirma que as características da malha urbana, vias e edificações obstruidoras influenciam diretamente na disponibilidade de luz natural no ambiente interno bem como no consumo energético com iluminação artificial. Strømman-Andersen e Sattrup (2011) indicam que a influência das geometrias dos cânions urbanos na energia consumida alcançou, em sua pesquisa, valores superiores a 30% do gasto energético total para ambientes comerciais se comparados a um sítio não obstruído. No entanto, mesmo que em pequenas proporções – se comparado à iluminação natural direta, o solo, as edificações adjacentes ou até mesmo algumas partes da própria fachada do edifício podem refletir a luz e esta reflexão pode ser aproveitada em seus ambientes internos (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1980; LAM, 1986; ROBBINS, 1986). Pereira, Pereira e Claro (2008), identificaram em sua

pesquisa uma contribuição média do entorno de aproximadamente 26% da iluminação natural interna admitida pelas aberturas laterais.

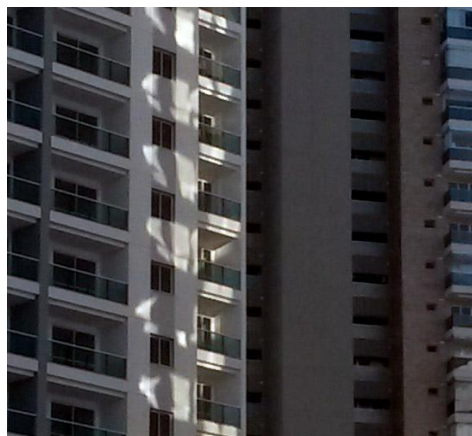
No lado sombreado de um edifício, a luz refletida do solo e das edificações do entorno são complementares à luz difusa da abóbada celeste. O uso dessa luz refletida era uma estratégia comum antes do advento da iluminação elétrica. Entretanto, essa reflexão pode causar ofuscamento por excesso de brilho no campo visual do usuário interno, principalmente quando o sol está mais baixo no céu. Nesses casos, os modelos de edifícios com envidraçamento refletivo têm impacto negativo na vizinhança, conforme apresentado nas Figuras 10 e 11, e devem ter seu uso atenuado (LAM, 1986).

Figura 10: Ao centro da imagem nota-se o ofuscamento devido ao reflexo do sol em edifício com fachada envidraçada composta por vidro reflexivo em Vitória-ES



Fonte: O autor.

Figura 11: Ao centro da imagem pode-se perceber o impacto do reflexo dos raios solares na vizinhança, causado por edifício em Vitória-ES, cuja fachada é composta por vidro reflexivo



Fonte: O autor.

Para se planejar o aproveitamento da luz natural é preciso conhecer os atributos e condições do entorno que podem afetar o seu uso (ROBBINS, 1986). Em determinadas situações, como demonstrado nos exemplos anteriores, as edificações do entorno podem provocar reflexões indesejáveis da luz natural. Todavia, o aproveitamento da luz refletida nas superfícies adjacentes pode também ser favorável (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1980; STRØMANN-ANDERSEN; SATTRUP, 2011). De acordo com Li e outros (2010), em casos de centros urbanos verticalizados, onde a parcela visível da abóbada é bastante reduzida nos pavimentos inferiores, a maior parte da luz natural admitida nos ambientes é proveniente das reflexões nas superfícies exteriores.

Entretanto, essas obstruções exteriores tendem a diminuir a quantidade de luz admitida no ambiente interno por reduzir a parcela visível da abóbada celeste. Segundo Baker e Steemers (2002) e Li e outros (2010), esse efeito pode ser significativo, aumentando a necessidade de energia para iluminação elétrica. Dependendo do ângulo de altura solar e da orientação da janela, essa obstrução pode ser favorável para bloquear a radiação direta do sol, evitando assim o aparecimento de manchas solares no interior do recinto e o consequente ofuscamento por excesso de brilho das superfícies iluminadas.

Sendo assim, o parâmetro mais relevante que deve ser considerado em relação às edificações do entorno é o ângulo de elevação da obstrução através da janela, que pode variar de acordo com a altura do pavimento onde se deseja analisar e da distância da edificação vizinha (BAKER; STEEMERS, 2002).

Visto que a cada dia os centros urbanos estão se tornando mais adensados e verticalizados, estudos sobre a influência dessas obstruções no aproveitamento de luz natural no interior dos edifícios se fazem necessários, pois segundo Strømman-Andersen e Sattrup (2011) a geometria urbana é um fator chave no uso de energia dos edifícios. Em virtude disso, nessa pesquisa optou-se por investigar o desempenho das prateleiras de luz sob condições de obstrução de parte da abóbada por edificações vizinhas, com o intuito de simular uma situação que se aproxime da realidade dos centros urbanos verticalizados. Para tal fim, é necessário caracterizar o entorno construído com suas dimensões, afastamentos, índices de reflexão de suas superfícies, dentre outras.

Como já abordado nesse capítulo, as características do entorno têm influência considerável na admissão de luz em um ambiente interno seja bloqueando parte da luz difusa proveniente da abóbada ou dos raios solares diretos ou até mesmo através da reflexão da luz em suas superfícies. Para analisar a eficácia dos sistemas de iluminação propostos para um edifício, inserido em uma região verticalizada, antes mesmo da sua construção, é possível modelá-lo e avaliá-lo através dos *softwares* de simulação computacional.

2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EDIFÍCIOS

Segundo Reinhart e Wienold (2011), na última década se multiplicaram os avanços para avaliação do desempenho da luz natural nos ambientes através de *softwares* de simulação.

Apesar desse fato, algumas barreiras atrapalham a larga adoção dessa tecnologia pela comunidade de projetistas, como por exemplo, o tempo despendido, o complicado processo de simulação e a incapacidade de interpretar os resultados obtidos. Antes desse avanço, esse tipo de avaliação era feito com medições no próprio ambiente, baseadas em métodos descritos nas normas técnicas específicas, ou através de modelos em escala.

O uso de modelos em escala para simulação de edifícios foi bastante reduzido em virtude da confiabilidade dos *softwares* de simulação (REINHART; FITZ, 2006). Atualmente, através das simulações por computador, é possível avaliar os projetos em diversos aspectos, inclusive avaliar alguns tipos de impacto ambiental que porventura poderia vir a ser provocado por uma decisão de projeto, antes mesmo de sua execução. A utilização dos computadores possibilita simular o desempenho térmico, luminoso e energético das edificações através de modelos computacionais estudados em diferentes condições, o que permite uma avaliação mais precisa das decisões de projeto em relação à eficiência das soluções propostas (DIDONÉ; PEREIRA, 2010).

Discutiu-se na pesquisa de Didoné e Pereira (2010) que o controle do sistema de iluminação artificial com o aproveitamento da luz natural reduz o consumo energético visto que as cargas térmicas internas também são reduzidas. Os pesquisadores observaram que o gasto de energia total da sala analisada foi consideravelmente reduzido, e para a previsão desse consumo e da iluminação natural nas edificações é recomendável a utilização de *softwares* de simulação que utilizam arquivos climáticos e processam as simulações de acordo com o conceito do *Daylight Coefficients*. Para tal, pode ser utilizado o *software* EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2010), por exemplo, cuja função é a simulação termoenergética. Para um resultado mais próximo da realidade, nas pesquisas de Didoné e Pereira (2010) e Yun e Kim (2013), o *software* Daysim (REINHART, 2006) foi utilizado para gerar um arquivo de dados e através dele, calcular o consumo energético anual no EnergyPlus.

Nesses casos, a extração dos resultados das simulações de iluminação natural do programa Daysim pode ser definida como uma etapa precedente para a realização das simulações sobre eficiência energética dos modelos simulados. Além disso, sabendo que o uso da luz natural nos edifícios de escritórios reduz a necessidade da utilização de luz artificial e proporciona níveis satisfatórios de iluminação interna (DIDONÉ; PEREIRA, 2010), diversos profissionais

buscam o seu aproveitamento no interior dos ambientes e utilizam, como ferramenta de estudo, os modelos tridimensionais simulados em *softwares* para esse fim.

Na pesquisa de Reinhart e Fitz (2006), envolvendo profissionais de 27 países que trabalham com projeto de edificações, foi constatado que 91% dos projetistas entrevistados incluem aspectos de iluminação natural em seus edifícios. Desses profissionais, os que consideraram o uso de luz natural 79% utilizavam simulação por computador para aprimorar seus projetos. A maioria delas desenvolveu seus trabalhos através de auto-treinamento, ou seja, utilizando tutoriais dos *softwares* para o uso das ferramentas de simulação de iluminação natural, porém, a complexidade das ferramentas foi um dos principais pontos de reclamação dos projetistas.

Os resultados de simulação mais comuns buscados pelos pesquisadores foram a iluminância de interiores sobre específicas condições de céu e o fator de luz do dia, enquanto as soluções mais influenciadas pelas análises das simulações foram os tipos de sombreamento e controle da luz através do tamanho das janelas, do tipo de vidro e outros sistemas de controle (REINHART; FITZ, 2006).

Em sua pesquisa, Raphael (2011) simula um modelo a partir do *software* de simulação de iluminação *Radiance* (WARD, 1993), que utiliza um método conhecido como raio-traçado. Esse *software* já foi utilizado como motor de simulação por diversos outros *softwares* e foi testado e validado extensivamente (RAPHAEL, 2011). Uma versão do *software* em questão também foi utilizada na pesquisa de Santos (2007), porém, a pesquisadora modelou suas simulações na versão *Desktop*, que utiliza o ambiente gráfico do *software AutoCAD*, cuja utilização é bastante abrangente nos escritórios de arquitetura, e no qual a profissional já tinha experiência, o que facilitou a modelagem virtual.

No Brasil, outras pesquisas, como a de Laranja (2010), Araújo, Cavalcanti e Cabús (2005) e Cândido, Torres e Cabús (2005), foram desenvolvidas utilizando modelos virtuais simulados no *software* de iluminação *Troplux*, que segundo a última pesquisa citada, é baseado no método Monte Carlo e também no método do raio traçado.

De acordo com Yun e Kim (2013), *softwares* de simulação de desempenho energético podem apresentar grandes diferenças nos resultados relativos à iluminância de interiores e consequentemente no gasto energético com iluminação. Com o intuito de minimizar a imprecisão da simulação deve ser utilizado um método de simulação integrado com o auxílio

de outro *software* para o cálculo da iluminação. Os pesquisadores utilizaram, nesse caso, o *software Daysim*, cujo cálculo de iluminação interna é possui maior precisão, promovendo resultados mais confiáveis da iluminação natural interna. Consequentemente, o cálculo de consumo de energia gasto pela iluminação se torna mais seguro.

Considerando que ocorrem muitas variações da luz natural ao longo do dia e do ano, as avaliações através de medidas dinâmicas da iluminação no ambiente interno se tornam mais próximas à realidade. Assim, é possível calcular o perfil anual da iluminação interna com o uso dos arquivos climáticos do local a ser simulado (REINHART; MARIDALJEVIC; ROGERS, 2006).

3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

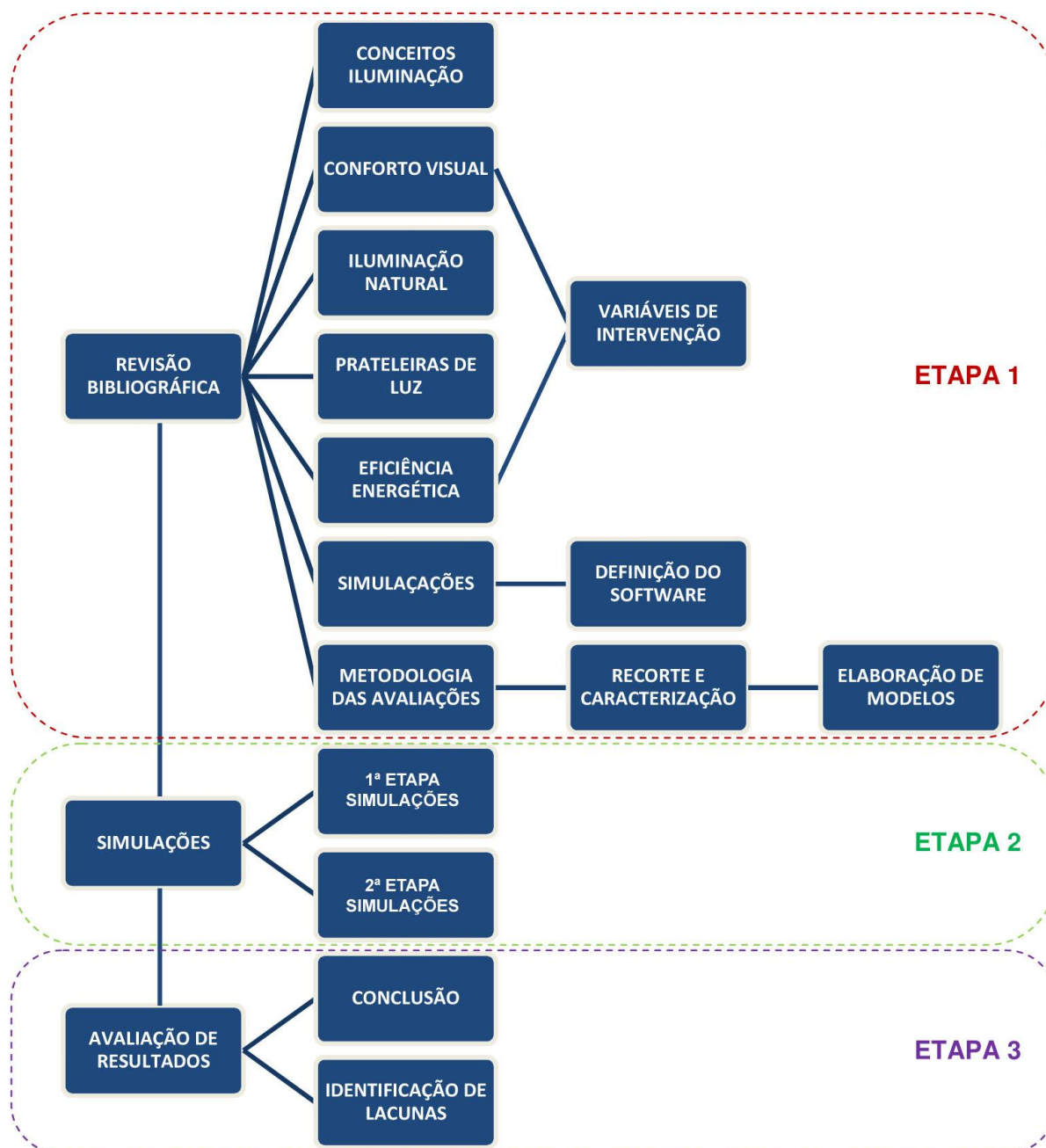
Este capítulo explicita os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento desta pesquisa, apresentando estratégias de pesquisa e métodos utilizados para alcançar o objetivo geral.

A investigação proposta foi baseada no estudo de caso de um mesmo modelo de edifício simulado em diferentes cidades, com diferentes soluções de prateleiras de luz. Estes foram comparados a um modelo de controle definido como um edifício que apresenta características comuns encontradas nas diferentes regiões do Brasil. A fim de se obter resultados mais próximos às situações encontradas nos grandes centros urbanos, os modelos foram inseridos em um contexto de obstrução externa, simulando edifícios em seu entorno imediato. Para avaliação dos estudos de caso, os modelos são simulados em *softwares* específicos e os resultados dessas simulações computacionais, com caráter quantitativo, são comparados e analisados.

Para isso, dentre as etapas metodológicas, primeiramente foi executada uma revisão bibliográfica dos temas abordados na pesquisa e levantados dados sobre as características e disponibilidade de iluminação natural nos edifícios de escritórios. Em paralelo, foi feito um recorte e caracterização do edifício comercial a ser adotado como referência e, posteriormente, modelado em computador. Para a modelagem, foram selecionados os *softwares* de simulação, alicerçado principalmente no nível de confiabilidade do resultado e na acessibilidade para manuseio e inserção de dados. Após a modelagem do edifício referência, foram propostos outros edifícios com as intervenções propostas. Ainda nesta etapa, foram selecionadas diferentes localidades para simulação dos modelos e em sequência, feitos os processos de simulação (Figura 12).

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas de simulações. Primeiramente verificou-se a influência das obstruções externas em salas com prateleira de luz plana, porém simuladas em distintos pavimentos do edifício. O intuito dessa etapa metodológica foi analisar o aproveitamento da iluminação natural em ambientes com esse dispositivo, submetidos a diferentes percentuais de obstrução da abóbada celeste e, conseqüentemente, captando percentuais distintos de luz proveniente das reflexões externas, como das edificações do entorno e do solo, em diferentes latitudes do território brasileiro.

Figura 12: Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: O autor.

Já foi abordado no capítulo anterior que a prateleira de luz reduz o brilho excessivo provocado pela radiação solar direta. Entretanto, o bloqueio dos raios solares não são tão efetivos quando estes são provenientes de baixas altitudes e necessitam de proteção complementar (LITTLEFAIR; AIZLEWOOD; BIRTLES, 1994). Contudo, ao dimensionar as prateleiras com diferentes projeções internas e externas, de acordo com a carta solar das latitudes

simuladas, observou-se que os ângulos de obstrução produzidos pelas edificações do entorno, somados à obstrução da prateleira, poderiam reduzir a radiação solar direta proveniente dos menores ângulos de altura solar. Esse fato levou à investigação de outras orientações, que comumente não apresentam um bom desempenho das prateleiras de luz.

Sendo assim, na segunda etapa de simulações, optou-se por analisar as salas cuja parcela visível da abóbada celeste seria a menor possível. Entretanto, nas simulações do pavimento do edifício caracterizado pelo menor aproveitamento da luz natural, optou-se por uma investigação mais aprofundada e com mais variáveis. Foram então analisadas 2 geometrias diferentes de prateleiras de luz, com obstrução no entorno, em quatro orientações cardeais e com dois tipos diferentes de vidro utilizados na parcela inferior da abertura.

Após executados os cálculos e desenvolvida a avaliação dos resultados, foram selecionados os modelos que alcançaram o melhor desempenho em cada uma das capitais. Esses modelos, junto ao modelo referência de mesma orientação, foram então analisados minuciosamente e tiveram seus resultados comparados.

Na última etapa do trabalho, após avaliação os resultados, foram identificadas as lacunas e definidas as conclusões da pesquisa.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa dos procedimentos metodológicos foram executadas pesquisas em artigos científicos, dissertações, teses nacionais e em publicações internacionais como artigos científicos disponíveis na base de dados da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Analisados esses trabalhos e aprofundado o conhecimento sobre o tema, foram discutidos de forma mais aprofundada aspectos sobre iluminação natural em edificações comerciais, prateleiras de luz e modelagem de edifícios em simulação computacional.

3.2 VARIÁVEIS DA ILUMINAÇÃO NATURAL NOS EDIFÍCIOS

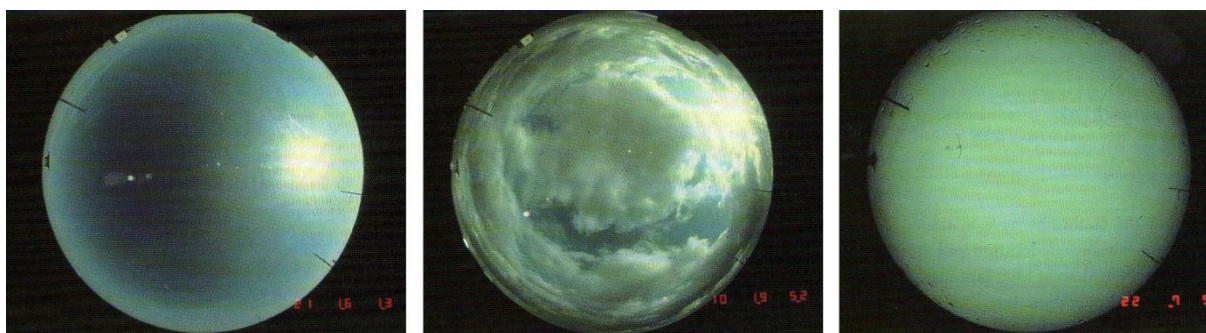
Considerando o recorte dado ao objeto da pesquisa, foi necessário verificar algumas características específicas dos edifícios de escritórios no Brasil. Esses edifícios captam a luz exterior através das janelas, o que os caracterizam por uma iluminação natural lateral. Essas

aberturas são importantes nos ambientes, pois admitem a luz natural além de promover contato visual externo e ventilação natural (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1980, LAM, 1986). Entretanto, esse sistema de iluminação natural acarreta uma iluminação desuniforme no interior do recinto, sendo que a quantidade e a qualidade da luz natural captada dependem tanto de fatores internos como externos (LI; TSANG, 2008), que serão definidos em um item posterior referente à elaboração dos modelos.

Dentre os fatores externos que influenciam na disponibilidade da luz natural, Vianna e Gonçalves (2007) citam a sazonalidade, visto que a iluminação natural varia com a época do ano e a hora do dia; o clima, que definirá os tipos de céu mais frequentes; a qualidade do ar; as características físicas e geográficas, como a latitude; além da orientação e configuração do entorno construído.

Os níveis de luz natural observados em espaços abertos variam consideravelmente ao longo do dia e do ano, podendo alcançar, ao meio dia em dias de céu claro, valores superiores a 70.000 lux no inverno e 100.000 lux no verão (VIANNA; GONÇALVES, 2007). Além dessa variação ao longo do ano, a quantidade de luz que atinge as superfícies de uma região pode sofrer grande influência do clima e do tipo de céu (Figura 13). Em clima quente e úmido, por exemplo, o céu mais comum é o parcialmente nublado e tem como característica muita luminosidade, proveniente das nuvens ou vapor d'água na atmosfera. Porém, ao compararmos a luminosidade proveniente do céu encoberto no verão, por exemplo, os valores podem exceder duas vezes ao horário correspondente no inverno.

Figura 13: Classificação dos tipos de céu, como céu claro, à esquerda, céu parcialmente encoberto, ao centro, e céu encoberto à direita



Fonte: Baker e Steemers (2002), p. 34.

Em função desta grande variação de níveis de luminosidade que podem ocorrer ao longo do dia e do ano, nessa pesquisa optou-se por trabalhar com simulações dinâmicas de luz natural, as quais retratam as condições do céu, de hora em hora, em um ano referência da localidade selecionada. Esse tipo de simulação se apresenta como mais adequado aos métodos de avaliação propostos.

Nessa pesquisa serão avaliados os níveis de iluminância, medidos em lux, e de uniformidade da luz natural, calculados através da razão entre o valor mínimo e a média das iluminâncias medidas no recinto. Desse modo, será possível avaliar esses quesitos relativos ao conforto visual e à percepção do indivíduo no interior do edifício. Além da importância dessas avaliações para o usuário, elas também podem auxiliar na influência do impacto energético de diferentes soluções adotadas nos modelos simulados. Entretanto, essa pesquisa não objetiva a avaliação energética das soluções propostas, e sim o desempenho da luz natural e sua influência no conforto visual do usuário no ambiente.

3.3 RECORTE E CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO COMERCIAL

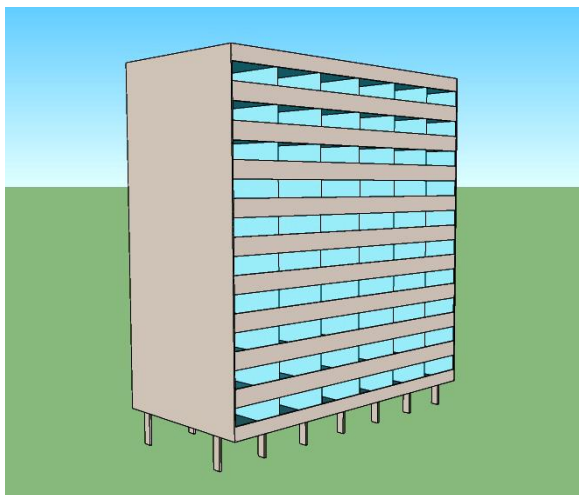
O edifício representativo a ser modelado nos *softwares* de simulação por computador é semelhante ao detalhado nas pesquisas de Bernabé (2012), Santos (2012) e Casagrande (2013), desenvolvidas no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFES, considerando que os modelos utilizados foram definidos a partir de pesquisas com tipologias edificatórias para edifícios comerciais.

Uma das referências para a construção desse modelo é o trabalho de Lamberts, Ghisi e Ramos (2006), que levantou informações pertinentes às edificações comerciais do país em diferentes regiões climáticas. A pesquisa identificou que as características da envoltória desses edifícios não sofrem adequação ao clima do sítio de implantação, sendo que esse resultado justifica a utilização de um mesmo modelo em diferentes climas e latitudes para análise e avaliação através dos dados obtidos nas simulações com os *softwares* escolhidos.

Com isso, os resultados obtidos nessa pesquisa poderão ser comparados aos alcançados nos demais trabalhos com o intuito de avaliar os dados das diferentes soluções construtivas com suas variáveis de simulação, visto que cada uma das pesquisas está analisando aspectos distintos de um modelo similar de edificação.

O edifício considerado consiste numa torre de 10 pavimentos tipo sobre pilotis (Figura 14). O pavimento térreo destinado, por exemplo, à guarda de veículos, não possui envoltória e não será climatizado, minimizando com isso sua influência no consumo energético do edifício. Os demais pavimentos são destinados a escritórios climatizados artificialmente.

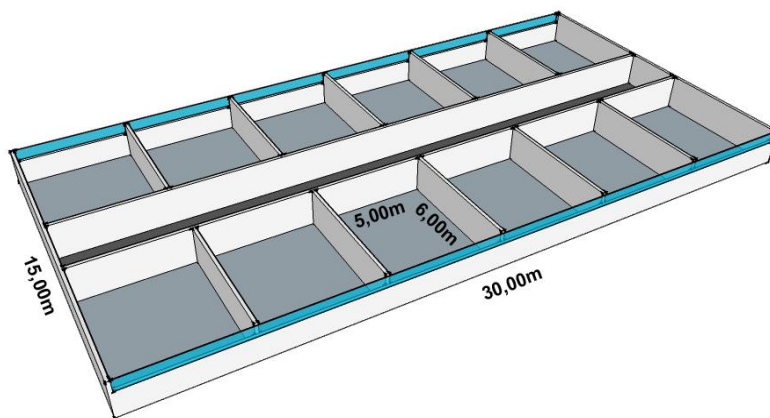
Figura 14: Edificação composta por torre de 10 pavimentos tipo sobre pilotis



Fonte: O autor.

A edificação é caracterizada por uma planta tipo com largura de 30m, onde se encontram posicionadas as aberturas em faces opostas, e profundidade de 15m, indicadas como paredes cegas (Figura 9). As salas, com dimensões aproximadas de 5m de largura por 6m de profundidade, estão dispostas lado a lado nas fachadas de maior dimensão e são separadas por um corredor central de acesso às mesmas (Figura 15).

Figura 15: Croqui esquemático do pavimento tipo



Fonte: O autor.

Para uma análise representativa sem influência de outras variáveis – como menor obstrução periférica da abóbada celeste, como acontece nas salas laterais –, foi selecionada uma das salas centrais para análise com o *software* de simulação. Este modelo foi utilizado como edifício referência e, para fins de comparação, sofreu algumas intervenções relativas às características de sua envoltória e do entorno imediato, como obstruções externas.

O modelo foi simulado nas quatro principais orientações cardeais, com diferentes tipos de vidro, dois modelos de prateleira de luz e em latitudes diversas, representativas do território nacional. As variações do modelo seguem apresentadas nos itens 3.5 e 3.6.

3.4 SELEÇÃO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Os instrumentos de pesquisa utilizados para obtenção de dados para análise são os *softwares* de simulação. Nesta pesquisa foi selecionado um *software* direcionado à simulação dos aspectos de interferência na qualidade da iluminação do ambiente analisado, cujo processo de escolha foi realizado considerando as seguintes características desejáveis:

- Experiência demandada para sua utilização;
- Confiabilidade dos resultados obtidos (validação);
- Possibilidade de acesso ao *software*;
- Custo de aquisição e treinamento;
- Interface amigável.

Para a simulação de sistemas de iluminação, o *U. S. Department of Energy* apresenta uma lista de mais de 40 *softwares* indicando os gratuitos e os recentemente atualizados. Dentre eles se encontra o *Daysim* (REINHART, 2006), com uma interface amigável, testado pelo relatório internacional da CIE 171:2006 (USDOE, 2013) e validado na pesquisa de Reinhart e Walkenhorst (2001).

Esse *software* tem sido utilizado em pesquisas científicas nacionais e internacionais recentes (DIDONÉ; PEREIRA, 2010; FONTENELLE, 2012; JAKUBIEC; REINHART, 2012; SHEN; TZEMPELIKOS, 2012; JAKUBIEC; REINHART, 2013; YUN; KIM, 2013; MAIOLI; TAUFNER; ALVAREZ, 2014). É utilizado para predição da disponibilidade anual da iluminação natural, objeto de estudo desta pesquisa, e uso de energia elétrica para iluminação artificial (USDOE, 2013).

O *software Daysim* considera os dados climáticos do local e utiliza o método *Ray-tracing* para cálculo de iluminância (JAKUBIEC; REINHART, 2013; YUN; KIM, 2013). De acordo com Reinhart e Walkenhorst (2001) o programa é baseado nos conceitos de coeficientes de luz do dia de Tregenza e Waters (1983) e no modelo do céu de Perez (PEREZ et al., 1990; PEREZ; SEALS; MICHALSKY, 1993). Segundo Didoné e Pereira (2010), o *software* simula a iluminação natural através do RADIANCE (WARD, 1993).

O RADIANCE é um programa computacional que personaliza as superfícies ópticas dos materiais a serem simulados e ainda considera informações sobre sombreamento contextual e reflexão. A simulação é baseada em um modelo geométrico tridimensional detalhado, contribuindo dessa forma para uma maior aproximação com a realidade. Outro ponto de destaque do *software* é a segurança de maior precisão na investigação através da possibilidade de simulação anual da irradiação (JAKUBIEC; REINHART, 2013).

Os *softwares* de simulação de eficiência energética também informam os níveis de iluminação natural obtidos no interior do ambiente. Apesar disso, estes programas são utilizados apenas para o acionamento da iluminação artificial complementar (SANTOS, 2012), não dispondo de muitos pontos para avaliação da distribuição e disponibilidade da iluminação natural no ambiente (CARLO, PEREIRA, LAMBERTS, 2004). Outro motivo para a escolha de instrumentos para avaliação exclusiva da iluminação é que os *softwares* de simulação de eficiência energética que utilizam o motor de cálculo do *EnergyPlus* – como o *DesignBuilder* – superestimam a luminosidade natural no interior dos ambientes (DIDONÉ; PEREIRA, 2010; YUN; KIM, 2013). Em virtude dessas questões foi selecionado um *software* de simulação de iluminação dinâmica que atendesse os requisitos necessários para a investigação proposta nessa pesquisa.

3.5 ELABORAÇÃO DOS MODELOS

A modelagem tridimensional dos ambientes foi desenvolvida no *software* Google Sketchup, versão 8, e depois exportada, através do *plug-in* Su2ds para o *software* Daysim, versão 3.1. Neste programa são alteradas as propriedades de alguns materiais, além de configurado o padrão de ocupação do ambiente, conforme as orientações descritas no tutorial do *software* (REINHART, 2006).

3.5.1 Elaboração do modelo de referência

Para a configuração do modelo de referência, foi necessária a caracterização do edifício assim como a classificação das variáveis a serem analisadas. Os modelos paramétricos considerados como edifícios referência foram configurados de acordo com as variáveis especificadas no Quadro 1.

Quadro 1: Variáveis de teste para elaboração dos modelos

Variáveis de teste		Edifício Referência
01	Orientação solar da maior fachada	De acordo com a etapa de simulação
02	Dispositivo de redirecionamento da luz natural	Sem dispositivo
03	Fator de transmissão à radiação visível do vidro	53% Vidro contr. solar 8mm
		90% Vidro transp. 6mm
04	Percentual de abertura de fachada	50%

Fonte: O autor.

Além dessas, são avaliadas variáveis de controle da iluminação natural e as variáveis de controle da envoltória e das características de ocupação do edifício. Neste trabalho os modelos são simulados em diferentes cidades com o intuito de verificar as alterações nas características da luz natural no interior do ambiente com o uso de diferentes dispositivos de redirecionamento de luz.

Como fatores internos fixos, foram definidos a altura do plano de trabalho e o índice de refletância das superfícies internas do ambiente.

O percentual de abertura de fachada (PAF), foi adotado o valor de 50%, proposto de acordo com as tipologias descritas em pesquisas anteriores como em Lamberts, Ghisi e Ramos (2006), Santana (2006), Carlo (2008), Rupp (2011), Bernabé (2012), Santos (2012) e Casagrande (2013). Esta última adotou esse percentual por representar um percentual médio se comparado aos edifícios com fachadas totalmente envidraçadas, tipologia largamente utilizada atualmente.

O vidro utilizado no modelo referência é transparente com espessura de 6mm, encontrado na maioria das edificações levantadas no país (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006). No

software de simulação adotado, o vidro incolor se encontra como um material padrão, cuja transmitância à luz visível configurada é de 90%, valor utilizado na pesquisa de Freewan (2010) e Amorim e outros (2011).

Para comparação entre modelos propostos com este vidro e com outro que apresente menor transmitância à luz visível, foi proposta a utilização do vidro bronze com transmitância à luz visível de 53%. A escolha por esse tipo de vidro justifica-se devido à preferência dos ocupantes de escritório por esse material, segundo Arsenault, Hébert e Dubois (2012), pois o mesmo apresenta valores mais agradáveis e brilho mais natural no interior do recinto.

Apesar de algumas pesquisas, como em Santos e Souza (2012), concluírem que a fachada Norte é a mais indicada para a utilização da prateleira de luz no hemisfério sul, nesta pesquisa os modelos foram simulados em outras três orientações – Leste, Sul e Oeste –, a fim de possibilitar uma comparação mais abrangente. Outro motivo que determinou as simulações nas demais orientações foi a necessidade de avaliar o comportamento das prateleiras sob influência das obstruções no entorno. Nota-se que, enquanto os obstáculos das proximidades bloqueiam a radiação solar direta incidente no ambiente, proveniente dos menores ângulos de altura solar, a prateleira bloqueia os raios oriundos dos maiores ângulos, o que possibilita a redução do número de horas com a presença de manchas de sol no interior do recinto.

Para uma análise mais precisa dos dados produzidos nas simulações, foram estabelecidos valores para as variáveis de controle da iluminação natural, de componentes da envoltória e das características da edificação. Para essas variáveis – como altura do pé-direito, fator de transmissão à radiação visível do vidro, refletância dos dispositivos de proteção solar, dentre outros –, foram utilizados padrões encontrados em outras pesquisas selecionadas, em normas técnicas, e nos padrões disponíveis no *software* utilizado (Quadro 2). O mesmo se aplica para as variáveis de uso e ocupação do edifício (Quadro 3), tais como densidade e horário de ocupação, nível de iluminância, carga de iluminação e equipamentos, dentre outras.



Quadro 2: Variáveis de controle, componentes e características do edifício

Variáveis de controle, componentes e características do edifício		
Variável	Valor	Justificativa
Gabarito	10 pavimentos tipo	Altura do edifício utilizada na pesquisa de Santos (2012) e observada como um dos valores mais expressivos na pesquisa de Lamberts, Ghisi e Ramos (2006).
Forma do pavimento tipo	Retangular	A maioria dos edifícios de escritórios possui planta baixa com formato retangular (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006). Dimensões utilizadas por Bernabé (2012), Santos (2012) e Casagrande (2013).
Dimensões do pavimento tipo	30x15m	
Quantidade de salas por pavimento	12	Divisão utilizada por Bernabé (2012) e Casagrande (2013).
Pé direito	2,70m	Medida utilizada na pesquisa de Ochoa e Capeluto (2006), Didoné (2009), Didoné e Pereira (2010) e Santos (2012).
Refletância dos componentes opacos das fachadas	0,6	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) descrevem em sua pesquisa que 45 % dos edifícios comerciais brasileiros possuem refletância dos elementos da fachada entre 0,5 e 0,7. Índice utilizado na pesquisa de Bernabé (2012) e Casagrande (2013).
Refletâncias internas do ambiente	70% - teto 50% - paredes 20% - piso	Refletâncias utilizadas por Didoné e Pereira (2010).

Fonte: O autor

Quadro 3: Variáveis de uso e ocupação do edifício

Variáveis de uso e ocupação do edifício		
Variável	Valor	Justificativa
Horário de ocupação	Ocupação total: 8h às 12h e 14h às 18h. Ocupação reduzida para 50%: 12h às 14h	Horários de ocupação total utilizados por Ghisi e Tinker (2005), Bernabé (2012) e Santos (2012).
Nível de iluminação de referência	500 lx	Valor recomendado pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) para ambientes de escritório para realização de tarefas como escrever, teclar, ler, processar dados etc. Valor utilizado por Didoné e Pereira (2010), Bernabé (2012) e Santos (2012).
Carga de iluminação	20 W/m ²	Utilizado por Santos (2012).
Sistema de acionamento da iluminação artificial	Interruptores convencionais de dois passos	Comumente adotado em edifícios comerciais (SANTOS, 2012).

Fonte: O autor.

3.5.2 Elaboração dos demais modelos

As variáveis que influenciam os modelos paramétricos, tais como orientação solar, tipo de prateleiras de luz, obstrução externa, entre outros, se encontram descritas no Quadro 4, cuja função é facilitar a compreensão das variáveis utilizadas em cada etapa das simulações.

Quadro 4: Variáveis de teste dos modelos de edifício, por etapa de simulação

Variáveis de teste		1ª etapa	2ª etapa			
01	Orientação solar da maior fachada	N	N	L	S	O
02	Dispositivo de redirecionamento da luz natural	Prateleira externa e interna plana	Sem dispositivo			
			Prateleira externa e interna plana			
			Prateleira externa curva e interna plana			
03	Pavimentos simulados	2º	2º			
		7º				
		10º				
04	Fator de transmissão à radiação visível do vidro	53% V. contr. solar 8mm	53% V. contr. solar 8mm			
		90% Vidro transp. 6mm	90% Vidro transp. 6mm			
05	Obstrução de parte visível da abóbada por edificações no entorno	Com obstrução	Com obstrução			
		Sem obstrução				
06	Cidades simuladas	Belém	Belém			
		Recife	Recife			
		Brasília	Brasília			
		Vitória	Vitória			
		São Paulo	São Paulo			
		Porto Alegre	Porto Alegre			

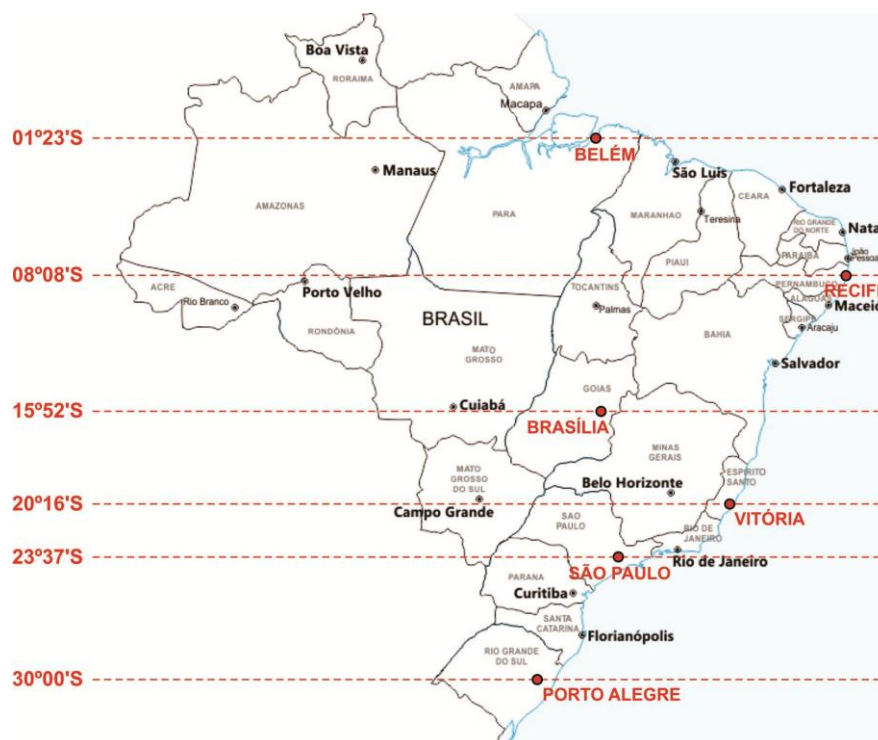
Fonte: O autor.

Dessa forma, têm-se então definidas todas as variáveis a serem trabalhadas na pesquisa, que resultaram em 204 simulações nas duas etapas de investigação das características da iluminação natural admitida nos modelos, sendo 72 na primeira etapa e 144 na segunda. Entretanto, 12 dessas variações dos modelos já haviam sido elaboradas na primeira etapa, não havendo necessidade de repeti-las.

3.6 SELEÇÃO DE LATITUDES

As localidades selecionadas apresentam latitudes diferentes, visto ser um fator que influencia na disponibilidade de luz natural (VIANNA; GONÇALVES, 2007). Para uma avaliação dos dados obtidos nessa pesquisa, as cidades escolhidas para simulação foram Belém (LAT 1°23' S), Recife (LAT 8°08' S), Brasília (LAT 15°52' S), Vitória (LAT 20°16' S), São Paulo (LAT 23°37' S) e Porto Alegre (LAT 30°00' S), assim como na pesquisa de Casagrande (2013), considerando ser um refinamento necessário para um melhor mapeamento das latitudes das cidades brasileiras (Figura 16).

Figura 16: Mapa do Brasil com a identificação das cidades escolhidas para simulação



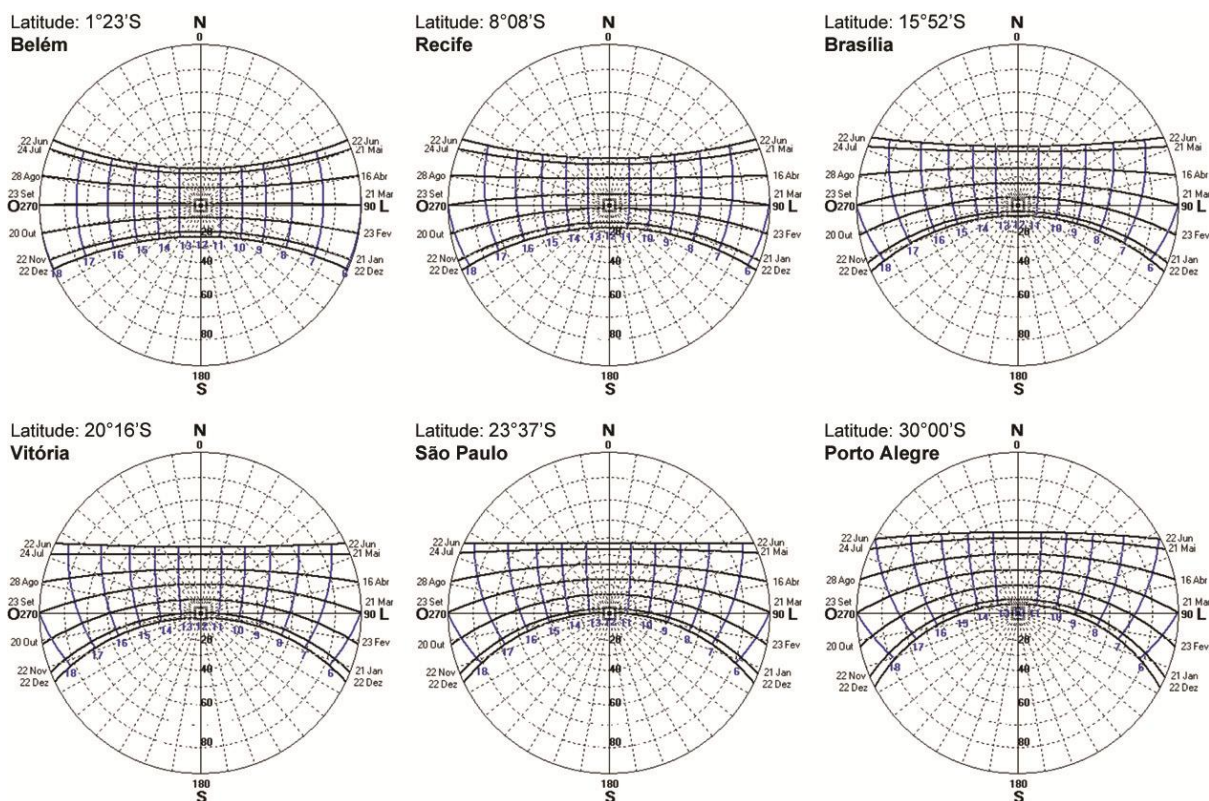
Fonte: Modificado a partir de imagem disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin> > Acesso em: 20 de dezembro de 2013.

Os municípios selecionados possuem arquivos climáticos com dados tratados que podem ser utilizados nos *softwares* de simulação, disponíveis no *site* do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LABEEE (<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>), e estão localizadas em distintas e representativas latitudes do país.

A escolha dessas cidades considera o âmbito da amostragem nas várias regiões do país, envolvendo desde regiões próximas à Linha do Equador, como em Belém, onde a carta solar é

quase simétrica em relação à trajetória do sol nas porções norte e sul da abóbada, até regiões fora dos Trópicos, como em Porto Alegre, onde a trajetória solar se encontra mais concentrada na porção norte da abóbada e o sol nunca alcança o zênite. Através do estudo das cartas solares dessas latitudes (Figura 17) é possível dimensionar as prateleiras de luz de acordo com a trajetória solar da região.

Figura 17: Cartas solares das localidades selecionadas geradas no software Analysis SOL-AR



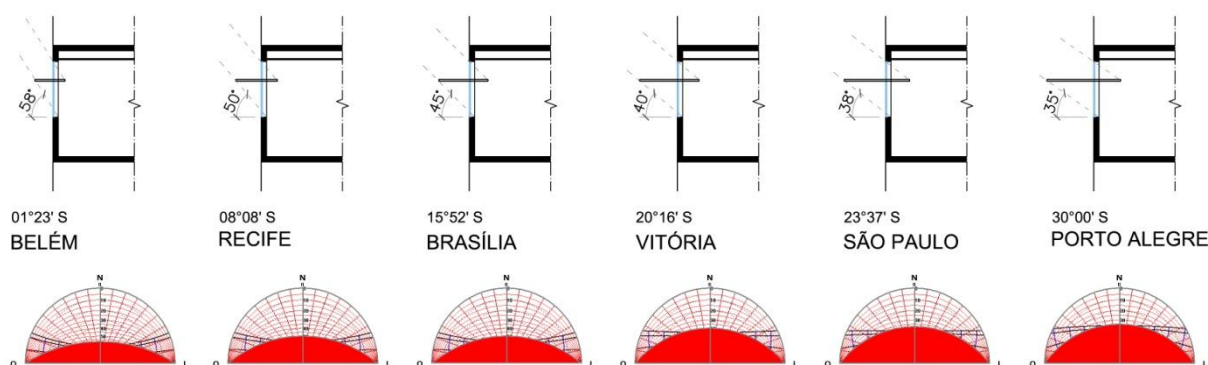
Fonte: O autor.

3.7 ELABORAÇÃO DAS VARIAÇÕES DOS MODELOS

O modelo referência sofreu algumas intervenções com o intuito de adaptá-lo melhor ao clima da região. A proposta de adequação aos condicionantes locais foi executada através da proteção das janelas para minimizar a incidência da radiação solar direta no ambiente interno. Esse fato foi determinante para o dimensionamento dos dispositivos, pois, segundo Boyce (2014), quando a visão está adaptada a uma determinada condição de iluminação, valores muito mais altos de luminância são percebidos como brilho excessivo, por isso, causam desconforto e devem ser evitados no plano de trabalho.

Conforme Baker, Fanchiotti e Steemers (2010), latitudes diferentes exigirão tamanhos distintos de prateleiras de luz. Visto que cada localidade selecionada possui diferentes ângulos de trajetória solar, foram propostas prateleiras de luz com dimensões variadas a fim de barrar as manchas solares no interior das salas nos períodos mais quentes do ano (Figura 18). Os dispositivos, representados com espessura de 0,05m, foram inseridos a 2,1m do piso em uma janela com altura total de 1,55m e peitoril de 1,1m.

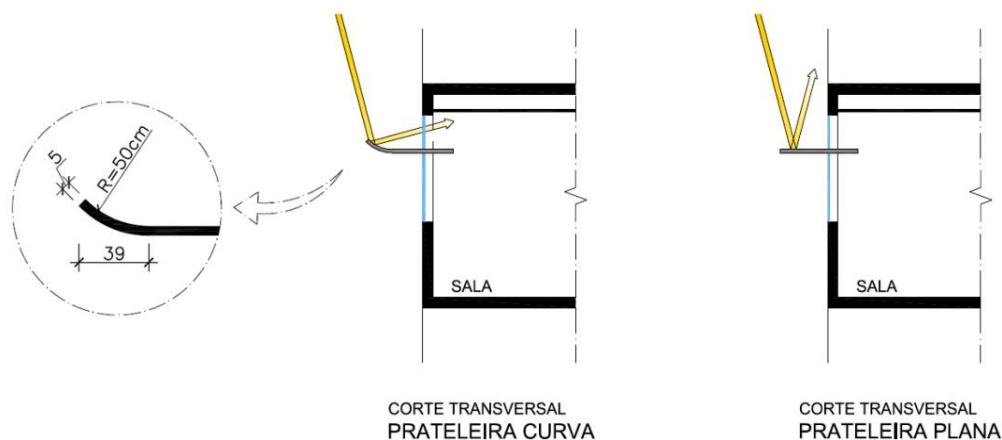
Figura 18: Em cima, cortes com ângulo de proteção nas diferentes localidades; abaixo, suas respectivas máscaras solares, produzidas com a parcela do céu obstruída pela prateleira, geradas no software Analysis SOL-AR



Fonte: O autor.

Nos modelos acima representados foram projetadas prateleiras de luz planas. Com o intuito de avaliar uma variação deste modelo, foram propostas prateleiras cuja porção externa apresenta uma curvatura em sua superfície. Essa geometria permite o redirecionamento dos raios solares provenientes de ângulos maiores – próximo ao zênite – para o interior do recinto (Figura 19).

Figura 19: Comparação entre a reflexão dos raios solares mais altos nas prateleiras curvas e planas

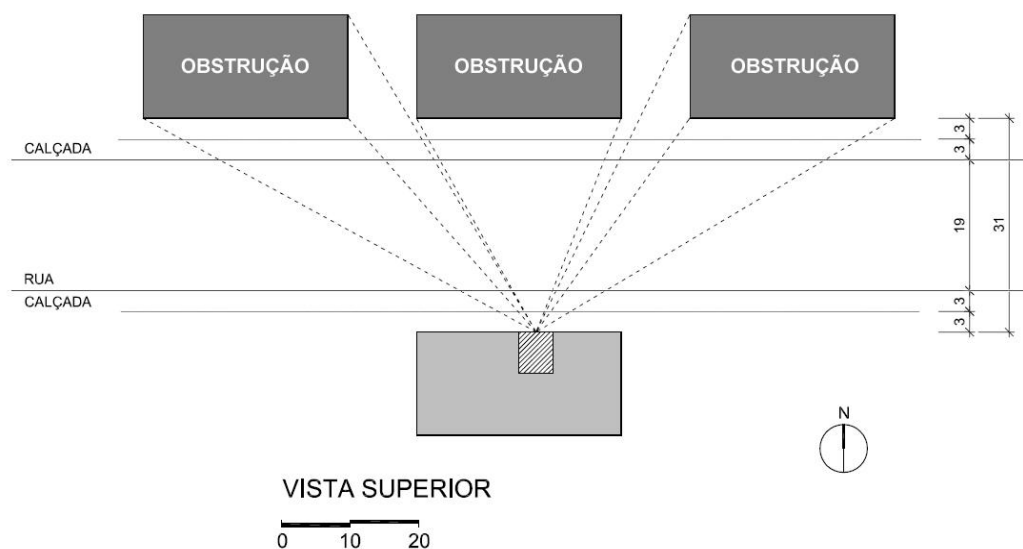


Fonte: O autor.

Nas configurações das características dos edifícios para a simulação de eficiência energética e iluminação natural, as prateleiras de luz foram projetadas com índice de refletância de 0,8, mesmo valor adotado por Santos e Souza (2012), referente a um material refletivo opaco de cor clara. Esse dispositivo apresenta um índice maior que os demais componentes do edifício para otimizar a reflexão da luz natural para o ambiente interno.

Com o objetivo de simular uma situação que se aproxime da realidade dos grandes centros urbanos, foi proposta a modelagem com elementos obstruidores, como edifícios localizados na frente dos modelos a serem analisados (Figura 20). Essas obstruções limitam a parcela visível da abóbada celeste, alterando a quantidade de luz natural incidente em um ponto interno do edifício (LARANJA, 2010).

Figura 20: Localização de edifícios no entorno imediato



Fonte: O autor.

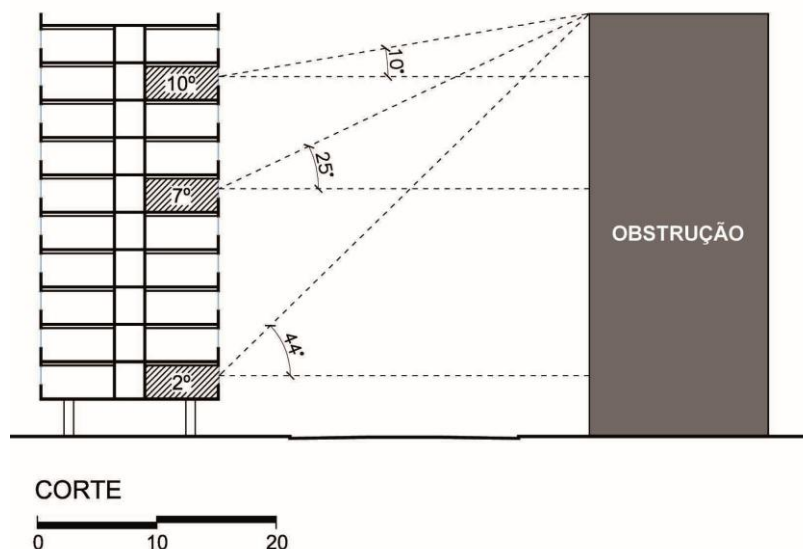
Para a definição da posição e dimensionamento desses edifícios foram investigados os planos diretores municipais e algumas situações já consolidadas das cidades, com o intuito de definir as características comuns à maioria das cidades selecionadas. Como o estudo visa investigar o comportamento da luz admitida nos edifícios de escritórios sob obstrução de edificações vizinhas, procurou-se identificar as características dos centros comerciais dessas capitais. Posteriormente, foram catalogadas as larguras das vias coletoras e arteriais, comuns às cidades e verificou-se que essas dimensões variavam de aproximadamente 15 a 40m, com exceção de Brasília.

Entretanto, como o intuito dessa pesquisa é investigar o comportamento das prateleiras de luz sob condições de obstrução do entorno em diferentes regiões do país, a investigação das características da malha urbana de cada região não foi aprofundada. Definiu-se, por fim, uma largura de via que somada às calçadas totalizam 25m e um afastamento frontal entre as fachadas das edificações de 31m, respeitando um afastamento frontal de 3m de cada lado (Figura 20). Entretanto, a largura da via e das calçadas são apenas representativas, sendo a distância entre os edifícios o fator mais importante a ser analisado. Essa situação poderia configurar, por exemplo, uma via de 16m e afastamentos frontais de 5m, ou uma via de 31m sem afastamento frontal de suas edificações.

Para a análise de uma interferência maior das edificações do entorno, foram definidos três edifícios como elementos obstruidores afastados 10m entre si. Para a definição da altura dos edifícios vizinhos, foi utilizado o mesmo gabarito do modelo de edifício referência, discutido no item 3.5 desta dissertação, configurado com altura total de 35m.

Conforme mencionado anteriormente, o percentual da abóbada obstruído por essas edificações no entorno depende das dimensões e da posição desses elementos no sítio. Quanto maior e mais próximo à edificação à sua frente, menor será a parcela visível do céu. Essa variação também ocorre entre os pavimentos de um edifício. Considerando um entorno edificado em centro urbano verticalizado, quanto mais baixo é o pavimento analisado, menor será o percentual visível da abóbada. Para a primeira etapa desta investigação, foram selecionados 3 pavimentos, indicados na Figura 21, de acordo com o seu percentual de obstrução.

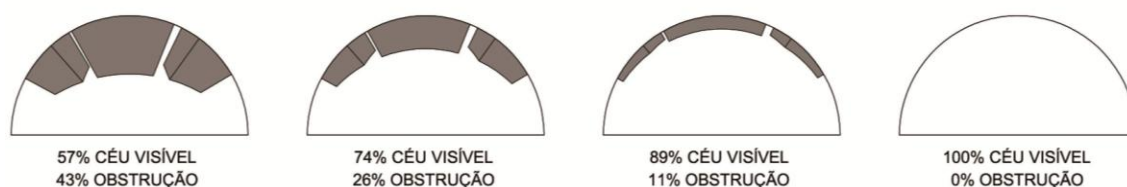
Figura 21: Corte esquemático do edifício proposto indicando os pavimentos selecionados e seus respectivos ângulos de obstrução pela edificação à frente



Fonte: O autor.

Foram então selecionados o 2º, 7º e 10º pavimentos em função de sua parcela obstruída da abóbada e por representarem diferentes situações de visibilidade do céu, com percentuais de obstrução de 43%, 26% e 11%, respectivamente. Para efeito de comparação, nesta primeira etapa de simulações também foi investigado um modelo desconsiderando as obstruções no entorno (Figura 22).

Figura 22: Da esquerda para a direita, máscaras de obstrução referentes aos pavimentos 10º, 7º, 2º e modelo de referência, sem obstruções. Em cinza, áreas obstruídas pelo entorno; em branco, parcela desobstruída da abóbada celeste



Fonte: O autor.

Na segunda etapa de simulações foram analisados somente os modelos referentes ao 2º pavimento da edificação proposta, com o intuito de investigar apenas os ambientes com uma maior interferência do entorno. Entretanto, diferentemente da etapa anterior que investigou somente os modelos orientados para o Norte, nessa etapa de simulações o desempenho dos mesmos foi analisado nas quatro principais orientações cardeais.

3.8 TRATAMENTO DE DADOS PARA SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Para uma maior aproximação com uma situação real das condições de céu para aproveitamento da luz natural, foram utilizados os dados disponíveis no arquivo climático do ano de referência das cidades selecionadas. Os dados são referentes aos registros meteorológicos tratados de 1961 a 1970, para as cidades de Belém, Brasília e Vitória e de 1951 a 1970, para Recife, São Paulo e Porto Alegre. Cada localidade tem o seu ano de referência, sendo os arquivos de Recife, Brasília e Vitória o ano de 1962, o arquivo de Belém referente ao ano de 1964 e Porto Alegre e São Paulo, o ano de 1954 (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998).

Os arquivos climáticos em formato CSV de cada cidade analisada (disponíveis em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>), contém os dados referentes à nebulosidade, dentre outras informações, graduados numa escala de 0 a 10. Para uma simplificação da classificação dos tipos de céu, Carlo, Pereira e Lamberts (2004), consideraram como céu claro as nebulosidades 0 e 1, céu parcialmente nublado de 2 a 8 e céu nublado os valores 9 e 10.

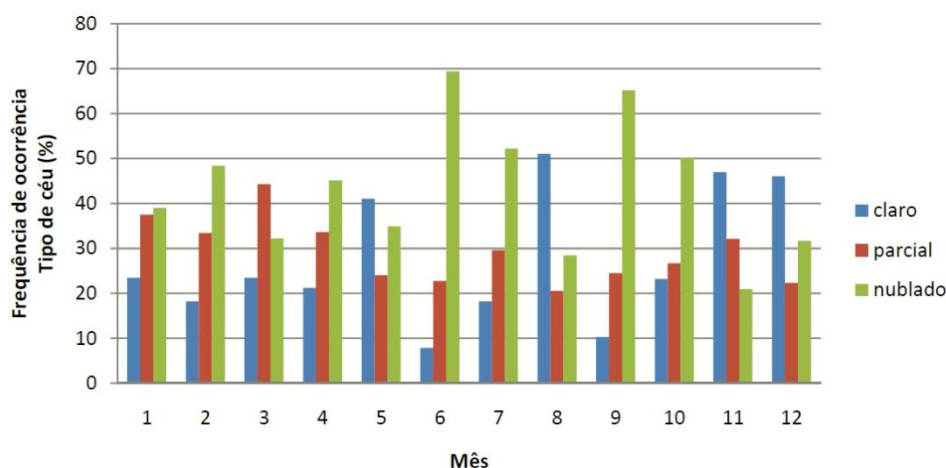
Para verificar a frequência de ocorrência da cada tipo de céu, Carlo, Pereira e Lamberts (2004), contabilizaram os dados referentes aos horários comerciais, porém não eliminando finais de semana e feriados por motivos práticos. Entretanto, os autores contabilizaram apenas 2960 horas, pois foram eliminadas duas horas de intervalo na jornada de trabalho diária. Diferentemente dessa pesquisa, também por motivos práticos, adotou-se nessa etapa metodológica os horários entre 8h e 18h, de hora em hora, visto que este é um período em que existe a presença da luminosidade na abóbada celeste nas latitudes estudadas na maior parte dos dias do ano.

Esta etapa visa apenas a exposição dessas informações para auxiliar na compreensão do comportamento da luz natural admitida no interior do ambiente, visto que algumas cidades têm predominância de ocorrência do céu claro, enquanto outras, de parcialmente nublado, o que interfere na admissão da luz natural pela abertura, como pode ser observado em Goulart, Lamberts e Firmino (1998).

Para exemplificar essa etapa metodológica, selecionou-se a cidade de Porto Alegre. Foram analisados os dados referentes a 4015 horas durante o ano. Como resultado dessa análise

pode-se observar uma ocorrência média de 29% das horas comerciais apresentando um céu claro, aproximadamente o mesmo percentual apresentando céu parcialmente nublado, enquanto em 42% das horas o céu se apresentava nublado (Gráfico 1).

Gráfico 1: Frequência de ocorrência dos tipos de céu no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Porto Alegre, no período de 8h às 18h



Fonte: O autor.

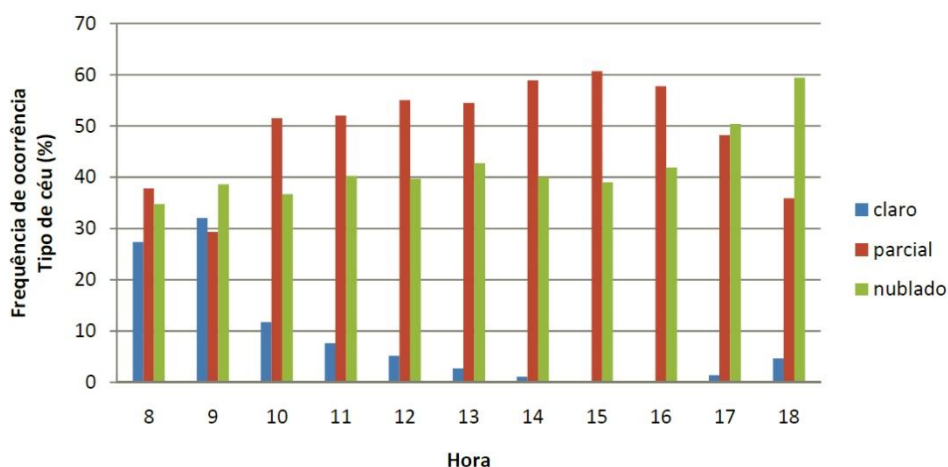
De posse dos mesmos dados, outro método para avaliação do tipo de céu foi utilizado a fim de proporcionar uma interpretação mais precisa dos níveis internos de iluminação natural. Em virtude disso, foi proposta nessa etapa uma organização diferente desses dados, separando-os por hora do dia, no período correspondente à jornada de trabalho.

Esse método foi proposto visto que, quando se trata de iluminação natural, os níveis de iluminância sofrem grandes variações ao longo do dia e um dos grandes responsáveis por essas alterações é o ângulo de altura solar. Isso se deve ao fato de, num céu claro, a posição do sol ser determinante para a distribuição de luminâncias na abóbada, caracterizada por uma aura de luz muito brilhante ao redor do mesmo. Em contrapartida, ao se analisar o céu encoberto, por exemplo, valores mais altos de iluminância são alcançados próximos ao meio-dia e níveis inferiores com os menores ângulos de altura solar. (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1980).

Conclui-se que, de acordo com as características do tipo de céu de uma região, é possível verificar o aproveitamento da luz natural com relação aos horários do dia. Um exemplo claro de interpretação desses dados pode ser encontrado em localidades que possuem grande percentual de céu encoberto ou parcialmente encoberto nos horários próximos ao meio-dia.

Nesses locais, os níveis obtidos de iluminância anuais serão menores, visto que os horários em que seriam alcançados os maiores valores se encontram no período do dia em que o céu está encoberto ou parcialmente encoberto. Características semelhantes a essa podem ser observadas em Belém, conforme dados do Gráfico 2, cujo horário entre 13h e 17h apresenta percentuais muito baixos de ocorrência de céu claro, reduzindo os índices de iluminância interna a serem observados nesse período.

Gráfico 2: Frequência de ocorrência dos tipos de céu por hora do dia, no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Belém



Fonte: O autor.

Todos os modelos serão simulados nos horários de 8 às 18h, produzindo dados referentes às iluminâncias em cada horário, conforme observado no Gráfico 1. Os dados da ocorrência dos tipos de céu em cada cidade auxiliarão na análise dos resultados simulados.

3.9 PROCESSO DE SIMULAÇÃO

Nesta etapa são executadas as simulações no *software* pré-definido com as variações dos modelos do edifício para verificação do desempenho luminoso do sistema. O programa computacional escolhido para as simulações de iluminação natural foi o *Daysim*, versão 3.1.

A fim de estimar o tempo total a ser despendido nesta etapa das simulações, foram levantadas informações disponíveis em outros trabalhos, como por exemplo, no próprio tutorial do programa (REINHART, 2006). Foi descrito que o tempo de simulação depende da complexidade do modelo simulado e da capacidade de processamento do computador utilizado. Em virtude disso, o tempo despendido pode ser verificado mais precisamente a

partir de alguns testes preliminares executados no *software* previamente instalado nos equipamentos utilizados para a realização das simulações. Verificou-se que as mesmas poderiam demorar cerca de trinta minutos, entretanto, para cada variável utilizada na investigação, eram despendidos mais alguns minutos em alterações das configurações dos modelos no *software Google Sketchup*, para após esse procedimento, ser novamente extraído o arquivo em formato compatível e finalmente simulado no *Daysim*.

As simulações nesse último programa têm como dado de saída alguns arquivos que podem ser exportados para *softwares* de desempenho energético, por exemplo, e uma planilha contendo as informações gerais resumidas do modelo e as obtidas em cada um dos pontos de medição da malha proposta (Tabela 2). Nessa planilha estão descritos alguns coeficientes para avaliação da iluminação natural no modelo simulado, como o *Daylight Factor*, *Daylight Autonomy*, *Useful daylight illuminance*, dentre outros. Além desses, também é apresentado um montante anual de exposição à luz – *annual light exposure* –, medido pela iluminância total incidente, por hora de medição, para cada ponto identificado pelas coordenadas X, Y e Z.

Tabela 2: Dados de saída do software Daysim, com resultado detalhado das simulações, onde cada linha da tabela representa um ponto de medição. As 3 primeiras colunas são referentes à localização do ponto e as demais, aos coeficientes e valores registrados

x	y	z	DF [%]	DA [%]	DA _{con} [%]	DA _{max} [%]	UDI _{<100} [%]	UDI ₁₀₀₋₂₀₀₀ [%]	UDI _{>2000} [%]	DSP [%]	annual light exposure [luxh]
0.500	0.500	3.850	0.7	7	55	0	14	86	0	38	1098761
0.500	1.500	3.850	1.0	30	67	0	10	90	0	61	1466711
0.500	2.500	3.850	1.3	50	77	0	7	93	0	79	2063499
0.500	3.500	3.850	2.2	72	88	0	3	97	0	94	3327434
0.500	4.500	3.850	5.5	89	96	8	0	52	48	81	11479118
0.500	5.500	3.850	16.6	99	100	47	0	17	83	0	38259720
1.500	0.500	3.850	0.8	16	59	0	13	87	0	47	1213546
1.500	1.500	3.850	1.0	35	69	0	10	90	0	68	1594799
1.500	2.500	3.850	1.5	56	80	0	6	94	0	85	2376769
1.500	3.500	3.850	2.6	78	90	0	2	96	3	96	3935314
1.500	4.500	3.850	6.8	93	98	11	0	38	61	65	14961296
1.500	5.500	3.850	19.1	100	100	59	0	13	87	0	42967536
2.500	0.500	3.850	0.9	20	62	0	12	88	0	53	1277623
2.500	1.500	3.850	1.1	38	72	0	9	91	0	73	1703874
2.500	2.500	3.850	1.6	59	82	0	5	95	0	89	2543346
2.500	3.500	3.850	2.6	78	90	0	2	95	3	96	3975748
2.500	4.500	3.850	7.2	93	98	11	0	40	60	63	14411007
2.500	5.500	3.850	19.5	100	100	59	0	12	88	0	42672288
3.500	0.500	3.850	0.8	15	59	0	13	87	0	48	1207911
3.500	1.500	3.850	1.0	35	68	0	10	90	0	64	1553848
3.500	2.500	3.850	1.6	58	82	0	5	95	0	88	2499370
3.500	3.500	3.850	2.5	77	90	0	2	96	2	96	3853550
3.500	4.500	3.850	6.8	93	98	10	0	44	56	70	13837983
3.500	5.500	3.850	19.2	100	100	58	0	13	87	0	41936104
4.500	0.500	3.850	0.7	7	53	0	14	86	0	35	1068051
4.500	1.500	3.850	0.9	27	64	0	12	88	0	56	1373545
4.500	2.500	3.850	1.3	48	76	0	7	93	0	79	2021547
4.500	3.500	3.850	2.1	69	87	0	3	97	0	93	3168741
4.500	4.500	3.850	5.7	92	97	7	0	51	48	83	11340415
4.500	5.500	3.850	16.8	99	100	46	0	14	86	0	36653080

Fonte: O autor.

Para as análises dos dados dos modelos simulados foi necessário organizar as informações de acordo com as diferentes soluções utilizadas em cada modelo. Com esse intuito, foi proposta uma codificação das variáveis para identificação dos modelos. As siglas referentes a cada variável são demonstradas no Quadro 5. Quando combinadas, como no modelo BEL_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST, identificam a simulação com as variáveis utilizadas.

Quadro 5: Siglas utilizadas nas simulações

Sigla	Significado
BEL	Modelo localizado em Belém, latitude 01°23' S
REC	Modelo localizado em Recife, latitude 08°08' S
BRA	Modelo localizado em Brasília, latitude 15°52' S
VIT	Modelo localizado em Vitória, latitude 20°16' S
SPA	Modelo localizado em São Paulo, latitude 23°37' S
PAL	Modelo localizado em Porto Alegre, latitude 30°00' S
L	Orientação Leste para a fachada analisada
N	Orientação Norte para a fachada analisada
O	Orientação Oeste para a fachada analisada
S	Orientação Sul para a fachada analisada
CPC	Com prateleira de luz interna plana e externa curva
CPP	Com prateleira de luz interna e externa plana
SP	Sem proteção solar externa
2PAV	Segundo pavimento
7PAV	Sétimo pavimento
10PAV	Décimo pavimento
TV53	Transmissão à luz visível do vidro igual a 53%, referente ao vidro bronze
TV90	Transmissão à luz visível do vidro igual a 90%, referente ao vidro incolor
SOBST	Modelo de edifício sem obstrução no entorno ¹

¹ Os modelos sem esta sigla no final se referem aos que possuem obstrução no entorno.

Fonte: O autor.

A combinação das variáveis listadas no Quadro 4, resultou em 72 modelos na primeira etapa de simulações e de 132 modelos na segunda etapa. Dentre esses modelos, encontram-se os edifícios referências identificados pela sigla SP e pelos dois tipos de vidro, TV53 e TV90, sendo este último o mais representativo das tipologias encontradas no país, segundo levantamento de Lamberts, Ghisi e Ramos (2006). Cada um dos modelos tridimensionais, previamente elaborados no *Google SketchUp*, foram simulados no *Daysim* de acordo com os

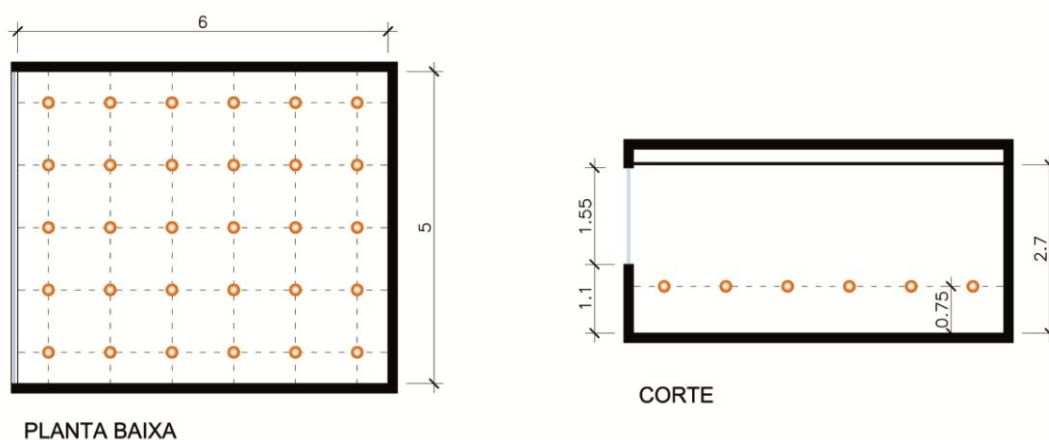
procedimentos descritos no capítulo 3 e seus resultados analisados para posteriormente serem comparados ao modelo referência ou entre si.

3.10 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE UNIFORMIDADE E CÁLCULO DOS NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA INTERNA

Para a avaliação da capacidade de uniformização do nível de iluminamento interior em profundidade das prateleiras de luz, alguns pesquisadores utilizam o sistema de medição através de pontos distribuídos ao longo do eixo da sala, perpendicular à abertura. Esse tipo de investigação foi utilizado nas pesquisas de Araújo, Cavalcanti e Cabús (2005), Cândido, Torres e Cabús (2005), Freewan, Shao e Riffat (2008), Freewan (2010) e Maioli e Alvarez (2013).

Diferentemente dos trabalhos acima citados, essa pesquisa, assim como em Didoné (2009), Laranja, Gazzaneo e Cabús (2009), Didoné e Pereira (2010), Amorim e outros (2011), Fontanelle (2012), Maioli, Taufner e Alvarez (2014), considerou os pontos de medição distribuídos em um plano horizontal, como uma malha disposta a 0,75 m de altura em relação ao piso do ambiente, indicada para medições da área de trabalho (ABNT, 2005c). Os pontos de medição foram distanciados 1 metro entre si, para uma averiguação mais precisa da uniformidade dos níveis de iluminância no plano de trabalho, respeitando uma faixa marginal de 0,5m dos limites da sala (Figura 23), seguindo as recomendações da NBR 15.215-4 (ABNT, 2005c).

Figura 23: Representação dos pontos de cálculo em planta e corte esquemáticos

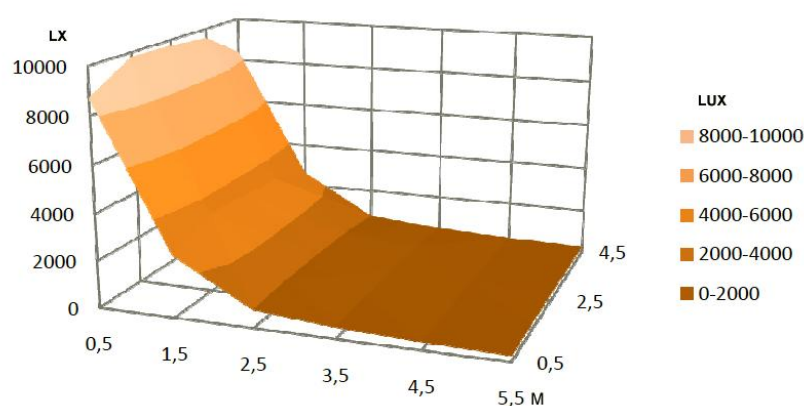


Fonte: O autor.

As simulações de iluminação natural foram realizadas em todas as cidades para o modelo referência e os demais propostos. Nesse processo, os horários de ocupação são configurados como dado de entrada no *software Daysim*. Foram considerados para as medições os horários de 8h00 à 18h00, assim como nos trabalhos de Didoné e Pereira (2010), Fontenelle (2012) e Tagliabue, Buzzetti, Arosio (2012), simulando o horário de ocupação de uma edificação de escritórios.

Como dado de saída, o *software* apresenta o montante anual de exposição à luz incidente em cada ponto da malha. Dessa forma, para descobrir um valor mais próximo de uma medição horária, utilizou-se esse valor, porém dividido por 365 dias, equivalente ao período de um ano, e depois por 12 horas, correspondente ao período médio em horas de trajetória solar na abóbada celeste, a fim de se obter a média de iluminância por hora de medição. Resumidamente, o valor correspondente a iluminância total anual incidente em cada ponto de medição foi dividido por 4380, que corresponde ao total de horas de trajetória solar na abóboda celeste em um ano. Para ilustrar a variação desses valores em um ambiente simulado de forma mais clara, foram gerados gráficos em que cada ponto da superfície resultante corresponde ao nível atingido (Figura 24).

Figura 24: Média horária dos níveis anuais de iluminância do modelo referente à cidade de Vitória, fachada Norte, sem prateleira, 2º pavimento. A área à esquerda do gráfico é representada a porção próxima a parede externa que contém a abertura, e à direita, a área referente à parede oposta à abertura



Fonte: O autor.

Através desses valores anuais de iluminância, foi possível extrair o índice de uniformidade de cada modelo simulado. Para isso, foi utilizado o quociente entre a média das iluminâncias e o valor mínimo encontrado, como recomendado pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013).

Entretanto, para classificar a disponibilidade de luz natural no ambiente interno, semelhante à pesquisa de Laranja (2010), adotou-se como parâmetro a Iluminância Útil da Luz Natural (IULN), ou originalmente *Useful daylight illuminance* (UDI), proposta por Nabil e Mardaljevic (2006), conforme descrito na Tabela 3. A faixa que compreende a IULN, ou UDI, é entre 100 lx e 2000 lx. Valores abaixo dessa faixa são considerados insuficientes como fonte de luz, e acima, considerados excessivos, pois podem causar desconfortos (NABIL; MARDALJEVIC, 2006). Além disso, estudos demonstram que valores acima de 2000 lx não trazem nenhuma melhora para a acuidade visual (VIANNA; GONÇALVES, 2007). Portanto, considerando as informações anteriores, este trabalho adota então a faixa de 100 lx a 2000 lx, não estudando cada intervalo em específico, mas sim a faixa por completo.

Tabela 3: Iluminância útil da luz natural (NABIL; MARDALJEVIC, 2006)

<i>Useful daylight illuminance</i> - UDI	
Característica da iluminância	Nível de iluminância
Insuficiente como única fonte de iluminação ou para contribuir significativamente com a iluminação artificial	< 100 lx
Consideradas efetivas tanto como única fonte de luz ou em conjunto com a iluminação artificial	100 lx < UDI < 500 lx
Níveis percebidos como desejáveis ou ao menos toleráveis	500 lx < UDI < 2000 lx
Produz desconforto visual, térmico ou ambos.	> 2000 lx

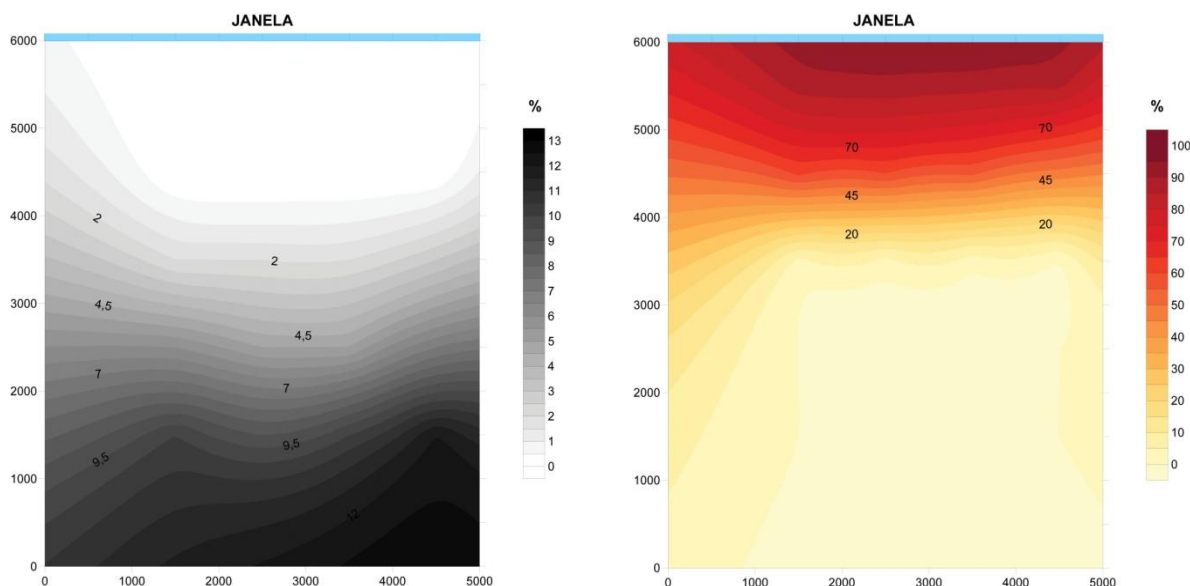
Fonte: Adaptado de Nabil e Mardaljevic (2006).

Segundo Boyce (2014), outro método de avaliação da luz natural interior associada a modelos baseados na iluminância anual admitida é o DA - *Daylight Autonomy* (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). Essa medida é definida pela porcentagem de horas anuais de um ambiente, num período definido, que um determinado nível de iluminância é excedido. Pode ser utilizado para estimar os benefícios de custo do uso de sistemas de controle de iluminação integrados à luz natural. Esse método, porém, não difere níveis aceitáveis de iluminância para o plano de trabalho de níveis excessivos. Entretanto, foi calculado para cada modelo simulado um percentual médio obtido desse coeficiente.

Baseado nesses métodos de avaliação da luz natural admitida no interior do ambiente, essa pesquisa visa comparar os modelos referência com suas diversas variações, através dos dados de saída extraídos do *software*, a fim de investigar os melhores e piores desempenhos alcançados. Mas, para isso, é necessária uma análise aprofundada dos valores contidos nas tabelas produzidas por cada modelo simulado.

Os resultados sobre a iluminância interior obtidos no *software Daysim* são fornecidos por cada ponto de medição, conforme descrito no capítulo anterior. Para análise da área a ser avaliada através da iluminância útil, optou-se por trabalhar com os dados de saída das colunas referentes aos três intervalos descritos na UDI e, para uma comparação mais abrangente entre os modelos, da coluna referente ao DA. Esses dados foram organizados em forma de planilha e assim foi possível extrair as médias dos intervalos de iluminância de cada modelo simulado. A partir dessa planilha também foi possível produzir gráficos referentes aos intervalos da UDI e para os modelos simulados (Figura 25), a fim de compará-los aos de outros modelos, como observado na pesquisa de Reinhart e Wienold (2011).

Figura 25: Representação em planta baixa simplificada dos ambientes simulados, graduados com os percentuais referentes aos níveis de iluminâncias insuficientes, à esquerda, e excessivos, à direita



Fonte: O autor.

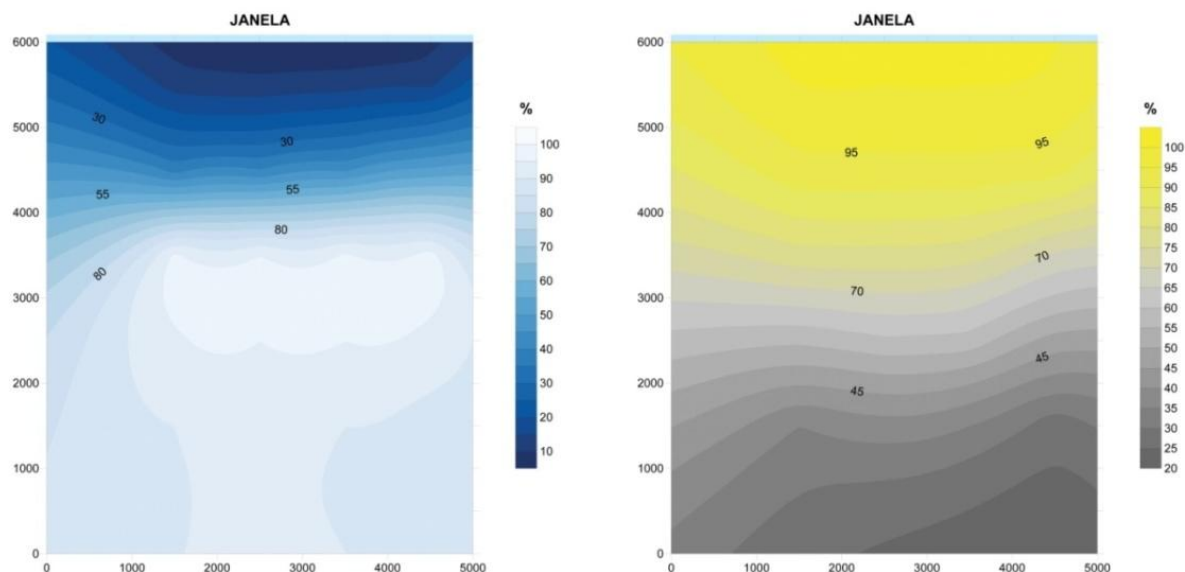
Entretanto, diferentemente do trabalho de Reinhart e Weinold (2011), com o objetivo de facilitar o entendimento, nessa pesquisa os gráficos foram graduados com cores distintas

relacionadas ao tipo de coeficiente representado. Nos gráficos referentes ao intervalo de iluminâncias consideradas insuficientes, a graduação foi feita em tons de cinza, com as cores escuras representando as áreas com níveis mais elevados de carência de luz. Nos gráficos referentes às iluminâncias excessivas, a graduação foi feita em cor vermelha, simbolizando ganhos térmicos, sendo os maiores percentuais representados pelos tons de vermelho mais escuro e os menores, por tons mais claros.

Nos gráficos referentes à iluminância útil, correspondente ao intervalo entre 100 e 2000 lux, a graduação foi feita em tons de azul, com as cores mais claras representando os maiores níveis percentuais deste coeficiente, e as mais escuras, os menores valores (Figura 26). No eixo vertical, à esquerda da figura, e no horizontal, abaixo da imagem, estão representadas as medidas, em milímetros, dos ambientes simulados. No lado direito da imagem da sala está localizada a escala de graduação do gráfico, representada por uma paleta de cores, com a qual é possível verificar os percentuais de horas do ano simulado em que a região do ambiente se encontra. Espera-se, com isso, uma interpretação mais fácil das imagens a serem representadas ao longo do trabalho.

Outro coeficiente analisado foi o *Daylight Autonomy*, representado na imagem da esquerda da Figura 26. Sua graduação foi feita numa escala de amarelo à cinza, sendo a primeira cor referente aos maiores índices e a cinza, aos menores. Através de sua comparação com outros gráficos gerados, se torna evidente o fato de que ele não é eficiente para a indicação de valores de iluminância acima do recomendado. Como pode ser observados nas imagens da Figura 26, altos valores de DA podem mascarar índices considerados excessivos de iluminância no ambiente, contribuindo para a redução do percentual de horas anuais presentes no intervalo de iluminância útil. Para a avaliação através do DA, foi considerado um nível de iluminância interna mínimo de 500 lux, determinada pela norma NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013).

Figura 26: Representação em planta baixa simplificada dos ambientes simulados, graduados com os percentuais referentes ao intervalo de iluminâncias útil, à esquerda, e ao Daylight Autonomy, à direita



Fonte: O autor.

Com o intuito de comparar os dados desta pesquisa com os de Bernabé (2012), de Santos (2012), de Casagrande (2013) e outras similares, os resultados obtidos das simulações de níveis de iluminação natural foram analisados, sendo possível estabelecer relações entre as diferentes intervenções na janela da edificação e suas variáveis, além de propor, como possibilidade de pesquisas futuras, a verificação de sua influência no consumo energético da iluminação e climatização artificiais.

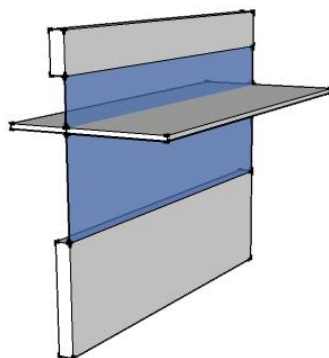
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esse capítulo apresenta a análise dos coeficientes de avaliação da luz natural dos modelos tridimensionais simulados, de acordo com as etapas de simulações e metodologias estabelecidas no capítulo anterior e discute os dados resultantes extraídos do *software*.

4.1 PRIMEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES

De acordo com a metodologia estabelecida no capítulo anterior, para a investigação e avaliação da primeira etapa de simulações, foram analisados os ambientes orientados apenas para o Norte, com prateleira de luz plana (Figura 27), com vidro incolor e bronze, com e sem obstrução do entorno e em três diferentes pavimentos.

Figura 27: Esboço representativo do modelo de prateleira de luz plana implantada na abertura lateral



Fonte: O autor.

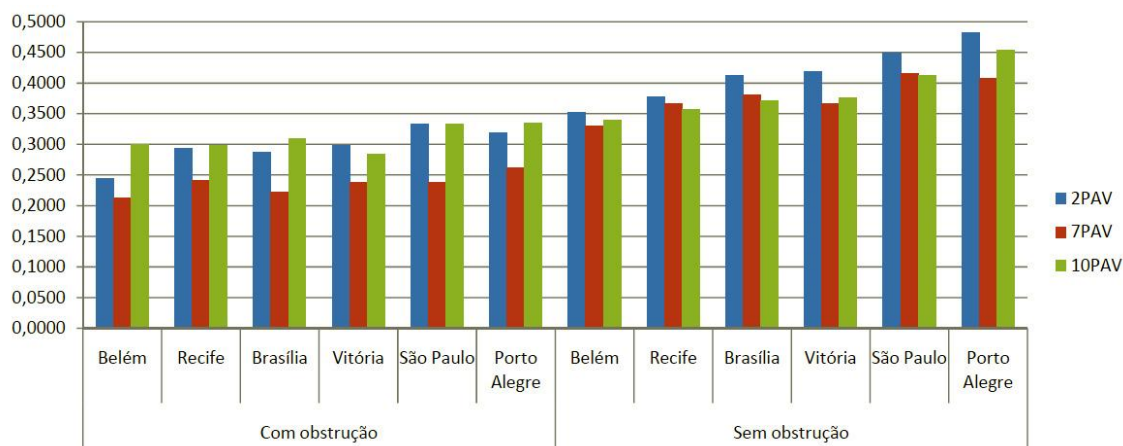
Para um levantamento das características da luz admitida, quanto à sua distribuição no ambiente interno e quanto à iluminância útil no plano de trabalho, as análises foram separadas por variáveis, por pavimentos e por cidades. Dessa forma, permitiu-se uma avaliação mais precisa das intervenções além de uma análise da influência da obstrução no entorno para a tipologia adotada, objetivo dessa etapa de simulações.

4.1.1 Análise do impacto das obstruções

As obstruções externas têm impacto significativo na admissão de luz natural a partir das aberturas laterais (LARANJA, 2010). Percebe-se, através da análise do Gráfico 3, a influência

da obstrução nos modelos simulados. Em geral, o índice de uniformidade da iluminação natural admitida nos modelos sem obstrução foi 40% superior aos com obstrução.

Gráfico 3: Comparativo entre os índices médios de uniformidade dos modelos com e sem obstrução do entorno, separados por cidades e por pavimentos



Fonte: O autor.

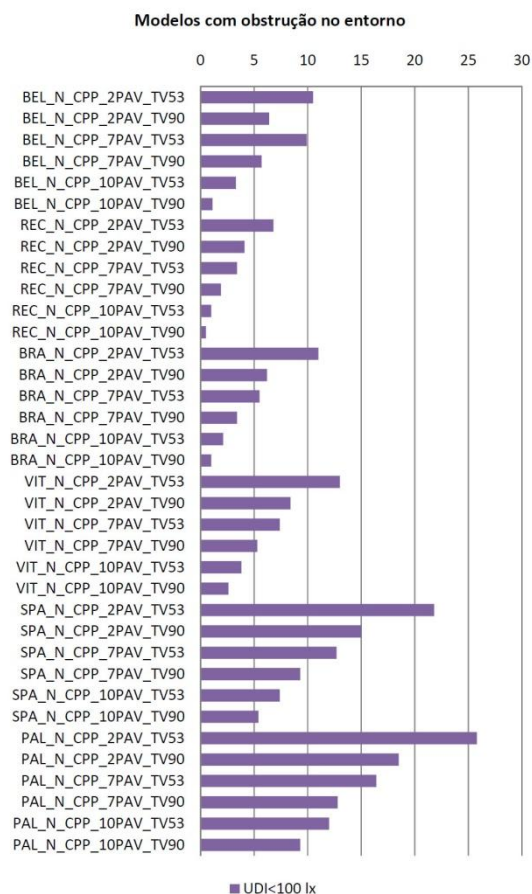
Em todos os modelos simulados, a obstrução parcial da abóbada celeste reduziu os níveis de iluminância captados pelos pontos de medição no recinto analisado. Essa característica resultou numa maior quantidade de níveis de iluminância observados abaixo de 100 lux, ou seja, considerada insuficiente de acordo com os intervalos da UDI, nos modelos com obstrução no entorno. A influência das obstruções na admissão da luz externa é evidenciada nos pavimentos inferiores, como já era esperado, visto que esses modelos possuem uma maior parcela da abóbada celeste obstruída.

Em média, a obstrução de parte do céu pelos edifícios foi responsável por um aumento de 37,5% dos níveis de iluminância insuficiente no 10º pavimento. Já no 7º pavimento, o aumento desses níveis foi de 163%, enquanto no 2º pavimento o aumento das horas anuais medidas com iluminâncias abaixo de 100 lux alcançou quase 250%. Na comparação entre todos os modelos simulados identificados nos Gráficos 4 e 5, torna-se evidente que os modelos com obstrução obtiveram maior percentual de horas com iluminância insuficiente.

Da mesma forma, reduzindo os níveis de iluminância nos ambientes, as obstruções podem ter suas vantagens em locais com altos índices de luminosidade do céu e com janelas compostas por vidros com transmissividade à luz visível elevada. Nesses casos a obstrução pode reduzir o percentual de horas medidas com iluminâncias consideradas excessivas. Em média, a

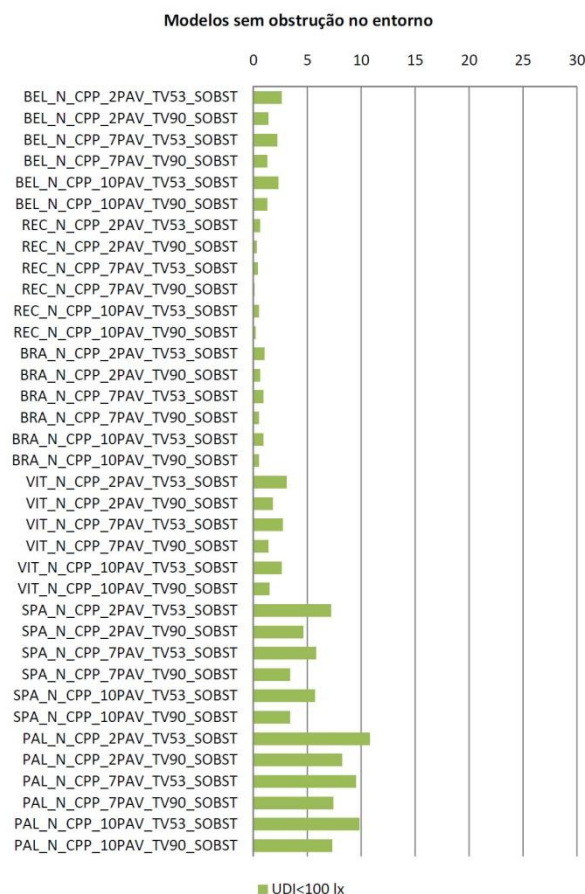
obstrução reduziu em quase 8% as horas medidas acima de 2000 lux nos modelos simulados no 10º pavimento. No 7º pavimento esse percentual foi reduzido em 38%. Nos ambientes modelados no 2º pavimento a redução dos níveis de iluminância excessiva com obstrução no entorno alcançou média superior a 67%.

Gráfico 4: Percentual de horas anuais dentro da faixa de iluminância insuficiente dos modelos com obstrução do entorno



Fonte: O autor.

Gráfico 5: Percentual de horas anuais dentro da faixa de iluminância insuficiente dos modelos sem obstrução do entorno



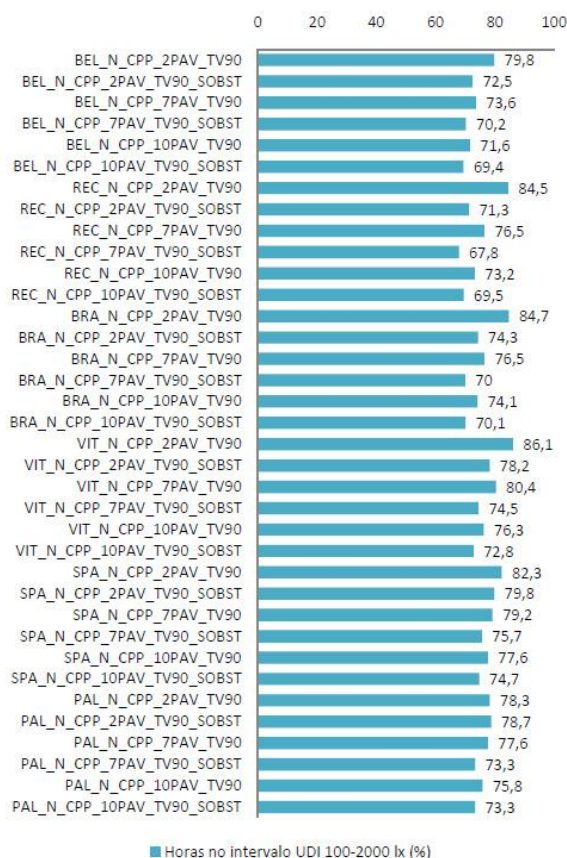
Fonte: O autor.

4.1.2 Análise da influência da transmissão luminosa dos vidros

Quando comparados os dois tipos de vidro em relação à iluminância útil, verifica-se, em geral, que os maiores percentuais são obtidos pelos modelos configurados com o vidro bronze. Numa média abrangendo todas as simulações dessa etapa, a opção pelo vidro bronze aumentou em aproximadamente 9% as iluminâncias medidas no interior compreendidas na faixa entre 100 e 2000 lux.

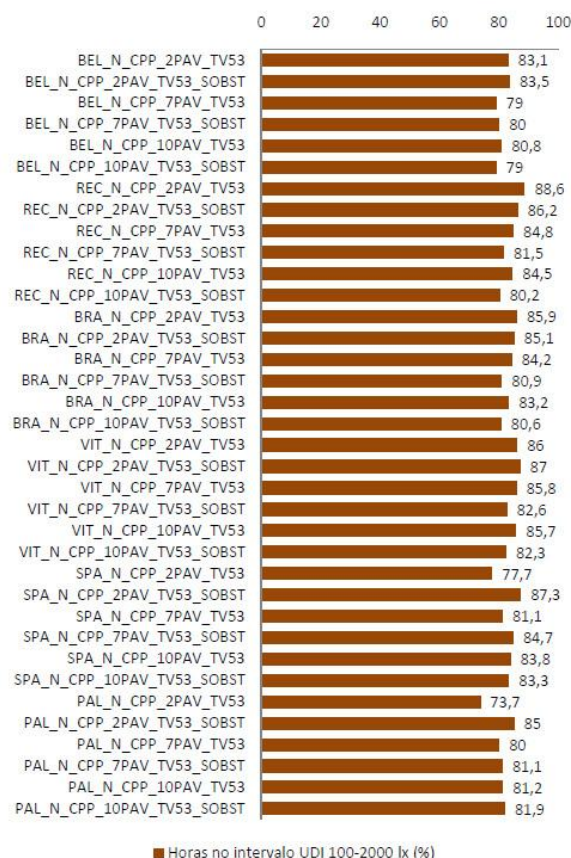
Conforme pode ser observado nos Gráficos 6 e 7, em apenas 3 situações simuladas – VIT_N_CPP_2PAV_TV90; SPA_N_CPP_2PAV_TV90 e PAL_N_CPP_2PAV_TV90 –, ou seja, em aproximadamente 8% dos casos, o modelo com opção pelo vidro incolor obteve percentual superior de horas anuais no intervalo de iluminância útil ($100 < \text{UDI} < 2000 \text{ lx}$).

Gráfico 6: Comparativo entre percentual de iluminância útil dos modelos simulados com vidro incolor



Fonte: O autor.

Gráfico 7: Comparativo entre percentual de iluminância útil dos modelos simulados com vidro bronze



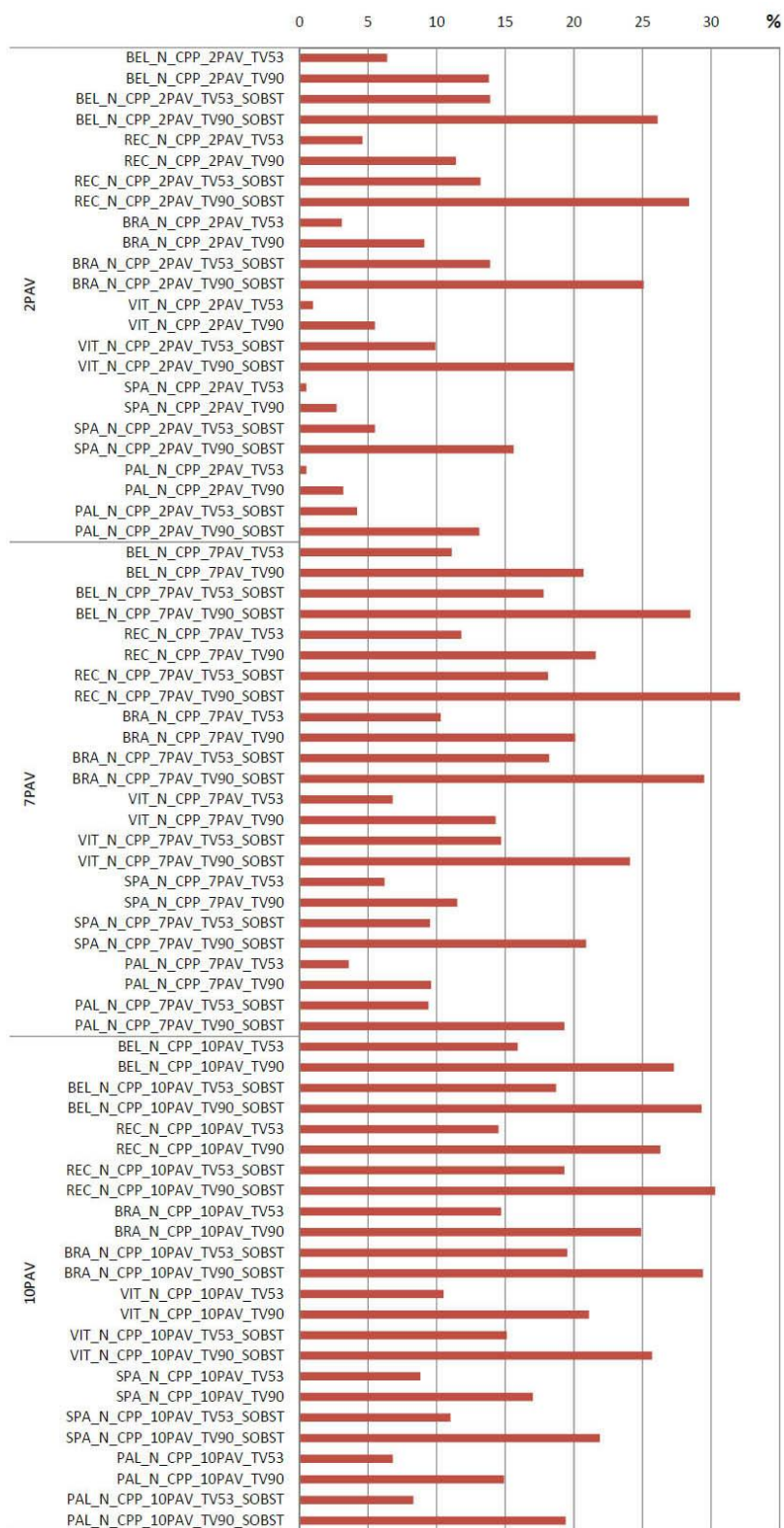
Fonte: O autor.

4.1.3 Análise por pavimento

Ao analisar separadamente os modelos por pavimentos, é possível perceber que os mais próximos ao nível do solo, por possuírem maior percentual de obstrução da parcela visível da abóbada celeste, estão menos suscetíveis aos níveis excessivos de iluminâncias (Gráfico 8). Somando todos os modelos simulados, com e sem obstrução, as sala referentes ao 2º pavimento apresentaram iluminância excessiva em seu interior em 10,4% das horas anuais investigadas, enquanto o 7º pavimento registrou média de 16,2% e o 10º pavimento, 18,8%.



Gráfico 8: Comparativo entre os percentuais de horas anuais com iluminâncias acima de 2000 lux para os três pavimentos analisados

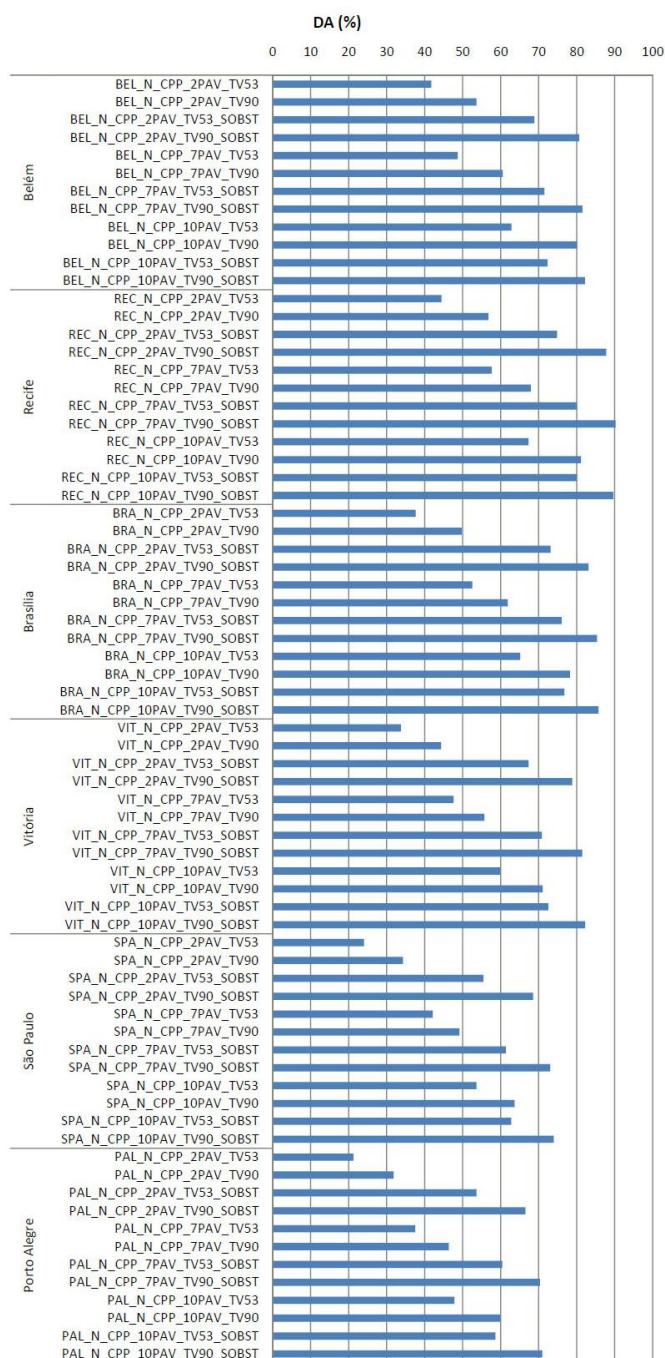


Fonte: O autor.

4.1.4 Análise por cidades

Através da análise do percentual de horas anuais registradas acima de 500 lux, apresentada no Gráfico 9, é possível perceber que o nível médio de iluminâncias observadas no ambiente interno diminui à medida que se aumenta a latitude do modelo simulado.

Gráfico 9: Comparativo entre os modelos simulados através do Daylight Autonomy



Fonte: O autor.

Esse fato pode ser reforçado pela média do DA dos modelos analisados de cada uma das cidades estudadas. A única localidade que fugiu a essa regra foi Belém, tendo em vista a grande ocorrência de céus encobertos ou parcialmente encobertos ao longo do ano nessa capital. As médias relativas ao coeficiente *Daylight Autonomy* obtidas por cada cidade se encontram descritas na Tabela 4.

Tabela 4: DA médio das cidades referente a todos os modelos simulados na primeira etapa

<i>Daylight Autonomy</i> - DA (500 lx)	
Cidade	DA médio (%)
Belém	67,0
Recife	73,1
Brasília	68,7
Vitória	63,8
São Paulo	55,1
Porto Alegre	52,1

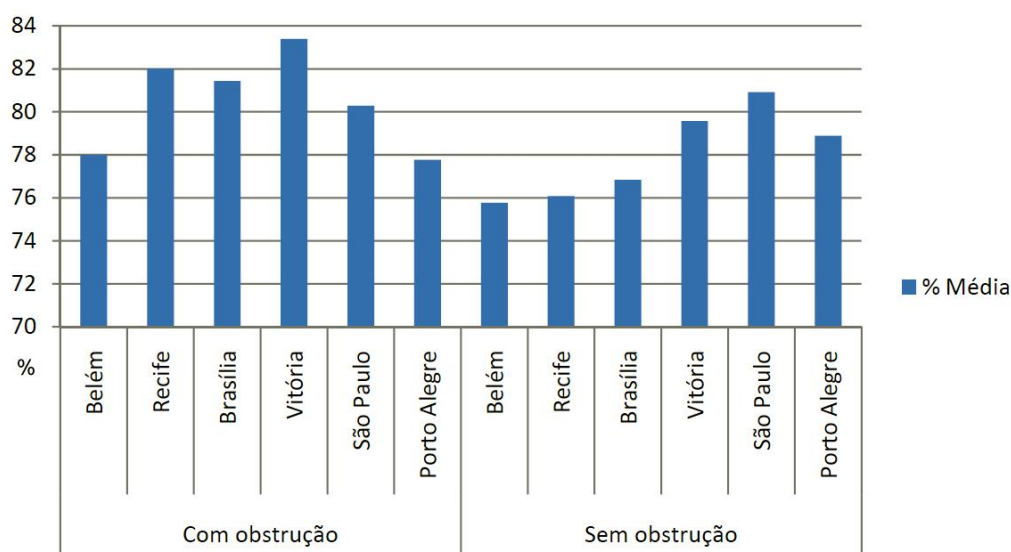
Fonte: O autor.

Em relação aos níveis compreendidos entre 100 lx e 2000 lx dos modelos simulados sem obstrução, foi verificado que sua iluminância média aumentava à medida que aumentava a latitude simulada. A única capital que não seguiu tal expectativa foi a cidade de Porto Alegre, que obteve iluminância média inferior a São Paulo e Vitória (Gráfico 10).

A mesma relação não pôde ser constatada nos modelos simulados com obstrução. Nesses casos, a média dos modelos simulados em Porto Alegre alcançou o pior desempenho e o simulado em Vitória, o melhor, alcançando percentuais médios de 77,8% e 83,4% respectivamente.

Numa média geral de todos os modelos simulados em cada cidade, Vitória apresentou o melhor desempenho, seguido de São Paulo, e Belém o pior, seguido de Porto Alegre.

Gráfico 10: Comparativo da média da iluminância útil entre os modelos simulados

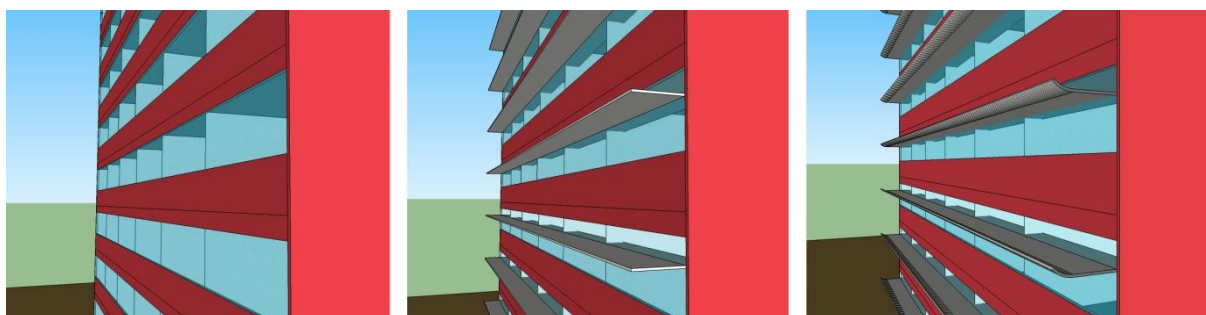


Fonte: O autor.

4.2 SEGUNDA ETAPA DE SIMULAÇÕES

Conforme descrito no capítulo 3, nesta etapa de simulações foram avaliados apenas as salas com os maiores percentuais de obstrução, ou seja, as referentes ao segundo pavimento. Entretanto, para um resultado mais abrangente, foram realizadas as simulações para diferentes situações, como a presença ou não das prateleiras curvas e planas (Figura 28), os ângulos de proteção desses dispositivos específicos para cada latitude, o uso de vidros de diferentes índices de transmissividade, nas quatro orientações cardeais principais. Conforme etapa anterior de simulações, as análises foram divididas em categorias para uma melhor avaliação do desempenho de cada um dos modelos simulados.

Figura 28: Edifícios modelados sem dispositivo de proteção, à esquerda, com prateleira plana, ao centro e com prateleira curva, à direita

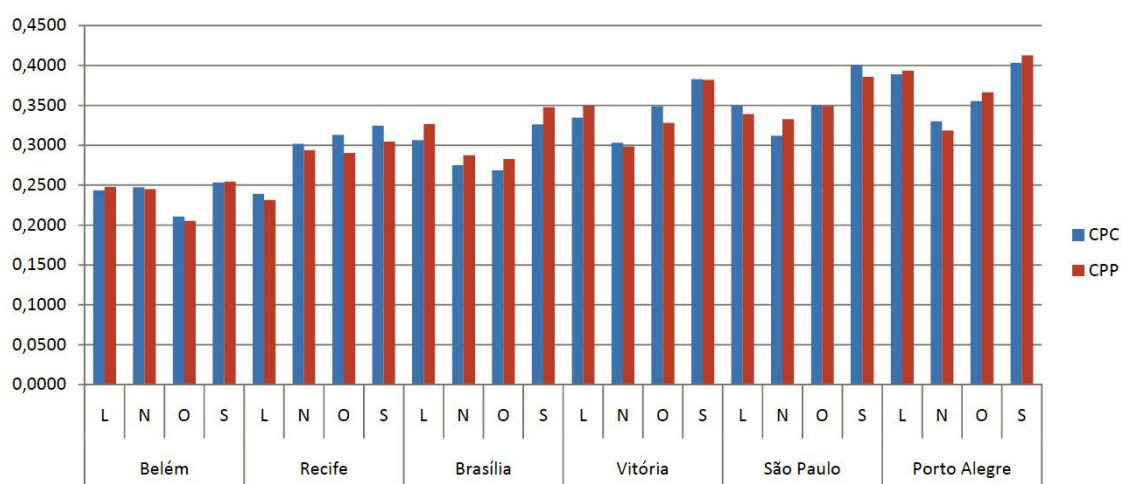


Fonte: O autor.

4.2.1 Análise da influência das geometrias das prateleiras

Em relação à geometria das prateleiras, não houve grandes diferenças nos níveis de uniformidade. Ao se comparar a média de desempenho dos dois tipos de vidro nas prateleiras planas e curvas, as últimas obtiveram maiores índices de uniformidade em 54% dos casos. A única localidade em que as prateleiras curvas obtiveram desempenho superior em todas as orientações simuladas foi Recife. Diferentemente dessa situação, os modelos simulados em Brasília com prateleiras planas obtiveram uniformidade superior nas quatro orientações. Em todas as outras capitais os resultados se alternavam entre as duas geometrias (Gráfico 11).

Gráfico 11: Índices de uniformidades médias dos modelos com prateleiras planas (CPP) e com prateleiras curvas (CPC)

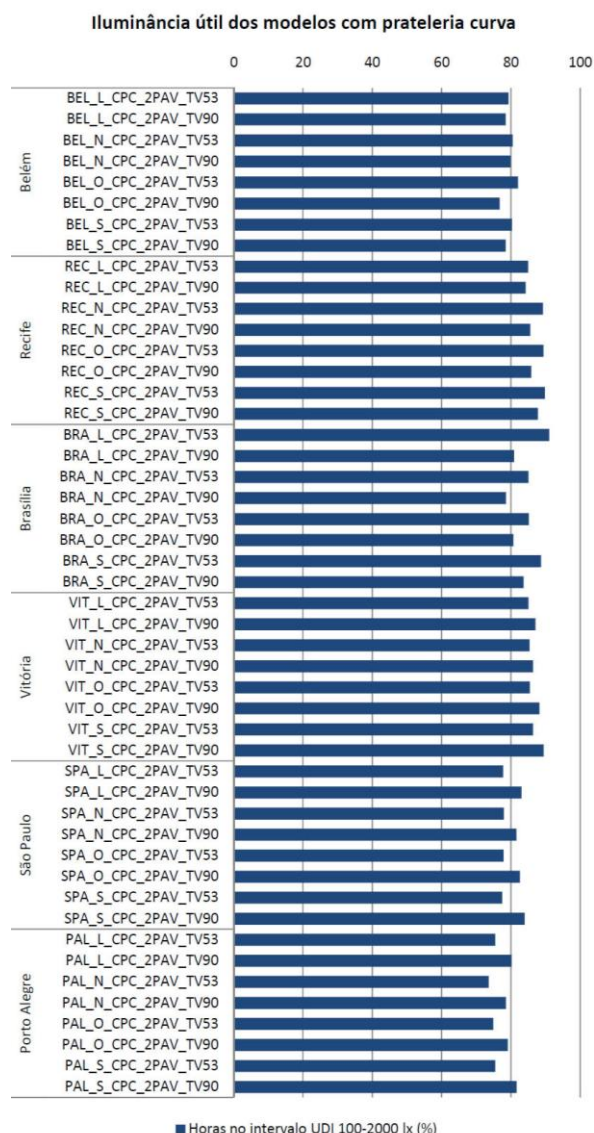


Fonte: O autor.

A geometria da prateleira curva definida para esta investigação visava proporcionar uma maior reflexão da luz para a parte posterior da sala nos períodos cuja trajetória solar alcançasse os maiores ângulos, proporcionando assim um maior percentual de horas dentro do intervalo de iluminância útil. Entretanto, como pode ser observado na comparação entre os Gráficos 12 e 13, não houve diferença significativa, com relação a esse intervalo, no desempenho das duas geometrias de prateleiras. O dispositivo plano obteve resultados superiores em algumas cidades enquanto o curvo, em outras.

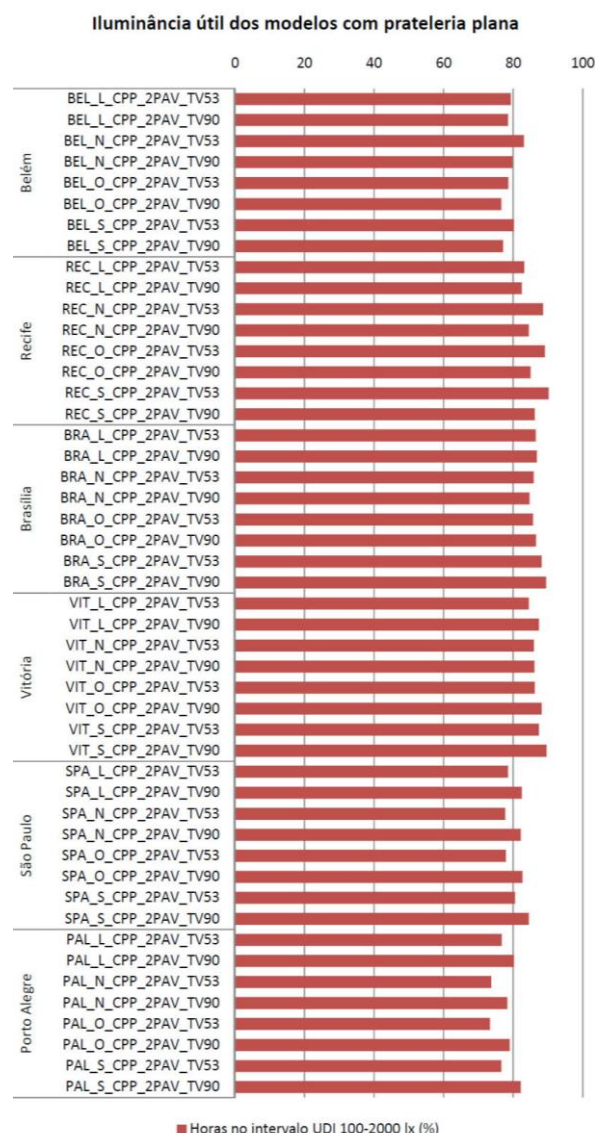
Enquanto a prateleira curva alcançou melhores resultados em Belém e Recife, localidades com menores latitudes dentre as analisadas, a plana obteve percentuais superiores em Vitória e São Paulo, sobretudo em Brasília.

Gráfico 12: Comparativo entre percentuais de horas anuais dentro do intervalo de iluminância útil dos modelos com prateleira de luz curva



Fonte: O autor.

Gráfico 13: Comparativo entre percentuais de horas anuais dentro do intervalo de iluminância útil dos modelos com prateleira de luz plana



Fonte: O autor.

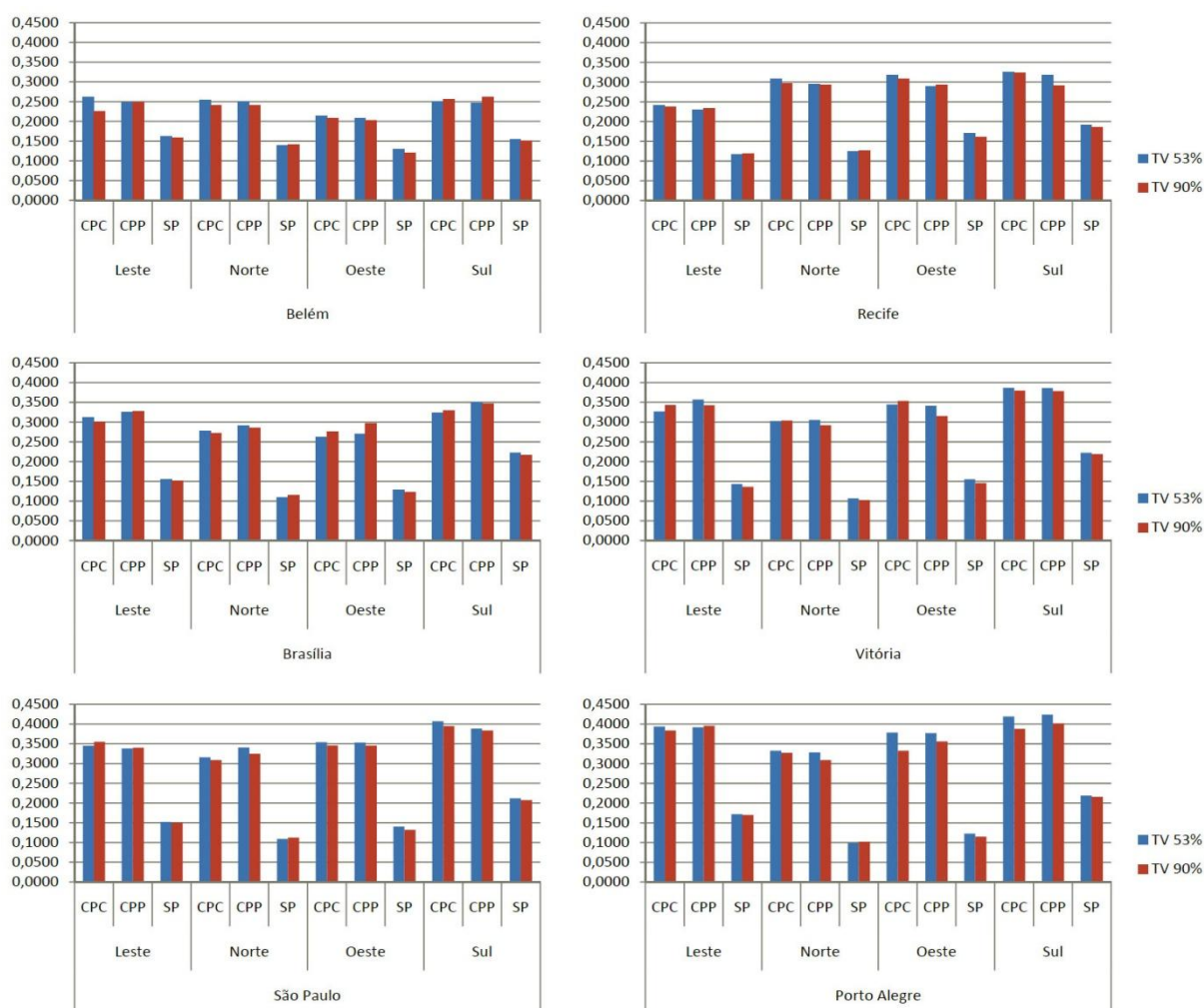
4.2.2 Análise da influência da transmissão luminosa dos vidros

Através da análise dos resultados extraídos dos dados de saída do *software* verificou-se o diferente comportamento da iluminação natural interior admitida pelas aberturas compostas apenas pelo vidro incolor comum e pela composição deste com o vidro bronze. Como relatado anteriormente, a opção por um vidro com menor transmitância à luz visível visava minimizar os níveis de iluminância próximos à janela, mas sem prejudicar significativamente os níveis

em profundidade no ambiente, visto que o fechamento da porção superior da prateleira é composto pelo vidro incolor. Consequentemente eram esperados maiores valores de uniformidade para os modelos com o vidro bronze, com transmissão à luz visível de 53%, se comparados ao incolor, com transmissão de 90%.

Em geral esse fato foi observado, porém, não com unanimidade. Em aproximadamente 29% dos casos analisados, os modelos dotados de vidro incolor obtiveram maiores índices de uniformidade. Das 72 comparações entre modelos simulados com os dois tipos de vidro, apresentadas no Gráfico 14, 5 dos simulados com vidro comum que obtiveram maior uniformidade foram observados em Brasília e apenas 2 na cidade de Porto Alegre.

Gráfico 14: Comparativo sobre a uniformidade entre os dois tipos de vidro, o bronze, com transmissão à luz visível de 53% (TV 53%) e o incolor, com transmissão à luz visível de 90% (TV 90%), para todas as variáveis simuladas na segunda etapa metodológica

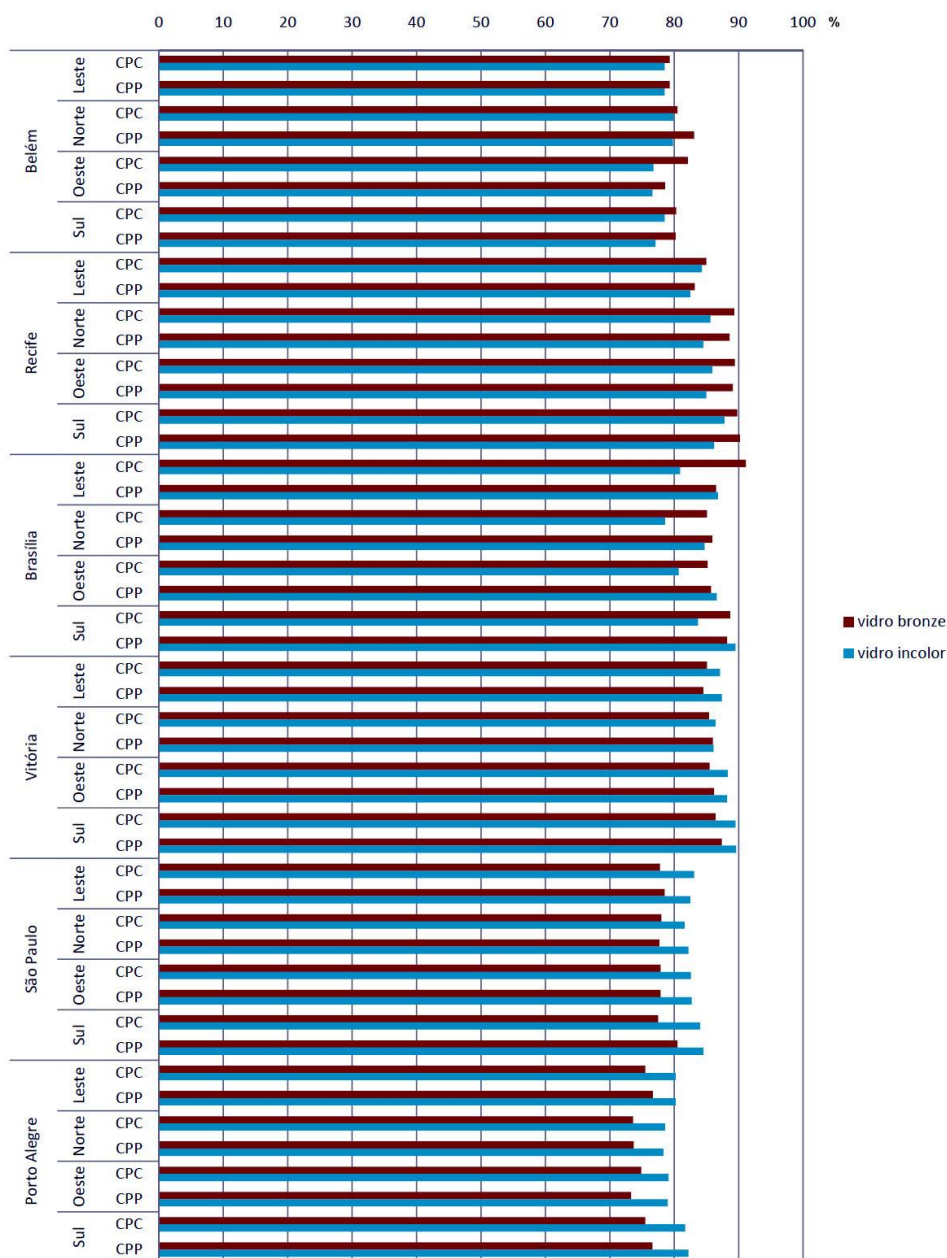


Fonte: O autor.

Entretanto, ao se comparar as médias horárias dos níveis de iluminância entre os dois tipos de vidro, a unanimidade foi observada e não poderia ser diferente, visto que um índice inferior de transmitância à luz visível do vidro permite uma menor entrada da luz natural e, conseqüentemente, menores níveis de iluminância interna.

Em relação ao percentual de horas nos intervalos da UDI, a influência dos vidros obteve resultados mais expressivos quando analisadas as localidades separadamente, conforme comparativo apresentado no Gráfico 15. Isso porque nas três cidades com latitudes maiores – Vitória, São Paulo e Porto Alegre –, cujo céu apresenta maior luminosidade, o vidro incolor alcançou percentual superior das horas anuais medidas entre 100 e 2000 lux em todas as simulações. Já nas duas capitais com menores latitudes foi observado que o vidro bronze alcançou maior percentual de horas nesse intervalo da UDI. Somente na cidade de Brasília que os valores de transmissividade visível dos fechamentos transparentes dos modelos simulados não alcançaram unanimidade, com os dois tipos de vidro se alternando entre os maiores percentuais de acordo com as outras variáveis.

Gráfico 15: Comparativo entre o percentual de horas no intervalo de iluminância útil dos modelos simulados com os dois tipos de vidro propostos



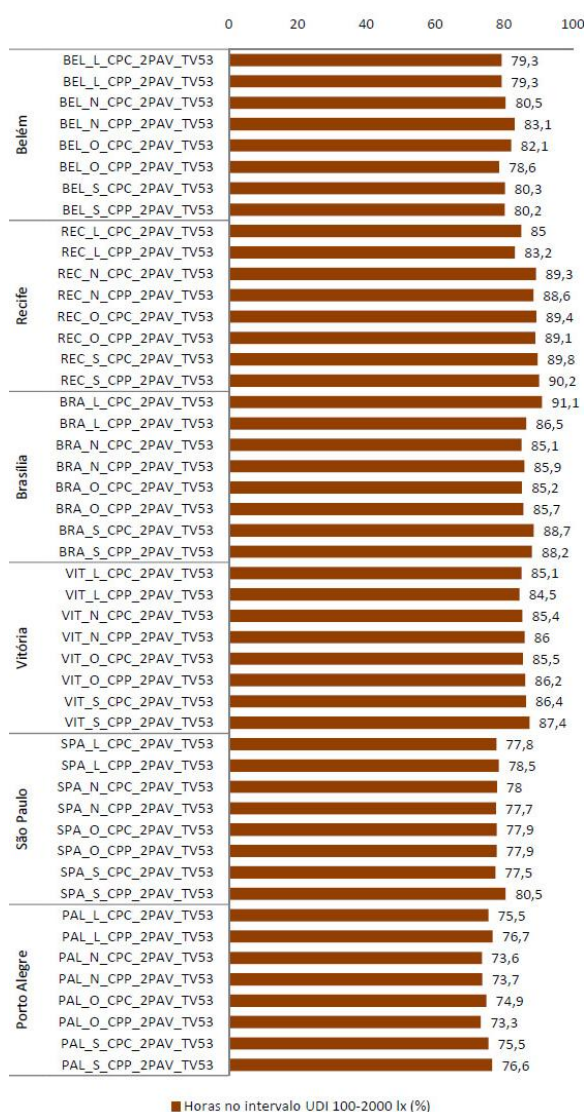
Fonte: O autor.

Ao se separar as simulações em função dos tipos de vidro, percebe-se, nos modelos especificados com vidro bronze, um maior percentual de horas no intervalo de iluminância útil ($100 < \text{UDI} < 2000 \text{ lx}$) das simulações realizadas para as cidades de Recife, Brasília e Vitória (Gráfico 16). Já nos modelos simulados com vidro incolor, essa característica não é muito evidenciada, alcançando um destaque maior, de modo geral, apenas a cidade de Vitória



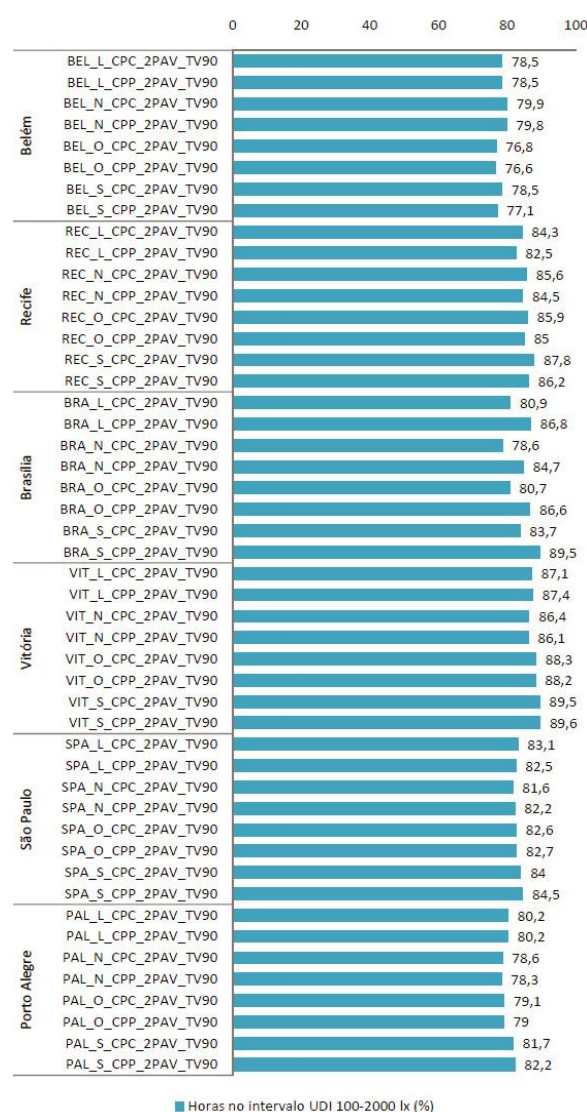
com melhores resultados e uma diferença pequena entre as simulações (Gráfico 17). Na cidade de Brasília, por exemplo, a adoção deste tipo de vidro obteve uma variação maior em função das características da geometria da prateleira, visto que, nessa localidade, os dispositivos planos obtiveram desempenho superior.

Gráfico 16: Percentual de horas no intervalo de iluminância útil dos modelos simulados com o vidro bronze



Fonte: O autor.

Gráfico 17: Percentual de horas no intervalo de iluminância útil dos modelos simulados com o vidro incolor

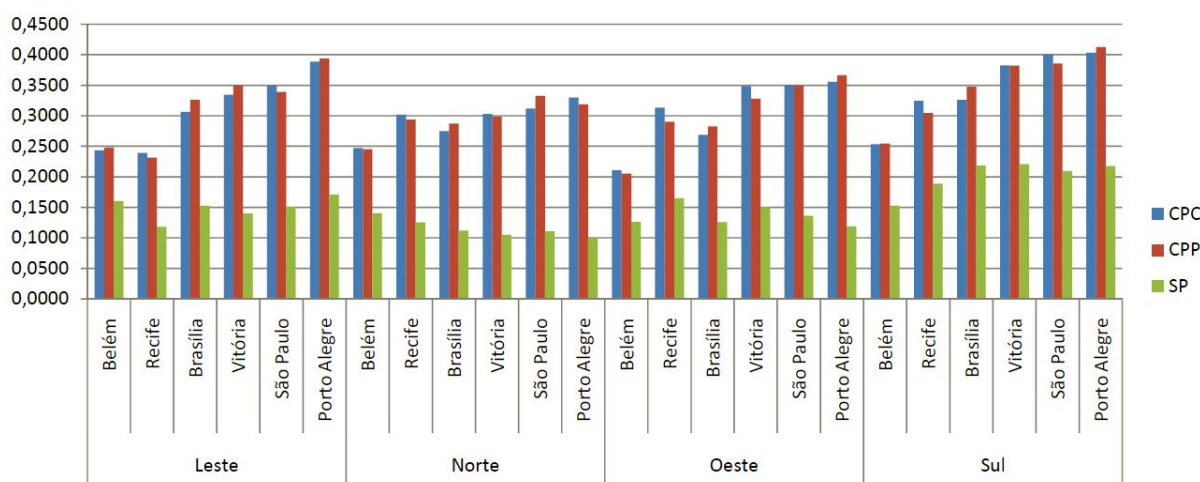


Fonte: O autor.

4.2.3 Análise por orientação

Ao se analisar os índices de uniformidade das cidades, comparadas por orientação, percebe-se que os modelos de Porto Alegre com as prateleiras se destacam com os maiores valores em todas as orientações. Apenas o modelo com o dispositivo plano simulado na fachada Norte, em São Paulo, obteve índice superior ao referente da primeira cidade citada. Contudo, os piores valores foram obtidos em Belém, ficando em segundo lugar apenas na comparação entre os modelos simulados para o Leste, no qual os piores resultados foram obtidos em Recife, conforme dados dispostos no Gráfico 18. Para simplificação e observação objetiva do gráfico, foram utilizadas as médias correspondentes aos modelos com vidro transparente e com vidro bronze.

Gráfico 18: Comparativo entre os índices médios de uniformidade dos modelos com prateleira curva (CPC), com prateleira plana (CPP) e sem prateleira (SP), separados por orientação da fachada



Fonte: O autor.

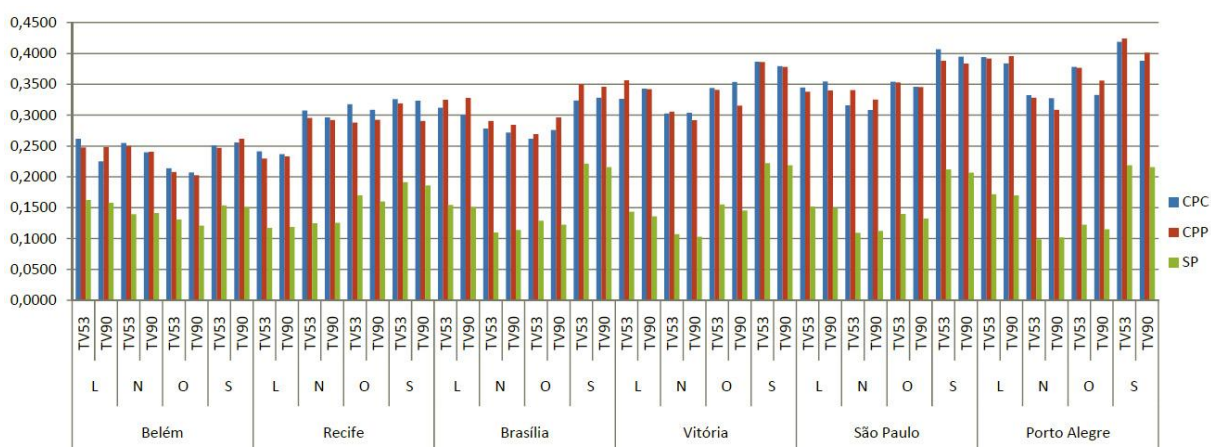
Nota-se, através da análise do Gráfico 18, que os modelos sem prateleira de luz apresentam resultados inferiores de uniformidade em todas as capitais e orientações estudadas, quando comparados aos modelos com prateleiras. Em média, as edificações modeladas sem o dispositivo obtiveram aproximadamente 52% de desempenho inferior aos modelos equipados com as prateleiras. Essa diferença de desempenho foi menos percebida em Belém, na orientação Leste, onde o percentual alcançou aproximadamente 34%, e foi mais destacada nas simulações em Porto Alegre, com fachada Norte, cuja diferença percentual entre o modelo com maior uniformidade e o com pior índice alcançou quase 70%. Dessa forma, reforça-se a

capacidade das prateleiras de luz em uniformizar a iluminação natural admitida no ambiente interno.

4.2.4 Análise por cidades

Em relação aos índices de uniformidade, através da análise do Gráfico 19, fica evidente que a uniformidade alcançada no interior do edifício aumentou nos modelos simulados com prateleiras de luz à medida que se aumentou a latitude selecionada. O mesmo fato não ocorreu para os modelos simulados sem o dispositivo.

Gráfico 19: Comparativo entre os índices de uniformidade dos modelos simulados

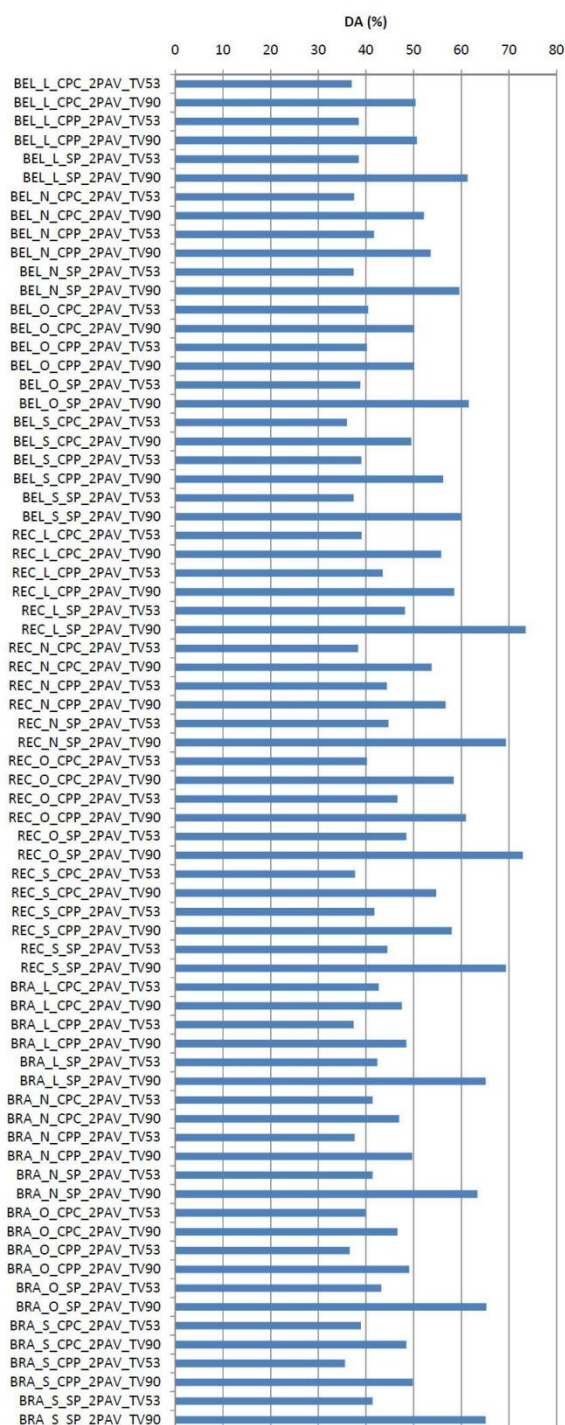


Fonte: O autor.

Quando são analisados os percentuais de horas anuais pelo Daylight Autonomy, cuja iluminância interna deveria alcançar valores superiores a 500 lux, verifica-se que os modelos configurados com o vidro incolor apresentaram valores superiores aos mesmos modelos que utilizaram vidro bronze em seus fechamentos externos (Gráficos 20 e 21).

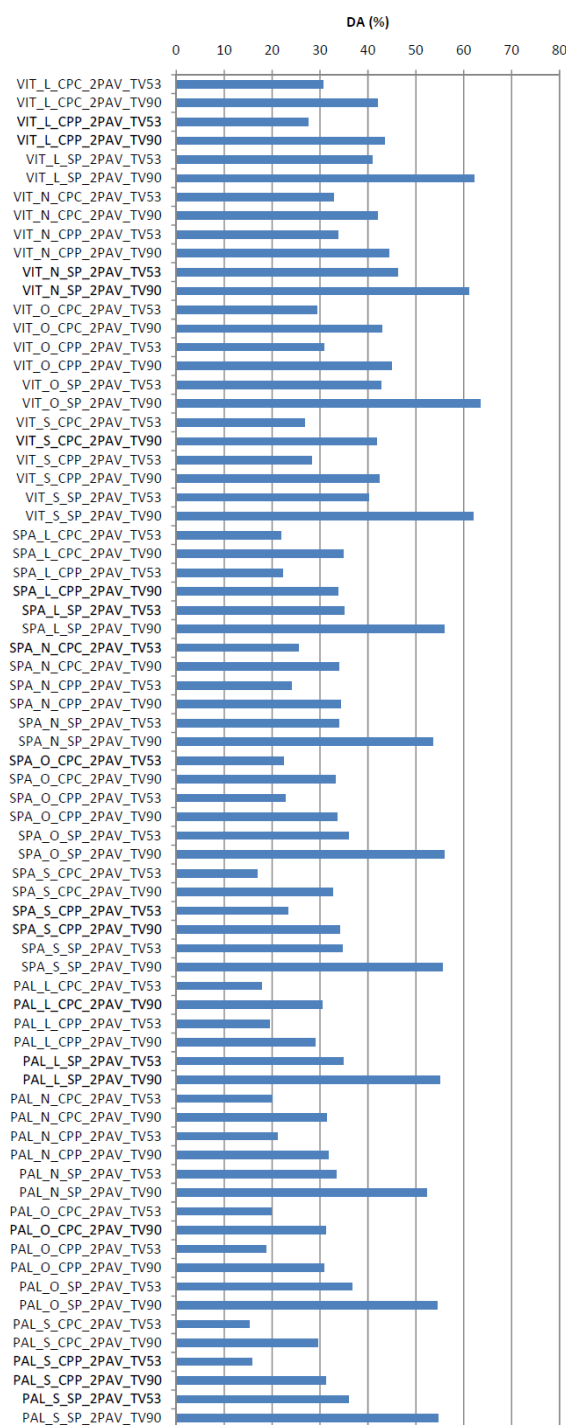


Gráfico 20: Percentuais de horas anuais definidas pelo DA dos modelos simulados em Belém, Recife e Brasília



Fonte: O autor.

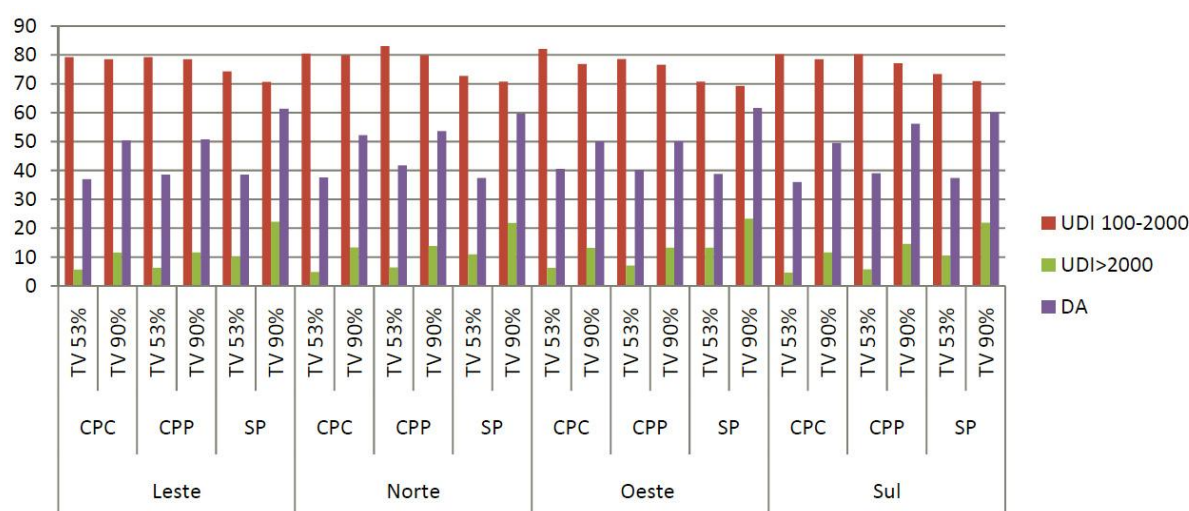
Gráfico 21: Percentuais de horas anuais definidas pelo DA dos modelos simulados em Vitória, São Paulo e Porto Alegre



Fonte: O autor.

Através da análise dos dados, fica evidente a não correlação dos coeficientes de avaliação de luz natural UDI e DA, visto que o aumento do percentual de horas acima de 500 lux, avaliado através do DA, nem sempre reflete em um aumento do percentual de iluminância útil para o modelo simulado. Basta comparar a diferença desses valores obtidos entre os mesmos modelos configurados com o vidro bronze e com o incolor. O exemplo mais claro desse fato, simulado em Belém, é o modelo com fachada Oeste, sem prateleira e com vidro incolor. O resultado dessa simulação apresenta o maior valor de DA observado dentro os modelos desta capital, todavia, apresenta também o menor valor dentro da faixa de 100 a 2000 lux e o maior percentual de horas com iluminância considerada excessiva (Gráfico 22).

Gráfico 22: Comparativo entre UDI e DA para os modelos simulados na cidade de Belém

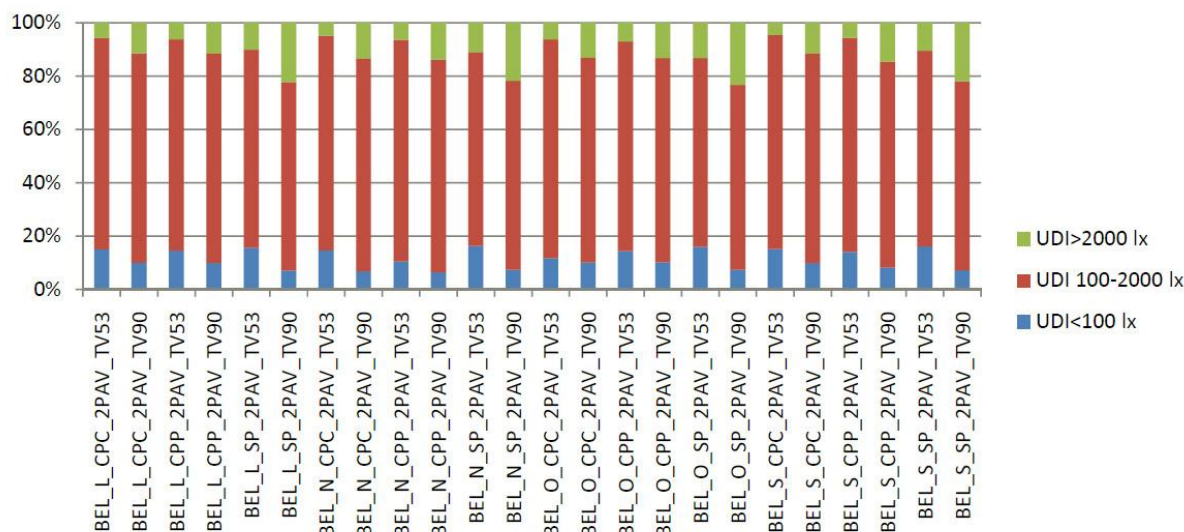


Fonte: O autor.

4.2.4.1 Belém

A cidade de Belém, dentre todas as localidades analisadas, apresentou, em geral, o maior percentual de horas dentro do intervalo de iluminância excessiva, alcançando uma média de 11,79% das horas simuladas, o que contribuiu para um dos piores percentuais em relação à iluminância útil. Entretanto, os exemplos modelados com os vidros cuja transmissividade visível era inferior, apresentaram também, em comparação com os demais, índices elevados de iluminâncias abaixo de 100 lux (Gráfico 23).

Gráfico 23: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de Belém

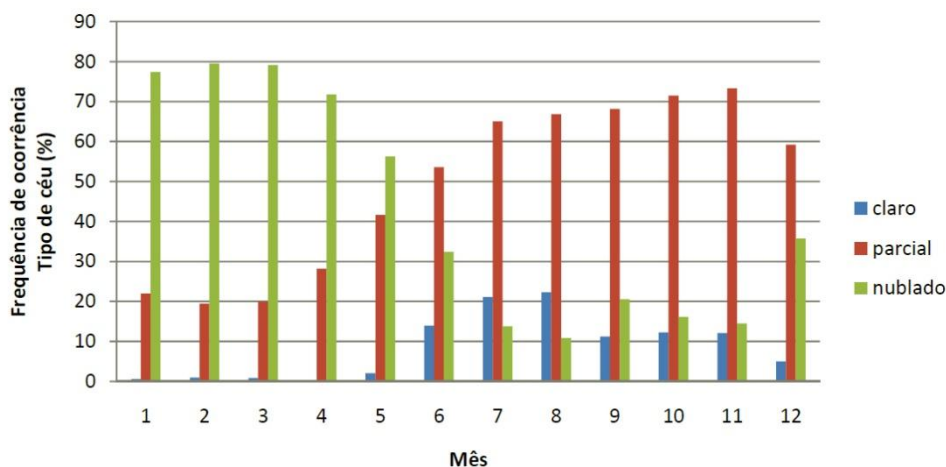


Fonte: O autor.

Outra característica que se pode destacar na avaliação dos resultados desses modelos é que a opção pelo vidro bronze aumentou em média apenas 3% das horas medidas na faixa correspondente entre 100 e 2000 lux. Todavia, as simulações configuradas com essa variável também aumentaram em média 78% os horários registrados com iluminância insuficiente. Em alguns casos, como nos modelos simulados na fachada Sul e sem as prateleiras, a configuração com o vidro bronze aumentou em 123% o percentual de horas dentro da faixa correspondente aos níveis de iluminância abaixo de 100 lux.

Nesta capital foi observado um baixo percentual de ocorrência de céu claro ao longo do ano, o que reduz a eficiência das prateleiras de luz e contribui para os altos índices de iluminância insuficiente observadas no modelo (Gráfico 24). De acordo com o arquivo CSV correspondente, nesta capital, em apenas 8,6% das horas comerciais do ano climático de referência o tipo de céu foi classificado com céu claro, enquanto em 49,3% foram classificadas como céu parcialmente encoberto e em 42,1%, como céu encoberto. Esse fato contribui para níveis inferiores de iluminância admitidas pelas aberturas do ambiente, se comparado a outras localidades com predominância de céu claro e parcialmente nublado.

Gráfico 24: Frequência de ocorrência dos tipos de céu no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Belém, no período de 8h às 18h

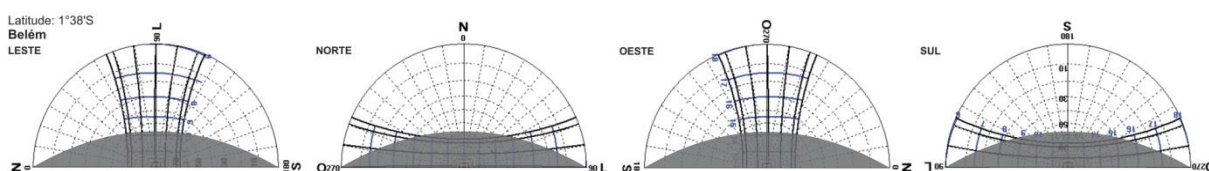


Fonte: O autor.

Outro fator que contribuiu para os altos percentuais de horas anuais com iluminâncias acima de 2000 lux foi o dimensionamento das prateleiras de luz. Os dispositivos foram dimensionados para bloquear a radiação solar direta nos horários próximos ao meio dia em todos os dias do ano. Entretanto, quando se utilizou o mesmo método nessa latitude, os horários com os menores ângulos de altura solar nos dias próximos aos solstícios ficaram apenas com uma eficiência parcial dos dispositivos de proteção, nos casos das fachadas Norte e Sul (Figura 29).

No caso de Belém, é observado um maior percentual de horas sem eficiência total de proteção contra os raios solares, se comparado às outras latitudes selecionadas. Essa característica permite que a radiação solar direta penetre por determinadas regiões da abertura e provoque manchas solares no interior do ambiente, próximas à abertura, ocasionando altos níveis de iluminância.

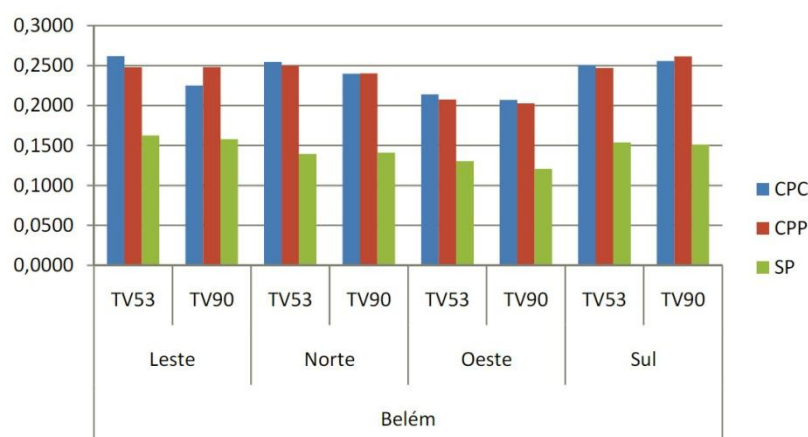
Figura 29: Máscara de sombra produzidas pelas prateleiras de luz das quatro fachadas dos modelos simulados para Belém



Fonte: O autor.

Em relação à uniformidade, a cidade de Belém obteve, em geral, os maiores índices na sala orientada para o Sul, e os piores na orientação Oeste. Esse fato ocorre em virtude da fachada Sul receber uma menor incidência de raios solares diretos, como observado anteriormente (Figura 29). Além disso, no período do ano em que poderiam ocorrer as manchas de sol dentro ambiente, há uma maior obstrução da radiação direta por parte da presença de nuvens, visto que o tipo de céu menos frequente nesses meses é o céu claro. Com isso, o índice de uniformidade na fachada Sul chegou a ser superior a 0,26, enquanto na fachada Oeste aproximadamente 0,12. Os modelos simulados sem prateleira alcançaram, em média, 39% menos uniformidade que os modelos com prateleiras (Gráfico 25).

Gráfico 25: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de Belém

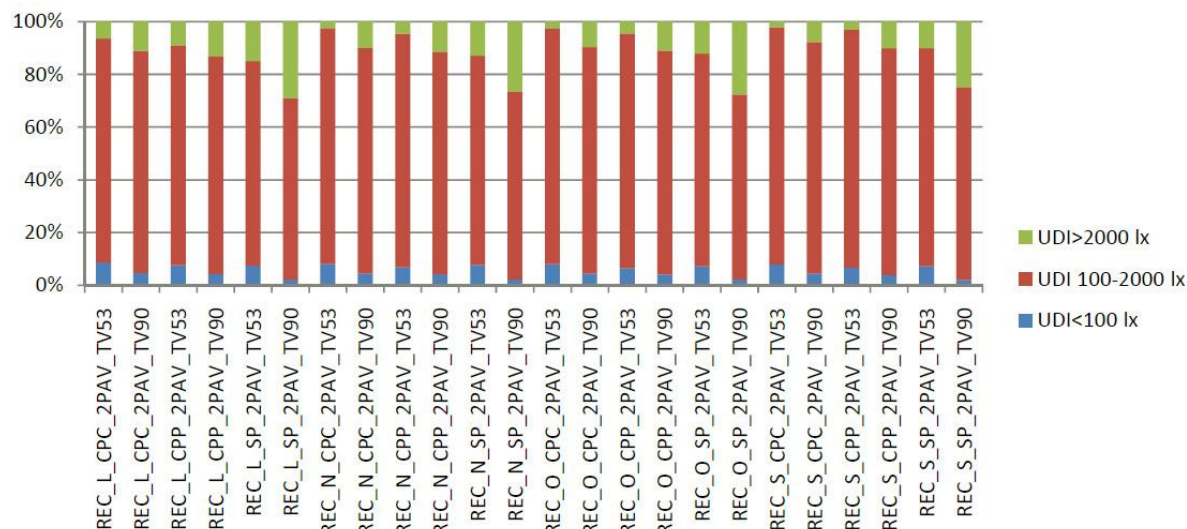


Fonte: O autor.

4.2.4.2 Recife

Os dados de saída do *software* Daysim referentes à cidade de Recife apresentaram baixos percentuais de horas anuais com iluminância insuficiente somados a percentuais elevados de iluminâncias excessivas. Dentre todas as localidades selecionadas, Recife obteve os menores percentuais de horas apresentando iluminâncias abaixo de 100 lux, o que contribuiu para esta cidade alcançar a segunda maior média percentual de horas dentro da faixa de iluminância útil, atingindo uma média geral de 82,91%. Dos modelos simulados em todas as capitais, o REC_S_SP_2PAV_TV90 se destacou por apresentar apenas 2% das horas medidas com iluminância insuficiente (Gráfico 26). Entretanto, obteve também quase 25% das horas analisadas com níveis acima dos 2000 lux.

Gráfico 26: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de Recife

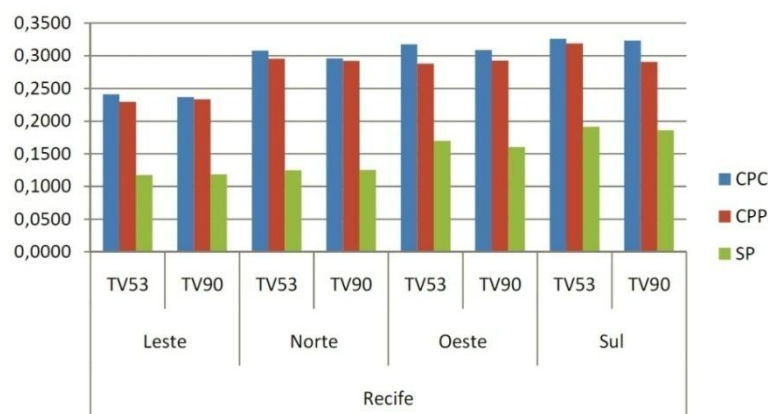


Fonte: O autor.

Nesta localidade o vidro bronze desempenhou papel importante em relação ao percentual de horas dentro da faixa de iluminância útil. Em comparação aos modelos que apresentavam vidro incolor como opção de fechamento da janela, os modelos cujos vidros tinham transmissividade visível de 53% obtiveram maiores percentuais de iluminância medida entre 100 e 2000 lux. Esse resultado se deve ao fato do céu desta localidade apresentar luminosidade alta e, reduzindo da quantidade de luz que penetra pelo fechamento transparente, diminuem-se também os níveis de iluminância excessiva. Para confirmar essa afirmação, observa-se que os edifícios simulados sem prateleiras de luz e com o vidro incolor, cujos níveis de iluminância interna alcançaram valores considerados excessivos, em aproximadamente 25% das horas simuladas ou mais nas quatro orientações propostas.

Com relação aos índices de uniformidade, nas simulações realizadas para esta cidade os modelos simulados com prateleira curva obtiveram desempenho superior aos demais. De modo geral, os modelos simulados com essa geometria do dispositivo obtiveram uniformidade 5% superior aos modelos com prateleira plana. Em média, os modelos com prateleiras alcançaram uniformidade 92,7% superior aos modelos simulados sem o dispositivo de proteção (Gráfico 27).

Gráfico 27: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de Recife

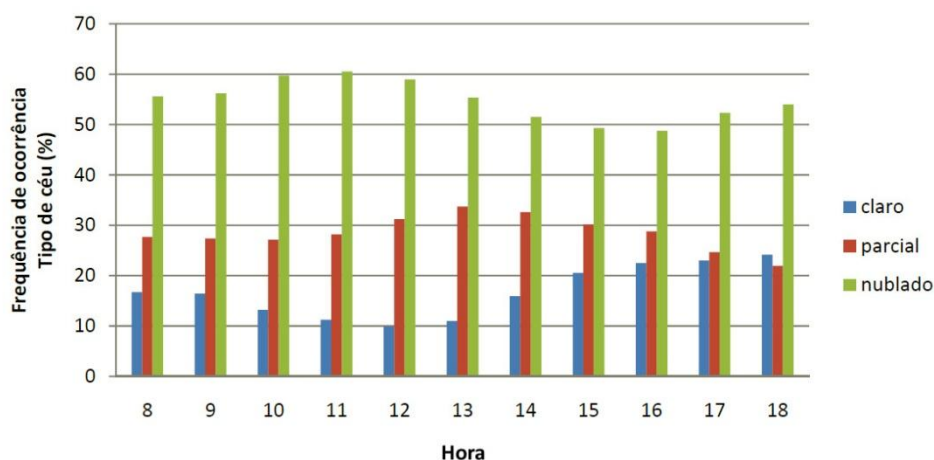


Fonte: O autor.

Ao se analisar a frequência de ocorrência dos tipos de céu para a cidade de Recife, verifica-se que 10,5% dos horários considerados são caracterizados pelo céu claro, enquanto 58,5% pelo céu parcialmente encoberto e 31% pelo céu encoberto. O elevado percentual de ocorrência de céu parcialmente encoberto pode contribuir para uma iluminação indireta mais eficiente, visto que esse tipo de céu pode proporcionar altos índices de luminosidade na abóbada.

Com relação à ocorrência dos tipos de céu no decorrer do horário analisado, no intervalo compreendido entre 9h e 12h são observadas as menores ocorrências de céu claro e as maiores de céu encoberto, reduzindo os níveis de iluminância a serem admitidos pelas aberturas dos edifícios nesse período (Gráfico 28).

Gráfico 28: Frequência de ocorrência dos tipos de céu, por hora do dia, no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Recife, no período de 8h às 18h

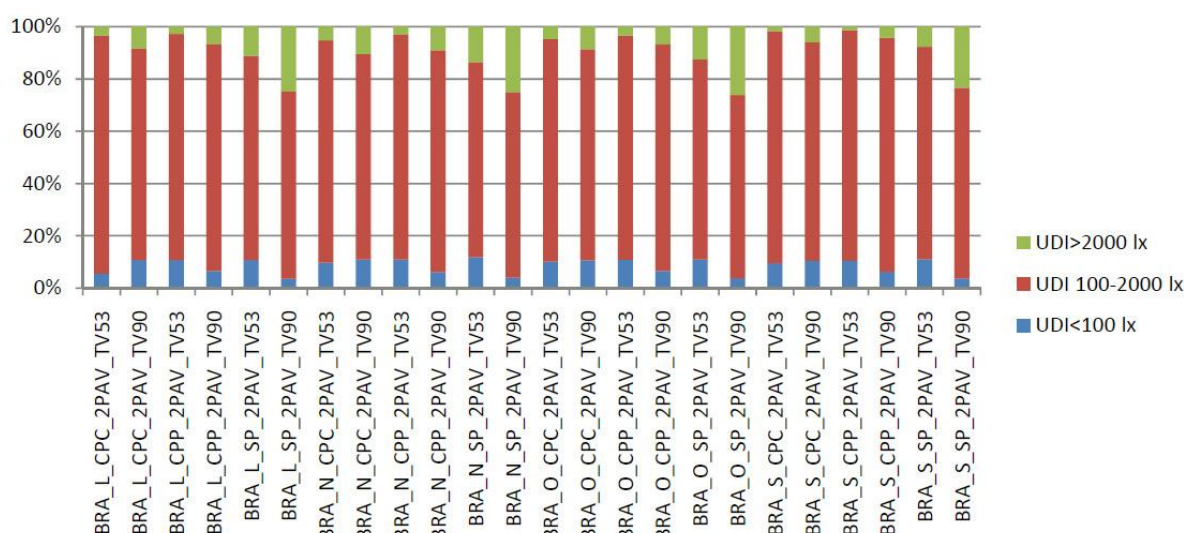


Fonte: O autor.

4.2.4.3 Brasília

Nos modelos simulados referentes à cidade de Brasília são observados altos percentuais de iluminância útil, com uma média geral de 81,8% das horas medidas nesse intervalo. 8,6% das horas anuais foram medidas com iluminância insuficiente enquanto 9,6%, com iluminância excessiva. Destacam-se no Gráfico 29 os modelos simulados com vidro incolor e sem dispositivos de proteção, os quais apresentaram os maiores percentuais de horas cuja iluminância excedeu os 2000 lx. Dentre eles, BRA_O_SP_2PAV_TV90 apresentou o pior índice no qual 26,1% das horas medidas se mostraram com iluminância excessiva.

Gráfico 29: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de Brasília

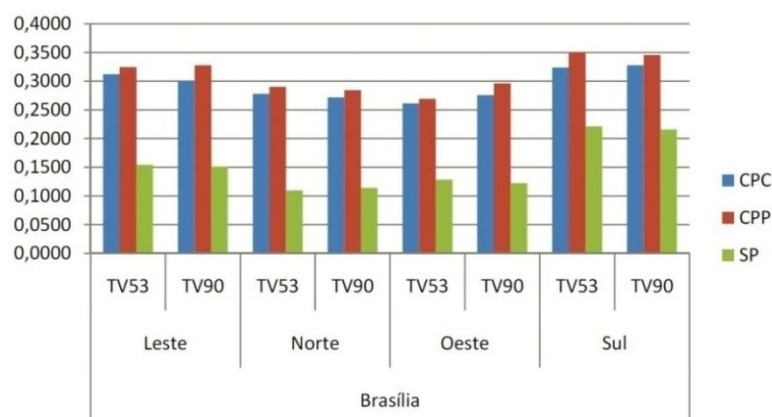


Fonte: O autor.

Em relação à iluminância útil, o de maior destaque foi o modelo BRA_L_CPC_2PAV_TV53. Os dados resultantes dessa simulação apresentaram 91,1% das horas nesse intervalo, o maior percentual dentre todos os modelos simulados nas seis localidades.

Nos modelos simulados nessa localidade, os maiores índices de uniformidade das iluminâncias internas foram observados nas simulações com a presença da prateleira plana. Em geral, essa geometria de prateleira proporcionou 5,8% a mais de uniformidade em relação aos modelados com o dispositivo curvo. Em comparação aos modelos sem prateleira de luz, a opção pelo dispositivo, curvo ou plano, alcançou índices de uniformidade 99% superiores, aproximadamente (Gráfico 30).

Gráfico 30: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de Brasília

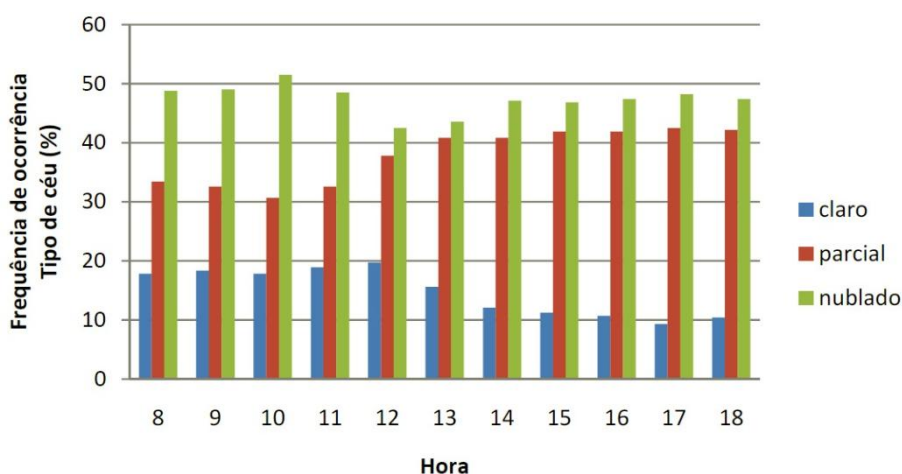


Fonte: O autor.

Em relação à frequência de ocorrência dos tipos de céu da cidade de Brasília, pode-se perceber através da análise do Gráfico 31, que a partir das 12h o percentual de dias no ano registrados com céu claro decai enquanto aumenta o percentual de céu parcialmente encoberto. Essa característica do céu tende a reduzir nesse período a radiação solar direta proveniente da porção oeste da abóbada, onde o sol estará presente nesse horário.

Mesmo com essa característica, Brasília registrou uma ocorrência de 14,7% das horas do período analisado com a ocorrência de céu claro. Entretanto, o percentual de ocorrência de céu parcialmente encoberto foi de 37,9%, enquanto houve registro de 47,4% das horas do ano com céu encoberto.

Gráfico 31: Frequência de ocorrência dos tipos de céu por hora do dia, no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Brasília

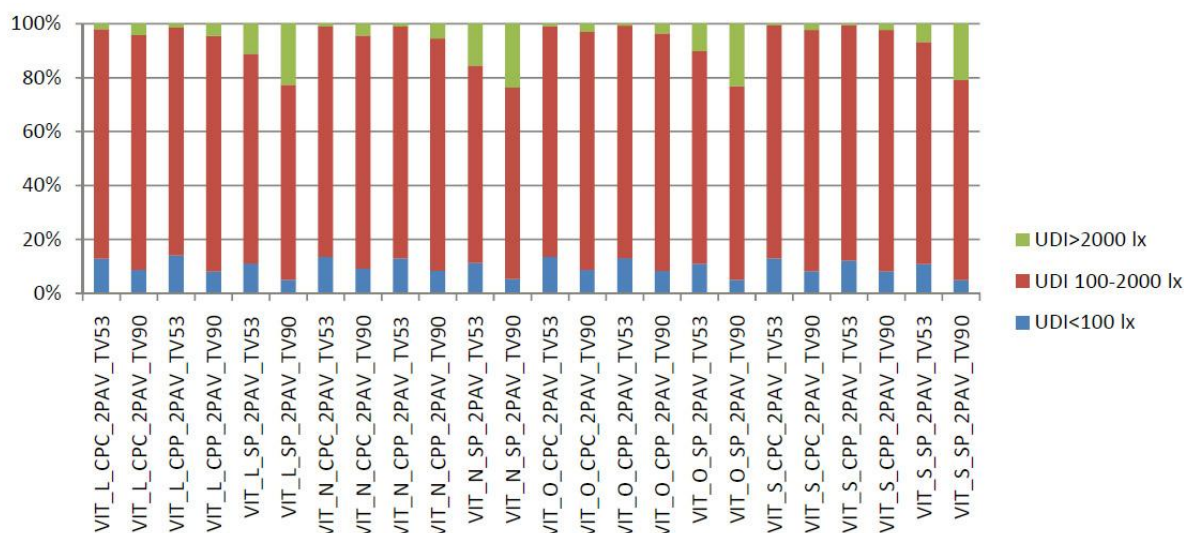


Fonte: O autor.

4.2.4.4 Vitória

Nas simulações realizadas para a cidade de Vitória, foi observada a maior média geral de horas anuais medidas entre 100 e 2000 lx, das quais aproximadamente 83% foram observadas dentro desse intervalo. O maior percentual de iluminância útil – 89,6% – foi registrado no modelo VIT_S_CPC_2PAV_TV90. Em contrapartida, também foram observadas algumas simulações com altos índices de iluminância excessiva, principalmente nos modelos sem dispositivo de proteção solar e com vidro incolor, como destaca o Gráfico 32. Em média, os modelos dessa localidade obtiveram apenas 7,2% das horas medidas acima de 2000 lx e 9,9% registradas com níveis de iluminância insuficientes.

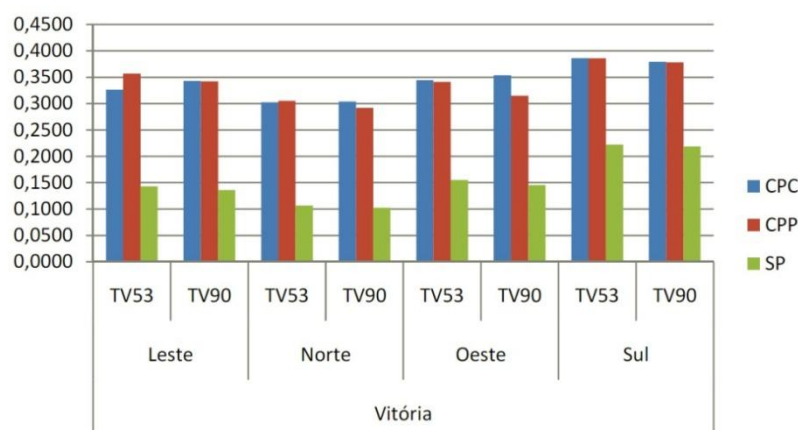
Gráfico 32: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de Vitória



Fonte: O autor.

Na análise dos índices de uniformidade, não é possível destacar uma geometria de prateleira que alcança unanimidade nas comparações. Entretanto, os modelos com algum tipo de prateleira obtiveram, em média, uniformidade superior em 122% em relação aos simulados sem o dispositivo. Os melhores índices de uniformidade foram observados nos modelos referentes à fachada Sul enquanto os piores, à fachada Norte (Gráfico 33). A diferença entre uniformidade observada nos modelos sem prateleira dessas fachadas foi substancial. Os da fachada Sul alcançaram índices 110% superiores em comparação aos da fachada Norte.

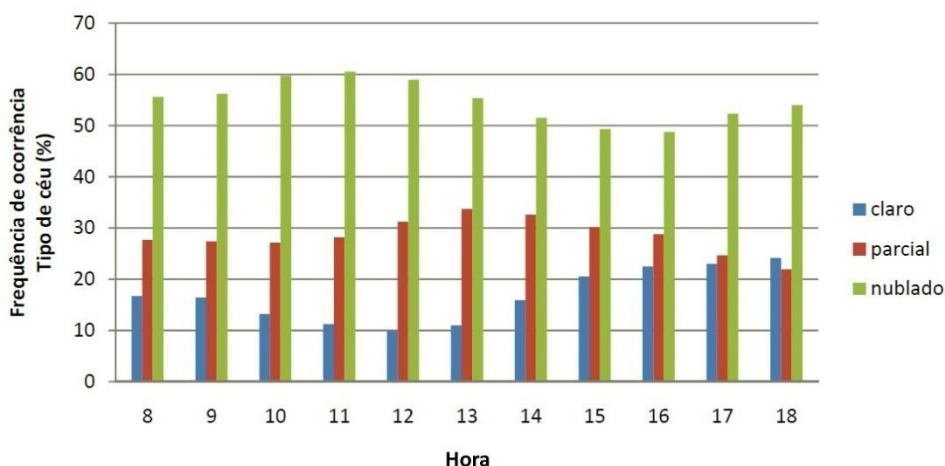
Gráfico 33: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de Vitória



Fonte: O autor.

Segundo os dados disponíveis no arquivo climático do ano de referência, os horários do dia que registraram o menor percentual de horas com céu claro são justamente os horários em que o sol apresenta os maiores ângulos de altura solar, ou seja, os horários em que seriam alcançados os maiores níveis de iluminâncias, como pode ser observado no Gráfico 34. Todavia, o período do dia com a maior ocorrência de céu claro e a menor observação de céu encoberto é justamente após o horário de intervalo para almoço, das 14h às 18h, quando o sol está na porção Oeste da abóbada celeste.

Gráfico 34: Frequência de ocorrência dos tipos de céu no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Vitória, no período de 8h às 18h



Fonte: O autor.

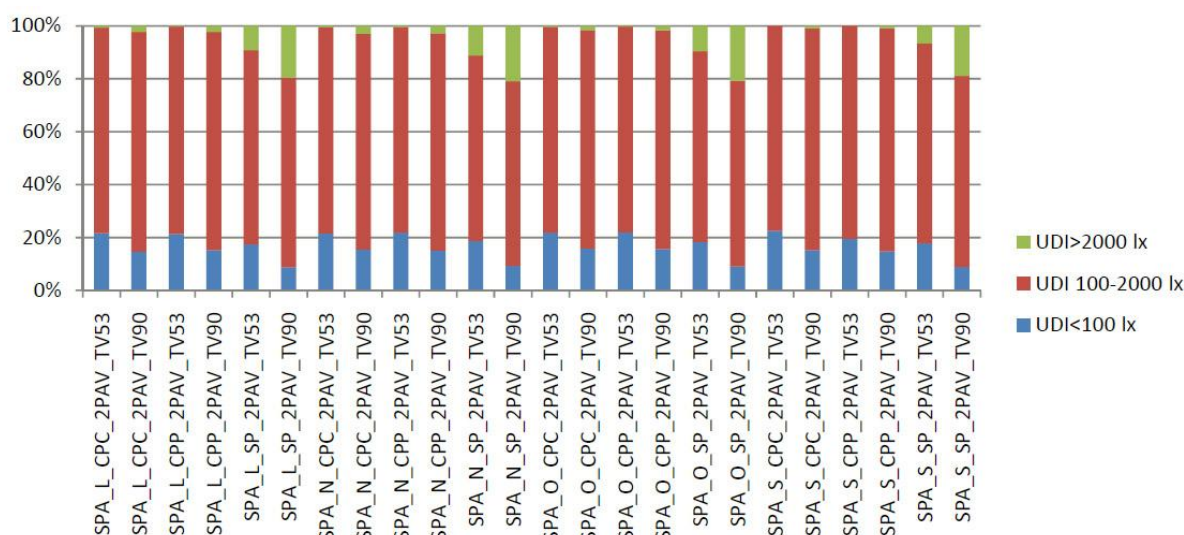
Dentre as localidades analisadas, a cidade de Vitória registrou o segundo maior percentual de horas anuais, compreendidas entre 8h e 18h, com ocorrência de céu encoberto – 54,8% –, reduzindo a disponibilidade de luz natural nessas situações. Entretanto, foi observado que 16,7% das horas foram caracterizadas como de céu claro e 28,5%, com céu parcialmente encoberto.

4.2.4.5 São Paulo

Os modelos simulados para São Paulo obtiveram, em média, um percentual significativo de iluminâncias registradas abaixo de 100 lx. Foram observadas nesse nível considerado insuficiente 16,7% das horas simuladas. Em 7 dos 24 modelos simulados para esta localidade, o percentual de horas registrados com iluminâncias insuficientes superou 21% (Gráfico 35).

Enquanto na média geral, 77,7% das horas do período simulado foram medidas com iluminância útil, apenas 5,6% alcançou iluminâncias excessivas nos pontos de medição. Em dois dos modelos simulados com prateleira e vidro bronze, o percentual de horas observadas com iluminâncias acima de 2000 lx se aproximou de zero.

Gráfico 35: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de São Paulo

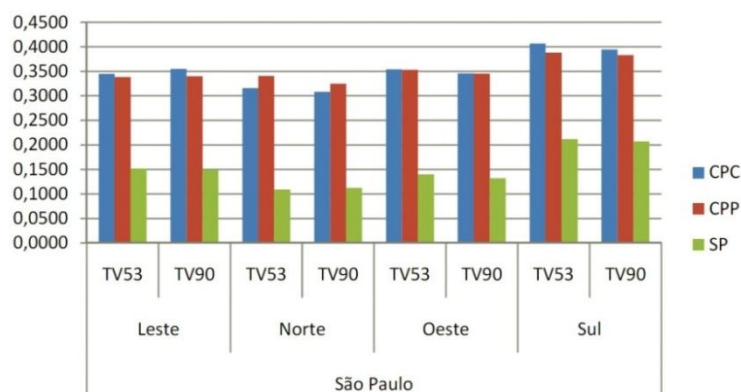


Fonte: O autor.

Através da análise dos índices de uniformidade referentes aos modelos simulados para esta localidade, observou-se que os modelos com prateleiras alcançaram desempenho 132%

superior às salas simuladas sem proteção. A opção pelo dispositivo curvo aumentou em 232% a uniformidade medida na sala orientada para o Norte com o vidro bronze. Em geral, os modelos com prateleiras obtiveram uniformidade média de 0,35, destacando-se, com os maiores índices, os modelos orientados para o Sul. Os modelos orientados para o Norte obtiveram os piores índices nessa avaliação (Gráfico 36).

Gráfico 36: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de São Paulo

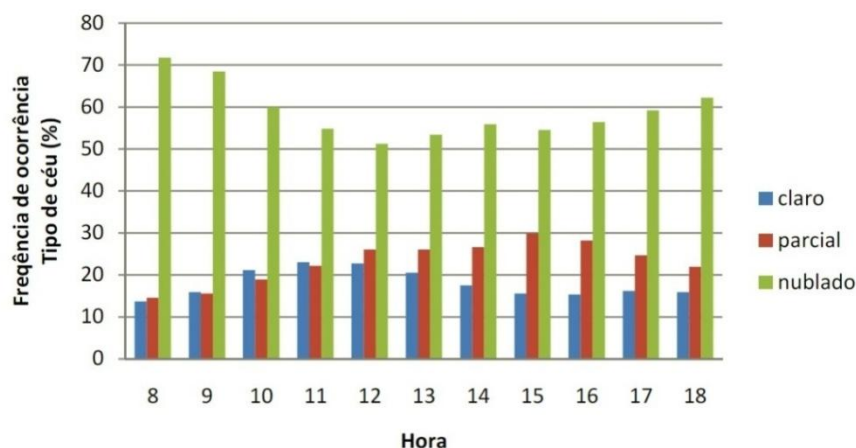


Fonte: O autor.

Em relação à ocorrência dos tipos de céu na cidade de São Paulo, foi observada, através da análise dos dados do arquivo climático do ano de referência, uma frequência de 58,9% das horas analisadas em condições de céu encoberto, caracterizando-a com o maior percentual desse tipo de céu dentre as seis localidades pesquisadas. Entretanto, o céu nublado é mais frequente nas primeiras horas da manhã referentes ao período analisado.

Em 18% das horas anuais do período descrito foram observadas a ocorrência do céu claro, sendo que este é mais frequente no período entre 10h e 14h (Gráfico 37). Outro fato interessante é que a localidade em questão registrou a menor frequência de ocorrência de céu parcialmente encoberto em comparação entre as cidades, apresentando esse tipo de céu em 23,1% das horas analisadas.

Gráfico 37: Frequência de ocorrência dos tipos de céu, por hora, no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de São Paulo, no período de 8h às 18h

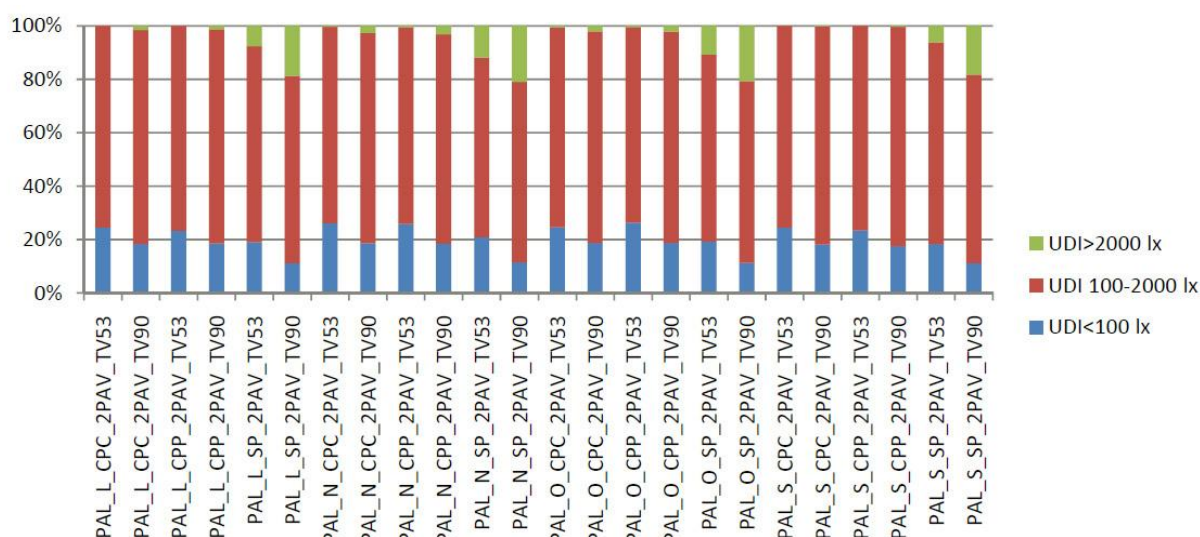


Fonte: O autor.

4.2.4.6 Porto Alegre

Através da análise dos dados disponíveis para a cidade de Porto Alegre, observou-se a pior média de horas medidas no intervalo de iluminância útil, 75,1%, a menor ocorrência de iluminâncias excessivas, 5,4% e o maior percentual de horas com iluminâncias consideradas insuficientes, 19,5%. Destacaram-se nessa última ocasião os modelos com prateleiras combinadas a vidros com menor índice de transmissão à luz visível (Gráfico 38).

Gráfico 38: Percentuais de horas anuais simuladas dentro dos intervalos da UDI, referente a todos os modelos simulados para a cidade de Porto Alegre



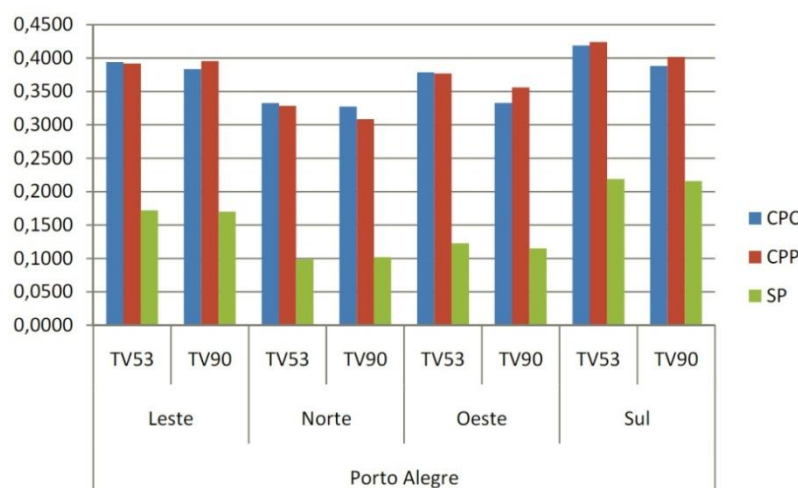
Fonte: O autor.

Nos modelos simulados com as prateleiras, a opção pelo vidro bronze reduziu em aproximadamente 6% a iluminância útil observada nos resultados das simulações. Ao se optar pelo dispositivo, os níveis de iluminância compreendidos entre 100 e 2000 lx aumentavam, em média, 9,1%, contudo, os níveis observados abaixo de 100 lx aumentavam 41,3%. Apesar de serem registrados altos índices de iluminâncias insuficientes nessa capital, os modelos tridimensionais configurados sem prateleiras de luz e com vidro incolor alcançaram valores acima de 18% das horas anuais medidas com iluminância excessiva.

Nessa localidade foi observado o modelo com o pior desempenho em relação à iluminância útil dentre todas as simulações, identificado como PAL_N_SP_2PAV_TV53, cujo percentual de horas anuais analisadas alcançou apenas 67,3%. Outro destaque negativo para esta localidade foi encontrado no modelo PAL_O_CPP_2PAV_TV53, cujo percentual de iluminâncias excessivas excedeu 26% do total de horas anuais investigadas.

Em relação à luz natural admitida no interior do recinto analisado, a opção pelas prateleiras aumentou em 144% os índices de uniformidade nos pontos de medição (Gráfico 39). O maior índice dentre todos os modelos simulados nas seis localidades foi alcançado pelo modelo PAL_S_CPP_2PAV_TV53, com uniformidade superior a 0,42. Os piores desempenhos observados nessa característica da luz natural admitida nessa localidade se encontram na orientação Norte.

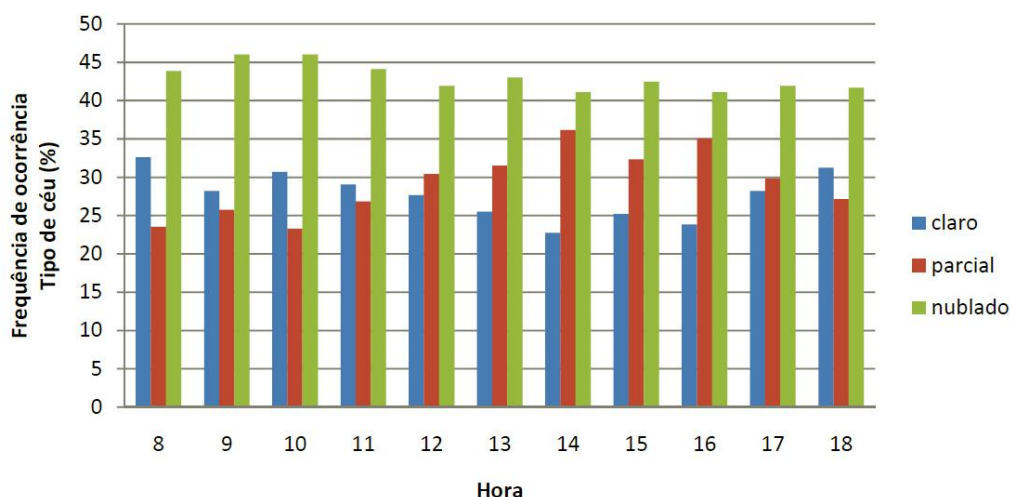
Gráfico 39: Índice de uniformidade dos modelos simulados para a cidade de Porto Alegre



Fonte: O autor.

Os valores de iluminâncias excessivas observadas nos modelos sem o dispositivo de proteção podem ser resultado de uma elevada ocorrência de céu claro nessa localidade, consequentemente, do aparecimento de manchas solares no interior dos ambientes simulados elevando consideravelmente os níveis internos de iluminâncias medidas acima de 2000 lx. No início da manhã e no final da tarde, horários em que o céu apresenta as maiores ocorrências de céu claro (Gráfico 40), é justamente o período em que as prateleiras não fazem a proteção efetiva total da radiação solar direta, pois o sol apresenta ângulos mais baixos na sua trajetória ao longo do dia.

Gráfico 40: Frequência de ocorrência dos tipos de céu, por hora, no ano climático de referência, de acordo com o arquivo CSV da cidade de Porto Alegre, no período de 8h às 18h



Fonte: O autor.

Dentre as cidades pesquisadas, é a que apresenta a maior frequência desse tipo de céu no horário analisado. Em 27,7% das horas foram observados o céu claro, enquanto 29,3% foram registradas com céu parcialmente encoberto e em 43% do período, céu encoberto.

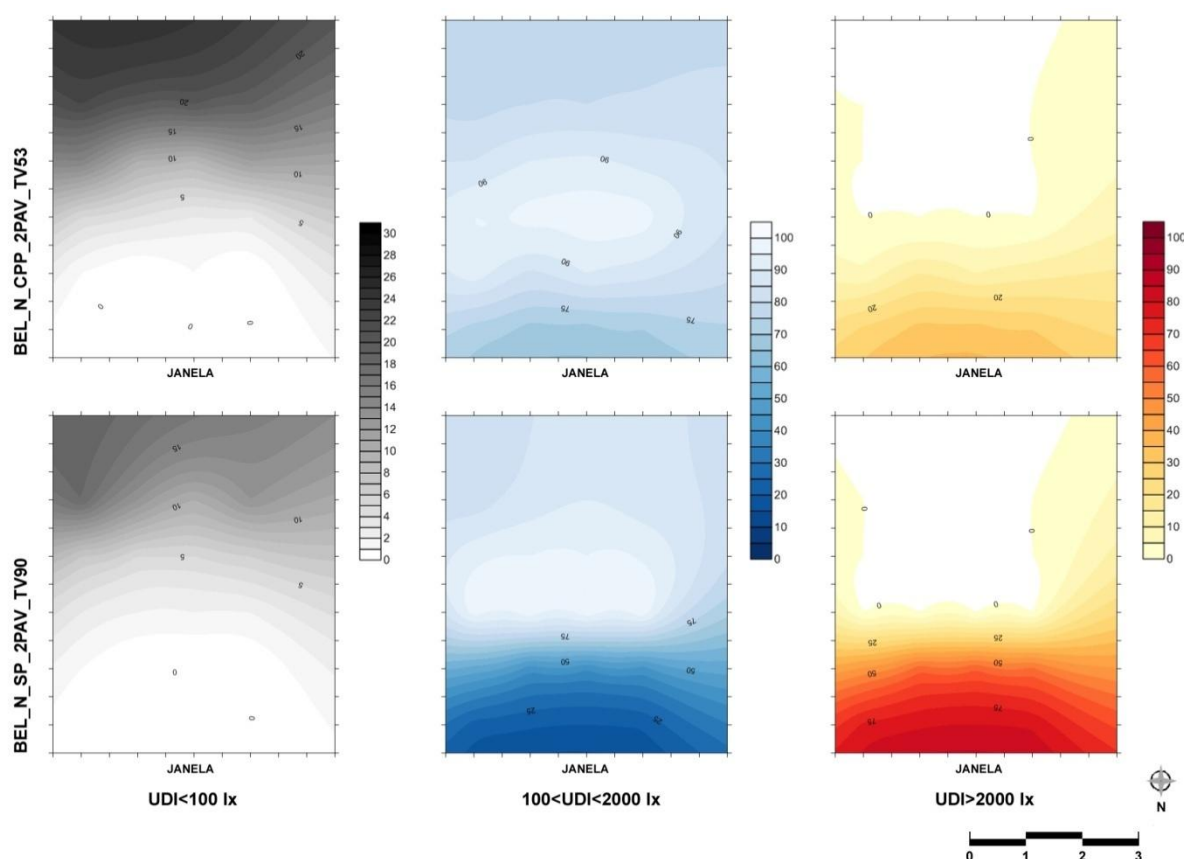
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MELHORES RESULTADOS E O MODELO REFERÊNCIA

Nesta etapa foram selecionados os modelos que obtiveram o maior percentual de horas anuais dentro da faixa de iluminância útil e depois comparados com o modelo de referência que obteve o pior resultado para a mesma orientação. Considerando a necessidade de síntese, foram escolhidos apenas 2 modelos de cada cidade, a serem apresentados e comparados separadamente.

4.3.1 Belém

Dentre os modelos simulados para a cidade de Belém, destacou-se, com o maior percentual de horas dentro do intervalo de iluminâncias compreendido entre 100 e 2000 lx, o modelo BEL_N_CPP_2PAV_TV53, o qual registrou 83,1% das horas anuais dentro desse intervalo. Uma característica negativa desse modelo é o percentual de horas com iluminância insuficiente, que corresponde a 10,5% das horas simuladas. Esse modelo foi comparado ao modelo referência de mesma orientação BEL_N_SP_2PAV_TV90. Na simulação sem prateleira, a quantidade anual de horas cujo valor de iluminância se encontra abaixo de 100 lx foi aproximadamente 30% inferior. Entretanto, esse modelo obteve 340% a mais de horas medidas com iluminância excessiva que a simulação com prateleira e aproximadamente 14,8% a menos de horas medidas com iluminância útil (Figura 30).

Figura 30: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de Belém



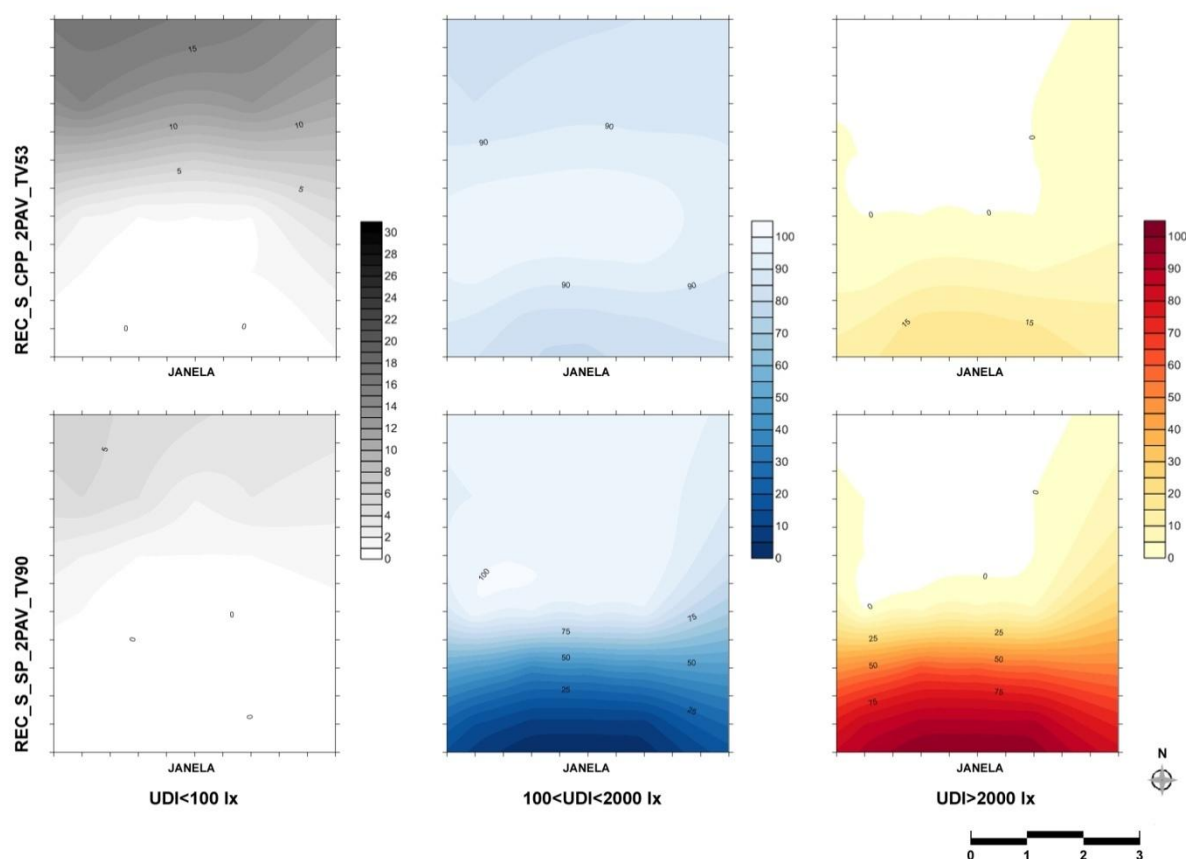
Fonte: O autor.

Como já citado anteriormente, a redução da iluminância excessiva é de grande importância para o conforto visual do usuário, mas, mesmo com a prateleira, ainda é observado esse fato em 6,4% das horas simuladas.

4.3.2 Recife

O modelo simulado em Recife que obteve o maior percentual de horas dentro do intervalo de iluminância útil foi o REC_S_CPP_2PAV_TV53, cujos resultados registraram 90,2% das horas simuladas entre 100 e 2000 lx. Esse modelo com prateleira plana foi comparado ao edifício referência identificado como REC_S_SP_2PAV_TV90, caracterizado por um percentual elevado de horas anuais registradas acima de 2000 lx, alcançando um total de 24,8%, valor 8 vezes superior ao registrado pelo modelo com prateleira (Figura 31).

Figura 31: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de Recife



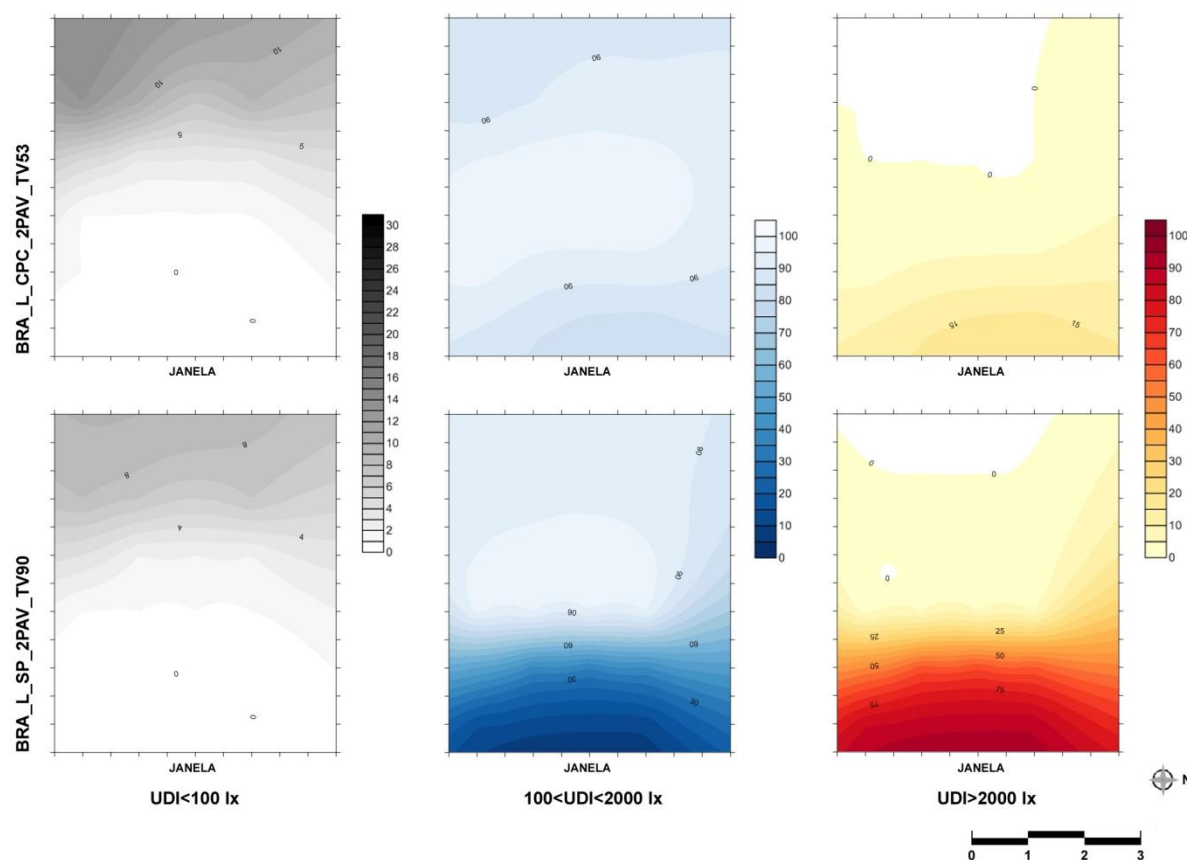
Fonte: O autor.

Em contrapartida, o modelo referência obteve apenas 73,1% das horas simuladas no intervalo de iluminância útil e apenas 2,1%, com iluminância insuficiente. No modelo com a prateleira plana registrou-se um aumento de 3,2 vezes as horas medidas com níveis de iluminância abaixo de 100 lux, aumentando consideravelmente conforme observado Figura 31 o percentual de horas com iluminâncias consideradas insuficiente registradas nos pontos de medição.

4.3.3 Brasília

Dentre as simulações de Brasília, o modelo BRA_L_CPC_2PAV_TV53 alcançou o maior percentual de horas simuladas com iluminâncias entre 100 e 2000 lx, apresentando 91,1% das horas compreendidas no intervalo de iluminância útil. Os dados obtidos dessa simulação foram comparados aos do modelo referência BRA_L_SP_2PAV_TV90. Na comparação entre os modelos, o simulado com a prateleira curva apresentou 1,9% a mais de horas simuladas consideradas insuficientes. A quantidade de horas medida no intervalo de iluminância útil foi 27% superior ao modelo sem o dispositivo, conforme pode ser observado na Figura 32. Na comparação entre os dois modelos, a opção pela prateleira de luz curva reduziu em mais de 86% as horas medidas com iluminâncias excessivas. Esse fato fica evidente na análise das imagens à direita referentes à avaliação das horas com iluminâncias acima de 2000 lx, que podem trazer grande desconforto ao usuário do ambiente.

Figura 32: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de Brasília

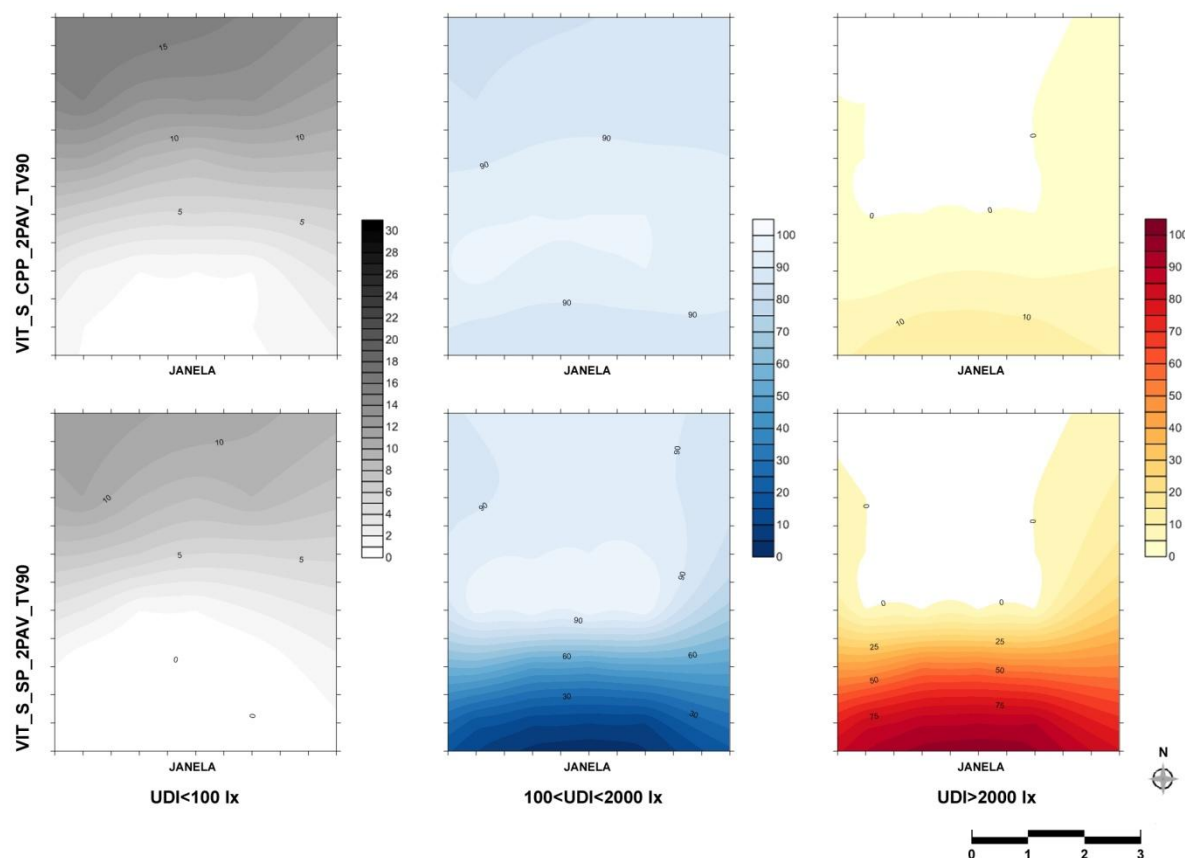


Fonte: O autor.

4.3.4 Vitória

O modelo que alcançou o melhor desempenho simulado para a cidade de Vitória foi o VIT_S_CPP_2PAV_TV90. Esse modelo alcançou um percentual de 89,6% das horas anuais simuladas entre 100 e 2000 lux. O mesmo foi então comparado ao modelo referência, de mesma orientação, VIT_S_SP_2PAV_TV90. O primeiro modelo aumentou em quase 21%, em relação ao edifício referência o percentual de horas dentro desse intervalo e reduziu em 89% as horas cujas iluminâncias são consideradas excessivas. Entretanto, também foi observado um acréscimo de 62% de horas anuais com iluminâncias inferiores a 100 lux (Figura 33).

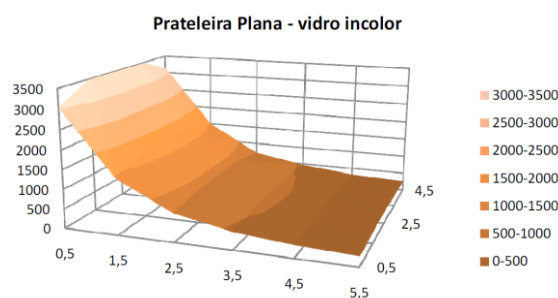
Figura 33: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de Vitória



Fonte: O autor.

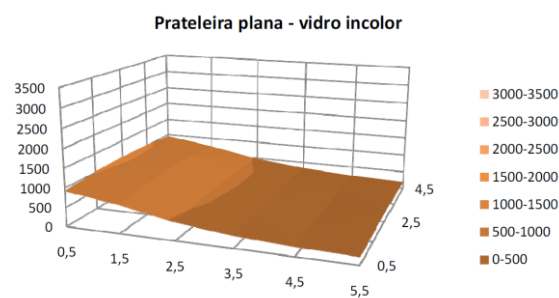
Em relação à uniformidade, é possível observar na comparação entre as Figuras 34 e 35 a capacidade do dispositivo proposto em equilibrar os níveis internos de iluminância provenientes da luz natural admitida pela abertura lateral. Dentre as comparações entre os modelos das seis cidades nessa última etapa da pesquisa, foi o que mais se destacou na uniformização da luz natural admitida no interior do ambiente analisado.

Figura 34: Níveis médios de iluminâncias do modelo Sul, 2º pavimento, sem dispositivo de proteção solar e vidro incolor



Fonte: O autor.

Figura 35: Níveis médios de iluminâncias do modelo Sul, 2º pavimento, com prateleira plana e vidro incolor

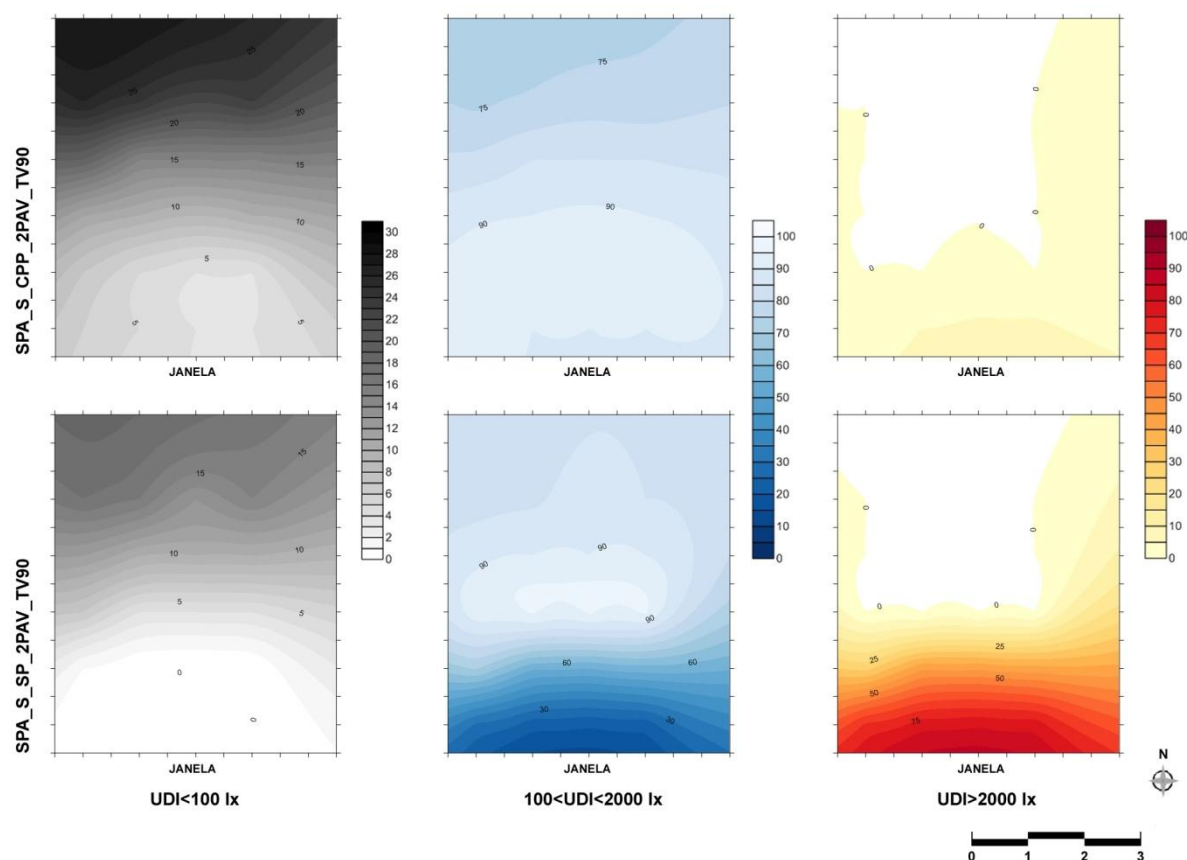


Fonte: O autor.

4.3.5 São Paulo

Nas simulações de São Paulo, a que alcançou maior percentual de horas dentro do intervalo de iluminância útil é identificada como SPA_S_CPP_2PAV_TV90. Esse modelo, cujo percentual de iluminância útil alcançou 84,5% das horas analisadas, foi comparado ao modelo de mesma orientação, porém sem o dispositivo de proteção e redirecionamento de luz denominado SPA_S_SP_2PAV_TV90. Os dados referentes à simulação sem prateleira apresentaram 14,4% a menos de horas medidas com iluminâncias entre 100 e 2000 lx. Entretanto, esse modelo alcançou um menor percentual inferior de horas com iluminâncias abaixo de 100 lx. Nesse caso, a opção pelo dispositivo aumentou em 67% a quantidade de horas nesse intervalo. Todavia, a opção pela prateleira fez reduzir consideravelmente as horas medidas com iluminâncias excessivas, resultando em uma diminuição de aproximadamente 96% no período analisado (Figura 36).

Figura 36: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de São Paulo

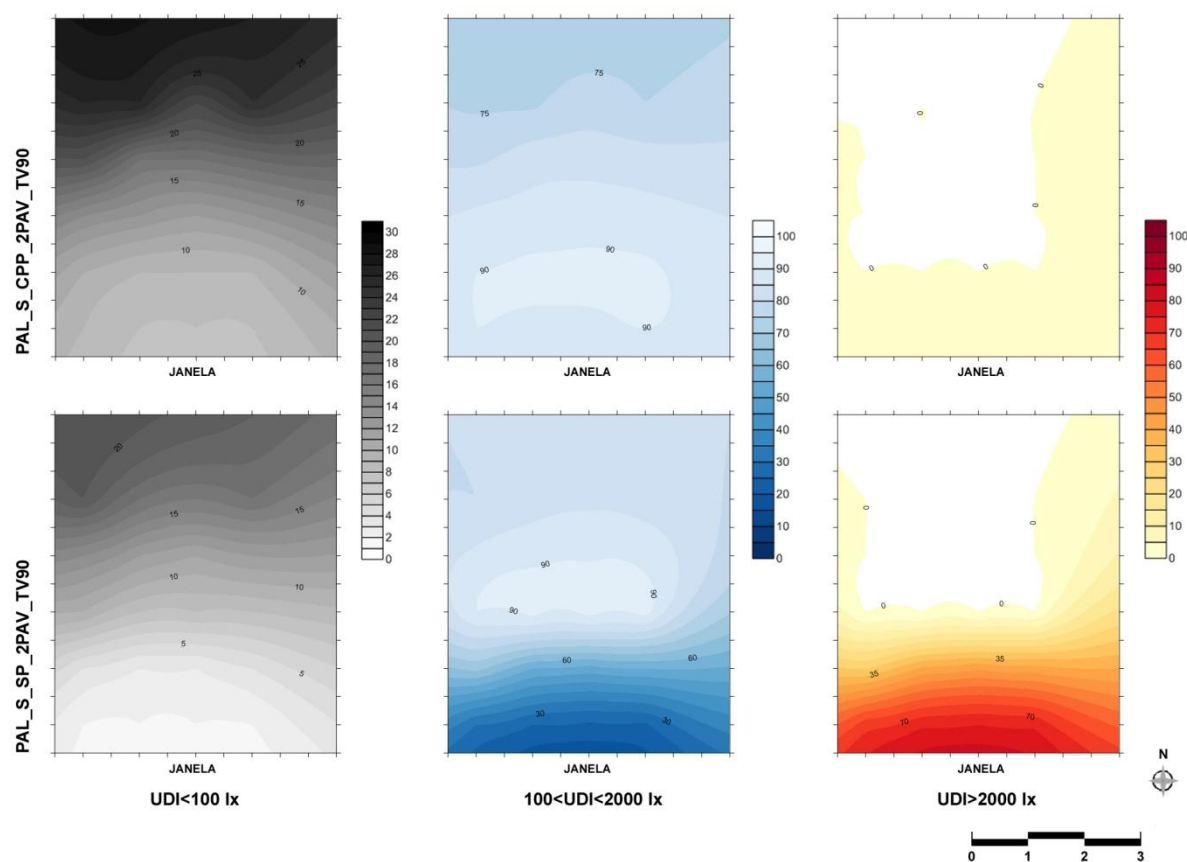


Fonte: O autor.

4.3.6 Porto Alegre

O modelo simulado para Porto Alegre que obteve o maior percentual de horas medidas com iluminância útil foi o PAL_S_CPP_2PAV_TV90. Essa simulação alcançou um percentual de 82,2% das horas anuais simuladas entre 100 e 2000 lux. O mesmo foi comparado ao modelo referência PAL_S_SP_2PAV_TV90. Este último apresentou uma redução de 14% das horas simuladas nesse intervalo de iluminâncias, mas também uma diminuição de 37% das horas medidas abaixo de 100 lx. Um ponto de destaque nessa comparação foi a avaliação das horas com iluminância excessiva, na qual a opção pela adoção do modelo com prateleira plana reduziu em quase 99% os horários registrados com iluminâncias acima de 2000 lx (Figura 37). Essa diminuição é importante para o conforto visual do usuário interno visto que no modelo com prateleira, o percentual de horas anuais medidas com iluminâncias que poderiam causar o desconforto térmico, lumínico ou ambos se reduziu a quase 0 (zero).

Figura 37: Comparativo dos intervalos da UDI entre os modelos com melhor e pior percentuais de iluminância útil para a cidade de Porto Alegre



Fonte: O autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou evidenciar a influência das prateleiras de luz no conforto visual do usuário de edifícios de escritórios sob influência do entorno obstruído, a fim de se obter uma maior aproximação com a situação encontrada nos centros urbanos verticalizados. Para isso, foram definidos modelos referenciais de edifícios e suas variações com os dispositivos de proteção e redirecionamento de luz natural, os quais foram simulados em 6 cidades do território brasileiro – Belém, Recife, Brasília, Vitória, São Paulo e Porto Alegre –, selecionadas por suas latitudes. Esses modelos foram configurados com obstrução no entorno, simulando edificações vizinhas, e analisados em diferentes pavimentos no mesmo edifício, numa primeira etapa de simulações, e posteriormente, em diferentes orientações. A análise foi feita com os dados de saída do *software* Daysim, para verificação dos índices de uniformidade e dos indicadores dinâmicos do desempenho da luz natural – UDI e DA.

Os programas utilizados se mostraram adequados a essa pesquisa, permitindo a modelagem de edifícios tridimensionais simulando um cenário real com elementos externos e simplificando a extração dos dados referentes aos indicadores utilizados para avaliação do desempenho da luz natural admitida.

Através da análise das simulações realizadas dos modelos sem prateleiras de luz, verificou-se que a simples adoção de um vidro com menor transmissão à luz visível não é o suficiente para garantir condições de conforto visual no interior do recinto. A principal característica obtida através dessa opção é a redução significativa dos níveis internos de iluminâncias, que pode ser vantajoso nos períodos de luminosidade excessiva, mas também pode ser prejudicial nos períodos em que há pouca disponibilidade de luz natural na abóbada celeste, como é o caso dos dias em que o céu se encontra encoberto e o sol está em altitudes baixas na sua trajetória.

De modo geral, os edifícios sem as prateleiras apresentaram índices de uniformidade baixos, caracterizando a iluminação nos espaços com altos níveis próximos à abertura e baixos níveis à medida que os pontos de medição se afastam da janela.

Em contrapartida, as análises dos dados de saída das simulações de iluminação natural evidenciam a capacidade de uniformização da luz natural admitida pelas aberturas com as prateleiras de luz, demonstrando a melhora no conforto lumínico interno em relação a esta característica. Em todas as situações pesquisadas, as duas geometrias propostas – prateleiras

plana ou curva – obtiveram uniformidade superior aos modelos sem esses dispositivos, aumentando, em média, em 109,5% esse índice.

Sobre as duas geometrias das prateleiras de luz propostas nessa pesquisa, de modo geral não foi observada uma melhora significativa nos índices analisados em relação a um ou outro modelo. Cada geometria ganhou um discreto destaque em diferentes situações. Sendo assim, para os modelos simulados, não se justifica a adoção de uma geometria mais complexa de execução, como é o caso da prateleira curva, visto que não proporcionou melhoras significativas para os quesitos avaliados.

Porém, as duas geometrias de prateleira de luz também se mostraram eficientes no aumento do percentual das horas anuais dentro do intervalo de iluminância útil e reduzindo a quantidade de horas medidas com iluminância excessiva no plano de trabalho. De modo geral, nos modelos simulados no segundo pavimento e com obstrução, a opção pelas prateleiras aumentou, em média para todas as latitudes, 13% a quantidade de horas no intervalo de UDI entre 100 lx e 2000 lx.

O fato mais relevante em relação à análise através dos intervalos da UDI foi que os modelos simulados com as prateleiras de luz reduziram, em média, 73,5% as horas registradas com iluminâncias excessivas, contribuindo para o conforto visual do usuário interno.

Entretanto, a opção por um desses dispositivos propostos na pesquisa também apresentou um lado negativo. Dentre todas as simulações realizadas na segunda etapa, os modelos simulados com as prateleiras aumentaram em média 27% a quantidade de horas anuais registradas com iluminâncias insuficientes.

Através das análises dos resultados referentes às simulações dos modelos investigados nessa pesquisa, verificou-se a influência do entorno construído na admissão da luz natural. Ressalta-se, com isso, a importância de se estudar o entorno ao se projetar um edifício e sua envoltória real ou prevista, visto que as características das obstruções dos edifícios vizinhos influenciam significativamente nas características da luz natural admitida no interior do ambiente.

Quando numa situação de obstrução de parte da abóbada celeste pelas edificações no entorno, as prateleiras de luz também se mostraram eficientes em todas as orientações, inclusive em orientações consideradas desfavoráveis, como a Leste e Oeste, cujo sol, em sua trajetória, alcança baixas altitudes, podendo penetrar pelas aberturas laterais e prejudicar o uso do

ambiente em função da ocorrência de manchas solares indesejáveis em seu interior. Nessas orientações, as obstruções do entorno colaboram para o bloqueio da radiação solar direta proveniente de menores altitudes do sol, reduzindo as iluminâncias excessivas no recinto.

Uma característica interessante observada nessa pesquisa é que, sob condições de obstrução do entorno, em geral, os modelos simulados na fachada Sul alcançaram desempenho superior aos demais. Esse fato ressalta a importância do estudo do entorno e das características do clima do sítio no desenho da arquitetura, visto que, em diversas pesquisas realizadas que não consideraram o entorno obstruído, observa-se um desempenho superior dos modelos simulados com aberturas voltadas para a orientação Norte.

Em relação à metodologia adotada nessa pesquisa, observa-se que os procedimentos colaboraram para o alcance do objetivo proposto. As análises dos dados de saída das simulações permitiram concluir que as alterações nas características da envoltória do edifício e do entorno são muito importantes para um melhor aproveitamento da luz natural e, conseqüentemente, para o conforto do usuário no interior dos edifícios. Dentre os muitos resultados observou-se que soluções simples, como a substituição do tipo de vidro das aberturas não são suficientes para garantir o conforto do usuário no interior dos ambientes. Conclui-se que o estudo de técnicas e sistemas de aproveitamento da iluminação natural devem ocorrer simultaneamente ao desenvolvimento das soluções de arquitetura, considerando sua importância para o conforto ambiental dos usuários e a eficiência energética do edifício. Sobretudo, a adoção das prateleiras de luz se apresentou como solução mais adequada às características das trajetórias solares nas cidades analisadas do que o uso de envoltórias sem proteção, mesmo em condições de obstrução do entorno.

A fim de testar e aperfeiçoar as metodologias utilizadas nesse trabalho recomenda-se para pesquisas futuras:

- Realizar estudos semelhantes com simulações integradas de iluminação e eficiência energética;
- Avaliar estudos similares com outras configurações e geometrias de ambientes a fim de proporcionar uma visão mais abrangente sobre o tema pesquisado;
- Analisar outros fatores do conforto ambiental como o ofuscamento provocado pelo brilho excessivo das janelas ou das fachadas das edificações do entorno;



- Analisar a influência de outros tipos de vidro, disponíveis no mercado mundial, com diferentes índices de transmissividade à luz visível; e
- Comparar resultados obtidos das simulações computacionais a modelos reais.

6 REFERÊNCIAS

- AMORIM, C. N. D. et al. Simulação de iluminação natural em cidades brasileiras: a influência da profundidade dos ambientes residenciais. *In: XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. Anais.* Búzios-RJ, 2011.
- ARAÚJO, I. A. L. de; CAVALCANTE, M. R. C.; CABÚS, R. Influência de prateleira de luz sob marquise na uniformidade da iluminação natural em interiores. *In: ENCAC – ELACAC 2005. Anais.* Maceió, 2005, p. 280-288.
- ARSENAUT, H.; HÉBERT, M.; DUBOIS, M. C. Effects of glazing colour type on perception of daylight quality, arousal, and switch-on patterns of electric light in office rooms. **Building and Environment**, n. 56, p. 223-231, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO/CIE 8995-1.** Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- 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 15215-4:** Iluminação natural – Parte 4: verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição. Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16401-3:** Instalações de ar condicionado – Sistemas Centrais e Unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- BAKER, N.; STEEMERS, K. **Daylighting design of buildings.** London: James & James (Science Publishers) Ltd, 2002.
- BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, K. **Daylighting in Architecture – A European Reference Book.** London: Earthscan Ltd, 2010.
- BERNABÉ, A. C. A. **A influência da envoltória no consumo de energia em edifícios comerciais artificialmente climatizados na cidade de Vitória-ES.** 130p. Dissertação de Mestrado. UFES. Vitória, 2012.
- BORBA, I. M. M. **Avaliação do potencial de prateleiras de luz na distribuição da luz natural: estudo em modelo reduzido.** 160 p. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET/PR. Curitiba, 2003.
- BORMANN, O. R. **Iluminação natural em salas de aula e escritórios com o uso de prateleiras de luz.** 123 p. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET/PR. Curitiba, 2003.
- BOYCE, P. R. **Human Factors in Lighting.** 3.ed. New York: Taylor & Francis Group, 2014.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás. Procel Edifica. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso (Ano-Base 2005):** classe comercial alta tensão: relatório

Brasil. 2008. Disponível em:

<<http://www.procelinfo.com/>>. Acesso em: 25 abr. 2013.

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

CÂNDIDO, C.; TORRES, S.; CABÚS, R. Análise da utilização de prateleiras de luz em edifício de pesquisas da UFAL, Maceió-AL. In: ENCAC – ELACAC 2005. **Anais**. Maceió, 2005, p. 83-91.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-residenciais**. Dissertação de Mestrado. UFSC. 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**.

CASAGRANDE, B. G. **Cenários climáticos futuros: diagnóstico prospectivo do desempenho termoenergético de edifícios comerciais no Brasil para o século XXI**. 135p. Dissertação de Mestrado. UFES. Vitória. 2013.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em Busca de uma Arquitetura Sustentável para os Trópicos**. Editora Revan, 2003.

CUNHA, E. G. da. **Elementos de arquitetura de climatização natural: método projetual buscando a eficiência nas edificações**. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2006.

DIDONÉ, E. L. **A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC**. 174 p. Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 2009.

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

DUBOIS, M. C.; BLOMSTERBERG, A. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review. **Energy and Buildings**, n.43, p.2572-2582, 2011.

ENERGYPLUS. Getting Started with EnergyPlus. 2010. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

FARACO, R. M.; SANTOS, C. M. L.; PORTO, M. M. Conforto visual: uma reflexão sobre o conceito e fatores influentes. In: Nutau 2006. Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade, 2006.

FONTENELLE, M. R. **A abordagem multicritério na concepção arquitetônica: um estudo sobre as aberturas laterais em edifício de escritórios no Rio de Janeiro**. 130p. Dissertação de Mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.

FOSSATI, M. **Metodologia para avaliação da sustentabilidade de projetos de edifícios: o caso de escritórios em Florianópolis**. Tese de doutorado. UFSC. Florianópolis, 2008.

- FRANCO, I. M. Efficacy of Light Shelves: Passive, Dinamic and Automatic Devices Related to Light and Thermal Behavior. In: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference, 2007, Clearwater Beach, Florida. Proceedings Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X. Atlanta -USA: ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., 2007.
- FREEWAN, A. A.; SHAO, L.; RIFFAT, S. Optimizing performance of the lightshelf by modifying ceiling geometry in highly luminous climates. **Solar Energy**, n.82, p.343-353, 2008.
- FREEWAN, A. A. Maximizing the lightshelf performance by interaction between lightshelf geometries and curved ceiling. **Energy Conversion and Management**, n.51, p.1600-1604, 2010.
- FROTA, A. B; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2003.
- GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras**. 2ª ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.
- HELANDER, M. G.; ZHANG, L. Field studies of comfort and discomfort in sitting. **Ergonomics**, v.40, p.895-915, 1997.
- HESCHONG, L. Daylighting and Human Performance. **ASHRAE Journal**, June, p.65-67, 2002.
- HO, M.C.; CHIANG, C. M.; CHOU, P. C.; CHANG, K. F.; LEE, C. Y. Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classrooms. **Energy and Buildings**, n.40, p.1844-1855, 2008.
- HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Iluminação natural**. 2ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1980.
- JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. The ‘adaptive zone’ – A concept for assessing discomfort glare throughout daylit spaces. **Lighting Research and Technology**, n.44, p.149-170, 2012.
- JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations. **Solar Energy**, v.93, p. 127-143, 2013.
- KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LABEEEE. Seção Downloads. Arquivos climáticos em formato EPW. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads>>. Acesso em: 18 fev. 2013.
- LAM, W. M. C. **Sunlighting as formgiver for architecture**. New York: Van Nostrand Reinold Company Inc., 1986.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª ed. São Paulo, 2014.

- 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.
- LARANJA, A. C. **Parâmetros urbanos e a disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno**. Tese de Doutorado. 285p. UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.
- LARANJA, A. C.; GAZZANELO, L. M. C.; CABÚS, R. C. **Interferências da largura das vias na disponibilidade de iluminação natural do ambiente interno**. Revista Labor & Engenho, n.1, v.3, p.55-69, 2009.
- LI, D. H. W.; CHEUNG, G. H. W.; CHEUNG, K. L.; LAM, T. N. T. Determination of vertical daylight illuminance under non-overcast sky conditions. **Building and Environment**, n. 45, p.498–508, 2010.
- LI, D. H. W.; TSANG, E. K. W. An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong Kong. **Building and Environment**, n. 43, p. 1446–1458, 2008.
- LIM, Y. W.; KANDAR, M. Z.; AHMAD, M. H.; OSSEN, D. R.; ABDULLAH, A. M. Building façade design for daylighting quality in typical government office building. **Building and Environment**, n.57, p.194-104, 2012.
- LIMA, M. R. C. de. **Percepção visual aplicada à arquitetura e à iluminação**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2010.
- LITTLEFAIR, P. J.; AIZLEWOOD, M. E.; BIRTLES, A. B. The performance of innovative daylighting systems. **Renewable Energy**, v.5(II), p.920-934,1994.
- MAIOLI, R. N.; ALVAREZ, C. E. de. Análise da utilização de prateleiras de luz em Vitória-ES (Brasil). **Revista Hábitat Sustentável**, n.1, v.3, p.37-46, 2013.
- MAIOLI, R. N.; TAUFNER, M. D.; ALVAREZ, C. E. de. Impacto da escolha do vidro em aberturas associado ao dispositivo prateleira de luz para o conforto visual em ambientes de escritório. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2014. **Anais**. Guimarães, 2014, p. 197-206.
- MAYHOUB, M. S.; CARTER, D. J. The costs and benefits of using daylight guidance to light office buildings. **Building and Environment**, n. 46, p. 698-710, 2011.
- MESA, N. A.; CORICA, L.; PATTINI, A. Evaluation of the potential of natural light to illuminate buildings in dense urban environment. A study in Mendoza, Argentina. **Renewable Energy**, n. 36, p. 2414-2423, 2011.
- NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, n.38, p.905-913, 2006.
- OCHOA, C. E.; CAPELUTO, I. G. Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates. **Building and Environment**, n.41, p.1128-1135, 2006.
- PEREIRA, R. C.; PEREIRA, F. O. R.; CLARO, A. Caracterização da contribuição do entorno na avaliação da iluminação natural em edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 103-115. 2008.

- 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.05, p.271-289, 1990.
- PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution – preliminary configuration and validation. **Solar Energy**, n.50, v.3, p.235-245, 1993.
- PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, n. 40, p. 394-398, 2008.
- PORTO, M. M.; FONSECA, I. Madrid-Barajas: Uma experiência vivenciada dos espaços iluminados do aeroporto espanhol. **Lume Arquitetura**, São Paulo, v. 29, p. 36-38, 2007.
- RAPHAEL, B. Active control of daylighting features in buildings. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, n.26, p.393-405, 2011.
- REINHART, C. F. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Ottawa: Institute for research in Construction National Research Council Canada, 2006.
- REINHART, C.; FITZ, A. Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design. **Energy and Buildings**, n.38, p.824–835, 2006.
- REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. **Leukos**, v. 3, n. 1, 2006.
- REINHART, C.; WALKENHORST, O. Valiadation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test Office with external blinds. **Energy and Buildings**, n.33, p.683-697, 2001.
- REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The daylighting dashboard e A simulation-based design analysis for daylit spaces. **Building and Environment**, n.46, p.386-396, 2011.
- RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. 2ª ed. Porto Alegre: D. C. Luzzatto Editores, 1986.
- ROSIM, C. A. **Comportamento de prateleira de luz em modelo físico sob céu real na cidade de Campinas, SP**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.
- RUCK, N. C. International Energy Agency's Solar Heating and Cooling Task 31, 'Daylighting Buildings in the 21st Century'. **Energy and Buildings**, n.38, p.718–720, 2006.
- RUPP, R. F. **Dimensionamento de área de janela em edificações comerciais: integração da iluminação natural com a artificial e utilização da ventilação híbrida**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.
- SANATI, L.; UTZINGER, M. The effect of window shading design on occupant use of blinds and electric lighting. **Building and Environment**, n. 64, p. 67-76, 2013.
- SANTANA, M. V. **Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis - SC**. Dissertação de Mestrado. UFSC. Florianópolis, 2006.
- SANTOS, C. M. L. **O projeto de iluminação para edifícios de escritórios - Influência das variáveis arquitetônicas no comportamento da luz natural e conforto visual**. Dissertação de mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, I. G.; SOUZA, R. V. G. Proteções solares no Regulamento brasileiro de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 227-241, 2012.

SANTOS, L. S. **Requisitos de iluminação natural nos sistemas de avaliação de edifícios e impactos energéticos em edificações comerciais no Brasil**. Dissertação de mestrado. UFES. Vitória, 2012.

SHEN, H.; TZEMPELIKOS, A. Daylighting and energy analysis of private offices with automated interior roller shades. **Solar Energy**, n.86, p.681-704, 2012.

SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; LAMBERTS, R. **Sombrear ou não sombrear janelas**. Nota técnica n. 02/2011. Florianópolis: LABEEE, 2011.

STRØMANN-ANDERSEN, J.; SATTRUP, P.A. The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. **Energy and Buildings**, n.43 p.2011–2020, 2011.

TAGLIABUE, L. C.; BUZZETTI, M.; AROSIO, B. Energy saving through the sun: Analysis of visual comfort and energy consumption in office space. **Energy Procedia**, n.30, p.693-703, 2013.

TREGENZA, P.; WATERS, I. Daylight coefficients. **Lighting Research and Technology**, n.15, v.2, p.65-71, 1983.

TZEMPELIKOS, A.; ATHIENITIS, A. K. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. **Solar Energy**, n.81, p.369-382, 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: 06 jul. 2013.

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

WARD, G. Radiance Tutorial. Building Technologies Department. Lawrence Berkeley Laboratory. 1993. Disponível em: <<http://radsite.lbl.gov/radiance/>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

XUE, P.; MAK, C. M.; CHEUNG, H. D. New static lightshelf system design of clerestory windows for Hong Kong. **Building and Environment**, v.72, p. 368-376, 2014.

YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. **Energy and Buildings**, n. 54, p. 243-251, 2012.

YUN, G.; KIM, K. S. An empirical validation of lighting energy consumption using the integrated simulation method. **Energy and Buildings**, n. 57, p. 144-154, 2013.

ZHANG, J.; HELANDER, M.; DRURY, C. G. Identifying factors of comfort and discomfort in seating. **Human Factors**, n.38, p.377-389, 1996.



APÊNDICE A – Resultado extraídos das simulações no *software* Daysim

Tabela 5: Resultados das cidades de Belém, Recife e Brasília referentes à primeira etapa de simulações.

Percentual de horas anuais (%)					
cidade	modelo	UDI<100 lx	UDI 100-2000 lx	UDI>2000 lx	DA
Belém	BEL_N_CPP_2PAV_TV53	10,5	83,1	6,4	41,7
	BEL_N_CPP_2PAV_TV90	6,4	79,8	13,8	53,6
	BEL_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	2,6	83,5	13,9	68,8
	BEL_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	1,4	72,5	26,1	80,6
	BEL_N_CPP_7PAV_TV53	9,9	79,0	11,1	48,7
	BEL_N_CPP_7PAV_TV90	5,7	73,6	20,7	60,5
	BEL_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	2,2	80,0	17,8	71,5
	BEL_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	1,3	70,2	28,5	81,5
	BEL_N_CPP_10PAV_TV53	3,3	80,8	15,9	62,8
	BEL_N_CPP_10PAV_TV90	1,1	71,6	27,3	80,1
	BEL_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	2,3	79,0	18,7	72,3
	BEL_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	1,3	69,4	29,3	82,1
Recife	REC_N_CPP_2PAV_TV53	6,8	88,6	4,6	44,4
	REC_N_CPP_2PAV_TV90	4,1	84,5	11,4	56,7
	REC_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	0,6	86,2	13,2	74,8
	REC_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	0,3	71,3	28,4	87,7
	REC_N_CPP_7PAV_TV53	3,4	84,8	11,8	57,6
	REC_N_CPP_7PAV_TV90	1,9	76,5	21,6	67,9
	REC_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	0,4	81,5	18,1	80,0
	REC_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	0,1	67,8	32,1	90,2
	REC_N_CPP_10PAV_TV53	1,0	84,5	14,5	67,3
	REC_N_CPP_10PAV_TV90	0,5	73,2	26,3	81,1
	REC_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	0,5	80,2	19,3	80,0
	REC_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	0,2	69,5	30,3	89,6
Brasília	BRA_N_CPP_2PAV_TV53	11,0	85,9	3,1	37,6
	BRA_N_CPP_2PAV_TV90	6,2	84,7	9,1	49,7
	BRA_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	1,0	85,1	13,9	73,1
	BRA_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	0,6	74,3	25,1	83,1
	BRA_N_CPP_7PAV_TV53	5,5	84,2	10,3	52,5
	BRA_N_CPP_7PAV_TV90	3,4	76,5	20,1	61,8
	BRA_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	0,9	80,9	18,2	76,0
	BRA_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	0,5	70,0	29,5	85,3
	BRA_N_CPP_10PAV_TV53	2,1	83,2	14,7	65,1
	BRA_N_CPP_10PAV_TV90	1,0	74,1	24,9	78,2
	BRA_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	0,9	80,6	19,5	76,7
	BRA_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	0,5	70,1	29,4	85,7

Fonte: O autor



Tabela 6: Resultados das cidades de Vitória, São Paulo e Porto Alegre referentes à primeira etapa de simulações.

Percentual de horas anuais (%)					
cidade	modelo	UDI<100 lx	UDI 100-2000 lx	UDI>2000 lx	DA
Vitória	VIT_N_CPP_2PAV_TV53	13,0	86,0	1,0	33,7
	VIT_N_CPP_2PAV_TV90	8,4	86,1	5,5	44,3
	VIT_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	3,1	87,0	9,9	67,3
	VIT_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	1,8	78,2	20	78,8
	VIT_N_CPP_7PAV_TV53	7,4	85,8	6,8	47,6
	VIT_N_CPP_7PAV_TV90	5,3	80,4	14,3	55,7
	VIT_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	2,7	82,6	14,7	70,8
	VIT_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	1,4	74,5	24,1	81,4
	VIT_N_CPP_10PAV_TV53	3,8	85,7	10,5	59,8
	VIT_N_CPP_10PAV_TV90	2,6	76,3	21,1	71,0
	VIT_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	2,6	82,3	15,1	72,5
	VIT_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	1,5	72,8	25,7	82,2
São Paulo	SPA_N_CPP_2PAV_TV53	21,8	77,7	0,5	24
	SPA_N_CPP_2PAV_TV90	15	82,3	2,7	34,3
	SPA_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	7,2	87,3	5,5	55,4
	SPA_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	4,6	79,8	15,6	68,5
	SPA_N_CPP_7PAV_TV53	12,7	81,1	6,2	42,1
	SPA_N_CPP_7PAV_TV90	9,3	79,2	11,5	49,1
	SPA_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	5,8	84,7	9,5	61,3
	SPA_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	3,4	75,7	20,9	73
	SPA_N_CPP_10PAV_TV53	7,4	83,8	8,8	53,6
	SPA_N_CPP_10PAV_TV90	5,4	77,6	17	63,6
	SPA_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	5,7	83,3	11	62,7
	SPA_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	3,4	74,7	21,9	73,9
Porto Alegre	PAL_N_CPP_2PAV_TV53	25,8	73,7	0,5	21,2
	PAL_N_CPP_2PAV_TV90	18,5	78,3	3,2	31,8
	PAL_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	10,8	85	4,2	53,6
	PAL_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	8,2	78,7	13,1	66,5
	PAL_N_CPP_7PAV_TV53	16,4	80	3,6	37,5
	PAL_N_CPP_7PAV_TV90	12,8	77,6	9,6	46,3
	PAL_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	9,5	81,1	9,4	60,4
	PAL_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	7,4	73,3	19,3	70,3
	PAL_N_CPP_10PAV_TV53	12	81,2	6,8	47,8
	PAL_N_CPP_10PAV_TV90	9,3	75,8	14,9	59,9
	PAL_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	9,8	81,9	8,3	58,6
	PAL_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	7,3	73,3	19,4	70,9

Fonte: O autor



Tabela 7: Índice de uniformidade dos modelos simulados na 1ª etapa de simulações

Índice de uniformidade					
cidade	modelo	unif.	cidade	modelo	unif.
Belém	BEL_N_CPP_2PAV_TV53	0,2498	Vitória	VIT_N_CPP_2PAV_TV53	0,3053
	BEL_N_CPP_2PAV_TV90	0,2403		VIT_N_CPP_2PAV_TV90	0,2917
	BEL_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	0,3578		VIT_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	0,4127
	BEL_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	0,3477		VIT_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	0,4234
	BEL_N_CPP_7PAV_TV53	0,2193		VIT_N_CPP_7PAV_TV53	0,2504
	BEL_N_CPP_7PAV_TV90	0,2060		VIT_N_CPP_7PAV_TV90	0,2257
	BEL_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	0,3461		VIT_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	0,3801
	BEL_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	0,3142		VIT_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	0,3529
	BEL_N_CPP_10PAV_TV53	0,3109		VIT_N_CPP_10PAV_TV53	0,2981
	BEL_N_CPP_10PAV_TV90	0,2892		VIT_N_CPP_10PAV_TV90	0,2716
	BEL_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	0,3487		VIT_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	0,3895
	BEL_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	0,3316		VIT_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	0,3638
Recife	REC_N_CPP_2PAV_TV53	0,2954	São Paulo	SPA_N_CPP_2PAV_TV53	0,3407
	REC_N_CPP_2PAV_TV90	0,2922		SPA_N_CPP_2PAV_TV90	0,3249
	REC_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	0,3754		SPA_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	0,4565
	REC_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	0,3784		SPA_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	0,4423
	REC_N_CPP_7PAV_TV53	0,2438		SPA_N_CPP_7PAV_TV53	0,2405
	REC_N_CPP_7PAV_TV90	0,2372		SPA_N_CPP_7PAV_TV90	0,2363
	REC_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	0,3737		SPA_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	0,4465
	REC_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	0,3611		SPA_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	0,3845
	REC_N_CPP_10PAV_TV53	0,3133		SPA_N_CPP_10PAV_TV53	0,3577
	REC_N_CPP_10PAV_TV90	0,2825		SPA_N_CPP_10PAV_TV90	0,3087
Brasília	REC_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	0,3736	Porto Alegre	SPA_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	0,4353
	REC_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	0,3404		SPA_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	0,3898
	BRA_N_CPP_2PAV_TV53	0,2905		PAL_N_CPP_2PAV_TV53	0,3283
	BRA_N_CPP_2PAV_TV90	0,2843		PAL_N_CPP_2PAV_TV90	0,3086
	BRA_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	0,4284		PAL_N_CPP_2PAV_TV53_SOBST	0,4767
	BRA_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	0,3979		PAL_N_CPP_2PAV_TV90_SOBST	0,4876
	BRA_N_CPP_7PAV_TV53	0,2283		PAL_N_CPP_7PAV_TV53	0,2725
	BRA_N_CPP_7PAV_TV90	0,2155		PAL_N_CPP_7PAV_TV90	0,2516
	BRA_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	0,3988		PAL_N_CPP_7PAV_TV53_SOBST	0,4277
	BRA_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	0,3621		PAL_N_CPP_7PAV_TV90_SOBST	0,3887
	BRA_N_CPP_10PAV_TV53	0,2958		PAL_N_CPP_10PAV_TV53	0,3620
	BRA_N_CPP_10PAV_TV90	0,3237		PAL_N_CPP_10PAV_TV90	0,3090
	BRA_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	0,3907		PAL_N_CPP_10PAV_TV53_SOBST	0,4640
	BRA_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	0,3501		PAL_N_CPP_10PAV_TV90_SOBST	0,4443

Fonte: O autor



Tabela 8: Resultados das cidades de Belém e Recife referentes à segunda etapa de simulações.

Percentual de horas anuais (%)					
cidade	modelo	UDI<100 lx	UDI 100-2000 lx	UDI>2000 lx	DA
Belém	BEL_L_CPC_2PAV_TV53	15,1	79,3	5,6	37,0
	BEL_L_CPC_2PAV_TV90	10,0	78,5	11,5	50,4
	BEL_L_CPP_2PAV_TV53	14,5	79,3	6,2	38,5
	BEL_L_CPP_2PAV_TV90	9,9	78,5	11,6	50,7
	BEL_L_SP_2PAV_TV53	15,6	74,3	10,1	38,5
	BEL_L_SP_2PAV_TV90	7,1	70,7	22,2	61,3
	BEL_N_CPC_2PAV_TV53	14,7	80,5	4,8	37,5
	BEL_N_CPC_2PAV_TV90	6,8	79,9	13,3	52,2
	BEL_N_CPP_2PAV_TV53	10,5	83,1	6,4	41,7
	BEL_N_CPP_2PAV_TV90	6,4	79,8	13,8	53,6
	BEL_N_SP_2PAV_TV53	16,3	72,8	10,9	37,4
	BEL_N_SP_2PAV_TV90	7,4	70,8	21,8	59,6
	BEL_O_CPC_2PAV_TV53	11,7	82,1	6,2	40,5
	BEL_O_CPC_2PAV_TV90	10,1	76,8	13,1	50,1
	BEL_O_CPP_2PAV_TV53	14,4	78,6	7,0	40,2
	BEL_O_CPP_2PAV_TV90	10,2	76,6	13,2	50,1
	BEL_O_SP_2PAV_TV53	16,0	70,8	13,2	38,8
	BEL_O_SP_2PAV_TV90	7,4	69,3	23,3	61,6
	BEL_S_CPC_2PAV_TV53	15,2	80,3	4,5	36,0
	BEL_S_CPC_2PAV_TV90	9,9	78,5	11,6	49,5
	BEL_S_CPP_2PAV_TV53	14,1	80,2	5,7	39,0
	BEL_S_CPP_2PAV_TV90	8,3	77,1	14,6	56,2
	BEL_S_SP_2PAV_TV53	16,1	73,4	10,5	37,4
	BEL_S_SP_2PAV_TV90	7,2	70,9	21,9	60,1
Recife	REC_L_CPC_2PAV_TV53	8,6	85,0	6,4	39,1
	REC_L_CPC_2PAV_TV90	4,6	84,3	11,1	55,8
	REC_L_CPP_2PAV_TV53	7,7	83,2	9,1	43,5
	REC_L_CPP_2PAV_TV90	4,2	82,5	13,3	58,5
	REC_L_SP_2PAV_TV53	7,5	77,6	14,9	48,2
	REC_L_SP_2PAV_TV90	2,2	68,8	29,0	73,5
	REC_N_CPC_2PAV_TV53	8,2	89,3	2,5	38,3
	REC_N_CPC_2PAV_TV90	4,5	85,6	9,9	53,8
	REC_N_CPP_2PAV_TV53	6,8	88,6	4,6	44,4
	REC_N_CPP_2PAV_TV90	4,1	84,5	11,4	56,7
	REC_N_SP_2PAV_TV53	7,8	79,3	12,9	44,7
	REC_N_SP_2PAV_TV90	2,3	71,3	26,4	69,4
	REC_O_CPC_2PAV_TV53	8,1	89,4	2,5	40,2
	REC_O_CPC_2PAV_TV90	4,5	85,9	9,6	58,4
	REC_O_CPP_2PAV_TV53	6,5	89,1	4,4	46,6
	REC_O_CPP_2PAV_TV90	4,0	85,0	11,0	61,0
	REC_O_SP_2PAV_TV53	7,2	80,7	12,1	48,5
	REC_O_SP_2PAV_TV90	2,3	70,1	27,6	72,9
	REC_S_CPC_2PAV_TV53	8,0	89,8	2,2	37,7
	REC_S_CPC_2PAV_TV90	4,4	87,8	7,8	54,7
	REC_S_CPP_2PAV_TV53	6,7	90,2	3,1	41,8
	REC_S_CPP_2PAV_TV90	3,8	86,2	10,0	58,0
	REC_S_SP_2PAV_TV53	7,4	82,6	10,0	44,5
	REC_S_SP_2PAV_TV90	2,1	73,1	24,8	69,4

Fonte: O autor



Tabela 9: Resultados das cidades de Brasília e Vitória referentes à segunda etapa de simulações.

Percentual de horas anuais (%)					
cidade	modelo	UDI<100 lx	UDI 100-2000 lx	UDI>2000 lx	DA
Brasília	BRA_L_CPC_2PAV_TV53	5,5	91,1	3,4	42,7
	BRA_L_CPC_2PAV_TV90	10,7	80,9	8,4	47,5
	BRA_L_CPP_2PAV_TV53	10,8	86,5	2,8	37,4
	BRA_L_CPP_2PAV_TV90	6,6	86,8	6,6	48,5
	BRA_L_SP_2PAV_TV53	10,7	78,1	11,2	42,4
	BRA_L_SP_2PAV_TV90	3,6	71,6	24,8	65,1
	BRA_N_CPC_2PAV_TV53	9,7	85,1	5,2	41,4
	BRA_N_CPC_2PAV_TV90	11,0	78,6	10,4	47,0
	BRA_N_CPP_2PAV_TV53	11,0	85,9	3,1	37,6
	BRA_N_CPP_2PAV_TV90	6,2	84,7	9,1	49,7
	BRA_N_SP_2PAV_TV53	11,9	74,5	13,6	41,4
	BRA_N_SP_2PAV_TV90	4,0	71,0	25,0	63,4
	BRA_O_CPC_2PAV_TV53	10,1	85,2	4,7	39,9
	BRA_O_CPC_2PAV_TV90	10,6	80,7	8,7	46,6
	BRA_O_CPP_2PAV_TV53	10,9	85,7	3,4	36,6
	BRA_O_CPP_2PAV_TV90	6,6	86,6	6,8	49,1
	BRA_O_SP_2PAV_TV53	11,0	76,5	12,5	43,2
	BRA_O_SP_2PAV_TV90	3,8	70,1	26,1	65,3
	BRA_S_CPC_2PAV_TV53	9,5	88,7	1,8	38,9
	BRA_S_CPC_2PAV_TV90	10,4	83,7	5,9	48,5
	BRA_S_CPP_2PAV_TV53	10,4	88,2	1,4	35,6
	BRA_S_CPP_2PAV_TV90	6,3	89,5	4,2	49,8
	BRA_S_SP_2PAV_TV53	11,1	81,2	7,7	41,4
	BRA_S_SP_2PAV_TV90	3,7	72,9	23,4	65,1
Vitória	VIT_L_CPC_2PAV_TV53	12,9	85,1	2,0	30,6
	VIT_L_CPC_2PAV_TV90	8,7	87,1	4,2	42,0
	VIT_L_CPP_2PAV_TV53	14,1	84,5	1,4	27,6
	VIT_L_CPP_2PAV_TV90	8,1	87,4	4,5	43,5
	VIT_L_SP_2PAV_TV53	11,0	77,9	11,1	40,9
	VIT_L_SP_2PAV_TV90	5,1	72,2	22,7	62,2
	VIT_N_CPC_2PAV_TV53	13,6	85,4	1,0	32,9
	VIT_N_CPC_2PAV_TV90	9,2	86,4	4,4	42,0
	VIT_N_CPP_2PAV_TV53	13,0	86,0	1,0	33,7
	VIT_N_CPP_2PAV_TV90	8,4	86,1	5,5	44,3
	VIT_N_SP_2PAV_TV53	11,2	73,3	15,5	46,2
	VIT_N_SP_2PAV_TV90	5,3	71,0	23,7	61,1
	VIT_O_CPC_2PAV_TV53	13,6	85,5	0,9	29,3
	VIT_O_CPC_2PAV_TV90	8,7	88,3	3,0	42,9
	VIT_O_CPP_2PAV_TV53	13,1	86,2	0,7	30,8
	VIT_O_CPP_2PAV_TV90	8,3	88,2	3,5	44,9
	VIT_O_SP_2PAV_TV53	10,9	79,0	10,1	42,8
	VIT_O_SP_2PAV_TV90	5,1	71,7	23,2	63,5
	VIT_S_CPC_2PAV_TV53	13,0	86,4	0,6	26,8
	VIT_S_CPC_2PAV_TV90	8,2	89,5	2,3	41,8
	VIT_S_CPP_2PAV_TV53	12,1	87,4	0,5	28,3
	VIT_S_CPP_2PAV_TV90	8,1	89,6	2,3	42,4
	VIT_S_SP_2PAV_TV53	10,8	82,4	6,8	40,2
	VIT_S_SP_2PAV_TV90	5,0	74,1	20,9	61,9

Fonte: O autor



Tabela 10: Resultados das cidades de São Paulo e Porto Alegre referentes à segunda etapa de simulações.

Percentual de horas anuais (%)					
cidade	modelo	UDI<100 lx	UDI 100-2000 lx	UDI>2000 lx	DA
São Paulo	SPA_L_CPC_2PAV_TV53	21,6	77,8	0,6	21,8
	SPA_L_CPC_2PAV_TV90	14,6	83,1	2,3	34,8
	SPA_L_CPP_2PAV_TV53	21,3	78,5	0,2	22,2
	SPA_L_CPP_2PAV_TV90	15,2	82,5	2,3	33,8
	SPA_L_SP_2PAV_TV53	17,4	73,5	9,1	35,1
	SPA_L_SP_2PAV_TV90	8,7	71,8	19,5	56,0
	SPA_N_CPC_2PAV_TV53	21,5	78,0	0,5	25,5
	SPA_N_CPC_2PAV_TV90	15,4	81,6	3,0	34,0
	SPA_N_CPP_2PAV_TV53	21,8	77,7	0,5	24,0
	SPA_N_CPP_2PAV_TV90	15,0	82,2	2,8	34,3
	SPA_N_SP_2PAV_TV53	18,7	70,1	11,2	33,9
	SPA_N_SP_2PAV_TV90	9,2	69,9	20,9	53,5
	SPA_O_CPC_2PAV_TV53	21,8	77,9	0,3	22,3
	SPA_O_CPC_2PAV_TV90	15,8	82,6	1,6	33,2
	SPA_O_CPP_2PAV_TV53	21,9	77,9	0,2	22,7
	SPA_O_CPP_2PAV_TV90	15,6	82,7	1,7	33,5
	SPA_O_SP_2PAV_TV53	18,3	72,2	9,5	35,9
	SPA_O_SP_2PAV_TV90	9,0	70,3	20,7	55,9
	SPA_S_CPC_2PAV_TV53	22,5	77,5	0,0	16,8
	SPA_S_CPC_2PAV_TV90	15,2	84,0	0,8	32,7
	SPA_S_CPP_2PAV_TV53	19,5	80,5	0,0	23,3
	SPA_S_CPP_2PAV_TV90	14,7	84,5	0,8	34,2
	SPA_S_SP_2PAV_TV53	17,8	75,6	6,6	34,7
	SPA_S_SP_2PAV_TV90	8,8	72,3	18,9	55,5
Porto Alegre	PAL_L_CPC_2PAV_TV53	24,5	75,5	0,0	17,8
	PAL_L_CPC_2PAV_TV90	18,3	80,2	1,5	30,4
	PAL_L_CPP_2PAV_TV53	23,3	76,7	0,0	19,5
	PAL_L_CPP_2PAV_TV90	18,6	80,2	1,2	29,0
	PAL_L_SP_2PAV_TV53	19,1	73,3	7,6	34,9
	PAL_L_SP_2PAV_TV90	11,1	70,1	18,8	55,1
	PAL_N_CPC_2PAV_TV53	26,1	73,6	0,3	20,0
	PAL_N_CPC_2PAV_TV90	18,7	78,6	2,7	31,4
	PAL_N_CPP_2PAV_TV53	25,8	73,7	0,5	21,2
	PAL_N_CPP_2PAV_TV90	18,5	78,3	3,2	31,8
	PAL_N_SP_2PAV_TV53	20,8	67,3	11,9	33,3
	PAL_N_SP_2PAV_TV90	11,4	67,7	20,9	52,2
	PAL_O_CPC_2PAV_TV53	24,6	74,9	0,5	19,9
	PAL_O_CPC_2PAV_TV90	18,8	79,1	2,1	31,1
	PAL_O_CPP_2PAV_TV53	26,3	73,3	0,4	18,7
	PAL_O_CPP_2PAV_TV90	18,8	79,0	2,2	30,8
	PAL_O_SP_2PAV_TV53	19,3	70,0	10,7	36,7
	PAL_O_SP_2PAV_TV90	11,2	68,2	20,6	54,5
	PAL_S_CPC_2PAV_TV53	24,5	75,5	0,0	15,3
	PAL_S_CPC_2PAV_TV90	18,1	81,7	0,2	29,6
	PAL_S_CPP_2PAV_TV53	23,4	76,6	0,0	15,8
	PAL_S_CPP_2PAV_TV90	17,5	82,2	0,3	31,2
	PAL_S_SP_2PAV_TV53	18,3	75,5	6,2	36,0
	PAL_S_SP_2PAV_TV90	11,1	70,7	18,2	54,6

Fonte: O autor



Tabela 11: Índice de uniformidade dos modelos simulados na 2ª etapa de simulações

Índice de uniformidade					
cidade	modelo	uniform.	cidade	modelo	uniform.
Belém	BEL_L_CPC_2PAV_TV53	0,2616	Vitória	VIT_L_CPC_2PAV_TV53	0,3263
	BEL_L_CPC_2PAV_TV90	0,2251		VIT_L_CPC_2PAV_TV90	0,3429
	BEL_L_CPP_2PAV_TV53	0,2477		VIT_L_CPP_2PAV_TV53	0,3565
	BEL_L_CPP_2PAV_TV90	0,2480		VIT_L_CPP_2PAV_TV90	0,3423
	BEL_N_CPC_2PAV_TV53	0,2546		VIT_N_CPC_2PAV_TV53	0,3024
	BEL_N_CPC_2PAV_TV90	0,2399		VIT_N_CPC_2PAV_TV90	0,3037
	BEL_N_CPP_2PAV_TV53	0,2499		VIT_N_CPP_2PAV_TV53	0,3053
	BEL_N_CPP_2PAV_TV90	0,2403		VIT_N_CPP_2PAV_TV90	0,2917
	BEL_O_CPC_2PAV_TV53	0,2139		VIT_O_CPC_2PAV_TV53	0,3442
	BEL_O_CPC_2PAV_TV90	0,2072		VIT_O_CPC_2PAV_TV90	0,3535
	BEL_O_CPP_2PAV_TV53	0,2077		VIT_O_CPP_2PAV_TV53	0,3410
	BEL_O_CPP_2PAV_TV90	0,2027		VIT_O_CPP_2PAV_TV90	0,3152
	BEL_S_CPC_2PAV_TV53	0,2506		VIT_S_CPC_2PAV_TV53	0,3863
	BEL_S_CPC_2PAV_TV90	0,2557		VIT_S_CPC_2PAV_TV90	0,3793
	BEL_S_CPP_2PAV_TV53	0,2471		VIT_S_CPP_2PAV_TV53	0,3858
	BEL_S_CPP_2PAV_TV90	0,2615		VIT_S_CPP_2PAV_TV90	0,3781
Recife	REC_L_CPC_2PAV_TV53	0,2412	São Paulo	SPA_L_CPC_2PAV_TV53	0,3447
	REC_L_CPC_2PAV_TV90	0,2368		SPA_L_CPC_2PAV_TV90	0,3546
	REC_L_CPP_2PAV_TV53	0,2297		SPA_L_CPP_2PAV_TV53	0,3382
	REC_L_CPP_2PAV_TV90	0,2332		SPA_L_CPP_2PAV_TV90	0,3399
	REC_N_CPC_2PAV_TV53	0,3077		SPA_N_CPC_2PAV_TV53	0,3157
	REC_N_CPC_2PAV_TV90	0,2961		SPA_N_CPC_2PAV_TV90	0,3082
	REC_N_CPP_2PAV_TV53	0,2954		SPA_N_CPP_2PAV_TV53	0,3407
	REC_N_CPP_2PAV_TV90	0,2922		SPA_N_CPP_2PAV_TV90	0,3249
	REC_O_CPC_2PAV_TV53	0,3175		SPA_O_CPC_2PAV_TV53	0,3540
	REC_O_CPC_2PAV_TV90	0,3086		SPA_O_CPC_2PAV_TV90	0,3459
	REC_O_CPP_2PAV_TV53	0,2881		SPA_O_CPP_2PAV_TV53	0,3530
	REC_O_CPP_2PAV_TV90	0,2924		SPA_O_CPP_2PAV_TV90	0,3453
	REC_S_CPC_2PAV_TV53	0,3259		SPA_S_CPC_2PAV_TV53	0,4067
	REC_S_CPC_2PAV_TV90	0,3231		SPA_S_CPC_2PAV_TV90	0,3945
	REC_S_CPP_2PAV_TV53	0,3186		SPA_S_CPP_2PAV_TV53	0,3880
	REC_S_CPP_2PAV_TV90	0,2904		SPA_S_CPP_2PAV_TV90	0,3833
Brasília	BRA_L_CPC_2PAV_TV53	0,3122	Porto Alegre	PAL_L_CPC_2PAV_TV53	0,3939
	BRA_L_CPC_2PAV_TV90	0,3007		PAL_L_CPC_2PAV_TV90	0,3837
	BRA_L_CPP_2PAV_TV53	0,3246		PAL_L_CPP_2PAV_TV53	0,3916
	BRA_L_CPP_2PAV_TV90	0,3278		PAL_L_CPP_2PAV_TV90	0,3956
	BRA_N_CPC_2PAV_TV53	0,2781		PAL_N_CPC_2PAV_TV53	0,3324
	BRA_N_CPC_2PAV_TV90	0,2718		PAL_N_CPC_2PAV_TV90	0,3273
	BRA_N_CPP_2PAV_TV53	0,2905		PAL_N_CPP_2PAV_TV53	0,3283
	BRA_N_CPP_2PAV_TV90	0,2843		PAL_N_CPP_2PAV_TV90	0,3086
	BRA_O_CPC_2PAV_TV53	0,2615		PAL_O_CPC_2PAV_TV53	0,3784
	BRA_O_CPC_2PAV_TV90	0,2759		PAL_O_CPC_2PAV_TV90	0,3327
	BRA_O_CPP_2PAV_TV53	0,2691		PAL_O_CPP_2PAV_TV53	0,3768
	BRA_O_CPP_2PAV_TV90	0,2962		PAL_O_CPP_2PAV_TV90	0,3559
	BRA_S_CPC_2PAV_TV53	0,3239		PAL_S_CPC_2PAV_TV53	0,4188
	BRA_S_CPC_2PAV_TV90	0,3281		PAL_S_CPC_2PAV_TV90	0,3880
	BRA_S_CPP_2PAV_TV53	0,3498		PAL_S_CPP_2PAV_TV53	0,4240
	BRA_S_CPP_2PAV_TV90	0,3457		PAL_S_CPP_2PAV_TV90	0,4013

Fonte: O autor