

Alexandre Reis Felipe

**DESEMPENHO LUMINOSO E ENERGÉTICO DE VIDROS DE  
CONTROLE SOLAR E DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD.

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Felippe, Alexandre Reis

Desempenho luminoso e energético de vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento / Alexandre Reis Felippe ; orientador, Fernando Oscar Ruttkay Pereira - Florianópolis, SC, 2016.  
192 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação Multidisciplinar em Saúde.

Inclui referências

1. Saúde. 2. Dispositivos de sombreamento. 3. Vidros de controle solar. 4. Desempenho energético. 5. Desempenho luminoso. I. Pereira, Fernando Oscar Ruttkay. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação Multidisciplinar em Saúde. III. Título.

Alexandre Reis Felipe

**DESEMPENHO LUMINOSO E ENERGÉTICO DE VIDROS DE  
CONTROLE SOLAR E DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO**

Esta dissertação foi julgada e aprovada perante banca examinadora de trabalho final, outorgando ao aluno o título de Mestre em Engenharia Civil, Área de concentração Construção Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de maio de 2016

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.

Coordenador do PPGEC

Banca Examinadora:

---

Prof. Fernando Oscar Ruttkay  
Pereira, PhD. - Orientador UFSC

---

Prof. Roberto Lamberts, PhD.  
UFSC

---

Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.  
UFSC

---

Prof. Ricardo Carvalho Cabús, Dr.  
UFAL

---

Prof. Saulo Guths, Dr.

UFSC



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Antônio André Felipe e Márcia Reis Felipe, e ao meu irmão André Reis Felipe, por serem meu porto seguro, meu alicerce, não importando onde eu esteja; pelo amor incondicional, pelo exemplo e por serem sempre tão presentes nesta caminhada.

Ao professor e orientador Fernando Oscar Ruttkay Pereira pela oportunidade de formação no curso de mestrado, por sua seriedade, dedicação, paciência, apoio e incentivo ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho, por ter despertado em mim o interesse pela pesquisa de iluminação natural. Por me inspirar através de seu exemplo e, sobretudo, pela amizade que confere a mim e a todos do LabCon.

Aos membros da banca examinadora Fernando Simon Westphal, Roberto Lamberts, Saulo Guths e Ricardo Carvalho Cabús por aceitarem o convite de avaliar este trabalho e pelo esforço de encontrar uma data comum para a realização da banca.

A toda a família LabCon que me acompanhou durante o período de mestrado: Américo, Bianca, Caro Bedoya, Carol Carvalho, Catalina, Cíntia, Emerson, Feco, Gabi, Lê, Maíra, Marcelo, Marina, Martin, Natália, Rafael, Raphaela, Rupp, Silvana e Veri.

Agradeço em especial ao Emerson Antônio Penso pelo apoio nesta caminhada, pela companhia, pela atenção desprendida e pelos inúmeros conselhos enriquecedores.

Ao sempre professor e amigo, Rafael Cartana, por me incentivar no caminho acadêmico, por estar sempre presente e por despertar meu interesse na área de conforto ambiental.

A Raphaela Walger da Fonseca e a Letícia Niero Moraes (in memoriam) por me guiarem em meus primeiros passos no universo da simulação da iluminação natural; pelo exemplo de dedicação a pesquisa e por sempre me apoiarem neste caminho.

Agradeço a Larissa Tietjen e a Letícia Borges de Assis, amigas jornalistas, pela eterna amizade e, sobretudo, pelo grande apoio com a revisão de texto.

Ao laboratório LabCon/UFSC pelo espaço físico, equipamentos e bibliografias disponibilizados.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido durante o período de Mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC e à UFSC pela oportunidade de cursar o mestrado em uma instituição de excelência.

## RESUMO

As aberturas são elementos complexos e sensíveis às variações climáticas e, ao admitirem radiação solar, alteram a carga térmica do edifício e consequentemente o consumo energético do sistema de condicionamento de ar. Visando controlar a radiação e admitir luz natural, duas alternativas destacam-se por serem frequentemente empregadas no mercado: vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento. Vidros de controle solar filtram a radiação solar incidente reduzindo a parcela admitida sem modificar significativamente a distribuição espacial da energia radiante. Por sua vez, os dispositivos de sombreamento, ao controlar a radiação solar direta, podem alterar a direcionalidade da energia luminosa admitida, influenciando na distribuição da luz no ambiente interno. A inexistência de uma medida de desempenho comum aos sistemas e a grande variabilidade da eficiência dos dispositivos de sombreamento frente à geometria da insolação, tornam complexa a adoção de uma abordagem precisa que considere a eficiência energética e o desempenho luminoso dos sistemas. O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento luminoso e energético de vidros de controle solar e de dispositivos de sombreamento. Para tal, a metodologia consistiu em duas etapas: i) proposição de um indicador que permita equiparar vidros de controle solar a dispositivos de sombreamento do ponto de vista do ganho de calor solar e desempenho energético. ii) Análise do desempenho luminoso de conjuntos equiparados de vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento. Verificou-se, com base nos dados obtidos, que é possível utilizar um Fator Solar Equivalente Anual (FSEa) para descrever o comportamento energético de um dispositivo de

sombreamento, de forma similar ao dos vidros. A análise de sensibilidade demonstrou que a importância das variáveis na composição do FSEa difere de uma fachada para outra e conforme a geometria (horizontal ou vertical). Por meio de análise comparativa de iluminação natural dos sistemas equiparados, verificou-se que os dispositivos de sombreamento apresentaram melhor desempenho luminoso frente os vidros de controle solar, apresentando aumentos de até 143,34% na média do  $DA_{300}$ , 70,06% na média das  $UDI_{100-2000}$ , 286,16% na área do  $sDA_{300-50\%}$  e redução do  $sDA_{1000-250h}$  de até 88,08%. Os resultados encontrados, confirmam a expectativa de que os dispositivos de sombreamento apresentam uma importante característica que é a de possibilitar o redirecionamento da energia luminosa admitida; melhorando as condições de iluminação interna e ao mesmo tempo garantindo redução do ganho de calor solar.

**Palavras-chave:** Dispositivos de Sombreamento; Vidros de Controle Solar; Desempenho Energético e Luminoso.



## ABSTRACT

Openings are complex elements susceptible to climate changes which change the thermal load of the building and consequently the energy consumption of the air conditioning system by admitting solar radiation. There are two alternatives often used on the market aiming to control the radiation and admit natural light: solar control glazing and shading devices. Solar control glazing by filtering solar radiation leads to the reduction on the amount of heat admitted without significant changes on the spatial distribution of radiant energy. In turn the shading devices can change the directionality of light energy accepted by controlling direct sunlight. It affects the way that light is distributed in the indoor environment. A fitted approach for both systems is challenging to achieve due to the lack of a common metric for both systems which takes on account the energy efficiency and luminous performance and the wide efficiency variability regarding sunlight geometry. This study aims to analyze the luminous and energetic behavior of solar control glazing and shading devices. To do so, the methodology consisted of two steps: i) proposing an indicator that allows solar control glazing matching the shading devices from the aspect of solar heat gains and energy performance. ii) Analysis of luminous performance matched sets of solar control glazing and shading devices. In accordance to the obtained results it is possible to use an equivalent annual solar heat gain coefficient (FSEa) to describe the energy performance of devices which are similar to the ones used to categorize glazing. Sensitivity analysis has shown that the importance of variables in FSEa composition differs regarding the façade orientation and according to geometry (horizontal or vertical). Through comparative analysis of natural lighting systems, it has been noticed that

the shading devices have reached a better luminous performance than solar control glazing, with increases of up to 143.34% on average DA300, 70.06% average of UDI100-2000, 286.16 sDA300-50% in area and reduction of up to 88.08% sDA1000-250h. These results confirm the expectation that shading devices have an important feature which allows the redirection of admitted light energy improving the internal lighting conditions while ensuring reduction of solar heat gain.

**Key-words:** Shading Devices; Solar Control Glasses; Energy and Daylight Performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo Energético por Setor.....	28
Figura 2. Fachada com aplicação de vidro revestido de controle solar .	37
Figura 3. Espectro da energia solar.....	38
Figura 4. Fator Solar de Vidros.....	39
Figura 5. Vidros low-e .....	40
Figura 6. Sistema de vidro duplo insulado.....	41
Figura 7. Vidro eletrocromico com três zonas de modulação .....	43
Figura 8. Dispositivo externo de sombreamento horizontal .....	45
Figura 9. Dispositivo externo de sombreamento vertical .....	45
Figura 10. Variação da altura Solar ao Longo do Ano .....	46
Figura 11. Geometria da Insolação - Ângulos .....	46
Figura 12. Carta solar para Florianópolis .....	47
Figura 13. Transferidor de Ângulos.....	47
Figura 14. Exemplos de brises verticais com mesma máscara de sombreamento.....	48
Figura 15. Exemplos de brises horizontais com mesma máscara de sombreamento.....	49
Figura 16. Método de graus-dia de aquecimento e resfriamento para seleção do período a sombrear.....	51

Figura 17. Método SHADERADE para projeto de dispositivos de sombreamento.....	54
Figura 18. Padrão de ocupação médio dos edifícios de escritório analisados.....	61
Figura 19. Efeito da mudança do percentual de abertura da fachada no consumo energético em cinco condições climáticas. ....	64
Figura 20. Efeito das mudanças de Transmitância Térmica (U) e consumo energético em cinco condições bioclimáticas.....	65
Figura 21. Procedimentos utilizados para comparação dos desempenhos dos vidros.....	67
Figura 22. Sistemas de envidraçamento (duplo Low-e) com e sem película de controle solar.....	68
Figura 23. Períodos de avaliação para localização de Seul, Coréia do Sul.....	70
Figura 24. Componentes básicas da luz natural.....	72
Figura 25. Zonas de iluminação do modelo.....	77
Figura 26. Configurações propostas de abertura.....	79
Figura 27. Consumo com iluminação artificial em função da Transmissão Visível e da Orientação Solar.....	80
Figura 28. Consumo com iluminação em função do Tv, configurações de abertura e orientação.....	81
Figura 29. Transmitância de dispositivo de proteção horizontal em relação ao ângulo de perfil para diferentes ângulos de aletas.....	82

Figura 30. Resultados de luminância equivalente da janela com dispositivo de 10 aletas de 0,115m e refletância de 20% .....	84
Figura 31. Características do modelo para iluminação Natural e Radiação Solar .....	92
Figura 32. Características do modelo para simulação Termo-energética .....	93
Figura 33. Exemplo de componente do grasshopper e ligação entre componentes .....	95
Figura 34. Exemplo de slider e configuração do domínio numérico .....	95
Figura 35. Síntese do Método .....	100
Figura 36. Zoneamento Bioclimático Brasileiro.....	102
Figura 37. Padrão de ocupação do sistema de Iluminação Artificial e Pessoas .....	103
Figura 38. Padrão de disponibilidade do sistema de condicionamento de ar .....	104
Figura 39. Parâmetros variáveis do modelo geométrico de brises horizontais.....	106
Figura 40. Parâmetros variáveis e diferenças nos modelos de simulação .....	108
Figura 41. Simplificação dos procedimentos do Algoritmo .....	109
Figura 42. Algoritmo desenvolvido no Grasshopper para parametrização dos modelos. ....	109

Figura 43. Ilustração do Brise Horizontal e Planos de Análise para cálculo do FSE .....	110
Figura 44. Simulações realizadas para cálculo e verificação do FSE..	112
Figura 45. Variação do FSEm para Brise de 20cm e 5 divisões – Fachada Leste .....	117
Figura 46. Variação do FSEm para Brise de 20cm e 5 divisões – Fachada Oeste .....	117
Figura 47. Variação do FSEm para Brise de 20cm e 5 divisões – Fachada Sul .....	118
Figura 48. Variação do FSEm para Brise de 20cm e 5 divisões – Fachada Norte .....	119
Figura 49. Gráfico da radiação solar direta para o clima de Florianópolis. ....	120
Figura 50. Correlação entre os consumos de energia dos Brises Horizontais (FSEm) e Vidro com igual FS.....	122
Figura 51. Correlação entre os consumos de energia dos Brises Horizontais (FSEa) e Vidro com igual FS .....	124
Figura 52. Correlação entre os consumos de energia dos Brises Verticais (FSEa) e Vidro com igual FS.....	125
Figura 53. Variação do R <sup>2</sup> em função da refletância do brise e variações de carga interna .....	127
Figura 54. Variação do EPAM em função da refletância do brise e variações de carga interna.....	128

Figura 55. Sensibilidade Relativa (Sr) em relação às variáveis de descrição dos brises horizontais.....	130
Figura 56. Sensibilidade Relativa (Sr) em relação as variáveis de descrição dos brises verticais .....	131
Figura 57. Análise Gráfica - Fachada Norte - Caso 01 .....	136
Figura 58. Análise Gráfica - Fachada Norte - Caso 02.....	138
Figura 59. Análise Gráfica - Fachada Leste - Caso 03 .....	140
Figura 60. Análise Gráfica - Fachada Leste - Caso 04 .....	142
Figura 61. Análise Gráfica - Fachada Sul - Caso 05.....	144
Figura 62. Análise Gráfica - Fachada Sul - Caso 06.....	146
Figura 63. Análise Gráfica - Fachada Oeste - Caso 07.....	148
Figura 64. Análise Gráfica - Fachada Oeste - Caso 08.....	150
Figura 65. Análise Gráfica - Fachada Norte - Caso 09.....	152
Figura 66. Análise Gráfica - Fachada Norte - Caso 10.....	154
Figura 67. Análise Gráfica - Fachada Leste - Caso 11 .....	156
Figura 68. Análise Gráfica - Fachada Leste - Caso 12 .....	158
Figura 69. Análise Gráfica - Fachada Sul - Caso 13.....	160
Figura 70. Análise Gráfica - Fachada Sul - Caso 14.....	162
Figura 71. Análise Gráfica - Fachada Oeste - Caso 15.....	164
Figura 72. Análise Gráfica - Fachada Oeste - Caso 16.....	166

Figura 73. Variação percentual entre Brises e Vidros de Controle - Média do DA300.....	168
Figura 74. Variação percentual entre Brises e Vidros de Controle - Média das UDI100-2000.....	169
Figura 75. Variação percentual entre Brises e Vidros de Controle - sDA300-50% .....	170
Figura 76. Variação percentual entre Brises e Vidros de Controle - ASE1000-250h .....	171
Figura 77. Objetivos e resultados alcançados .....	173



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Trocas de calor para cálculo do balanço térmico .....	59
Tabela 2. Densidades de carga interna originais e densidades alternativas. .....	62
Tabela 3. Índice de seletividade (IS) para os 12 tipos de vidro .....	76
Tabela 4. Limites de IS para São Paulo .....	77
Tabela 5. Parâmetros para simulação.....	105
Tabela 6. Parâmetros do Daysim/Radiance utilizados para o estudo ..	107
Tabela 7. Características dos vidros de controle solar selecionados para análise .....	114
Tabela 8 – Simulações para cálculo do FSEm e Verificação das equivalências dos consumos mensais .....	121
Tabela 9 – Simulações para cálculo do FSEa e Verificação dos Consumos Anuais .....	123



## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1. Localização e Arquivo Climático .....	102
Quadro 2. Domínio Numérico de variação .....	107
Quadro 3. Vidros de controle solar e brises horizontais termicamente equivalentes. ....	133
Quadro 4. Vidros de controle solar e brises verticais termicamente equivalentes. ....	133



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AQUA - Alta Qualidade Ambiental

AHS - Ângulo Horizontal de Sombreamento

ASE - Exposição anual ao sol [% de área]

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers

AVS - Ângulo Vertical de Sombreamento

BEN - Balanço Energético Nacional

BREEAM - Building Research Establishment Environmental Assessment Method

COP - Coeficiente de Performance [ $W_{\text{térmico}}/W_{\text{elétrico}}$ ]

DCI - Densidade de Carga Interna

DA - Autonomia da Luz Natural [% de horas do ano]

DF - Fator de Luz Diurna [%]

EPAM - Erro percentual absoluto médio

EPW - Energyplus Weather Data

FS – Fator Solar [%]

FSE - Fator Solar Equivalente [%]

PAF - Percentual de abertura da Fachada

RTQ-C - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos

GH – Graus Hora

IEA - Agência Internacional de Energia

sDA - Autonomia da Luz Natural Espacial [% de área]

SWERA - Avaliação dos recursos solar e eólico

LEED - Leadership in Energy and Environmental Design

MME - Ministério de Minas e Energia

PROCEL Edifica - Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações

Tv - Transmissão de Luz Visível

UDI - Iluminâncias Úteis da Luz Natural [% de horas do ano]

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1.	OBJETIVOS .....	31
1.1.1.	Objetivo Geral .....	31
1.1.2.	Objetivos Específicos .....	31
1.2.	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	32
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>35</b>
2.1.	SISTEMAS DE FACHADAS.....	35
2.1.1.	Vidros de controle Solar.....	35
2.1.2.	Dispositivos de Sombreamento.....	44
2.2.	DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES .....	56
2.2.1.	Desempenho termo-energético e configurações das aberturas	58
2.2.2.	Desempenho luminoso e configurações das aberturas .....	71
2.3.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	86
2.3.1.	Simulação Termo-energética com o EnergyPlus .....	87
2.3.2.	Simulação da iluminação natural com o DIVA .....	88
2.3.3.	Diferença entre os modelos de simulação .....	91
2.3.4.	Parametrização de modelos no Grasshopper.....	94
2.3.5.	Considerações sobre a revisão bibliográfica .....	96
<b>3.</b>	<b>MÉTODO.....</b>	<b>99</b>
3.1.	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO .....	101

3.2.	ALGORITMO DE PARAMETRIZAÇÃO.....	108
3.3.	CÁLCULO E VERIFICAÇÃO DO FATOR SOLAR EQUIVALENTE.....	110
3.4.	SIMULAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL .....	113
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>115</b>
4.1.	FATOR SOLAR EQUIVALENTE.....	115
4.1.1.	Fator Solar Equivalente e período de análise .....	116
4.1.2.	Influência da carga interna e refletância dos dispositivos no FSE 126	
4.1.3.	Análise de Sensibilidade .....	128
4.1.4.	Considerações sobre o FSE.....	131
4.2.	VIDROS DE CONTROLE SOLAR E DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EQUIVALENTES PARA ANÁLISE DE ILUMINAÇÃO NATURAL .....	132
4.3.	ANÁLISE DA ILUMINAÇÃO NATURAL .....	134
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>172</b>
5.1.	CONSIDERAÇÕES SOBRE O FATOR SOLAR EQUIVALENTE.....	174
5.2.	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	175
5.3.	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ANÁLISES DE ILUMINAÇÃO NATURAL.....	177
5.4.	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O TRABALHO .....	178



5.5.	LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	179
5.6.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ....	180
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>182</b>

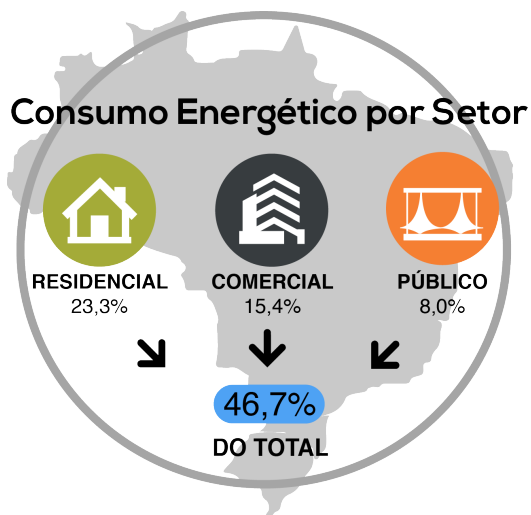


## 1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da iluminação natural é apontado como uma das formas eficazes para reduzir o consumo de energia referente à iluminação artificial das edificações. Já o calor da radiação, que a acompanha, pode ser desejável ou não, dependendo do contexto bioclimático onde está inserida a edificação. Em climas quentes, pode ocasionar um aumento considerável da carga térmica por meio do ganho de calor solar e consequente aumento da demanda energética para climatização; enquanto que em climas frios, pode apresentar uma redução da demanda energética por aquecimento.

Segundo Kim e Todorovic (2013), a energia de uma edificação é consumida principalmente durante o estágio da sua utilização, sendo apenas 10 a 20% deste uso proveniente da manufatura de materiais, construção e demolição das mesmas.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (MME, 2010), 46,7% do consumo energético do país se deve aos edifícios – incluindo os setores comerciais e públicos que consomem, respectivamente, 15,4% e 8,0% da energia elétrica (ver Figura 1). Nestes setores, aproximadamente 64% da energia elétrica utilizada é proveniente da utilização de sistemas de condicionamento de ar, enquanto 23% da distribuição do uso final de energia elétrica corresponde ao consumo por sistemas de iluminação artificial. Tal fato evidencia a necessidade do controle da radiação solar decorrente da carga térmica através das aberturas e o potencial da iluminação natural para a economia de energia.

**Figura 1. Consumo Energético por Setor**

Fonte: Adaptado de Lamberts et al., 2014

Neste contexto, as janelas são elementos responsáveis por regular a admissão do ganho solar, luz, vento, ruído e poluentes, podendo permitir ou não a integração entre o meio interno e o externo, possuindo papel importante no desempenho geral do edifício (FONTENELLE; BASTOS, 2014). No entanto, o projeto das aberturas é uma tarefa complexa, dados os efeitos opostos da admissão de luz e calor, e o número de elementos ambientais e requisitos energéticos a serem considerados. Dentre os parâmetros a serem definidos estão o tipo de esquadria, tamanho da janela, locação, tipo de vidro e dispositivos de sombreamento a serem utilizados, o que raramente torna possível encontrar uma solução que satisfaça a todas as necessidades.

Além disso, a relação entre o ganho solar, a iluminação natural e o projeto das aberturas assume considerações distintas de acordo com o propósito do edifício. Em edificações residenciais as pessoas não necessitam de tanta luz e estão livres para se moverem em busca de pontos mais adequados; enquanto em edifícios não-residenciais os ocupantes têm menos liberdade para mover-se e estão mais sujeitos ao efeito instantâneo da radiação solar simultaneamente aos requisitos de iluminação (PEREIRA, 1992).

O emprego de grandes áreas envidraçadas nas fachadas de edificações comerciais vem se consolidando como um estilo de arquitetura adotado em diversos países e nas mais variadas condições bioclimáticas. Esta aplicação é justificada por meio do aproveitamento da iluminação natural, integração entre o meio interno e externo, facilidade de manutenção e agilidade na construção, além de evidências de benefícios associados ao aumento da produtividade e bem-estar dos usuários (CIE, 2013; MARDALJEVIC, 2013).

Essa busca pela melhoria do desempenho de edificações, aliada às crises do setor energético, incentivou o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais para utilização nas aberturas, bem como novos métodos de avaliação de desempenho. Entre essas tecnologias destacam-se os diferentes tipos de vidros para controle solar: laminados, refletivos, baixo emissivos e seletivos (CEBRACE, 2011).

Em paralelo ao uso de vidros de controle solar, o emprego de dispositivos de sombreamento para proteger as aberturas da radiação solar direta tem sido defendido por muitos pesquisadores. Para Lechner (2008), o sombreamento é a estratégia chave para alcançar o conforto térmico no

verão. Olgyay (1963) aponta o controle solar como estratégia definitiva para evitar o ganho de carga térmica em climas quentes e salienta que, com o controle solar através do sombreamento, não há necessidade de resfriar o que não foi aquecido.

Os vidros de controle solar e os dispositivos de sombreamento permitem o controle da carga térmica e a admissão de iluminação natural.

No caso dos vidros de controle solar, estes apresentam um comportamento espectralmente seletivo, reduzindo a radiação transmitida em determinadas frequências de onda, porém, sem alterar significativamente a distribuição da iluminação.

Os dispositivos de sombreamento são capazes de promover um comportamento seletivo espacial da radiação solar, permitindo a entrada de luz do sol nos meses mais frios e barrando-a nos meses mais quentes. Além disso, diversas pesquisas têm demonstrado o potencial dos dispositivos de sombreamento em atuar como difusores de luz e radiação solar direta capazes de promover a iluminação natural às partes mais profundas do ambiente e melhorando sua distribuição (BOGO, 2007; PEREIRA, 1992; WONG; ISTIADJI, 2004; ESQUIVIAS et al., 2014).

Entretanto, sabe-se que a eficiência dos dispositivos de sombreamento, diferente dos vidros de controle solar, está muito mais sujeita à influência da geometria, orientação solar, refletância do material do elemento de proteção e ângulo de incidência, variando ao longo do dia e período do ano.

Ainda que, ao longo dos últimos anos, as simplificações dos métodos de parametrização de modelos, aliadas aos avanços dos programas de simulação computacional, tenham permitido a otimização

geométrica por meio de novas abordagens e explorações mais rápidas das alternativas projetuais (MANZAN, 2014). A inexistência de uma medida de desempenho comum às duas estratégias, vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento, torna a avaliação comparativa dos sistemas uma tarefa complexa, onde uma abordagem integrada dos fenômenos energético e luminoso deve partir de um "denominador comum", até agora inexistente.

Diante disso, surgem os seguintes questionamentos. Como comparar o desempenho energético e luminoso de vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento? Qual entre as estratégias apresenta melhor desempenho: vidros de controle solar ou dispositivos de sombreamento?

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Analisar comparativamente o comportamento luminoso e energético de vidros de controle solar e de dispositivos de sombreamento.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Verificar o desempenho dos vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento equivalentes em relação a medidas dinâmicas da iluminação natural.
- Propor um indicador de desempenho térmico que possibilite comparar o comportamento luminoso de vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento.

- Identificar a participação dos diferentes parâmetros dos elementos proteção na composição do Fator Solar Equivalente.

## 1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

O **Primeiro Capítulo** corresponde à introdução, onde são explicados o contexto geral do consumo de energia no Brasil e a participação das edificações nele inseridos. Apresenta-se a justificativa do estudo proposto e os objetivos da pesquisa.

O **Segundo Capítulo** corresponde à revisão bibliográfica dos conceitos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa no âmbito do desempenho térmico e luminoso das diferentes configurações de fachadas, especialmente dos elementos de proteção solar e fechamentos envidraçados; sua interação por meio do ganho de calor solar e o consumo energético decorrente.

O **Terceiro Capítulo** retrata o método adotado para a determinação dos parâmetros de análise e dos modelos computacionais para a realização das simulações. Nele se encontra também a proposição do *Fator Solar Equivalente* e o método para tratamento e manipulação dos dados para a posterior avaliação dos resultados.

No **Quarto Capítulo** são apresentados os resultados do estudo do Fator Solar Equivalente Anual e Mensal por meio da análise da correlação dos consumos dos modelos com dispositivo de sombreamento e vidros de controle solar. E, na sequência, os resultados da verificação da influência das cargas internas, refletâncias e análise de sensibilidade



das variáveis para composição do FSE. Por fim, são apresentadas as análises comparativas da iluminação natural por meio de análise gráfica e descritiva.

O **Quinto Capítulo** corresponde às conclusões do trabalho obtidas a partir das análises dos resultados das simulações e as considerações finais da pesquisa.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica que abrange os aspectos referentes às diferentes estratégias de controle solar, trabalhos sobre desempenho energético e luminoso de edificações e, especialmente, estudos desenvolvidos a partir de simulação computacional.

### **2.1. SISTEMAS DE FACHADAS**

As envoltórias das edificações contam, atualmente, com vastas possibilidades de acabamentos e soluções de revestimentos e esquadrias. As fachadas são compostas por elementos opacos e transparentes e buscam atender parâmetros de desempenho previstos em normas como a NBR15220 (ABNT, 2005) e a NBR15575 (ABNT, 2013), e podem oferecer recursos estéticos aos projetistas para a composição das volumetrias.

Estes sistemas compreendem soluções para esquadrias e sistemas de sombreamento, permitindo alto grau de vedação e estanqueidade.

#### **2.1.1. Vidros de controle Solar**

Os vidros são materiais transparentes que desempenham diversas funções na arquitetura. Entre elas, possibilitam a iluminação natural dos espaços internos e permitem o contato visual com o exterior.

Encontram-se no mercado diferentes tipos de vidros disponíveis para controlar as perdas e ganhos de calor. Os mais utilizados são os vidros revestidos de controle solar: reflexivos, duplos ou triplos, com tratamento de baixa emissividade (low-e), espectralmente seletivos e combinações destes tipos entre si.

Os vidros revestidos de controle solar conferem uma aparência contemporânea à edificação e são indicados para locais onde há grande incidência de raios solares como: fachadas de prédios, janelas e portas (ver Figura 2). A transformação do vidro float - vidro plano produzido a partir do processo de flutuação, em vidro revestido de controle solar consiste na aplicação de uma camada metalizada - *coating* - em uma de suas faces. Esta camada tem a função de reduzir a entrada de calor para o interior do ambiente, agindo, sobretudo, na reflexão da radiação para o ambiente externo, minimizando a quantidade de calor que atinge efetivamente o ambiente interno.

**Figura 2. Fachada com aplicação de vidro revestido de controle solar**



Fonte: Repositório digital da Anavidro.

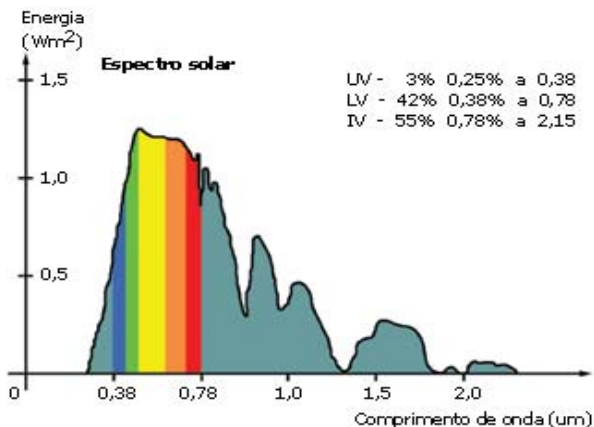
Para entender o funcionamento dos *coatings* metalizados deve-se compreender o espectro da energia solar (ver Figura 3), que pode ser dividido em três faixas conforme seu comprimento de onda:

- Ultravioleta (UV): 310-380 nanômetros
- Visível: 380-780 nanômetros
- Infravermelha (IV) - Acima de 780 nanômetros

---

Disponível em: < <http://www.anavidro.com.br/wp-content/uploads/2014/02/Vidro-Low-E-impede-a-transferência-térmica-entre-dois-ambientes.jpg> >. Acesso em abr. 2016.

**Figura 3. Espectro da energia solar**

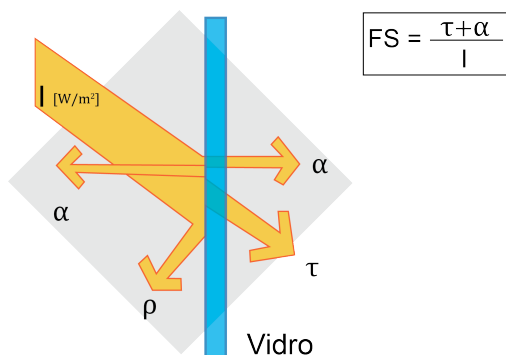


Fonte: Repositório digital da revista Finestra.

Os *coatings* foram desenvolvidos para minimizar especificamente a quantidade de luz ultravioleta e infravermelha que atravessam o vidro, agindo diretamente sobre a porcentagem de energia solar que incide no vidro e se transfere para o lado interno, ou seja, sobre o Fator Solar.

Quando a energia radiante incide sobre uma superfície transparente ela pode ser absorvida ( $\alpha$ ), refletida ( $\rho$ ) ou transmitida ( $\tau$ ) (ver Figura 4). Esta parcela absorvida pelo vidro pode ser dispersada (por meio da convecção do ar) ou reirradiada (pela superfície do vidro). A habilidade do material de irradiar energia é conhecida como emissividade.

**Figura 4. Fator Solar de Vidros**



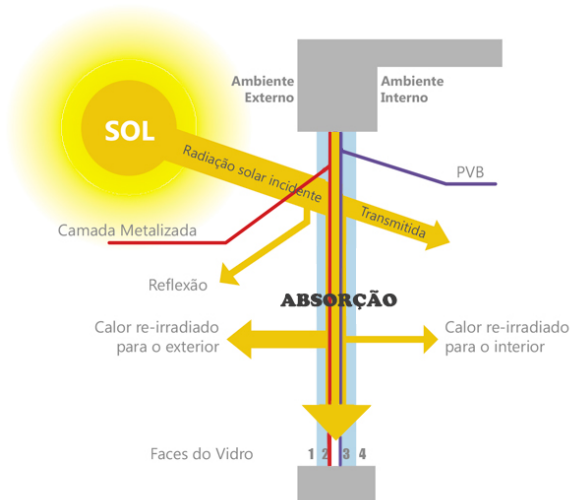
Fonte: Adaptado de Lamberts et al. (2014)

De maneira geral, materiais reflexivos possuem baixa emissividade, enquanto materiais não reflexivos metálicos possuem alta emissividade. Todos os materiais irradiam calor na forma de ondas longas, em maior ou menor quantidade, dependendo da emissividade e da temperatura de suas superfícies. A energia radiante é um dos fenômenos mais importantes para a transferência de calor que ocorre nas janelas. Logo, a redução da emissividade em uma ou mais superfícies envidraçadas melhora a capacidade de isolamento das mesmas (PALMER; GENTRY, 2012)

Frente a esta situação, os *coatings* baixo emissivos ou *low-e* têm sua aplicação. Os vidros *low-e* têm uma camada microscopicamente fina e transparente que reflete a radiação infravermelha de ondas longas. Alguns vidros *low-e* refletem também quantias significantes de energia em ondas curtas da faixa ultravioleta. Nos climas frios, a película é

geralmente posicionada na "face três" de um vidro duplo com câmara de ar, de modo que reflita o calor de volta para o interior, reduzindo a perda de calor radiante através do vidro. O inverso é aplicado para climas quentes, onde ao ser posicionado na "face dois" reflete o calor para o ambiente externo (Ver Figura 5).

**Figura 5. Vidros low-e**



Fonte: Repositório digital Allaboutthatglass

A aplicação de vidros duplos insulados (ver figura 6), neste caso atua principalmente sobre a Transmitância Térmica (U). A Transmitância Térmica pode ser definida como a medida do ganho ou da perda de calor

---

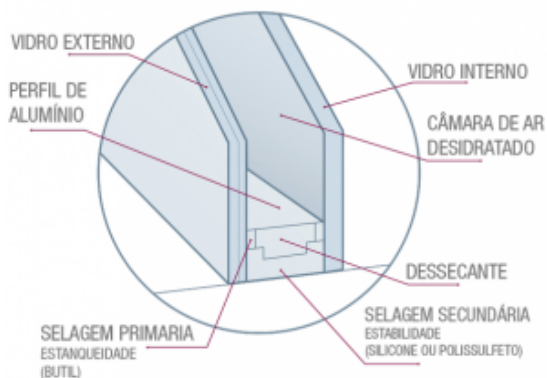
Disponível em: <<http://allaboutthatglass.com/vidro-low-e-ou-baixo-emissivo/>>. Acesso em abr. 2016.



através do vidro devido à diferença entre as temperaturas internas e externas.

Segundo a ASHRAE (2009), a Transmitância Térmica no caso de fechamentos envidraçados depende de diversos fatores: como número de planos de vidro, dimensões da câmara de gás, composição do gás da câmara entre os vidros, orientação do plano de vidro em relação à vertical e emissividade de cada superfície. Este valor pode ser estimado através de algumas ferramentas computacionais, como por exemplo o WINDOW (LBNL, 2013).

**Figura 6. Sistema de vidro duplo insulado**



Fonte: Repositório digital da Anavidro

Além dos aspectos energéticos, para correta especificação dos vidros de controle solar, deve-se levar em conta as necessidades de luz natural da edificação e a porcentagem de radiação na faixa de luz visível que atravessa o vidro ou, mais especificamente, seu valor de Transmissão de Luz Visível (TV).

O ganho solar em relação à luz ou índice de seletividade (IS) é a razão entre a Transmissão de Luz Visível (TV) e o Fator Solar. Esse índice define a capacidade do vidro em transmitir luz e barrar a radiação indesejada nos climas quentes. Deste modo, quanto maior o valor de IS, mais luz é admitida no ambiente, com menor entrada de calor – isso é desejado especialmente no verão. Com essa razão, denomina-se o vidro como "espectro seletivo" (GUARDIAN, 2012).

Ainda pouco utilizados no Brasil, alguns vidros são passíveis de terem suas características radiantes alteradas. É o caso dos vidros eletrocromico, gasocromico, cristal líquido e eletroforético examinados e comparados por Baetens et Al. (2010) sob os aspectos da iluminação dinâmica e do controle da radiação solar.

Vidros eletrocromicos, por exemplo, são capazes de controlar a passagem da radiação solar pela aplicação de uma voltagem externa. Essa modulação da transmitância da radiação solar é atingida tanto pela regulação da absortância quanto da refletância (JELLE, 2013).

Segundo o estudo de Baetens et Al. (2010), os vidros eletrocromicos e eletroforéticos apresentam melhor desempenho nas faixas de modulação (possuindo uma faixa maior de variação entre os estados escuro e claro). No estudo conduzido pelos autores, o vidro de cristal líquido foi considerado ruim para modulação, uma vez que se

demonstrou instável sob a radiação UV, sendo considerado inapropriado para aplicações externas em edificações. Ao mesmo tempo, os vidros de cristal líquido e partículas suspensas compartilham da necessidade de um campo elétrico para se manterem transparentes, resultando em maior gasto com energia elétrica quando comparados aos vidros eletrocrômicos.

Além disso, a pesquisa constatou que regular a absortância dos panos de vidro pode torná-los inaceitavelmente quentes, estado que leva a degradação de diferentes camadas do vidro eletrocrômico, ao passo que, ao escurecer o vidro, em torno de 50% do que é absorvido é reirradiado para o edifício, resultando também em ganhos de calor indesejáveis (JELLE, 2013). Desta forma, no que compete aos vidros eletrocrômicos, demonstrou-se como melhor alternativa regular sua refletância.

**Figura 7. Vidro eletrocrômico com três zonas de modulação**



Fonte: Repositório digital da Sageglass

Observa-se, assim, que o processo para definição do vidro adequado para cada uma das fachadas é complexo. E que este deve levar em consideração ao menos três indicadores básicos de desempenho: Fator Solar (FS), Transmissão Visível (Tv) e a Transmitância Térmica (U), atentando também para aspectos acústicos, de cunho estético e de influência no entorno da edificação.

### 2.1.2. Dispositivos de Sombreamento

A principal função de um elemento de sombreamento é a proteção do envelope transparente à radiação solar direta em condições de verão, assim prevenindo o superaquecimento ao bloquear o acesso do fluxo energético indesejado à edificação. Os protetores solares podem ser externos, internos ou incorporados à própria envoltória da fachada. Também podem ser fixos ou reguláveis, manuais, mecânicos ou automatizados.

Entre as várias soluções para limitar o ganho de calor, interceptar a radiação solar antes que ela atinja as áreas envidraçadas por meio do uso de dispositivos externos de sombreamento (ver Figuras 8 e 9) tem demonstrado ser a mais eficiente (GRATIA; HERDE, DE, 2007; KIM et al., 2012). Na verdade, esta solução tem se apresentado ainda mais efetiva à medida que as envoltórias das edificações evoluem, melhorando seu isolamento, reduzindo a taxa de infiltração de ar e, conseqüentemente, tornando os espaços internos mais sensíveis ao ganho solar através das aberturas.

**Figura 8. Dispositivo externo de  
sombreamento horizontal**



Fonte: Repositório digital da  
Nationwide Louvre Company  
Ltda.

**Figura 9. Dispositivo externo de  
sombreamento vertical**



Fonte: Repositório digital da  
Higherlogicdownload

Diferentemente dos vidros revestidos de controle solar, os dispositivos de sombreamento, quando bem projetados, podem garantir um comportamento espacialmente seletivo da radiação solar, ou seja, que

---

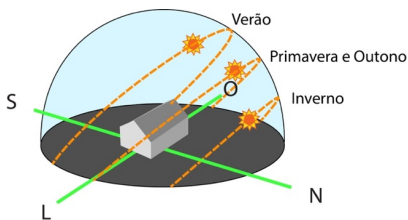
Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/louvres/14457477425/>. Acesso em mar. 2016

Disponível em: <http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AIA/UploadedImages/9fc359de-cd93-457d-b668-a56599bbb547/blog1photo3.JPG>  
Acesso em abr. 2016

os raios solares passem pelas aberturas apenas nos períodos desejados. Projetar um dispositivo de sombreamento exige, contudo, um maior conhecimento da geometria da insolação, à qual o dispositivo é mais sensível.

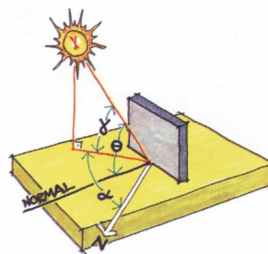
A posição do sol, relativamente a um ponto da Terra, varia ao longo do dia e também ao longo do ano. Um observador situado num ponto da superfície terrestre vê o sol tomar diferentes posições no seu horizonte visual durante o dia, devido ao movimento de rotação do planeta em torno do eixo polar. Também notará que no verão o sol atinge posições “mais altas” (ver Figura 10) do que no Inverno, devido ao movimento de translação em torno do sol. Esta posição do sol na abóbada celeste pode ser definida pelos ângulos de azimute solar ( $\gamma$ ), altura solar ( $\alpha$ ) e pelo ângulo de incidência solar ( $\theta$ ) (ver Figura 11)

Figura 10. Variação da altura Solar  
ao Longo do Ano



Fonte: O Autor

Figura 11. Geometria da Insolação  
- Ângulos

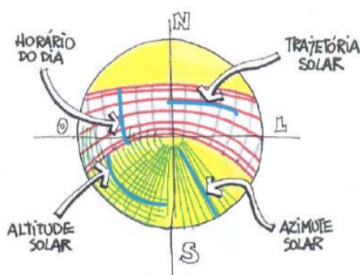


Fonte: (LAMBERTS et al., 2014)

- Azimute Solar ( $\gamma$ ) – É o ângulo formado entre a projeção do ângulo de incidência solar sobre a superfície e a orientação norte. Sempre tomado pela direita ou no sentido horário.
- Altitude Solar ( $\alpha$ ) – É o ângulo formado entre o raio solar e a sua projeção na superfície. Tem a ver com a hora do dia e período do ano. Por exemplo, ao nascer do sol sua altura é igual a zero.
- Incidência Solar ( $\theta$ ) – É o ângulo formado entre o raio solar e a normal da superfície receptora. Normal é a linha perpendicular à superfície vertical da edificação.

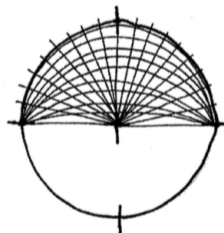
Estes ângulos são a base para os métodos usuais de projeto de dispositivos de sombreamento. Entre estes métodos, Dutra (1994) aponta o de Olgyay como o mais difundido. Ele consiste na construção de máscaras de sombreamento sobre a carta solar (ver Figura 12) para cada abertura da edificação.

**Figura 12. Carta solar para Florianópolis**



Fonte: Dutra (1994)

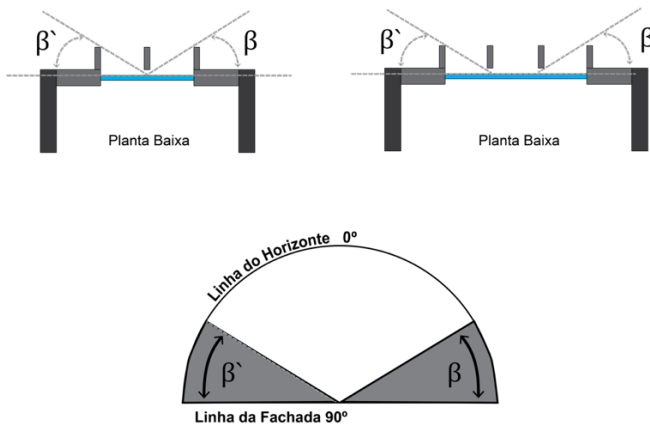
**Figura 13. Transferidor de Ângulos**



Fonte: Dutra (1994)

Estas máscaras são propostas por meio da utilização de um transferidor de ângulos verticais e horizontais de sombreamento ( $\alpha$  e  $\beta$ ) (ver Figura 13) em planta e em corte (ver Figuras 14 e 15) (LAMBERTS et al., 2014).

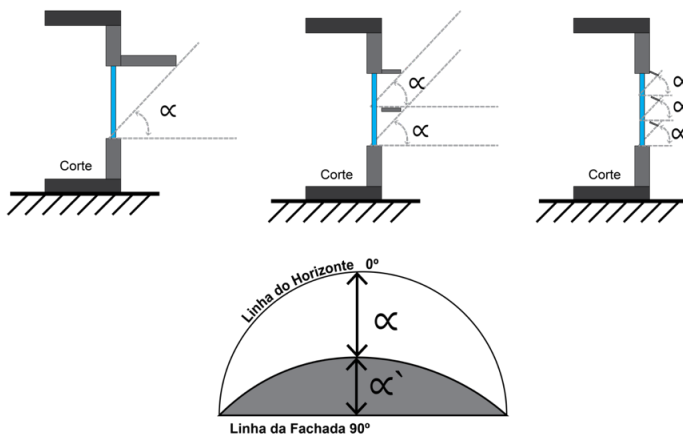
**Figura 14. Exemplos de brises verticais com mesma máscara de sombreamento.**



Fonte: O Autor



**Figura 15. Exemplos de brises horizontais com mesma máscara de sombreamento.**



Fonte: O Autor

No método de Olgyay, um *brise* é considerado eficiente quando permite sombrear o máximo possível do sol indesejável e, simultaneamente, o mínimo do restante (DUTRA, 1994).

Tal fato faz com que, embora o método apresentado seja de simples aplicação por empregar diretamente as cartas solares, seja restrito sob o ponto de vista do desempenho do dispositivo de sombreamento, uma vez que a máscara por si só não oferece indicadores dos períodos em que é desejável ou não a admissão de radiação, deixando a cargo do projetista a definição dos períodos a sombrear.

O método das Radiações Ponderadas (RP), proposto por Aroztegui (1981), traz componentes quantitativos para a análise do

sombreamento ao transferir os valores ponderados das radiações diretas e difusas para a carta solar. Entretanto, da mesma forma que o método de Olgyay, o método das RPs utiliza apenas as máscaras de 100% de sombras, ignorando os momentos em que a abertura é parcialmente sombreada. Além disso, a parcela difusa da radiação solar que é avaliada pelo método é resultante de céu limpo, padrão que se desvincula da realidade.

De acordo com Sargent et al. (2011), os demais métodos existentes para projeto de dispositivos de sombreamento dividem tarefa em duas etapas: seleção do período de sombreamento e geração da forma.

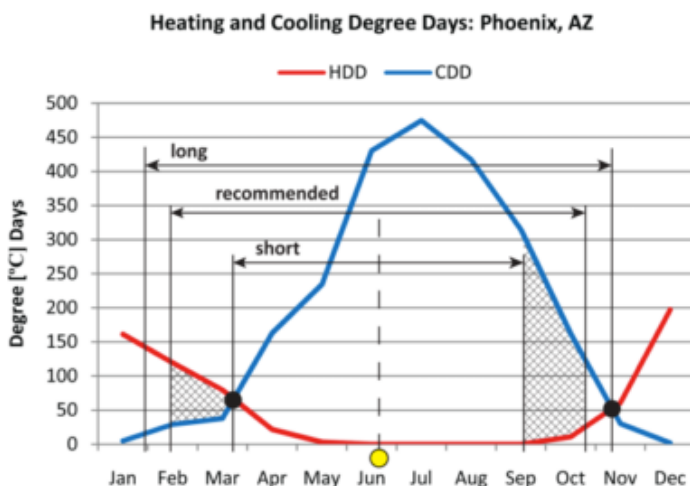
A maioria dos métodos para seleção do período de sombreamento envolve a identificação de datas de "corte". Além disso, é comum selecionar entre estas datas um padrão de horas "críticas" onde a radiação solar direta que incide sobre a janela deve ser bloqueada.

Sargent et al. (2011) citam os três métodos mais comuns de seleção das datas limites. O primeiro, intitulado seleção do equinócio, define o intervalo desejado de sombreamento como o período entre o equinócio de primavera e de outono. Este método é baseado no fato de que os equinócios aproximam as fronteiras entre os períodos anuais de aquecimento e resfriamento.

O segundo método utiliza a seleção de graus-dia de aquecimento (HDD) e resfriamento (CDD) para identificar os momentos de "sobreaquecimento" e períodos do tempo onde o sombreamento é assumidamente desejável. Porém, por conta da frequente assimetria dos padrões climáticos por volta do solstício de verão, este intervalo tende a conflitar com os requerimentos dos dispositivos de sombreamento

estáticos que possuem períodos de sombreamento simétricos, conforme exemplificado pelos autores na figura 16 para a localidade de Phoenix, Arizona.

**Figura 16. Método de graus-dia de aquecimento e resfriamento para seleção do período a sombrear.**



Fonte: Sargent et al. (2011)

De modo a resolver este conflito, os autores sugerem que os períodos sejam estabelecidos através da seleção de um intervalo simétrico com a máxima integração-temporal das somas dos graus-dia de resfriamento e aquecimento (CDD-HDD).

Este método é conceitualmente superior ao método do equinócio, uma vez que considera o clima local. Entretanto, os graus-dia de aquecimento e resfriamento nem sempre fornecem bons estimadores de

quando um espaço está sub-aquecido ou superaquecido, sendo que estas condições são afetadas por parâmetros específicos da edificação, como as cargas internas, padrões de ocupação, forma do edifício, propriedades da envoltória, etc.

O terceiro, e último método apresentado, envolve a condução de "rápidas" simulações térmicas anuais do espaço em consideração sem qualquer dispositivo de sombreamento. Esta abordagem, chamada de seleção-térmica, leva em consideração tanto o clima quanto os demais parâmetros construtivos e de utilização da edificação anteriormente citados. A partir destas simulações, as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento são calculadas, e o período simétrico de sombreamento é definido utilizando-se da mesma abordagem aplicada no método da seleção por graus-dia.

As três estratégias levam a datas únicas de corte que dividem o ano em períodos com e sem sombreamento. No entanto, uma abordagem que bloqueie todas as horas onde o sombreamento é desejado torna-se inviável por demandar elementos de proteção extremamente grandes. Por isso, define-se um intervalo de tempo onde o sombreamento seja garantido, geralmente considerando os períodos entre as 9h às 15h, 10h às 14h e ao meio dia.

Em relação à geração da forma do dispositivo de proteção, Sargent et al. (2011) propõem um novo método computacional intitulado SHADERADE.

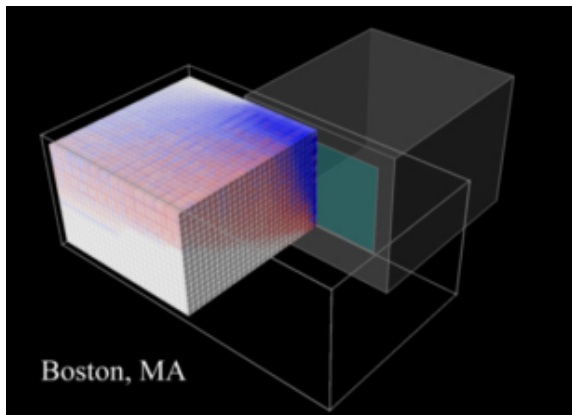
O método remonta raios individuais, de diferentes partes de uma janela, ao longo dos ângulos solares, a fim de quantificar os seus efeitos concorrentes em um volume de sombreamento tridimensional (ver Figura

17). Para definir qual a fração da energia solar que é desejável para determinado horário do ano, o método baseia a sua análise sobre cálculos de carga por meio de simulação computacional de um modelo sem sistema de sombreamento externo.

Estes vetores são projetados para um volume exterior proposto pelo utilizador, que define o limite espacial de todos os locais de sombreamento possíveis de serem considerados. O volume é dividido em uma grande e uniforme malha, e cada célula é verificada por intersecções com os vetores projetados.

A transmitância otimizada de cada célula é então mapeada com uma escala que vai de azul ( $T_{cell} = 0$ ) ao vermelho ( $T_{cell} = 1$ ). A decisão sobre a inclusão ou não de uma célula no sombreamento é realizada comparando as cargas iniciais àquelas previstas para a célula que tem uma transmitância de zero. O método demonstrou ser extremamente útil ao permitir a redução do tamanho dos dispositivos de sombreamento, fornecendo para o projetista a informação de quais porções do dispositivo são mais necessárias para melhoria do desempenho térmico.

**Figura 17. Método SHADERADE para projeto de dispositivos de sombreamento**



Fonte: Sargent et al. (2011)

Os diversos métodos apresentados nesta seção ignoram a possibilidade de aumento ou redução dos índices de iluminação provenientes da utilização de dispositivos de sombreamento. Esta contribuição tem sido frequentemente estudada de forma dissociada do fenômeno térmico, não proporcionando uma visão global do desempenho dos mesmos.

De acordo com Bogo (2007), a admissão de luz natural através das aberturas, de forma controlada, possibilita a melhoria das condições de iluminação do ambiente interior a partir da entrada da luz em quantidade suficiente e/ou uma distribuição diferente da insolação direta no ambiente interno. Esta influência ocorre devido ao bloqueio/filtração parcial da luz natural incidente na abertura, e da variação da direção da

luz para o ambiente interno por meio dos múltiplos processos de reflexão entre os elementos de controle solar (ESQUIVIAS et al., 2014).

Sendo assim, é importante conhecer a refletância dos materiais dos dispositivos de sombreamento, uma vez que este valor é capaz de influenciar não somente a carga térmica, mas também a parcela da energia luminosa refletida para o ambiente interno.

Dentre as poucas abordagens capazes de considerar ambos os fenômenos térmico e luminoso, está a otimização geométrica dos dispositivos de controle solar através de algoritmos genéticos/evolutivos (TSANGRASSOULIS et al., 2006; MANZAN, 2014). Esta é capaz de resolver situações com fenômenos conflitantes, como o ganho térmico e a iluminação natural por exemplo.

Os algoritmos evolutivos trabalham com o cruzamento de "indivíduos", onde parte dos "genes" (características) é herdada de uma geração para outra. Cada um dos novos indivíduos é avaliado por meio de um valor de "fitness", valor que expressa seu desempenho frente à determinada situação. Ainda que a abordagem traga os benefícios da otimização conjunta de múltiplos fenômenos, encontrar os melhores indivíduos costuma ser um processo complexo, que demanda um grande período de tempo e número de simulações computacionais.

Posto isso, fica evidente que a caracterização da eficiência energético-luminosa dos dispositivos de proteção solar é complexa e deve contemplar, sobretudo, seus aspectos geométricos, da orientação e clima bem como a refletância dos materiais que compõem o dispositivo.

## 2.2. DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES

A definição de desempenho das edificações está diretamente associada ao comportamento das mesmas quando em utilização, onde o edifício deve ser entendido como produto e, portanto, apresentar características que o capacitem a cumprir objetivos e funções para os quais foi projetado.

No Brasil, em vigor desde 2013, a Norma ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), sob o título de “Edificações Habitacionais – Desempenho”, estabelece padrões mínimos de qualidade baseados no desempenho e na durabilidade dos sistemas. Foi concebida de modo a atuar como balizadora para o mercado de construção civil. A nova Norma visa estabelecer qualitativa e quantitativamente os critérios globais de desempenho a serem atingidos. Seu grande diferencial em relação às normas da ABNT anteriores é que a ABNT NBR 15575 não é uma norma prescritiva, permitindo que processos construtivos alternativos tenham potencial de atendê-la, desde que se façam os ensaios necessários por ela descritos.

A norma está estabelecida em seis partes: Requisitos Gerais (NBR 15.575-1); Sistemas estruturais (NBR 15.575-2); Sistemas de pisos (NBR 15.575-3); Sistemas de vedações verticais internas e externas (NBR 15.575-4); Sistemas de coberturas (NBR 15.575-5); e Sistemas hidrossanitários (NBR 15.575-6). A norma preconiza procedimentos para a análise do desempenho térmico de edificações a partir das



características térmicas dos elementos pertencentes ao seu envelopamento (paredes externas e coberturas), definidas por procedimentos de cálculo apresentados pela norma ABNT NBR 15220 de “Desempenho Térmico de Edificações”.

Em nota técnica Sorgato et al. (2012) destacam algumas considerações importantes em relação ao texto proposto da NBR 15575, que na época encontrava-se em consulta pública.

Os autores relatam que o item sobre sombreamento das janelas foi removido da NBR 15575, mas que deveria ter sido mantido devido à comprovação das grandes contribuições ao conforto térmico dos usuários com o uso de dispositivo de sombreamento nas janelas. E também, que o método de simulação proposto no Item 11.2 da NBR 15575-1 não permite uma adequada análise anual do desempenho térmico das edificações residenciais brasileiras.

No que se refere ao desempenho luminoso da edificação, a NBR 15575, agora vigente, prevê as áreas que devem receber iluminação natural, oriunda diretamente do exterior ou indiretamente através de recintos adjacentes. Estabelece, ainda, que os ambientes de permanência prolongada devem atender a uma iluminância mínima de 60lux no centro do ambiente.

O critério para avaliação é, contudo, ainda baseado na abordagem de Fator de Luz Diurna (FLD), ou seja, na razão da iluminância interna em relação à iluminância externa, o que não estimaria a frequência de ocorrência das iluminâncias.

Ainda sem uma norma brasileira específica, as edificações comerciais permanecem sujeitas às normas de desempenho anteriores como a NBR 15220 - Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005), e também às normas mais específicas e recentes como a NBR ISO-CIE 8995 - Iluminação de Ambientes de Trabalho (ABNT, 2013).

### 2.2.1. Desempenho termo-energético e configurações das aberturas

O desempenho termo-energético das edificações depende da combinação de diversos fatores, como as propriedades dos materiais da envoltória e dos fechamentos transparentes, das condições bioclimáticas nas quais a edificação está inserida, seu padrão de uso e ocupação e suas cargas internas (iluminação, pessoas e equipamentos).

Segundo Westphal (2007), a determinação do desempenho termo-energético de um modelo deve partir da identificação das trocas de calor da edificação. Estas trocas de calor são oito: trocas de calor pelas paredes, cobertura, piso, trocas e ganho de calor por radiação solar nas janelas, infiltração de ar externo ou perda de ar interno, geração de calor pelo sistema de iluminação artificial, geração de calor pelos demais equipamentos elétricos e geração de calor sensível e calor latente das pessoas.

Cada uma destas trocas possui variáveis associadas que devem ser consideradas para cálculo do balanço térmico (ver Tabela 1). Desta maneira, o consumo energético da edificação é determinado pelas trocas de calor que ocorrem na mesma, interagindo com o clima em que se insere e relacionando os diversos sistemas do edifício.

**Tabela 1. Trocas de calor para cálculo do balanço térmico**

Trocas de calor	Variáveis relacionadas
Paredes e cobertura	Dimensões
	Orientação solar
	Transmitância térmica
	Capacidade térmica
	Absortância à radiação solar
	Emissividade
Piso	Dimensões
	Contato externo (com o solo ou não)
	Transmitância térmica
	Capacidade térmica
	Emissividade
Janelas	Dimensões
	Orientação solar
	Transmitância térmica
	Transmitância, absortância e refletância à radiação solar
	Proteções solares externas e internas
Infiltração	Taxa de infiltração horária
Iluminação e equipamentos elétricos	Potência
	Padrão de uso
Pessoas	Quantidade
	Taxa metabólica
	Rotina de ocupação

Fonte: Westphal (2007)

Diversos estudos têm sido conduzidos para verificar de que forma estas variáveis relacionadas ao balanço térmico e desempenho

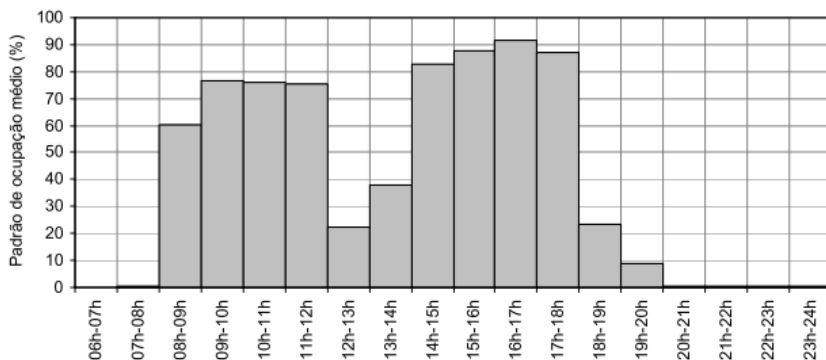
termo-energético afetam o desempenho das edificações com fachadas envidraçadas. Santana (2006) estudou a influência de parâmetros construtivos no consumo de energia em edifícios de escritórios em Florianópolis, SC. O trabalho procedeu, inicialmente, com caracterização construtiva por meio de levantamentos de localização e distribuição de 35 edifícios de escritório considerando aspectos de forma, cor das fachadas externas, número de pavimentos, presença de brises, orientação das fachadas principais, definição das áreas de fachada e das áreas de janela.

Com base neste levantamento, a autora identificou a tipologia predominante que consistiu em um modelo com 8m de largura por 25m de comprimento, 2,7m de altura de pé direito e 11 pavimentos. O estudo identificou como materiais mais utilizados nas paredes externas os tijolos cerâmicos com reboco em ambas as faces e cobertura composta por telhas de fibrocimento e laje de concreto.

Essa tipologia característica foi utilizada para compor o modelo-base das simulações realizadas para verificação da influência da variação de cada um dos parâmetros no consumo energético das edificações.

Além disso, ao analisar o padrão de ocupação médio destas edificações, Santana (2006) identificou uma ocupação mais intensa no período das 8h às 12h e das 14h às 18h (ver Figura 18).

**Figura 18. Padrão de ocupação médio dos edifícios de escritório analisados**



Fonte: Santana (2006)

No que tange aos vidros analisados, após realizações de simulações termo-energéticas no EnergyPlus o estudo identificou uma variação no consumo de energia do edifício em função do Fator Solar. Apontando para um acréscimo no consumo de energia à medida em que aumentam os valores de FS.

Carlo (2008) por meio de estudo de campo, levantou dados de características de edificações comerciais e institucionais e de uso da energia de modo a formar bases para a criação de modelos representativos de certas atividades. Foram selecionadas três atividades para formar cinco modelos de edificações: grandes e pequenos escritórios, grandes e pequenas lojas e hotéis. As características da envoltória como: área de janela, tipo de vidro, existência de dimensões de proteções solares, proporção das menores fachadas em relação às maiores, número de pavimentos e forma foram observados em 1103 edificações distribuídas em cinco cidades brasileiras: Recife, Salvador, Belo Horizonte, São Paulo

e Florianópolis. As características mais comuns encontradas para cada atividade formaram modelos representativos para posterior simulação.

No levantamento foram registradas a densidade de potência instalada de iluminação e a carga de equipamentos média de cada uma das tipologias. Chegando a valores de  $6,7\text{W}/\text{m}^2$  de iluminação e  $9,6\text{W}/\text{m}^2$  de equipamentos para grandes escritórios e  $36,7\text{W}/\text{m}^2$  para iluminação e  $17,3\text{W}/\text{m}^2$  de equipamentos para pequenos escritórios, por exemplo (CARLO, 2008).

Em relação a densidade de carga interna (DCI), verificou-se que cada atividade apresenta uma densidade específica, de acordo com o seu uso. O autor, para investigar o grau de influência deste parâmetro, optou por simular alternativas do protótipo com sua densidade original e com uma densidade maior ou menor que a original, de acordo com a sua grandeza (ver tabela 3). Onde constatou-se que aumento da DCI reduziu o impacto das alternativas de materiais da envoltória sobre o consumo de energia.

**Tabela 2. Densidades de carga interna originais e densidades alternativas.**

<b>Protótipo</b>	<b>DCI original (<math>\text{W}/\text{m}^2</math>)</b>	<b>DCI alternativa (<math>\text{W}/\text{m}^2</math>)</b>
Grande escritório	18,90	28,90
Pequeno escritório	30,56	20,56
Hotel	15,30	24,20
Grande Loja	37,60	24,00
Pequena loja	29,60	37,60
Escritório vertical	18,50	37,60

Fonte: Carlo (2008)

Winkelmann e Lokmanhekim (1985) analisaram, por meio de simulações com o software DOE2, um modelo de um edifício típico de escritórios com 25 andares de altura e 50% de abertura das fachadas, considerando quatro climas distintos nos Estados Unidos: Miami, Los Angeles, Washington e Chicago. O estudo contemplou os diversos tipos de vidros de controle, vidros duplos, sombreamento externo e interno das aberturas. Em todas as quatro cidades, a alternativa que demonstrou menor consumo energético foi a que utilizou o vidro duplo *clear* com sombreamento externo. Os resultados apontaram que a utilização de vidros duplos para o clima de Miami teve, entretanto, pouco efeito sobre o consumo energético. Porém, para o clima de Washington foi encontrada uma redução expressiva de 10 a 22% e para o clima de Chicago uma redução ainda maior, em torno de 16% a 32%, demonstrando assim que a escolha da tecnologia a ser aplicada nas envoltórias não pode ser dissociada do clima na qual a edificação está inserida.

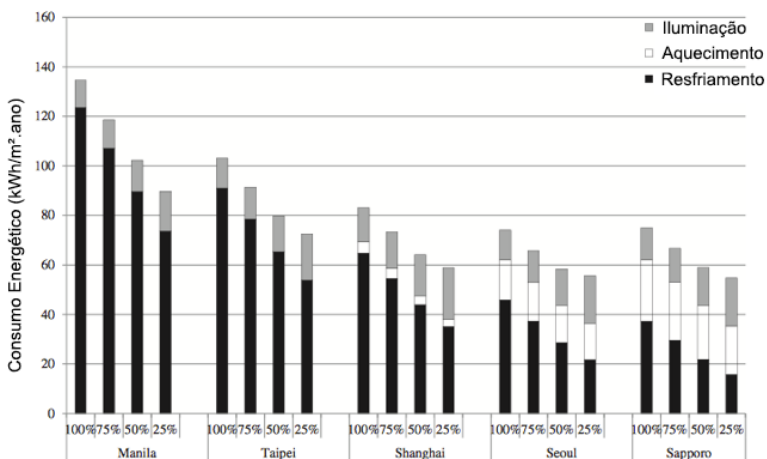
Consoante a isso, o trabalho de Lee et al. (2013) observa que as performances das janelas variam não somente com suas características físicas, mas também conforme o clima onde estão inseridas.

A pesquisa avaliou o desempenho de diferentes sistemas de janelas e propriedades como a Transmitância Térmica (U), Fator Solar (FS) e Transmissão Visível (TV) dos vidros, além de variações no percentual de Abertura de Fachada (PAF) e orientações para cinco tipos climas asiáticos (Manila, Taipei, Shanghai, Seoul e Sapporo), objetivando a otimização dos sistemas de aberturas para aquecimento, refrigeração e consumo com iluminação artificial.

Nos gráficos apresentados, referentes ao percentual de abertura da fachada (PAF) no consumo energético das cidades analisadas (ver Figura 19), a carga total de energia do edifício reduziu significativamente à medida que reduziram as áreas de aberturas (PAF). Além disso, menores áreas de abertura tenderam a aumentar a carga necessária para iluminação artificial.

O efeito da variação da Transmitância (U) das janelas foi demonstrado na figura 20. A porcentagem de redução do consumo com refrigeração mais alta encontrada foi para a cidade de Manila, apresentando 7%, e a mais baixa foi para a cidade de Sapporo, com 0,7%. Entretanto, a variação da transmitância apresentou melhores resultados em relação à redução com o consumo por aquecimento, registrando redução de 37% para Sapporo e 49% para Shanghai.

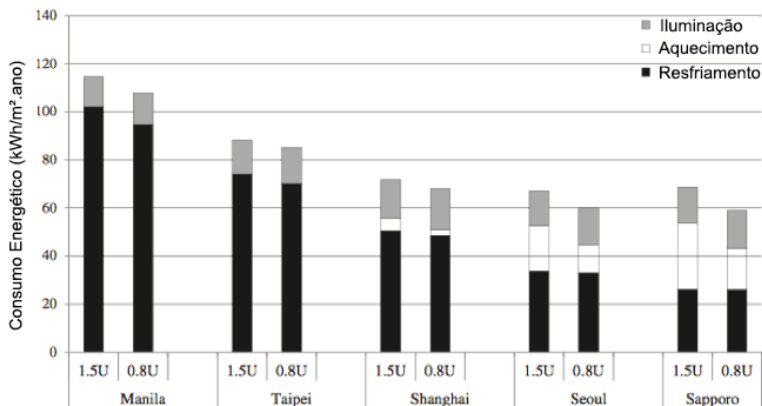
**Figura 19. Efeito da mudança do percentual de abertura da fachada no consumo energético em cinco condições climáticas.**



Fonte: LEE et al. (2013)



**Figura 20. Efeito das mudanças de Transmitância Térmica (U) e consumo energético em cinco condições bioclimáticas**



Fonte: LEE et al. (2013)

Os resultados obtidos através da simulação computacional no software COMFEN demonstraram que para otimização das aberturas em relação aos climas em questão seria recomendável a redução do PAF para menos de 25%, com exceção das fachadas Norte em Manila e Taipei. Tanto para os climas quentes quanto para os climas frios, um alto valor de Fator Solar e Transmissão Visível foram benéficos para economia de energia, enquanto vidros triplos com menor Transmitância Térmica (U) ofereceram vantagens, particularmente na economia de energia com aquecimento.

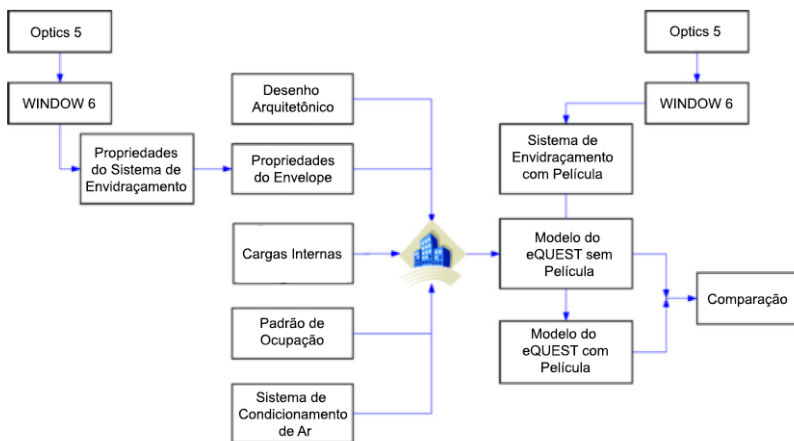
No que concerne às aberturas envidraçadas mais especificamente, Andreis et al. (2014) analisaram o desempenho energético de fachadas com vidros laminados e vidros duplos em quatro cidades brasileiras: São Paulo, Rio de Janeiro, Fortaleza e Curitiba,

ratificando que, quanto maior o PAF e o fator solar, maior o consumo energético decorrente. Sendo assim, verificou-se que, na maioria dos casos analisados, a utilização de um vidro de controle solar permite que se assumam um PAF mais elevado (50% ou 60%), garantindo consumo semelhante ao decorrente de modelos com vidro de pior desempenho térmico (fator solar mais elevado, como incolor e verde) e área envidraçada reduzida (30% ou 40%).

Os vidros de controle solar foram os que apresentaram melhor desempenho energético, reduzindo o ganho de calor por radiação solar direta através da abertura. O vidro laminado de controle solar obteve melhor desempenho em climas com temperaturas amenas, enquanto que vidros duplos de controle solar promoveram a redução do consumo em climas quentes, devido à menor transmitância térmica que reduziu o ganho de calor por condução através da abertura.

Yin et al. (2012) estudaram a aplicação de filmes para controle solar e baixo-emissivos em fachadas envidraçadas para o clima de Shanghai, China. O estudo foi realizado de acordo com os procedimentos descritos na figura 21 e utilizou dados de vidros obtidos no software WINDOW (LBNL, 2013) para realização de simulações de desempenho termo-energético no eQUEST.

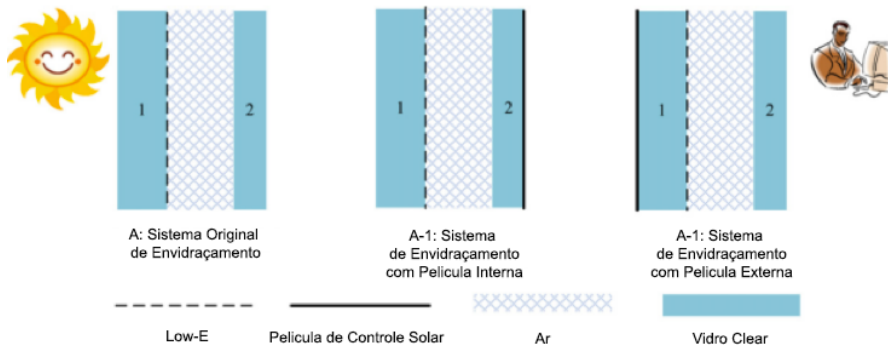
**Figura 21. Procedimentos utilizados para comparação dos desempenhos dos vidros**



Fonte: Yin et al. (2012)

Os autores afirmam que com a utilização de filmes de proteção solar no clima de Shangai, China, pode-se reduzir o fator solar de vidros em 44% e 22% quando da aplicação na face externa ou interna do vidro respectivamente (ver Figura 22), e quando associados à utilização de vidros duplos *low-e* podem representar uma redução da carga térmica a ser refrigerada de cerca de 27,5%.

**Figura 22. Sistemas de envidraçamento (duplo Low-e) com e sem película de controle solar**



Fonte: Yin et al. (2012)

O desempenho energético dos dispositivos sombreamento foi estudado por Palmero-Marrero e Oliveira (2010) através de simulações com o programa TRNSYS 16. No estudo, dispositivos verticais de sombreamento foram considerados para as orientações Leste e Oeste, e dispositivos horizontais foram utilizadas para sombrear a fachada Sul. O efeito do sombreamento no consumo energético do edifício variou conforme diversos parâmetros. Dentre eles, a localidade, o ângulo de inclinação e a área de abertura das janelas demonstraram ter especial importância na garantia de condições de conforto térmico.

Para a orientação Sul o dispositivo foi otimizado de modo a sombrear adequadamente no verão e ao mesmo tempo permitir a incidência solar durante o período de inverno. Por fim, seus parâmetros geométricos otimizados como: número de aletas, espaçamento entre as

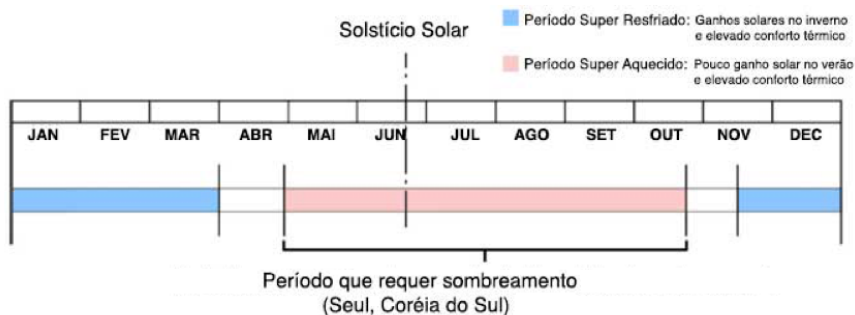
aletas, distância entre a janela e área do elemento, foram obtidas para diferentes áreas de janelas e cidades do Hemisfério Norte.

Os autores concluíram que em cidades como Londres, onde a radiação solar e temperatura ambiente são mais baixas do que nas outras cidades, o uso dos dispositivos de sombreamento durante todo o ano pode levar a uma demanda maior de energia anual com aquecimento. Porém, com sua aplicação em climas como em Cairo, Lisboa e Madrid pode-se obter reduções de 55% a 60%, 38% a 50%, e 3% a 9% respectivamente.

Através de simulações, Kim et al. (2012) averiguaram que formas de sombreamento poderiam colaborar com a eficiência energética, iluminação natural e, de forma adicional, garantir visuais mais agradáveis aos ocupantes de apartamentos na Coreia do Sul.

Dividindo o período de análise em dois, um período superaquecido e outro super-resfriado (ver Figura 23), várias simulações foram executadas através do software IES\_VE, que avalia o consumo de energia com refrigeração e aquecimento, possibilitando o melhor ajuste das aletas dos *brises* para a eficiência energética.

**Figura 23. Períodos de avaliação para localização de Seul, Coréia do Sul**



Fonte: Kim et al. (2012)

No estudo observou-se que o sombreamento externo é mais eficiente do que qualquer outra forma de sombreamento interno. Os resultados demonstraram que, na estação em que é necessário o resfriamento, as persianas convencionais com aletas inclináveis economizaram por volta de 10% de energia elétrica com o resfriamento, caindo para 3% com a inclinação das aletas a 60°. Enquanto o dispositivo externo experimental apresentou uma economia de 11% no pior caso com 60° de inclinação.

As medidas de desempenho utilizadas para controle de persianas automatizadas como método de sombreamento, antiofuscamento e diminuição de ganho de calor foram avaliados no artigo de Tzempelikos e Shen (2013). O estudo utilizou-se de modelos em tamanho real nos casos representativos para validação dos resultados de simulação computacional.

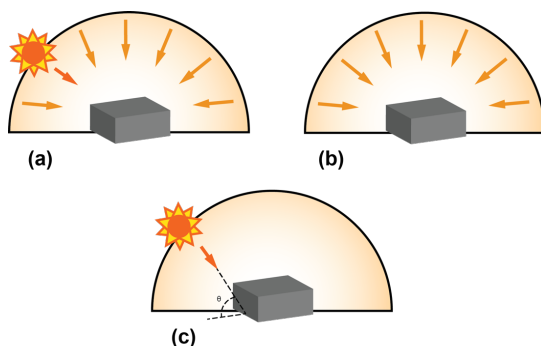
Observou-se na pesquisa que, dependendo da orientação, os sistemas de persianas automatizadas, que usam como medida de controle

a radiação solar, permaneceram recolhidos na maior parte do dia e durante as horas de trabalho, mostrando-se menos eficientes do que os modelos que utilizam a Iluminância como parâmetro de controle. As diferentes estratégias de controle da automação apresentaram uma variação no desempenho quanto ao consumo de energia elétrica entre 10,1% e 34,4%, dependendo do tipo do vidro e características do sombreamento da edificação.

## 2.2.2. Desempenho luminoso e configurações das aberturas

Pesquisas em todo o mundo têm sido realizadas buscando maneiras para melhor compreender e aplicar a luz natural nas edificações e avaliar o seu potencial de aproveitamento (ATHIENITIS; TZEMPELIKOS, 2002; LEE et al., 2006; DIDONÉ, 2009; LI, 2010; ROCHA, 2012; WILLIAMS et al., 2012; CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2014; FREEWAN, 2014).

A iluminação natural, segundo Mardaljevic (1998), chega às aberturas por meio de três componentes básicas: (a) iluminância global horizontal (Céu e Sol), (b) iluminância difusa horizontal (somente céu), e (c) iluminância direta normal (somente sol) (Figura 24).

**Figura 24. Componentes básicas da luz natural**

Fonte: Adaptado de Mardaljevic (1998)

A maneira com que estas componentes são tratadas e admitidas pelo sistema de aberturas afeta diretamente os índices de iluminação natural e a sua distribuição no ambiente interno. Sendo assim, características óticas dos vidros, a existência ou não de dispositivos de sombreamento, a geometria destes e sua refletância devem ser considerados para análise da iluminação natural, uma vez que afetam a transmitância bidirecional da abertura (BOGO, 2007).

A influência dos vidros de controle solar na iluminação natural é de fácil compreensão, visto que apresenta um comportamento linear de redução das iluminâncias em relação à Transmissão Visível ( $T_v$ ) do material. Esta redução ocorre em nível espectro-seletivo e pouco influencia na direcionalidade da luz visível transmitida.

Diferentes abordagens têm sido aplicadas para caracterização da eficiência luminosa dos ambientes. Essas abordagens consideram



medidas de desempenho que podem ser estáticas ou dinâmicas. A mais conhecida delas aplica o Fator de Luz Diurna (DF) como medida de desempenho.

O DF é uma medida de desempenho estática que pode ser definida como a razão entre as iluminâncias no interior e a iluminância simultaneamente disponível no exterior da edificação. Dessa forma, embora a luz do dia possa variar, o DF permanece constante, isso porque a iluminação do interior se modifica simultaneamente com a do exterior. Esta medida é eficiente em caracterizar um ambiente quanto à distribuição da iluminação natural, mas desconsidera a variação temporária do céu, as condições do sol e os níveis horários de iluminação natural absoluta.

As demais abordagens exigem simulações dinâmicas baseadas em arquivos climáticos. Estas rendem séries diárias, mensais ou anuais de iluminâncias que são interpretadas por meio de indicadores dinâmicos do desempenho da luz natural como a Autonomia da Luz Natural (DA) e Iluminâncias Úteis da Luz Natural (UDI).

A autonomia da luz natural pode ser definida como a porcentagem das horas ocupadas por ano, nas quais um nível mínimo de iluminância pode ser mantido apenas pela iluminação natural (REINHART; MORRISON, 2003).

Segundo Mardaljevic e Nabil (2006), a noção de simplesmente alcançar uma intensidade por meio da avaliação do DA tem, entretanto, valor restringido para análise da iluminação natural por duas razões:

Primeiramente, a autonomia de luz natural falha em considerar as iluminâncias abaixo da intensidade alvo (ex. 500 lux), mas que ainda assim podem ser utilizadas e apreciadas por seus ocupantes e que tem o potencial de substituir parte da iluminação artificial.

Em segundo lugar, a autonomia de luz natural não leva em consideração a quantidade da iluminância alvo que é excedida em determinado instante, desconsiderando altos níveis de iluminâncias, que são frequentemente associados ao desconforto dos usuários.

De modo a sanar estas restrições, Mardaljevic e Nabil (2006) propõem a utilização das Iluminâncias Úteis da Luz Natural (UDI). Elas representam não somente o atendimento aos níveis de iluminação, mas também fornecem um indicativo dos níveis não aproveitáveis, sejam por iluminâncias muito baixas ou por iluminâncias em excesso. As UDI podem ser definidas como a frequência das iluminâncias em um determinado tempo de acordo com faixas pré-estabelecidas:

- Iluminâncias da luz natural na faixa de 100-500 lx são consideradas efetivas, seja como fonte de iluminação ou em conjunto com a iluminação natural;
- Iluminâncias da luz natural na faixa de 500-2000 lux são frequentemente percebidas como desejáveis ou ao menos toleráveis;
- Iluminâncias da luz natural mais altas do que 2000 lux estão sujeitas a produzir desconforto visual, térmico ou ambos.

Aprovadas na LM-83-12 (IES, 2012), as medidas de desempenho Autonomia da Luz Natural Espacial (sDA) e Exposição

Solar Anual (ASE) são as mais atuais para caracterização da iluminação em um ambiente. Estas demonstraram apresentar, dentre as medidas de desempenho de iluminação, as melhores correlações com as preferências dos usuários (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2014) e portanto adotadas como critério para obtenção de créditos no sistema de certificação LEED v4.

O sDA e o ASE são obrigatoriamente acompanhados dos valores de iluminância-alvo e de período de tempo considerado. Desta forma, o  $sDA_{300-50\%}$  pode ser descrito como a porcentagem do espaço que atinge a iluminância da luz natural alvo de 300lux em 50% das horas de utilização do ambiente. E o  $ASE_{1000-250h}$  como a porcentagem do espaço sujeito a iluminâncias provenientes diretamente do sol acima do limite de 1000lux por mais do que 250h de utilização do ambiente.

Ainda que o sDA e o ASE correspondam a porcentagens de área de atendimento, a caracterização do desempenho luminoso promovida pelos diferentes sistemas de fachada é dificilmente representada por um único número, posto que a distribuição das iluminâncias pode ser completamente diferente de um caso para outro. Ainda assim, alguns autores têm proposto soluções interessantes para classificação dos materiais.

Fonseca et al. (2013) propuseram a avaliação do desempenho luminoso de vidros relacionando seu Índice de Seletividade (IS) com a porcentagem da área atendida pelas Iluminâncias Úteis da Luz Natural (UDIs) na faixa entre 300 lux e 2000 lux. Foram considerados 12 diferentes tipos (ver Tabela 4) para as cidades de Salvador, São Paulo e Porto Alegre.

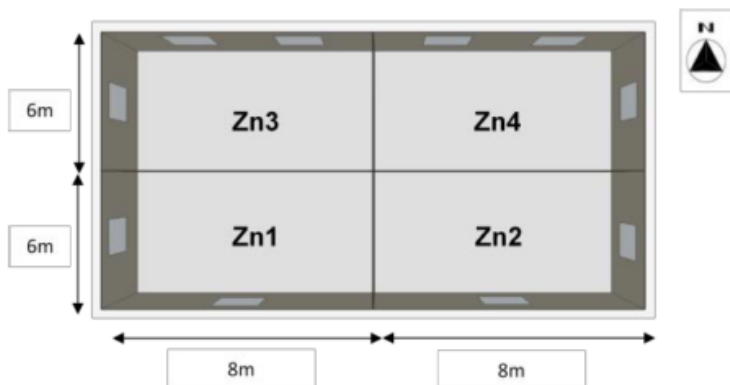
**Tabela 3. Índice de seletividade (IS) para os 12 tipos de vidro**

	<b>FS</b>	<b>Tv</b>	<b>IS</b>
1 - Simples	0,454	0,421	0,381
2 - Simples	0,425	0,479	0,463
3 - Simples	0,374	0,643	0,705
4 - Simples	0,650	0,478	0,303
5 - Simples	0,573	0,728	0,520
6 - Simples	0,827	0,885	0,439
7 - Simples	0,339	0,384	0,463
8 - Duplo	0,321	0,440	0,561
9 - Duplo	0,305	0,581	0,779
10 - Duplo	0,539	0,442	0,336
11 - Duplo	0,458	0,659	0,590
12 - Duplo	0,744	0,807	0,443

Fonte: Fonseca et al. (2013)

Por meio de simulações computacionais de iluminação, foram verificadas as  $UDI_{300-2000}$  em quatro zonas de iluminação (ver Figura 25).

**Figura 25. Zonas de iluminação do modelo**



Fonte: Fonseca et al. (2013)

Com base na porcentagem de área atendendo às UDI, foram definidas cinco faixas de classificação dos vidros para cada cidade analisada. Estas foram organizadas a partir dos limites inferiores e superiores de IS (ver Tabela 5).

**Tabela 4. Limites de IS para São Paulo**


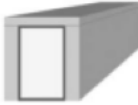







<b>SÃO PAULO</b>				
		A	>	51.13
51.13	$\geq$	B	>	43.51
43.51	$\geq$	C	>	35.88
35.88	$\geq$	D	>	28.25
		E	$\leq$	28.25

Fonte: Fonseca et al. (2013)

A combinação do Índice de Seletividade com a medida dinâmica de iluminação natural se mostrou útil ao oferecer informações térmicas e luminosas, além de informar a possibilidade de ofuscamento através da proporção excedente de UDI máximo.

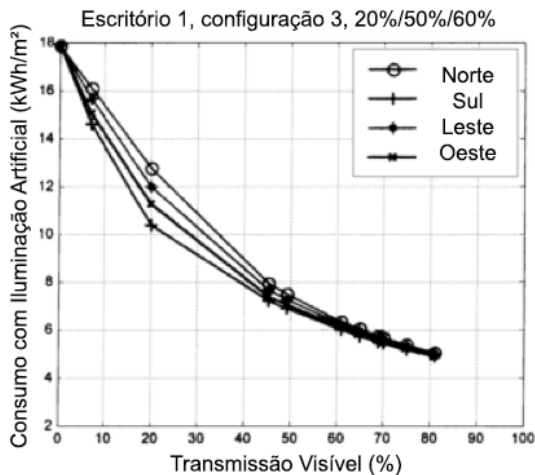
Bodart e De Herde (2002) estudaram o potencial de nove diferentes configurações da abertura (ver Figura 26) e diferentes tipos de vidros para economia de energia elétrica com iluminação artificial. Analisando vidros com  $T_v$  que variavam de 0 a 81%, o estudo adotou iluminância alvo de 500lux e arquivo climático de Uccle - Bélgica. Os autores observam que a Transmissão Visível ( $T_v$ ) possui grande influência sobre o consumo de iluminação artificial, apresentando uma relação direta onde quanto maior foi o  $T_{vis}$ , mais luz natural foi admitida e, portanto, menor o consumo com iluminação artificial (ver Figura 27).

**Figura 26. Configurações propostas de abertura**

<p><b>C1</b></p> <p>Janela / Piso = 50% Janela / Parede = 90%</p>	<p><b>C2</b></p> <p>Janela / Piso = 32% Janela / Parede = 57%</p>	<p><b>C3</b></p> <p>Janela / Piso = 32% Janela / Parede = 57%</p>
		
<p><b>C4</b></p> <p>Janela / Piso = 32% Janela / Parede = 57%</p>	<p><b>C5</b></p> <p>Janela / Piso = 16% Janela / Parede = 28,5%</p>	<p><b>C6</b></p> <p>Janela / Piso = 16% Janela / Parede = 28,5%</p>
		
<p><b>C7</b></p> <p>Janela / Piso = 16% Janela / Parede = 28,5%</p>	<p><b>C8</b></p> <p>Janela / Piso = 16% Janela / Parede = 28,5%</p>	<p><b>C9</b></p> <p>Janela / Piso = 16% Janela / Parede = 28,5%</p>
		

Fonte: Bodart e De Herde (2002)

**Figura 27. Consumo com iluminação artificial em função da Transmissão Visível e da Orientação Solar**

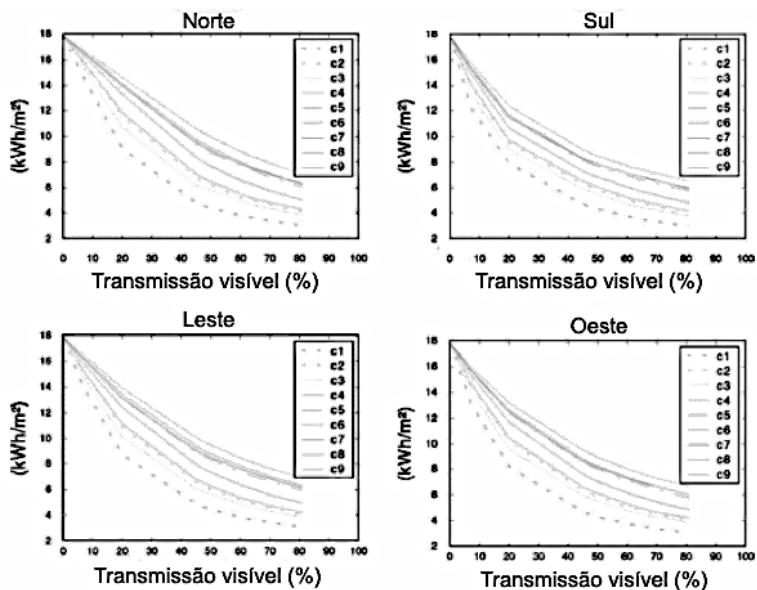


Fonte: Bodart e De Herde (2002)

A orientação norte apresentou, em todos os casos, maior consumo com iluminação artificial do que as demais orientações, seguida das fachadas leste, oeste e sul. As simulações também demonstraram que, quando há considerável quantidade de iluminação natural disponível proveniente de uma grande área de janela e/ou alta Transmissão Visível do vidro, a influência da orientação no consumo energético com iluminação artificial pode ser insignificante ou até mesmo inexistente (ver Figura 28).



Figura 28. Consumo com iluminação em função do Tv, configurações de abertura e orientação



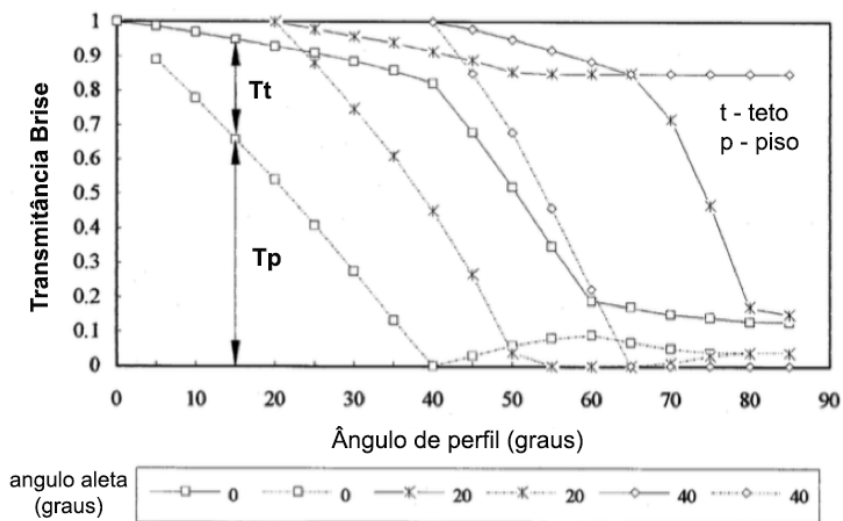
Fonte: Bodart e De Herde (2002)

Dispositivos de sombreamento têm sido extensivamente empregados não somente para controlar a quantidade de radiação solar que chega às aberturas, mas também promover e melhorar a distribuição da iluminação natural.

Pereira (1992) estudou o desempenho luminoso e térmico de dispositivos de sombreamento e dispositivos refletores de luz solar. Dentre os parâmetros estudados está a influência do ângulo de incidência da radiação e o ângulo das aletas dos brises.

Através de medição das transmitâncias de dispositivo de sombreamento refletivo em modelo de escala reduzida, observou que uma parcela da transmitância projeta luz em direção ao teto do ambiente enquanto outra projeta luz em direção ao piso. Essas parcelas são modificadas tanto pelo ângulo de perfil quanto pelo ângulo das aletas do dispositivo e demonstram que a geometria dos dispositivos de sombreamento possui grande influência na modulação e distribuição da luz no ambiente (ver Figura 29).

**Figura 29. Transmitância de dispositivo de proteção horizontal em relação ao ângulo de perfil para diferentes ângulos de aletas**



Fonte: Pereira (1992)

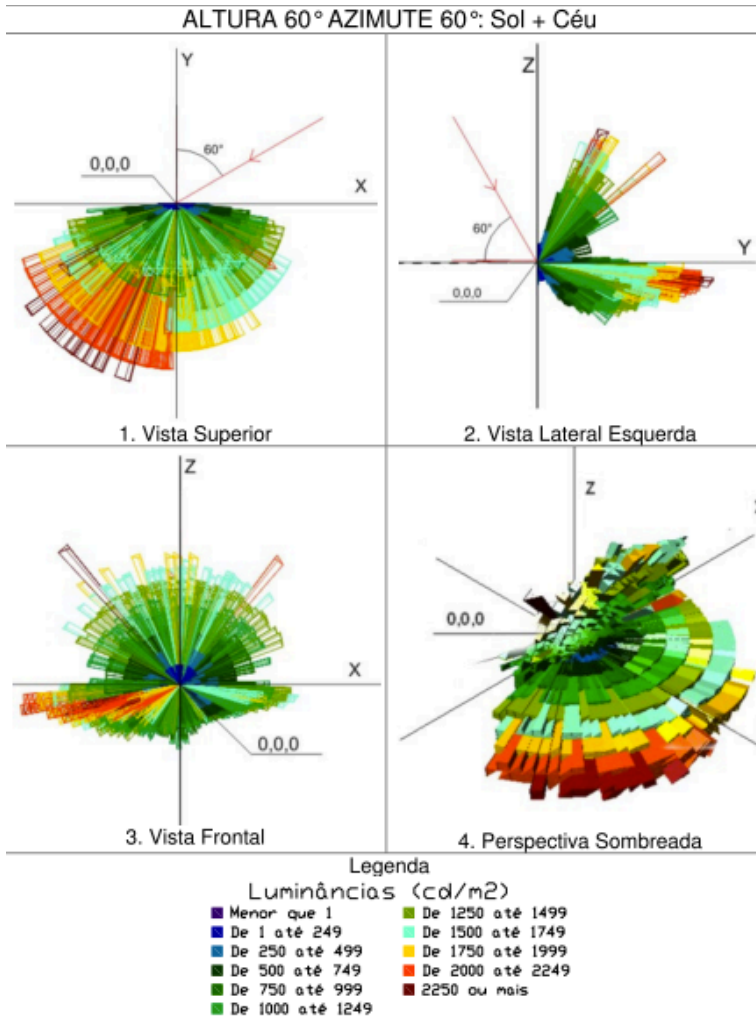
Bogo (2007) apresentou um método para avaliação da admissão de luz natural através de aberturas com elementos de controle solar, com

base na definição de um ambiente virtual de representação do ambiente de incidência de luz natural e sua emissão para o interior, considerando a abertura como fonte superficial de luz.

A questão da admissão de luz natural através de aberturas (fluxo luminoso admitido; luminância equivalente) foi estudada com utilização de um ambiente virtual do tipo hemisfera oca com base vertical e abertura como fonte de luz, por meio do uso do programa de simulação computacional APOLUX 1.0.

Por meio deste modelo foi possível avaliar a quantidade (fluxo luminoso) e a distribuição espacial (luminância equivalente) da luz admitida sob variação da geometria dos elementos de controle solar (ver Figura 30).

**Figura 30. Resultados de luminância equivalente da janela com dispositivo de 10 aletas de 0,115m e refletância de 20%**



Fonte: Bogo (2007)

Dubois e March (2003) desenvolveram indicadores simples de desempenho para avaliar o desempenho do sombreamento e a qualidade da iluminação natural. Estes foram baseados nas iluminâncias no plano de trabalho, uniformidade da iluminação no plano de trabalho, luminâncias das superfícies do ambiente, razão entre as luminâncias do plano de trabalho e seu entorno.

Por meio destes indicadores, toldos brancos, marquises e venezianas horizontais demonstraram ser capazes de promover a iluminação do plano de trabalho para níveis adequados para o desenvolvimento de atividades de escritório, enquanto venezianas a 45°, telas brancas e toldos azuis contribuíram com iluminâncias aceitáveis para atividades no computador e confortáveis em relação ao terminal visual, plano de trabalho e plano de fundo.

Wong e Istiadji (2004) examinaram o desempenho luminoso de sete tipos diferentes de sombreamento externo em um edifício residencial em Singapura. A investigação foi realizada por meio de simulações de iluminação natural com o software *Lightscape*.

O estudo demonstrou que os dispositivos de sombreamento podem reduzir efetivamente o nível de ofuscamento, ainda que este seja dependente de outros fatores como a área exposta da janela, o meio externo, luminâncias internas e o ângulo de visão do observador.

Athientis e Tzempelikos (2002) propuseram uma metodologia para simulação numérica detalhada da iluminação natural de um espaço de escritório com dispositivos de sombreamento automatizados. O modelo considerou uma abertura com vidro duplo baixo-emissivo e

dispositivo de sombreamento automatizado entre os dois planos de vidro. O método apresentado engloba um algoritmo capaz de alterar o ângulo das persianas objetivando garantir uma iluminância alvo de 500lux. Além disso, contempla a dimerização do sistema de iluminação artificial de modo a minimizar o consumo de energia elétrica.

Roche (2002) aponta, com base em seus resultados, que o uso de um sistema integrado que considere persianas móveis, automatizadas em conjunto com a dimerização das luminárias, tem o potencial de economizar uma grande fração da eletricidade utilizada com iluminação artificial ressaltando que se este tipo de sistema deve futuramente ser incentivado da mesma maneira que lâmpadas eficientes, a medida em que a tecnologia se torne economicamente viável.

### 2.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os programas para simulação termo-energética de edificações passaram a ser mais difundidos a partir da década de 70, após a crise do petróleo e proliferação dos microcomputadores pessoais (LABEEE, 2014). Essas ferramentas computacionais permitem aos engenheiros e arquitetos analisar fenômenos complexos, como a transferência de calor em edificações de difícil resolução manual.

Em paralelo a isto, softwares exclusivamente para cálculo da iluminação foram desenvolvidos inicialmente utilizando o Fator de Luz Diurna (DF) como medida de desempenho. De acordo com Kota e Haberl (2009), o conceito de Coeficientes da Luz Natural ou *Daylight Coefficients* (DC), utilizado pelos softwares mais atuais, foi inicialmente

introduzido por Tregenza and Water (1983). O Coeficiente da Luz Natural parte da ideia de dividir a área do céu em um grande número de pequenos elementos e então considerar a influência da iluminação emitida ao longo do tempo por cada uma dessas parcelas em relação ao modelo no espaço, aliado à técnica do raio traçado, que segue o caminho de um raio entre superfícies, inicialmente desenvolvida no campo da computação gráfica, pois pode lidar com cenas complexas.

Este método foi adotado por programas como o Radiance, Daysim e DIVA, vez que a partir de um arquivo climático ele é capaz de considerar formas complexas e condições de céu dinâmicas, permitindo o surgimento de medidas amplas de desempenho como o DA, UDI, sDA e ASE.

### 2.3.1. Simulação Termo-energética com o EnergyPlus

Entre os softwares mais conhecidos para simulação do desempenho energético destaca-se o *EnergyPlus*, criado a partir dos programas BLAST e DOE-2 e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Neste software é possível simular o aquecimento, resfriamento, iluminação, ventilação, outros fluxos de energia e o uso de água (CRAWLEY; LAWRIE, 2000).

O programa é gratuito, validado e reconhecido internacionalmente, e tem sido amplamente utilizado no contexto nacional. Os dados de entrada necessários para realizar as simulações são divididos entre aqueles que caracterizam a edificação e o arquivo

climático do local contendo informações básicas de temperatura, umidade, radiação solar, ventos, entre outras. A modelagem geométrica do edifício pode ser feita por meio de *plugins* de diversos softwares como o *Sketchup* e o *Rhinoceros/Grasshopper*.

Os modelos de simulação computacional utilizam dados referentes à geometria da edificação, às propriedades térmicas de seus materiais construtivos, à eficiência energética de equipamentos elétricos, à capacidade do sistema de condicionamento de ar, aos padrões de uso e ocupação do prédio, aos ganhos de calor interno da edificação, à infiltração de ar, à área de ventilação e ao arquivo climático da cidade onde se localiza o edifício para estimar o consumo energético de uma edificação.

No entanto, os estudos de Ramos e Ghisi (2010) e Didone e Pereira (2010) demonstram limitações do uso deste software para a análise de iluminação natural, uma vez que ele superestima a luz natural em ambientes internos. Os autores apontam a simulação integrada entre *EnergyPlus* e *Daysim* como alternativa para uma estimativa mais coerente para cálculo do potencial de economia de energia através do uso da iluminação natural.

### 2.3.2. Simulação da iluminação natural com o DIVA

O plugin Design Iterate Validate Adapt V.3 (DIVA), do software *Rhinoceros 5.0* realiza as simulações no *Radiance/Daysim*, *software* validado por Reinhart e Walkenhorst (2001) por meio de medidas e simulações de iluminâncias em um modelo de escritório com vidro duplo



e venezianas externas sobre 10.097 condições de céu. Os resultados da simulação provaram que as iluminâncias internas podem ser modeladas com precisão para vários tipos de persianas sob condições arbitrárias de céu, apresentando erros abaixo de 2% na análise das Autonomias de Luz Natural.

O *Daysim* simula a iluminação natural por meio dos *Daylight Coefficients* no programa RADIANCE, validado por Reinhart e Andersen (2006), que utiliza o método de raio traçado (ray-tracing) e o modelo de céu de Perez et al.(1990). Dessa forma, possibilita a simulação das iluminâncias sob qualquer condição de céu e a construção do perfil anual de iluminação natural (relatório de *LightControl*) para integração com o EnergyPlus. O relatório de *LightControl* é então inserido no *EnergyPlus* integrando as simulações.

*Outputs* quantitativos significativos do Radiance dependem fortemente da correta configuração de oito parâmetros chave de entrada descritos a seguir. De acordo com o manual do Radiance (1995), estes parâmetros devem ser definidos de modo a manter precisão fotométrica, a um custo de processamento que não seja proibitivo.

O parâmetro *ambient bounces* determina o máximo número de inter-reflexões entre as superfícies que o programa calcula antes de retornar o *ambient value* (valor do ambiente). Com um baixo número de Inter-reflexões, o programa tenderá a subestimar os níveis de iluminância, uma vez que o cálculo é interrompido antes de todo o fluxo luminoso ser considerado.

No Radiance, a amostragem de Monte Carlo ocorre em hemisférios de cossenos ponderados em pontos selecionados dentro do modelo, com a interpolação ocorrendo entre esses pontos. O número de divisões do ambiente define o número de amostras enviadas para fora a partir de cada hemisfério amostrado. O erro no cálculo de iluminação indireta do Monte Carlo será inversamente proporcional à raiz quadrada do número presente. Sendo assim, quanto maior o valor de *ambient divisions* mais precisos os resultados serão. Convencionalmente este valor é expresso como um fator de dois ( $2n$ ). Juntamente com este parâmetro, o Supersampling representa a disposição de mais raios em áreas dentro de um hemisfério, onde a variância a ser encontrada tende a ser grande.

O parâmetro *Ambient Accuracy* (Acuracidade do Ambiente) é o erro máximo (expresso em fração) permitido na interpolação da irradiância indireta. A maioria dos experimentos adota um padrão de 0.1, ou seja, um erro máximo permitido de 10%. A *Ambient resolution* (Resolução do Ambiente) está relacionada à acuracidade do ambiente, o tamanho da cena e o ponto de corte no qual a amostragem hemisférica cessa e a interpolação começa. Valores acima de 128 (onde as interpolações ocorrem para distâncias inferiores a 4.7cm) e inferiores a 512 são recomendados por fornecerem simulações com resultados precisos e tempo de simulação aceitáveis.

O valor de *Specular Threshold* (Limiar Especular) é a fração mínima de reflexão ou de transmissão em que não é realizada a amostragem especular. Um valor de 0 (zero) significa que as luzes serão sempre amostradas, traçando raios refletidos ou transmitidos. O valor de 1 (um) significa que a amostragem especular nunca é usada. Destaques

de fontes de luz estarão sempre corretas, mas as reflexões de outras superfícies serão aproximadas usando um valor de ambiente.

O parâmetro *Direct Sampling* (Amostragem Direta) prevê que uma fonte de luz será subdividida até que a largura de cada área de amostra dividida pela distância do ponto iluminado seja inferior a esta proporção. Isso garante precisão em regiões próximas a grandes fontes de iluminação com um pequeno custo de cálculo.

O parâmetro *Direct Relays* (Transferências Diretas) é referente ao número de transferências para fontes secundárias. Um valor "0" significa que as fontes secundárias serão ignoradas. O valor "1" significa que serão consideradas fontes secundárias de primeira geração; um valor "2" significa que a primeira geração de fontes secundárias será realizada e também fontes secundárias de segunda geração, e assim por diante.

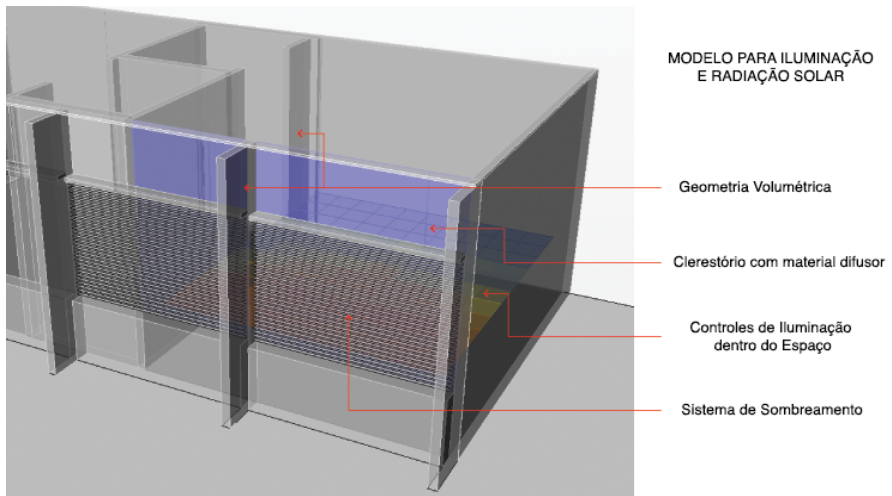
### 2.3.3. Diferença entre os modelos de simulação

Para realização de simulações computacionais coerentes é indispensável, primeiramente, compreender que os modelos são diferentes para cada finalidade, sendo um mais detalhado para a simulação de Iluminação Natural e Radiação Solar e outro mais esquemático para a avaliação termo-energética. Estes devem seguir as características necessárias para os motores por trás da simulação: Radiance e EnergyPlus.

Segundo Jakubiec e Reinhart (2011), as simulações de Iluminação Natural e Radiação Solar devem possuir geometrias

detalhadas, com espessuras e faces voltadas para o plano de análise. As paredes devem ter as aberturas “recortadas”, onde uma geometria distinta representará o elemento do vidro (Figura 31).

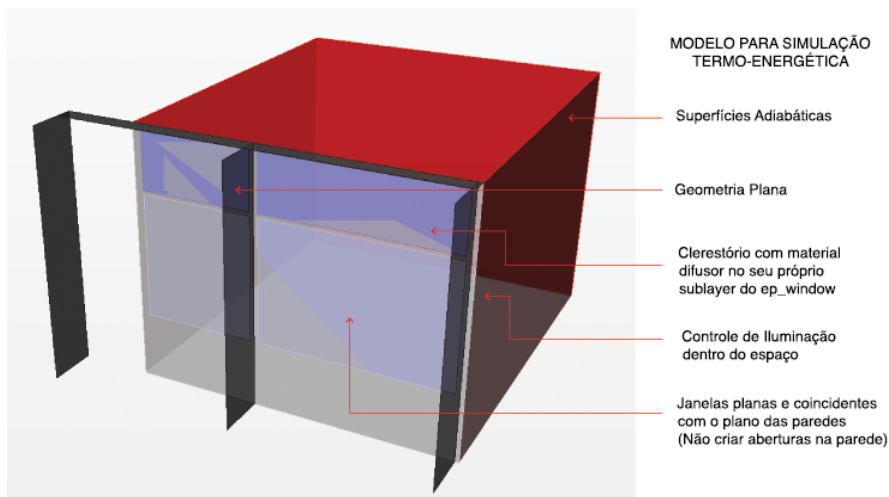
**Figura 31. Características do modelo para iluminação Natural e Radiação Solar**



Fonte: Jakubiec e Reinhart (2011)

Já o modelo Termo-energético não deve possuir espessuras, sendo que o plano do vidro deve ser coincidente com o plano da parede. Isto porque o EnergyPlus entende a geometria das aberturas como parte integrante da parede (Figura 32).

**Figura 32. Características do modelo para simulação Termo-energética**



Fonte: Jakubiec e Reinhart (2011)

Aos modelos geométricos para iluminação e radiação serão atribuídas as características radiantes dos materiais estabelecidos no arquivo *materials.rad* do DIVA V.3, enquanto para o modelo termo-energético serão atribuídos os materiais com suas características de Transmitância Térmica, Refletância, Fator Solar e Transmissão Visível no arquivo *.idf* base do DIVA.

Essas diferenças dificultam o processo de modelagem, tornando necessários dois modelos para realização da simulação precisa e/ou integrada da luz natural e eficiência energética. Felizmente, o processo descrito pode ser facilitado por meio da utilização de ferramentas de parametrização de modelos, como por exemplo o grasshopper.

#### 2.3.4. Parametrização de modelos no Grasshopper

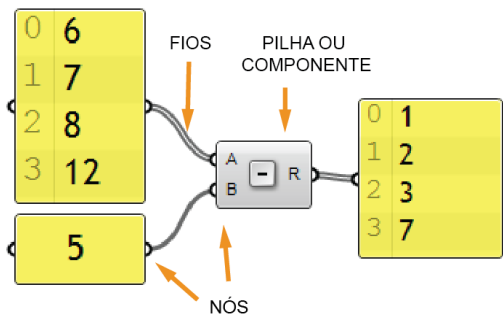
As variações no design são fundamentais quando se busca soluções para determinados problemas. A modelagem paramétrica enuncia novos princípios introduzindo a capacidade de promover alterações mediante as relações pré-estabelecidas e controladas, tornando possível a modificação de características sem a necessidade de refazer todo o modelo.

Os modelos paramétricos são constituídos por entidades geométricas cujos atributos (propriedades) podem permanecer fixos, ou facilmente alterados através de variáveis. Estes atributos variáveis são denominados parâmetros.

O processo de parametrização do modelo no plugin *Grasshopper* compreende a criação de um algoritmo amparado por interface gráfica. As “pilhas” ou componentes correspondem a instruções matemáticas e geométricas, e são posicionadas de forma a conceber a geometria dos elementos, aplicar as características dos materiais, etc. (Figura 33).

Os dados são passados de componente para componente por meio de fios que ligam estes nós.

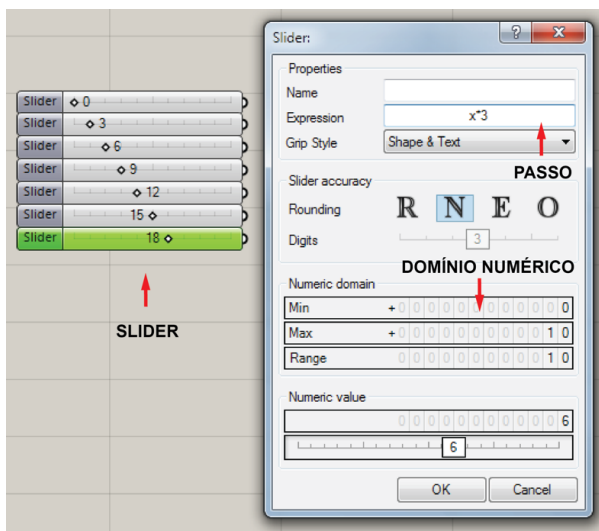
**Figura 33. Exemplo de componente do grasshopper e ligação entre componentes**



Fonte: O Autor

Através de “sliders” é possível editar o domínio numérico, os “passos” e o tipo de valor das variáveis (Figura 34).

**Figura 34. Exemplo de slider e configuração do domínio numérico**



Fonte: O Autor

Estes métodos que envolvem a parametrização permitem ao projetista a busca de diferentes soluções à medida em que o modelo paramétrico reage às modificações, adaptando a sua estrutura aos novos valores introduzidos, sem que seja necessário apagar ou refazer o próprio modelo. Além disso, a técnica permite que os parâmetros comuns sejam aplicados a mais de um tipo de modelo de simulação (termo-energético, iluminação natural) simultaneamente, simplificando o processo de modelagem.

Outras aplicações da modelagem paramétrica são a análise de desempenho em relação a um valor de “fitness” pré-estabelecido por meio de algoritmos genéticos e/ou por meio de análise combinatória dos parâmetros.

### 2.3.5. Considerações sobre a revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica deste trabalho abordou a utilização dos sistemas de vidro de controle solar e dispositivos de sombreamento para controle do ganho de calor solar, admissão e modulação da luz natural.

Nesta seção, foram apresentados os principais indicadores de desempenho utilizados quando da especificação de vidros de controle solar, os métodos usuais de projeto e de otimização de dispositivos de sombreamento e as metodologias para seleção de horas a sombrear.

Diversos estudos relacionados ao desempenho termo-energético e luminoso foram apresentados fornecendo critérios de projeto para otimização das envoltórias e para correta especificação dos vidros e



dispositivos de sombreamento. Estudos estes que apresentaram as principais variáveis relacionadas ao balanço térmico das edificações e o desempenho de diferentes configurações de fachadas.

As medidas dinâmicas de iluminação destacaram-se, ao longo desta revisão, como as mais adequadas para estimar quantitativamente a iluminação natural e integrá-la a avaliações termo-energéticas. Os programas de simulação EnergyPlus e DIVA foram apresentados, bem como seus principais parâmetros para correta simulação.

A revisão de literatura apresentada demonstrou que a metodologia detalhada para representação de simulações energéticas e da iluminação natural está completamente estabelecida. Diante do exposto, esta pesquisa visa contribuir na avaliação dos sistemas quanto à caracterização e comparação de seu comportamento energético e luminoso.



### 3. MÉTODO

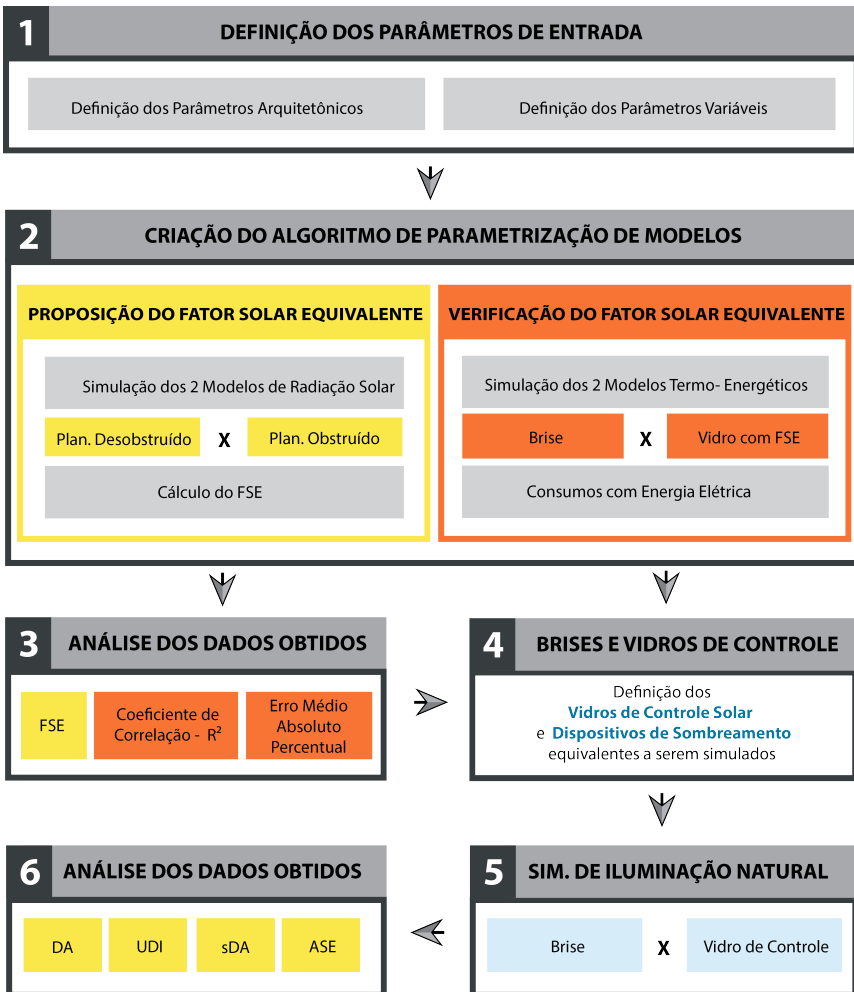
Neste capítulo são descritos os métodos para verificação do consumo energético e iluminação natural de ambientes com dispositivos de sombreamento e vidros de controle solar por meio de simulações computacionais paramétricas.

Inicialmente, o procedimento adotado consistiu em equiparar o consumo energético dos dispositivos de sombreamento aos dos vidros de controle solar para posterior análise da iluminação natural no ambiente interno. Para tal, foi proposto o conceito de Fator Solar Equivalente dos elementos de proteção.

O modelo simulado apresenta características invariáveis como padrão de uso e ocupação, geometria do ambiente e o material das superfícies externas como adiabático (exceto o material da fachada envidraçada).

Com relação aos parâmetros variáveis, verificou-se a partir das pesquisas analisadas no capítulo de revisão bibliográfica que o desempenho energético de edificações comerciais condicionadas artificialmente é influenciado diretamente por determinadas variáveis, estas relacionadas com o clima específico analisado. Foram considerados para o estudo o fator solar e transmitância térmica dos vidros, a geometria e refletância dos dispositivos de sombreamento e a orientação geográfica. A síntese dos procedimentos propostos pode ser observada na figura 35.

**Figura 35. Síntese do Método**

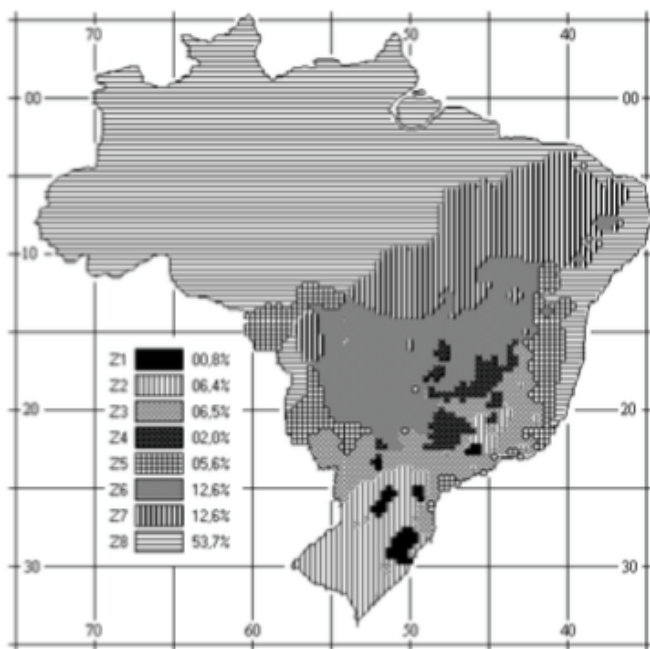


Fonte: O Autor

Para viabilizar o grande volume de simulações foi utilizado o plugin *Grasshopper*, do software *Rhinoceros*, no processo de parametrização dos modelos juntamente com os componentes do DIVA para *Grasshopper*, que realizam as simulações de Radiação Solar, Termo-Energéticas e de Iluminação Natural através do *Daysim* e do *EnergyPlus*. As etapas metodológicas utilizadas são apresentadas detalhadamente a seguir.

### 3.1. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Para este estudo foi considerada a cidade de Florianópolis, localizada entre os paralelos de  $27^{\circ}10'$  e  $27^{\circ}50'$  de latitude sul, e entre os meridianos de  $48^{\circ}25'$  e  $48^{\circ}35'$  de longitude oeste. Esta se insere na Zona Bioclimática 3 (ver Figura 36), seu clima é definido como mesotérmico úmido. O arquivo bioclimático utilizado para as simulações foi o disponibilizado pelo projeto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) obtido a partir do site do LabEEE (2005).

**Figura 36. Zoneamento Bioclimático Brasileiro**

Fonte: NBR 15220

**Quadro 1. Localização e Arquivo Climático**

Zona Bioclimática	ZB3	Florianópolis
Arquivo Climático	BRA_Florianopolis.83990_SWERA.epw	

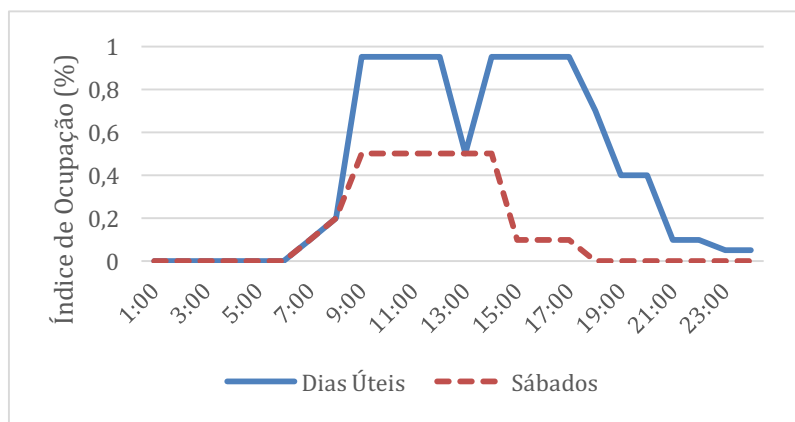
Fonte: O Autor

Os parâmetros arquitetônicos para o ambiente foram definidos com base no trabalho de Santana (2006), que analisou a frequência de ocorrência de parâmetros construtivos para edifícios de escritório em

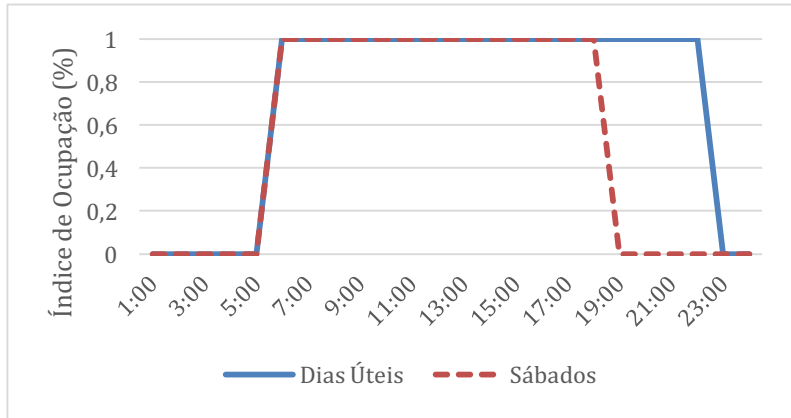
Florianópolis. Os modelos representam ambientes de 18m<sup>2</sup> em andares intermediários de edifícios de escritório e não se considerou a refletância do piso externo.

Para as simulações utilizou-se os padrões de ocupação originais do DIVA for Rhino que consideram, de maneiras distintas, os dias úteis e sábados, desconsiderando ocupação aos domingos. Os padrões de ocupação e disponibilidade podem ser observados nas Figuras 37 e 38.

**Figura 37. Padrão de ocupação do sistema de Iluminação Artificial e Pessoas**



Fonte: O Autor

**Figura 38. Padrão de disponibilidade do sistema de condicionamento de ar**

Fonte: O Autor

O sistema de condicionamento de ar adotado neste trabalho foi o padrão do *DIVA for Grasshopper*, que considera um Coeficiente de Performance (COP) de 0,8 para aquecimento e 3,0 para resfriamento, enquanto a taxa de infiltração considerada para o estudo foi de 0,5 renovações de ar por hora.

Outros parâmetros adotados para as simulações podem ser verificados na tabela 6 a seguir.



**Tabela 5. Parâmetros para simulação**

Parâmetro		Valor		
Área Envidraçada da fachada principal [%]		90%		
Fator Solar do Vidro Base para modelo com Brise [%]		FS 0.82		
Fechamentos Opacos		Todas as superfícies adiabáticas com exceção da fachada principal Alvenaria da fachada principal: $e=15\text{cm}$ ; $\lambda =0.89$ ; $U=2,02$ $C= 1920\text{kg/m}^3$ ; $\rho = 50\%$		
Cargas Internas	Grupo de DCI	Iluminação:	Pessoas*:	Equipamentos:
	20,36 W/m <sup>2</sup>	12 W/m <sup>2</sup>	35m <sup>2</sup> /pessoa	5W/m <sup>2</sup>
	76,96 W/m <sup>2</sup>	12 W/m <sup>2</sup>	3m <sup>2</sup> /pessoa	10W/m <sup>2</sup>
	151 W/m <sup>2</sup>	12 W/m <sup>2</sup>	0,95m <sup>2</sup> /pessoa	25W/m <sup>2</sup>
Geometria		Altura: 3m	Largura: 3m	Profundidade: 6m
Orientações		Leste, Oeste, Norte e Sul		
Brises		Refletância Solar: 30; 60; 90		

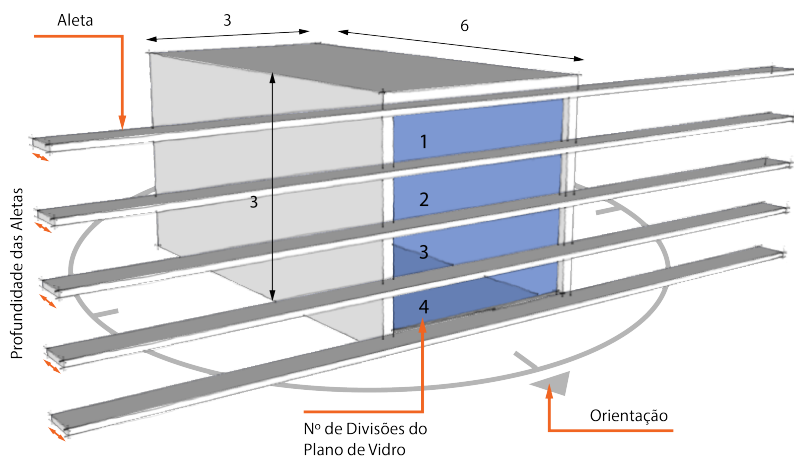
\* Taxa metabólica considerada de 120W/pessoa

Fonte: O Autor

Os parâmetros variáveis do modelo geométrico (ver Figura 39) definidos para as simulações estão diretamente associados à eficiência dos elementos de proteção e a geometria dos mesmos. Sendo assim, os

dispositivos foram caracterizados como Horizontais e Verticais e classificados de acordo com: o número de divisões do plano do vidro, profundidade das aletas e orientação solar. O domínio numérico de variação contemplado por este trabalho pode ser visualizado no Quadro 2.

**Figura 39. Parâmetros variáveis do modelo geométrico de brises horizontais**



Fonte: O Autor

**Quadro 2. Domínio Numérico de variação**

<b>Parâmetro</b>	<b>Domínio</b>
Profundidade das Aletas	5cm a 60cm (múltiplos de 5 cm)
Nº de Divisões do Plano de Vidro	1 divisão até 10 divisões
Orientação	Leste, Oeste, Norte, Sul

Fonte: O Autor

Com base no exposto no capítulo de revisão bibliográfica, definiram-se os seguintes parâmetros de entrada para realização das simulações de iluminação natural.

**Tabela 6. Parâmetros do Daysim/Radiance utilizados para o estudo**

Inter-reflexões difusas do ambiente	5
Divisão do ambiente	1000
Amostragem do ambiente	20
Precisão do ambiente	0.1
Resolução do ambiente	300
Limiar direto	0.15
Amostragem direta	0.20
Transferência Direta	2

Fonte: O Autor

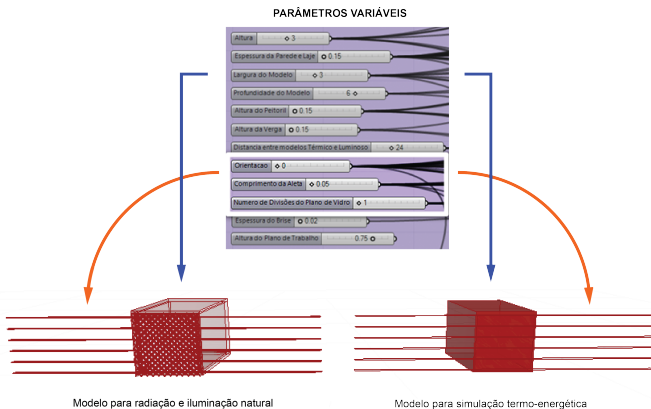
### 3.2. ALGORITMO DE PARAMETRIZAÇÃO

Devido à natureza repetitiva das simulações necessárias para o estudo do FSE e à necessidade de modelos distintos para simulação termo-energética e de iluminação natural, um algoritmo parametrizado no *Grasshopper* foi elaborado de modo a automatizar as variações na geometria dos elementos de proteção (ver Figura 40).

O algoritmo realiza quatro simulações sequenciais por geometria analisada, sendo que duas foram modeladas para cálculo do FSE (Radiance) e duas foram modeladas para verificação dos consumos energéticos (EnergyPlus).

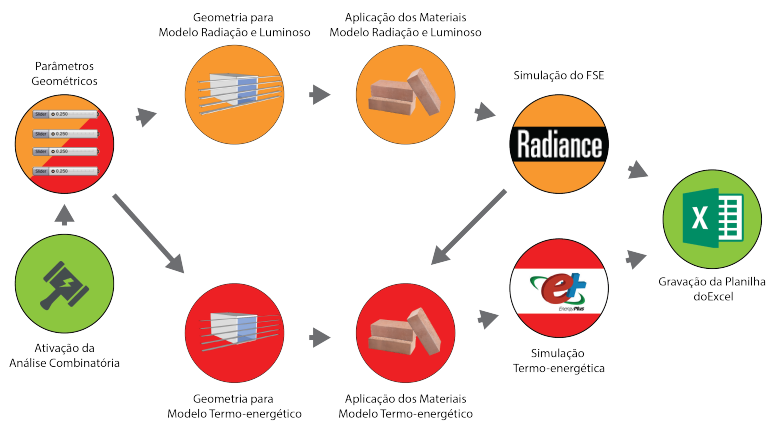
Os procedimentos realizados no algoritmo encontram-se simplificados na Figura 41 e o algoritmo completo desenvolvido no *grasshopper* é apresentado na Figura 42.

**Figura 40. Parâmetros variáveis e diferenças nos modelos de simulação**



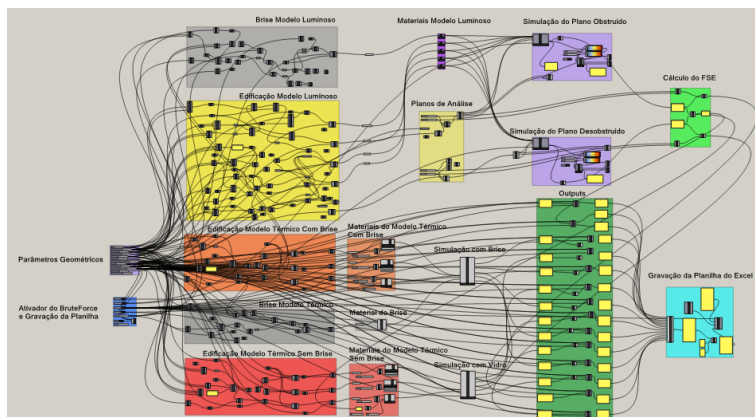
Fonte: O Autor

**Figura 41. Simplificação dos procedimentos do Algoritmo**



Fonte: O Autor

**Figura 42. Algoritmo desenvolvido no Grasshopper para parametrização dos modelos.**

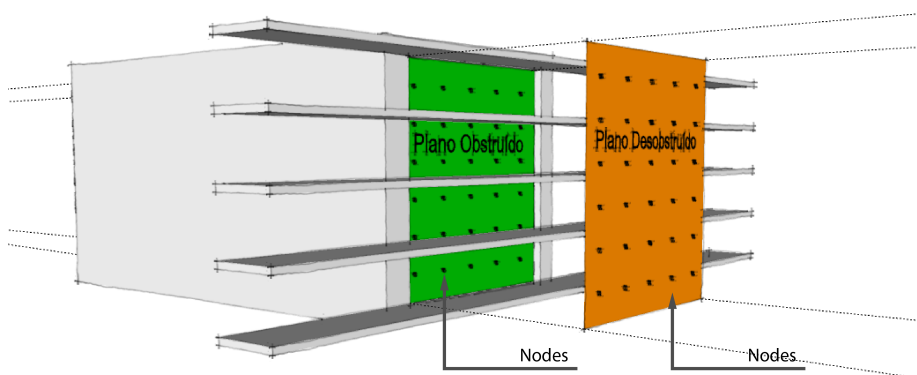


Fonte: O Autor

### 3.3. CÁLCULO E VERIFICAÇÃO DO FATOR SOLAR EQUIVALENTE

O Fator Solar dos dispositivos de proteção solar foi calculado com base em dois planos de análise (ver Figura 43). O primeiro plano, representado na cor laranja, recebeu a radiação direta sem obstrução. O segundo plano, representado em verde, recebeu somente a parte da radiação que atravessa o elemento de proteção solar.

**Figura 43. Ilustração do Brise Horizontal e Planos de Análise para cálculo do FSE**



Fonte: O Autor

Para a simulação da irradiação solar incidente foi necessário fornecer, juntamente com a geometria, os materiais do *radiance* e período da análise. Fez-se necessária a criação de três novos materiais no arquivo

*material.rad* para serem utilizados nas aletas dos brises. Estes utilizaram a categoria *Plastic* e foram definidas refletâncias de 30%, 60%, 90%.

Após a simulação no *DIVA for Grasshopper*, foram obtidos os valores de radiação solar incidente ( $\text{kWh/m}^2$ ) em cada um dos respectivos *nodes* (nós) dos planos durante o período de tempo determinado (mensal, sazonal, anual).

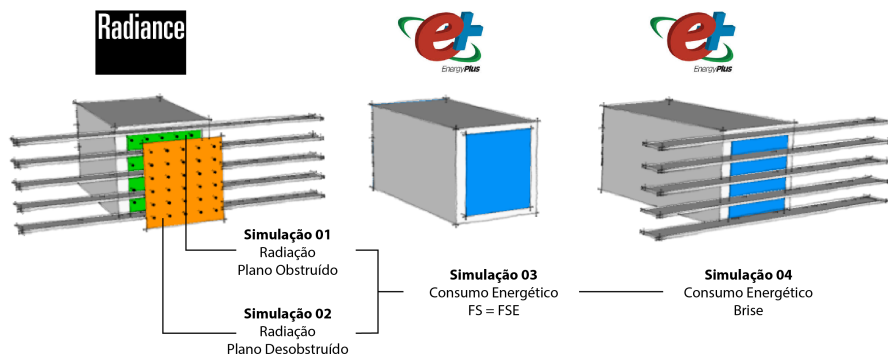
Com base nos valores obtidos foi calculada a fração de ganho térmico devido à radiação solar que cada uma das aberturas transmite através do elemento de proteção.

Uma vez que ambos os planos possuem o mesmo número de *nodes*, a equação do FS pôde ser definida como:

$$FS = \left( \frac{\sum I_{desobstruido} \times 100}{\sum I_{obstruido}} \right) \quad \text{Eq.01}$$

Para verificar a equivalência entre os consumos energéticos dos modelos, foram realizadas duas simulações termo-energéticas no EnergyPlus. A primeira simulação dotada de elemento de sombreamento e a segunda simulação dotada de vidro com Fator Solar igual ao Fator Solar calculado do Dispositivo de Sombreamento, possibilitando a comparação dos consumos de Energia Elétrica ( $\text{kWh}$ ) de ambos os modelos (ver Figura 44). Estes dados foram gravados em uma planilha do Excel, onde procedeu-se a verificação dos Erros Percentuais Absolutos Médios e do Coeficiente de Correlação.

**Figura 44. Simulações realizadas para cálculo e verificação do FSE**



Fonte: O Autor

Análises anuais e mensais foram realizadas para verificar se o comportamento dos elementos poderia ser descrito com razoável precisão em relação ao período de tempo analisado. A estes valores foram atribuídos os nomes Fator Solar Equivalente Anual (FSEa) e Fator Solar Equivalente Mensal (FSEm) dos dispositivos de sombreamento, uma vez que se verificou que eles representam a equivalência termo-energética do sistema em relação ao Fator Solar de vidros.



### 3.4. SIMULAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Considerando as especificações do Anexo V da Portaria N°50/2013 (INMETRO, 2013), foram selecionados oito vidros laminados de controle solar disponíveis no mercado brasileiro.

Os parâmetros obtidos dos catálogos para simulação foram o Fator Solar (FS) e a Transmitância da Luz Visível (Tv). Entretanto, para a realização das simulações foi necessária a conversão dos valores de Tv dos vidros para Transmissividade (Tn) nas faixas RGB (tn) utilizados pelo Radiance. A conversão foi realizada com a planilha disponibilizada no site do DIVA for Rhino que aplica a equação abaixo:

$$Tn = \frac{\sqrt{0.8402528435 + 0.0072522239 * Tv * Tv} - 0.9166530661}{0.0036261119 / Tn} \quad \text{Eq.02}$$

Cada um dos vidros selecionados para a pesquisa foi criado no arquivo *material.rad* para uso nas simulações de iluminação do DIVA for Rhino.

Com base nos valores de FS dos vidros selecionados a partir do Anexo V da Portaria INMETRO N°50/2013, foram definidos os dispositivos de sombreamento com igual Fator Solar Equivalente Anual (FSEa), previamente calculado, para serem utilizados na simulação comparativa da iluminação natural. Foram selecionados oito vidros com diferentes relações de Fatores Solar e Transmitância Visível.

**Tabela 7. Características dos vidros de controle solar selecionados para análise**

Vidro de Controle Solar	FS	Tv	IS (Tv/FS)
Guardian Sunguard Royal Blue 40	0,39	0,29	1,34
Cebrace 114 PN	0,27	0,14	1,93
Guardian Neutral Plus 50	0,39	0,47	0,83
Cebrace SKN 154	0,27	0,50	0,54
Guardian Light Blue 52	0,59	0,54	1,09
Guardian Sunguard Silver 32	0,43	0,33	1,30
Cebrace 120PN	0,30	0,20	1,50
Guardian Sunguard SN68	0,40	0,69	0,58

Fonte: o Autor

Para avaliação do efeito dos vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento na iluminação natural interna dos ambientes foram realizadas simulações anuais de planos horizontais ( $h=75\text{cm}$ ) com o DIVA for Rhino. Estes planos foram divididos em uma malha de 420 pontos (um ponto a cada  $0,20\text{cm}$ ), atendendo à equação do anexo B.2 da NBR ISO CIE 8995 (ABNT, 2013).

As seguintes medidas de desempenho foram utilizadas para simulação e caracterização da iluminação no ambiente interno: DA (Autonomia da Luz Natural), UDI (luminâncias Úteis da Luz Natural), sDA (Autonomia da Luz Natural Espacial) e ASE (Exposição Anual ao Sol). Os dados obtidos foram tratados graficamente para possibilitar a análise comparativa da disponibilidade e da distribuição da luz natural.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados deste trabalho relativos ao desempenho de vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento.

Inicialmente serão apresentados os estudos referentes ao Fator Solar Equivalente; considerações sobre o período de análise, variação das refletâncias e das cargas internas, análise de sensibilidade do FSE frente as variáveis. Na sequência, serão apresentados os resultados das análises comparativas de iluminação natural de modelos de dispositivos de sombreamento e vidros de controle solar energeticamente equivalentes.

### 4.1. FATOR SOLAR EQUIVALENTE

O Fator Solar Equivalente (FSE) foi proposto de modo a equiparar termo-energeticamente dispositivos de sombreamento a vidros de controle solar. Calculado com base em dois planos de análise, desobstruído e obstruído pelo dispositivo de sombreamento, este indicador representa a porcentagem da radiação incidente que atravessa o dispositivo de proteção solar.

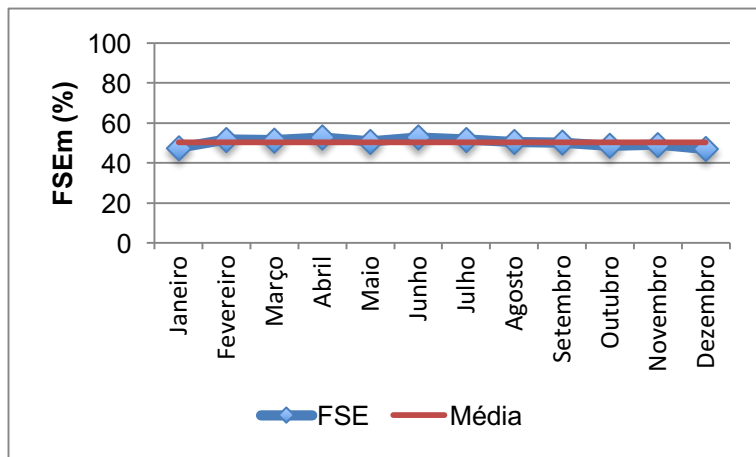
#### 4.1.1. Fator Solar Equivalente e período de análise

Devido à grande variabilidade da eficiência dos dispositivos de sombreamento frente a geometria da insolação. Inicialmente buscou-se um período mensal (FSEm) para caracterização do comportamento dos dispositivos de sombreamento ao longo dos meses. Este estudo inicial, possibilitou uma melhor compreensão do caráter espacialmente seletivo de alguns dispositivos de sombreamento.

O estudo partiu de brises horizontais, considerando refletância de 60% e cargas internas de  $76,96 \text{ W/m}^2$ . Através da análise da variação do FSEm para um brise horizontal com 5 divisões do plano de vidro e 20cm de profundidade, por exemplo, foi possível perceber o quanto o desempenho da geometria está associado a orientação solar. O FSEm para as orientações Leste e Oeste manteve-se praticamente inalterado na faixa dos 50% ao longo de todos os meses do ano (ver Figuras 45 e 46).

**Figura 45. Variação do FSEm para Brise de 20cm e 5 divisões – Fachada**

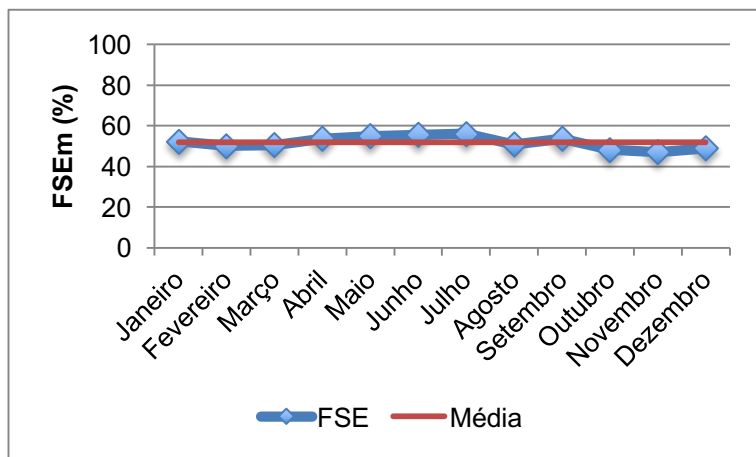
**Leste**



Fonte: O Autor

**Figura 46. Variação do FSEm para Brise de 20cm e 5 divisões – Fachada**

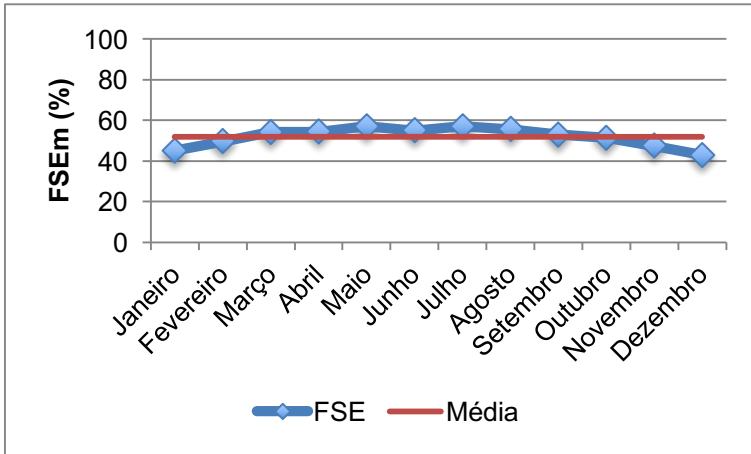
**Oeste**



Fonte: O Autor

O FSEm apresentou um resultado simétrico para orientação Sul (ver Figura 47). Onde houve aumento na porcentagem de radiação transmitida nos meses de inverno e redução nos meses de verão. Cabe ressaltar, que para Latitude de Florianópolis, a fachada Sul, recebe pouco ganho de radiação solar direta, porém recebe radiação difusa que não é filtrada pelo dispositivo de sombreamento. Sendo assim, ainda que a quantidade de radiação solar difusa seja menor nos meses de inverno do que nos meses de verão, proporcionalmente, a quantidade de radiação que que atravessa o dispositivo é maior.

**Figura 47. Variação do FSEm para Brise de 20cm e 5 divisões – Fachada Sul**

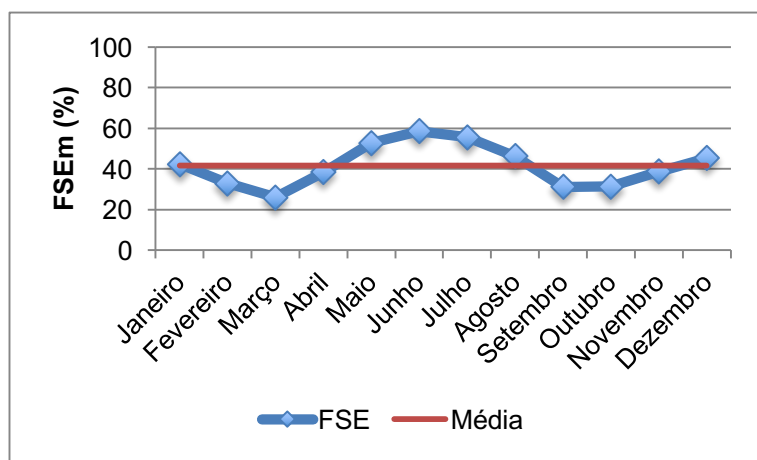


Fonte: O Autor

Em relação à fachada Norte, a Figura 48 deixa evidente que os meses de verão apresentam FSEm inferior ao dos meses de inverno, onde

admitir a radiação tende a melhorar o desempenho da edificação reduzindo o consumo com aquecimento. Este é o comportamento esperado de um dispositivo projetado para ser especialmente seletivo. Entretanto, os períodos de meia estação, em especial os meses de março, outubro e novembro apresentaram valores de FSEm inferiores aos meses de verão (ver Figura 48).

**Figura 48. Variação do FSEm para Brise de 20cm e 5 divisões – Fachada Norte**

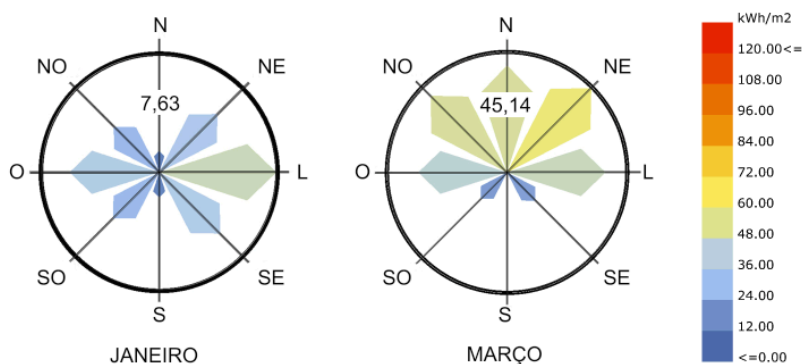


Fonte: O Autor

No verão, a altura solar nos períodos em que a radiação direta atinge a fachada norte é maior (alcançando um ângulo máximo de aproximadamente 87°) do que nos períodos de meia estação (quando atinge ângulo máximo por volta e 63°). Isso faz com que a radiação que

incide em um plano vertical seja reduzida de 45,14 kWh/m<sup>2</sup> para cerca de 7,63 kWh/m<sup>2</sup> como exposto na Figura 49, gráfico plotado a partir do arquivo climático de Florianópolis. Este fato explicaria o fenômeno, uma vez que o FSEm é uma proporção entre a radiação incidente e a radiação transmitida.

**Figura 49. Gráfico da radiação solar direta para o clima de Florianópolis.**



Fonte: O Autor - Elaborado a partir do arquivo climático SWERA de Florianópolis

Visto que o FSEm foi capaz de expressar o comportamento do sistema, procedeu-se a verificação das correlações com base nas seguintes nas simulações da Tabela 9.



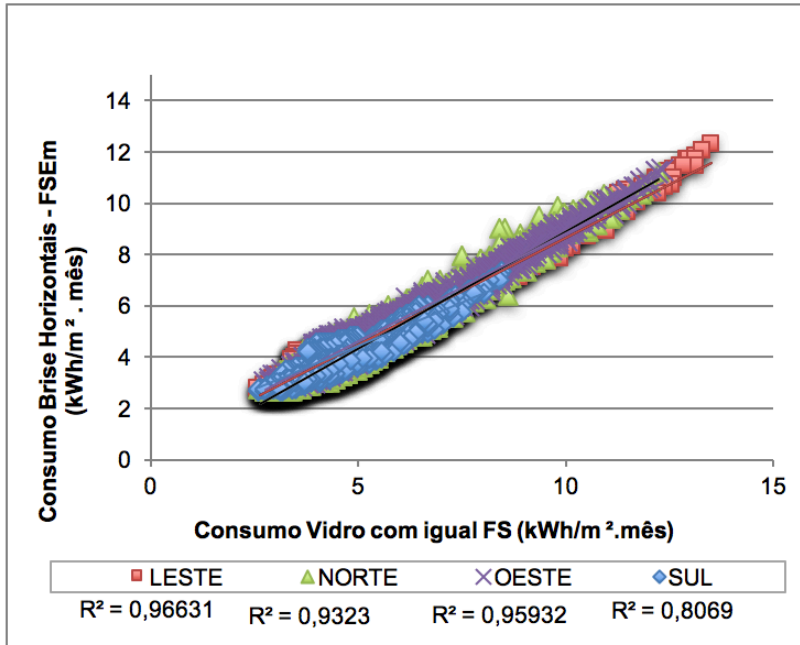
**Tabela 8 – Simulações para cálculo do FSEm e Verificação das equivalências dos consumos mensais**

<b>Variáveis</b>	<b>Variação</b>	<b>Número de Variações</b>
Profundidade das Aletas	De 0,05 até 0,60 cm	12
Número de Divisões do Plano de Vidro	De 1 até 8	8
Orientações	Leste, Oeste, Norte e Sul	4
Tipo do Brise	Vertical e Horizontal	2
Simulação Mensal	12 meses	12
	<b>TOTAL DE VARIAÇÕES</b>	<b>9096</b>
4 Simulações por Variação: 2 para FSE 2 para Verif. do Consumo	<b>TOTAL DE SIMULAÇÕES</b>	<b>36744</b>

Fonte: O Autor

Para brises horizontais, considerando refletância de 60% e cargas internas de  $76,96 \text{ W/m}^2$ , as correlações encontradas demonstram que seria possível estimar a eficiência mensal dos elementos com precisão satisfatória ( $R^2$  superior a 0,93 e erros inferiores a 6%) (ver Figura 50). Os erros percentuais absolutos médios (EPAM) encontrados foram de 5,41% para fachada Leste, 4,84% para fachada Oeste, 5,89% para fachada Norte e 5,38% para fachada Sul.

**Figura 50. Correlação entre os consumos de energia dos Brises Horizontais (FSEm) e Vidro com igual FS**



Fonte: O Autor

O parâmetro FSEm demonstrou-se bastante útil para caracterização da eficiência dos dispositivos de sombreamento ao longo dos meses, possibilitando uma melhor compreensão do comportamento seletivo espacial. Entretanto, as medidas dinâmicas de desempenho utilizadas para avaliação da iluminação natural são obtidas a partir de simulações anuais. Logo, para comparação da eficiência luminosa de dispositivos de sombreamento a vidros de controle solar, fez-se

necessária a verificação da representatividade do FSE em relação ao período anual.

Verificou-se a representatividade do FSEa (Fator Solar Equivalente Anual) por meio das simulações descritas na Tabela 10. Para esta etapa de simulação, foram adotados os valores médios de refletância (60%) e cargas internas (76,96 W/m<sup>2</sup>).

**Tabela 9 – Simulações para cálculo do FSEa e Verificação dos Consumos Anuais**

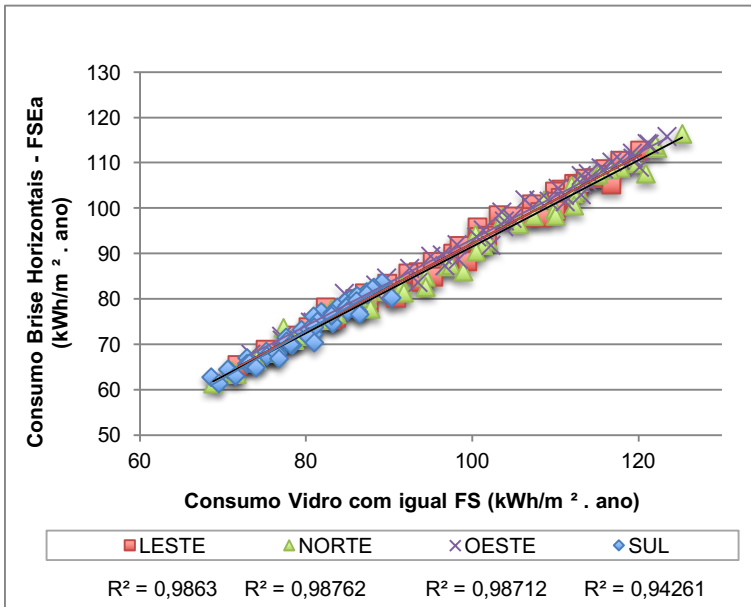
<b>Variáveis</b>	<b>Variação</b>	<b>Número de Variações</b>
Profundidade das Aletas	De 0,05 até 0,60 cm	12
Número de Divisões do Plano de Vidro	De 1 até 8	8
Orientações	Leste, Oeste, Norte e Sul	4
Tipo do Brise	Vertical e Horizontal	2
	<b>TOTAL DE VARIAÇÕES</b>	<b>768</b>
4 Simulações por Variação: 2 para FSE 2 para Verif. do Consumo	<b>TOTAL DE SIMULAÇÕES</b>	<b>3062</b>

Fonte: O Autor

Os resultados demonstraram correlações bastante representativas para o FSEa ( $R^2$  superior a 0,93 e erros inferiores a 6%) (ver Figura 51). Para brises horizontais foi identificado um coeficiente de correlação  $R^2=0,986$

para fachada Leste,  $R^2=0,987$  para fachada Oeste,  $R^2=0,987$  para fachada Norte e  $R^2=0,942$  para fachada Sul, e os respectivos erros médios absolutos percentuais (EPAM) de consumo de energia elétrica: 5,25%; 4,64%; 5,67%; 5,69%.

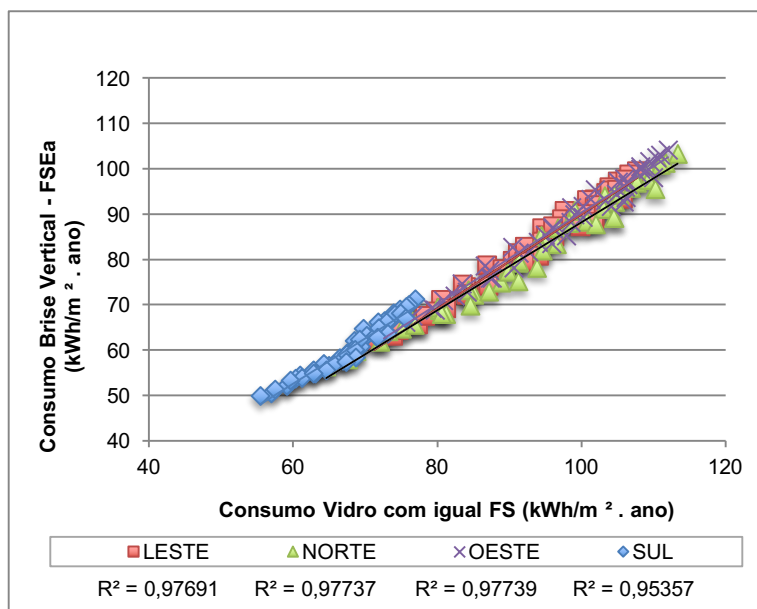
**Figura 51. Correlação entre os consumos de energia dos Brises Horizontais (FSEa) e Vidro com igual FS**



Fonte: O Autor

Em relação aos brises verticais, foram encontradas correlações de  $R^2=0,976$  para fachada Leste,  $R^2=0,977$  para fachada Oeste,  $R^2=0,977$  para fachada Norte e  $R^2=0,953$  para fachada Sul, e os respectivos erros médios absolutos percentuais (EMPA) de consumo de energia elétrica: 3,85%; 3,43%; 4,13%; 3,94% (ver Figura 52).

**Figura 52. Correlação entre os consumos de energia dos Brises Verticais (FSEa) e Vidro com igual FS**



Fonte: O Autor

Os resultados obtidos demonstram ser possível utilizar o valor de FSEa calculado para representar o consumo anual de uma edificação possibilitando equiparar elementos de proteção solar aos vidros de controle solar. Entretanto, deve-se considerar que o FSEa não é capaz de representar a variação da eficiência do dispositivo ao longo dos meses nem caracterizar o comportamento seletivo de alguns dispositivos em

relação a radiação solar, uma vez que este valor representa o comportamento médio do sistema.

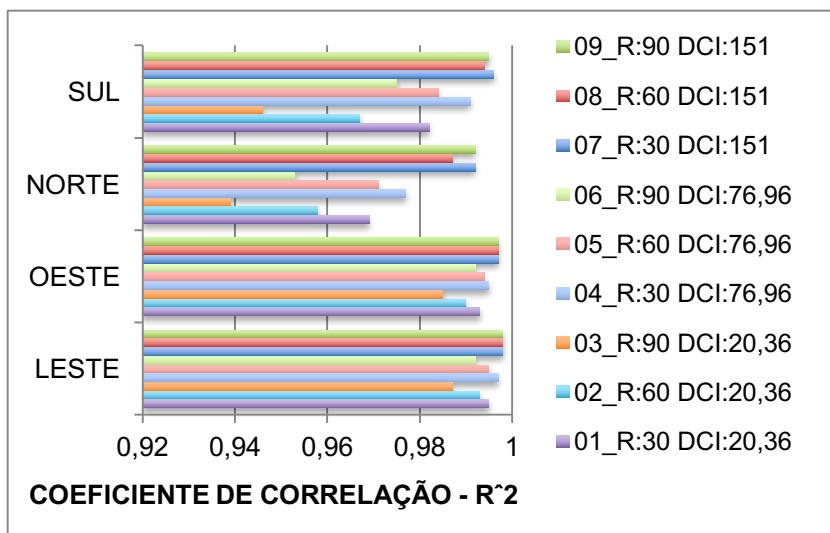
#### 4.1.2. Influência da carga interna e refletância dos dispositivos no FSE

Uma vez que o parâmetro utilizado para verificação das equivalências entre o FS e o FSE foi o consumo energético e que este depende não somente dos ganhos de calor direto através das aberturas, procedeu-se a verificação da influência das cargas internas e da refletância dos dispositivos de sombreamento no Coeficiente de Correlação  $R^2$  e EPAMs (Erros Percentuais Absolutos Médios).

Foram conduzidas simulações com refletâncias de 30%, 60% e 90% e três Densidades de Cargas Internas distintas (20,36 W/m<sup>2</sup>, 76,96 W/m<sup>2</sup> e 151 W/m<sup>2</sup>).

Ao aumentar a refletância, os resultados demonstram uma redução no Coeficiente de Correlação provavelmente decorrente da maior influência das inter-reflexões entre as aletas. Verificou-se ainda, que cargas internas maiores tendem a aumentar o Coeficiente de Correlação  $R^2$ , indicando um pequeno mascaramento dos resultados ao aproximar os valores de consumo total do modelo com brises ao do modelo com vidros. Entretanto, as correlações permaneceram aceitáveis mesmo na pior situação onde apresentou  $R^2$  acima de 0,93. (Ver Figura 53).

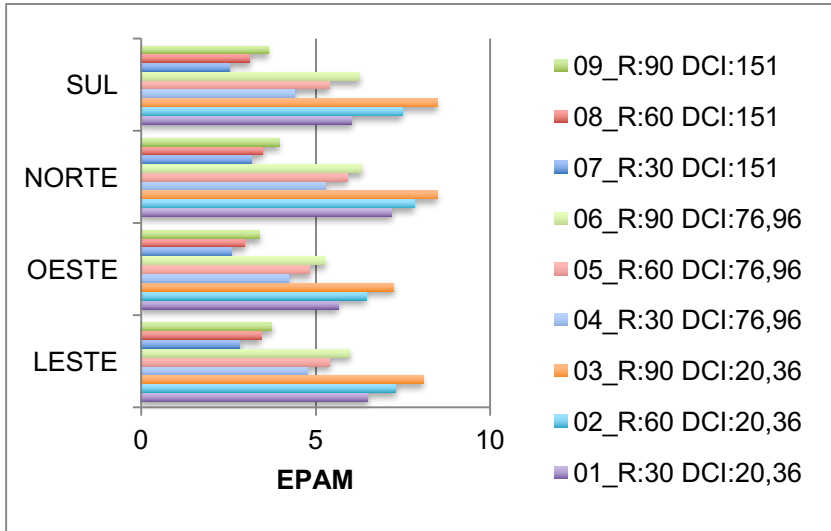
**Figura 53. Variação do  $R^2$  em função da refletância do brise e variações de carga interna**



Fonte: O Autor

Os erros percentuais absolutos médios (EPAMs) apresentaram comportamento similar ao coeficiente de correlação ( $R^2$ ), reduzindo o percentual ao aumentarmos as cargas internas. A refletância, por outro lado, aumentou os EPAMs, ainda assim, apresentando na pior situação erros inferiores a 9% (ver Figura 54).

**Figura 54. Variação do EPAM em função da refletância do brise e variações de carga interna**



Fonte: O Autor

#### 4.1.3. Análise de Sensibilidade

Com os dados obtidos, foi realizada a análise de sensibilidade contemplando as variáveis: profundidade do brise, número de divisões do plano de vidro e refletância.

A análise de sensibilidade (AS) permite identificar os parâmetros que causam maior perturbação na performance do modelo. Deste modo, a AS é realizada com o objetivo de definir a influência de alguns parâmetros (input) nos resultados (output) do modelo.

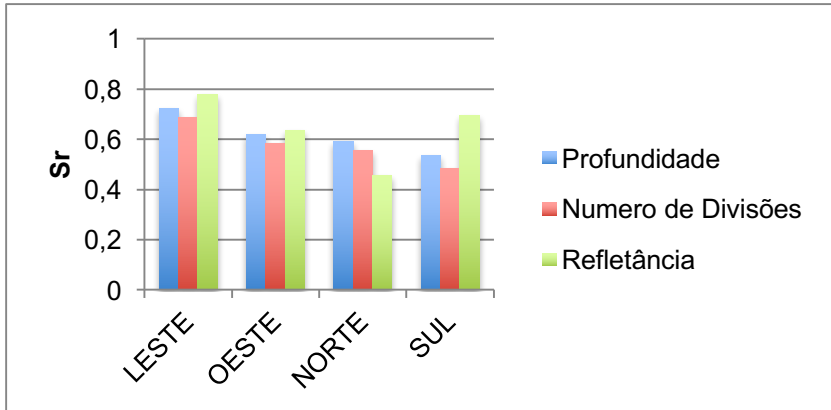


Para avaliar a sensibilidade dos resultados do modelo aos parâmetros de entrada, foi utilizado o método de variação nominal. Neste método o modelo é executado com base nos valores máximos e mínimos previstos para um dado parâmetro enquanto se mantém os restantes parâmetros - valores nominais - constantes. A sensibilidade relativa ( $Sr$ ), que permite a comparação entre as sensibilidades do modelo a cada parâmetro, é definida como a razão entre a taxa de variação da resposta do modelo ( $\partial R$ ) a uma pequena variação na entrada ( $\partial I$ ), normalizadas pelos valores iniciais da saída e da entrada, respectivamente. As Sensibilidades Relativas foram calculadas de acordo com a Equação 03.

$$Sr = \frac{\partial R}{\partial I} = \frac{\frac{R_2 - R_1}{R}}{\frac{I_2 - I_1}{I}} \text{ Eq.03}$$

No caso dos brises horizontais, as variáveis apresentaram contribuições distintas em relação à fachada para qual o brise está orientado. Nos brises horizontais orientados para sul, por exemplo, há maior contribuição da refletância do que do profundidade e número de divisões uma vez que por não incidir radiação solar direta sobre a fachada, a contribuição do sombreamento para redução do FSE é menor (ver Figura 55).

**Figura 55. Sensibilidade Relativa (Sr) em relação às variáveis de descrição dos brises horizontais**

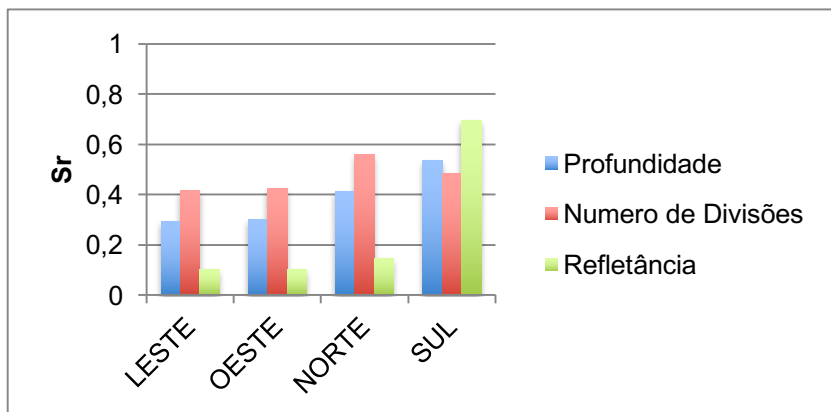


Fonte: O Autor

Para os brises verticais, a análise de sensibilidade apresentou um comportamento similar para as quatro orientações analisadas. Em todas as situações o número de divisões do plano demonstrou ser o fator com maior influência na composição do FSEa, seguido da profundidade da aleta e por fim da refletância dos dispositivos de proteção.

Apesar desse fato, a magnitude da sensibilidade relativa variou conforme a orientação solar. Novamente a refletância do dispositivo de proteção solar apresentou maior importância para composição do FSE da fachada Sul do que para as demais orientações indicando a importância da reflexão das aletas para promoção da radiação difusa (ver Figura 56).

**Figura 56. Sensibilidade Relativa (Sr) em relação as variáveis de descrição dos brises verticais**



Fonte: O Autor

#### 4.1.4. Considerações sobre o FSE

Os valores de correlação podem ser considerados satisfatórios. Com base nos resultados e erros obtidos, pode-se considerar que as situações são termo energeticamente equivalentes desde que observado o período de tempo analisado. A sequência do trabalho compreendeu os aspectos da disponibilidade da luz natural e de distribuição da luz pelos dispositivos de sombreamento. Uma vez que as métricas dinâmicas de iluminação natural são dadas em período anual, foram comparadas situações energeticamente equivalentes com base em seu FSEa.

#### 4.2. VIDROS DE CONTROLE SOLAR E DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EQUIVALENTES PARA ANÁLISE DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Oito vidros de controle solar disponíveis no mercado brasileiro e com diferentes relações de Tvis e FS foram selecionados para análise comparativa com os brises. Os vidros selecionados foram obtidos do Anexo Geral V da Portaria nº 50 - Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros (INMETRO, 2013). Uma vez observados seus valores de FS, oito dispositivos de sombreamento horizontais e verticais de desempenho energético equivalente (igual FSEa) foram selecionados para análise da iluminação natural. Adotou-se o período anual uma vez que as medidas de desempenho de iluminação natural, correspondem a este período de tempo (Autonomia da Luz Natural - DA<sub>300</sub>, Iluminâncias Úteis da Luz Natural - UDI<sub>100-2000</sub> e Autonomia da Luz Natural Espacial - sDA<sub>300-50%</sub> e Exposição Solar Anual - ASE<sub>1000-250h</sub>). Os quadros 3 e 4 a seguir apresentam os vidros de controle solar selecionados e os brises com FSEa equivalentes utilizados para análise comparativa de iluminação natural.

**Quadro 3. Vidros de controle solar e brises horizontais termicamente equivalentes.**

Nº do Caso e Orientação	Vidro de Controle Solar	Brise Horizontal Equivalente
Caso 1 – Norte	Guardian Sunguard Royal Blue 40 FS= 0,39 Tvis=29%	0,4m Profundidade 5 Divisões FSEa=0,390
Caso 2 – Norte	Cebrace 114 PN FS= 0,27 Tvis=14%	0,6m Profundidade 5 Divisões FSEa= 0,274
Caso 3 – Leste	Guardian Neutral Plus 50 FS= 0,39 Tvis=47%	0,3m Profundidade 7 Divisões FSEa= 0,394
Caso 4 – Leste	Cebrace SKN 154 FS=0,27 Tvis=50%	0,5m Profundidade 7 Divisões FSEa=0,271
Caso 5 – Sul	Guardian Light Blue 52 FS=0,59 Tvis=54%	0,6m Profundidade 2 Divisões FSEa=0,591
Caso 6 – Sul	Guardian Sunguard Silver 32 FS=0,43 Tvis=33%	0,5m Profundidade 5 Divisões FSEa=0,431
Caso 7 – Oeste	Cebrace 120PN FS= 0,30 Tvis=20%	0,4m Profundidade 8 Divisões FSEa= 0,300
Caso 8 – Oeste	Guardian Sunguard SN68 FS=0,4 Tvis=69%	0,5m Profundidade 6 Divisões Fsea=0,406

**Quadro 4. Vidros de controle solar e brises verticais termicamente equivalentes.**

Nº do Caso e Orientação	Vidro de Controle Solar	Brise Vertical Equivalente
Caso 9 – Norte	Guardian Sunguard Royal Blue 40 FS= 0,39 Tvis=29%	0,5m Profundidade 5 Divisões FSEa=0,39
Caso 10 – Norte	Cebrace 114 PN FS= 0,27 Tvis=14%	0,6m Profundidade 6 Divisões FSEa= 0,28
Caso 11 – Leste	Guardian Neutral Plus 50 FS= 0,39 Tvis=47%	0,4m Profundidade 8 Divisões FSEa= 0,396
Caso 12 – Leste	Cebrace SKN 154 FS=0,27 Tvis=50%	0,6m Profundidade 8 Divisões FSEa=0,30
Caso 13 – Sul	Guardian Light Blue 52 FS=0,59 Tvis=54%	0,4m Profundidade 2 Divisões FSEa=0,591
Caso 14 – Sul	Guardian Sunguard Silver 32 FS=0,43 Tvis=33%	0,2m Profundidade 8 Divisões FSEa=0,435
Caso 15 – Oeste	Cebrace 120PN FS= 0,30 Tvis=20%	0,6m Profundidade 8 Divisões FSEa=0,320
Caso 16 – Oeste	Guardian Sunguard SN68 FS=0,4 Tvis=69%	0,5m Profundidade 6 Divisões FSEa=0,468

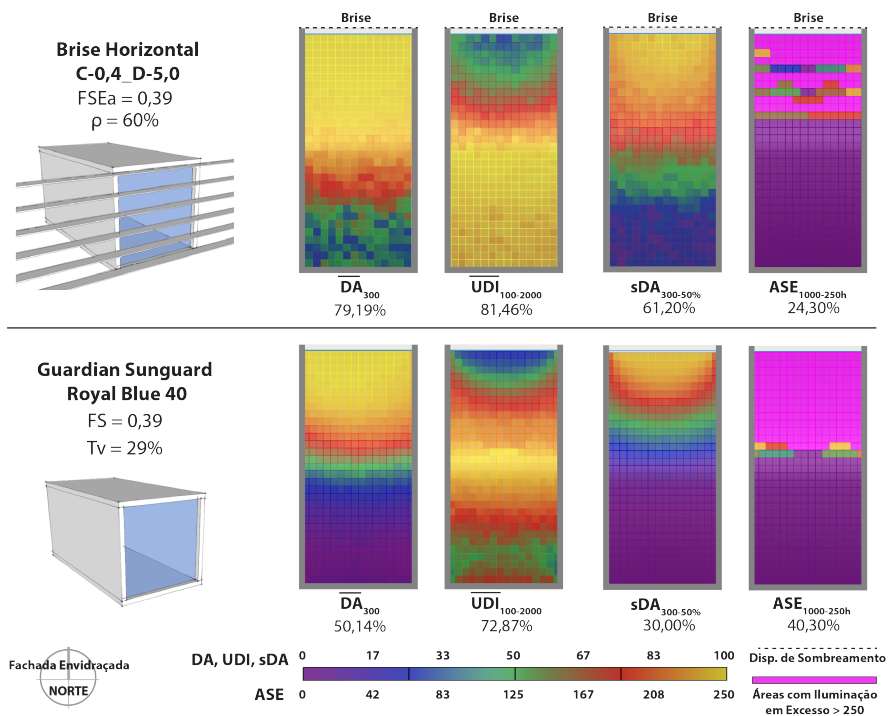
#### 4.3. ANÁLISE DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Para análise comparativa de iluminação natural, considerou-se refletância de 60%. As medidas de desempenho utilizadas para análise foram: Autonomia da iluminação Natural ( $DA_{300}$ ), Iluminâncias Úteis da Luz Natural ( $UDI_{100-2000}$ ), Autonomia da Iluminação Natural ( $sDA_{300-50\%}$ ), Exposição Anual ao Sol ( $ASE_{1000-250h}$ ). Os dezesseis casos estudados serão apresentados a seguir da figura 57 a 73 onde os casos 01 até 08 são referentes a dispositivos de controle solar horizontais e vidros de controle solar equivalentes, e os casos 09 a 16 referentes a dispositivos de controle solar verticais e seus vidros de controle solar equivalentes.

Verificou-se no caso 01 uma melhora na distribuição da iluminação natural do modelo com brise. É possível identificar neste caso o direcionamento da luz para o fundo do ambiente por meio das reflexões das aletas. Este direcionamento promoveu, ao compararmos os dois modelos, um aumento de 29,5 pontos percentuais de  $DA_{300}$  médio e de 8,59 pontos percentuais da  $UDI_{100-2000}$  média no modelo com brise, fornecendo indícios de que seria possível reduzir o consumo energético iluminação artificial. A área atendida pelo  $sDA_{300-50\%}$  também aumentou significativamente, atingindo 61,20% do ambiente, mais do que o nível de 55% exigido para obtenção dos créditos de iluminação do Leed v4. Entretanto, mesmo o modelo dotado de dispositivo de controle apresentando redução nos valores de  $ASE_{1000-250h}$ , os 24,30% encontrados não atenderiam ao critério de 10% imposto pela certificação.

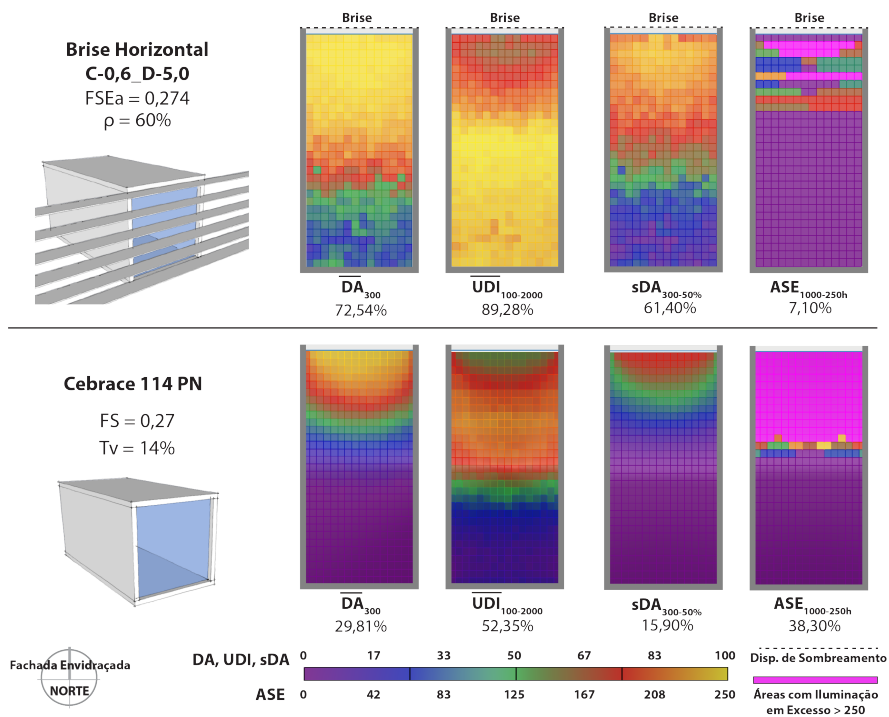


**Figura 57. Análise Gráfica - Fachada Norte - Caso 01**



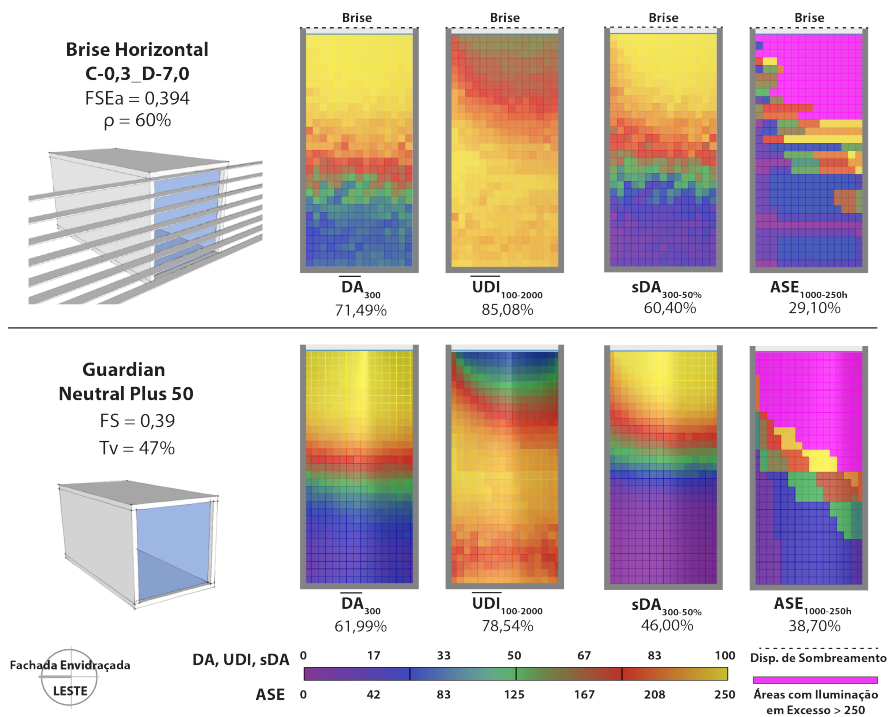
O Caso 02 apresentou melhores resultados para a fachada com dispositivo de controle do que para fachada com vidro de controle solar. Além de promover a iluminação natural para os espaços mais profundos do ambiente, o brise reduziu as iluminâncias acima de 2000 lux próximas a janela, frequentemente associadas ao desconforto dos usuários. O modelo com dispositivo de controle apresentou autonomia da luz natural espacial ( $sDA_{300-50\%}$ ) de 61,40% e exposição anual ao sol ( $ASE_{1000-250h}$ ) de 38,30%. O desempenho luminoso do modelo com vidro foi bastante prejudicado pela baixa Transmitância a Luz Visível ( $T_v$ ) e sua utilização implicaria em maior consumo de energia elétrica com iluminação artificial, em especial nas áreas mais distantes da janela.

**Figura 58. Análise Gráfica - Fachada Norte - Caso 02**



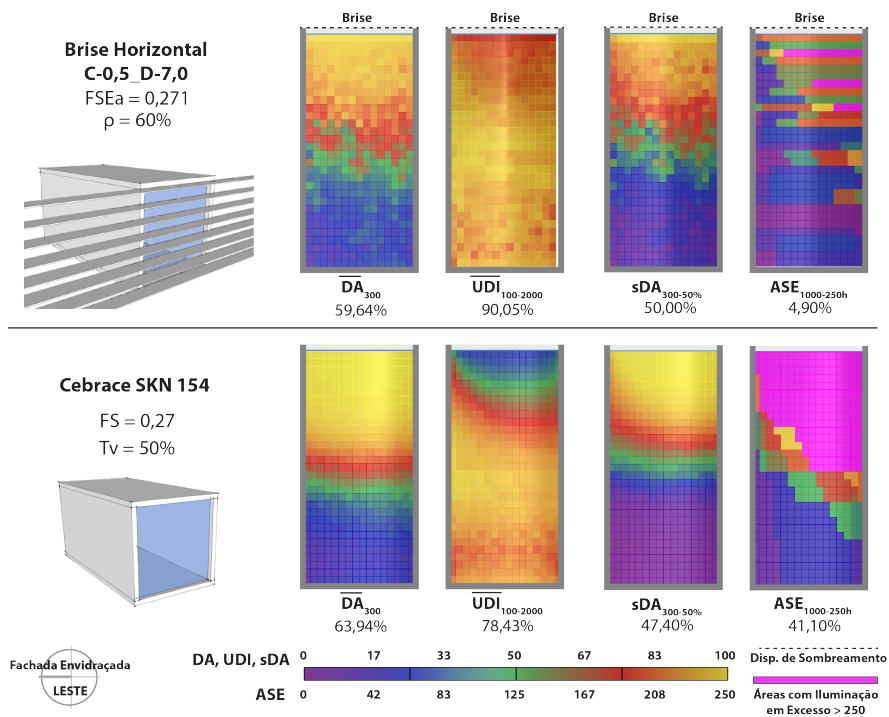
Assim como o Caso 01 e 02, o Caso 03 apresentou melhor desempenho luminoso para o dispositivo de sombreamento. Quando comparado ao modelo com vidro de controle, houve um aumento da Autonomia da Luz Natural de 61,99% para 71,49% e das Iluminâncias Úteis da Luz Natural de 78,54% para 85,08% bem como um aumento da área de sDA de 46,00% para 60,40%. Novamente as aletas foram responsáveis por difundir a iluminação para as porções mais profundas do ambiente, regulando, ao mesmo tempo, as iluminâncias em excesso no plano de trabalho próximo a janela. Além disso, houve redução do ASE de 38,70% para 29,10% através da utilização do dispositivo horizontal de sombreamento indicando que estes foram mais eficientes que os vidros em bloquear a radiação solar direta.

Figura 59. Análise Gráfica - Fachada Leste - Caso 03



Ainda orientado para Leste, o Caso 04 apresentou maior Autonomia da Luz Natural ( $DA_{300}$ ) para o modelo com vidro de controle solar (63,94%) do que para o modelo com brise (59,64%). O vidro empregado para este teste possui uma razão ótima entre a  $T_v$  e o FS, ou seja, transmite muita luz em relação ao seu Fator Solar. A análise das UDIs indica um excesso de iluminação junto a janela no modelo com vidro de controle, que é reduzido pelo emprego do dispositivo de controle solar apresentando uma variação de 11,62 pontos percentuais. O brise possibilitou o melhor controle da exposição direta ao sol reduzindo a área de ASE com iluminação em excesso de 41,10% para 4,90%.

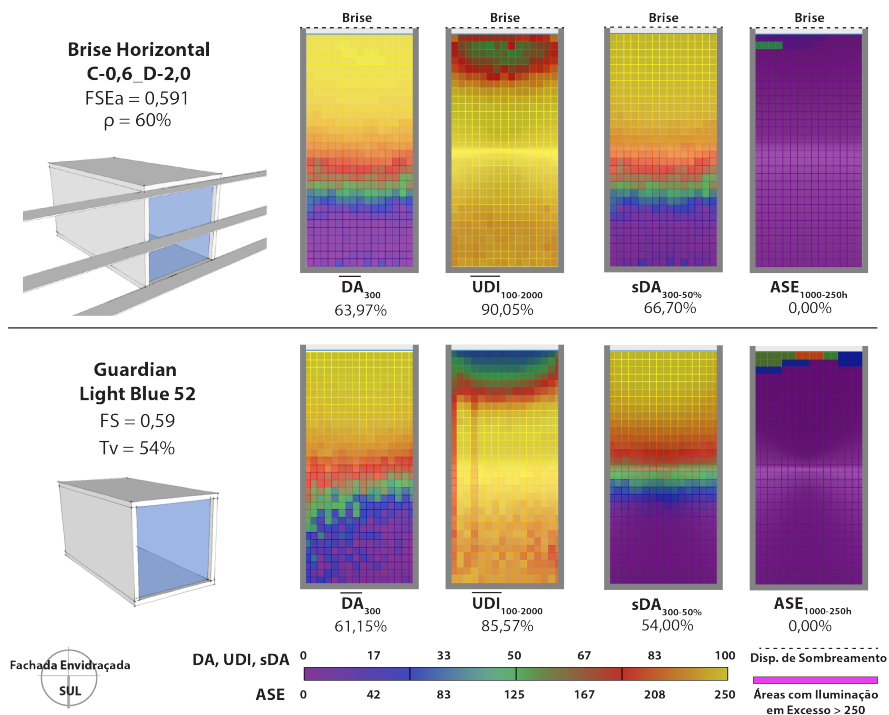
**Figura 60. Análise Gráfica - Fachada Leste - Caso 04**



Orientado para Sul, o caso 05 apresentou ganhos pequenos entre os modelos. Para Autonomia da Luz Natural houve incremento de 2,82 pontos percentuais na média do modelo com brise em relação ao modelo com vidro e também na área de  $sDA_{300-50\%}$  de 54,00% para 66,70%. As UDIs apresentaram um pequeno aumento passando de 85,57% no caso com vidro de controle solar para 90,05% no caso do dispositivo de sombreamento. Como a fachada Sul não recebe radiação solar direta o ASE para ambos os modelos resultou em 0% da área.

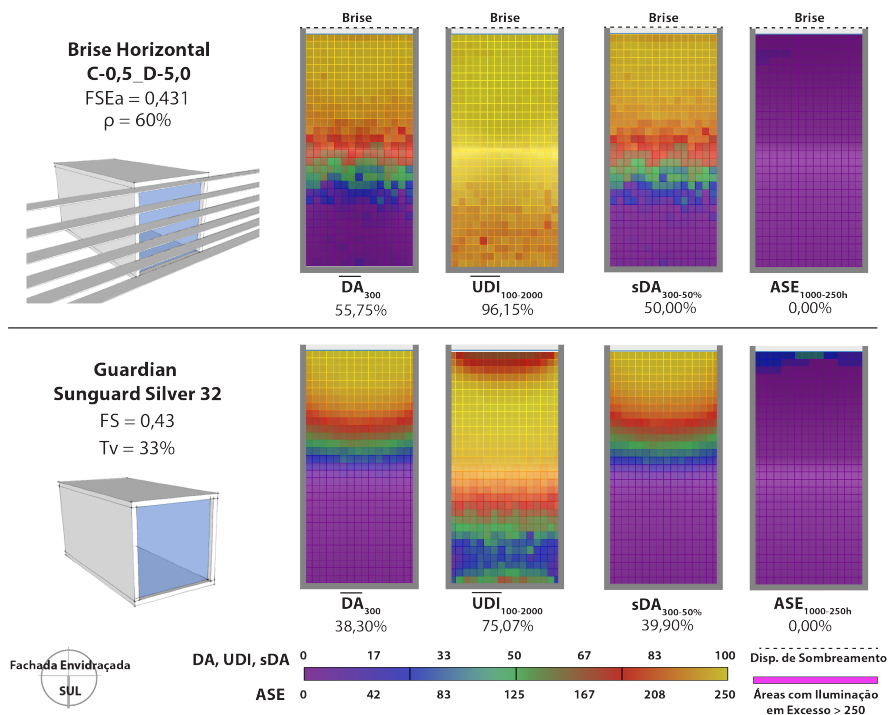


Figura 61. Análise Gráfica - Fachada Sul - Caso 05



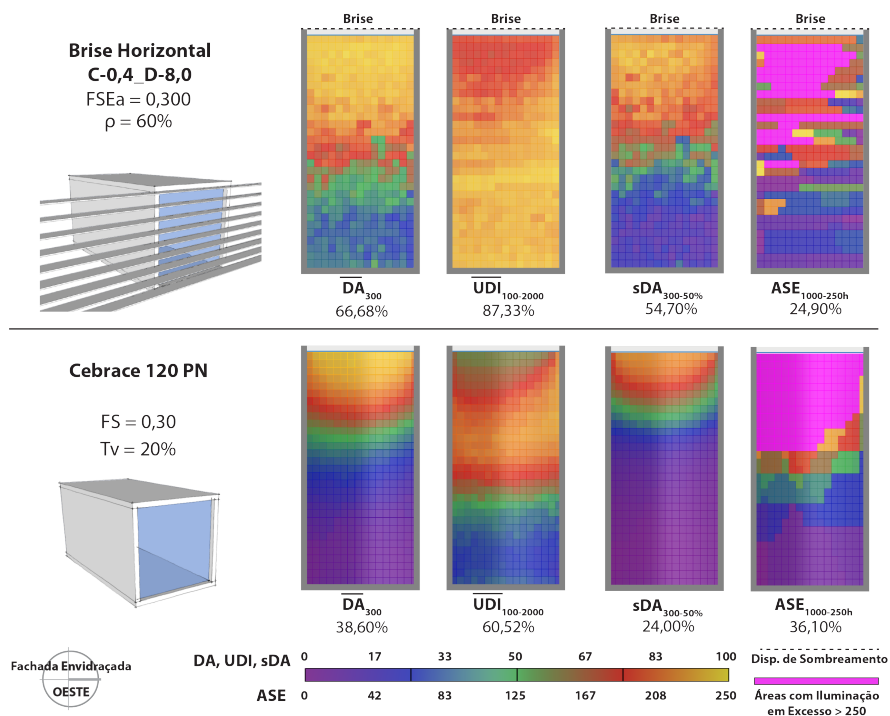
Também orientado para Sul, o Caso 06 apresentou ganhos consideráveis na iluminação do modelo com dispositivo de sombreamento quando comparado ao modelo com vidro de controle solar. O DA médio passou de 38,30% para 55,75%, houve um aumento da UDI média de 75,07% para 96,15%. Graficamente foi possível identificar um aumento da UDI nas porções mais profundas e redução da iluminação em excesso nas áreas próximas as janelas. Um aumento significativo de 10,1 pontos percentuais ocorreu no  $sDA_{300-50\%}$  elevando 39,90% para 50,00% a área atendida. O ASE permaneceu 0% da área, uma vez que a fachada sul não recebe radiação solar direta.

Figura 62. Análise Gráfica - Fachada Sul - Caso 06



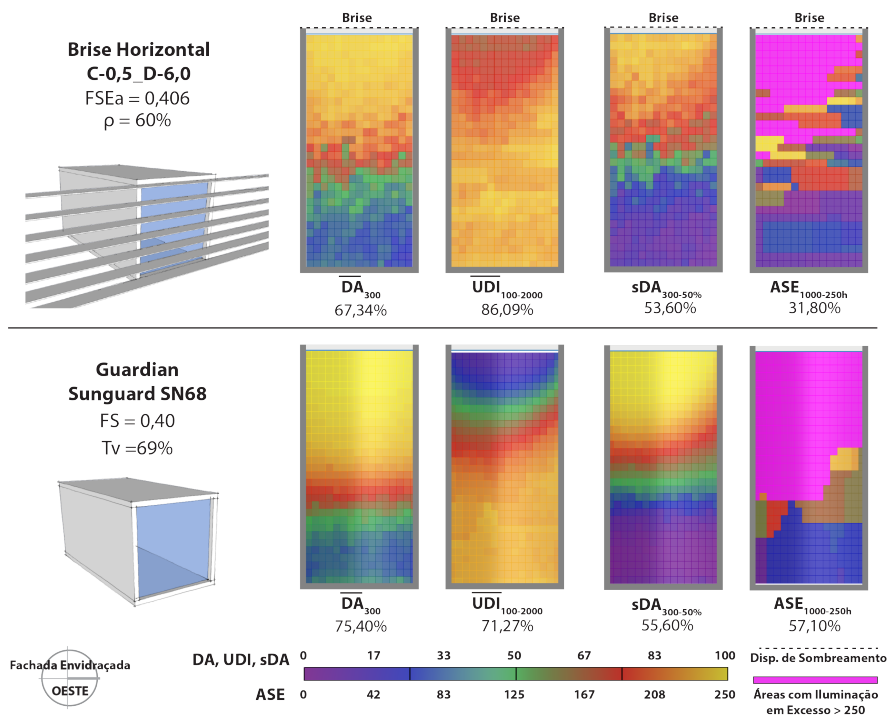
As fachadas orientadas para Oeste possuem um comportamento similar em relação às fachadas Leste onde os dispositivos de controle solar não têm o melhor desempenho em controlar a radiação solar direta. Entretanto, como é possível perceber por meio da comparação gráfica dos dois modelos do Caso 07, ganhos significativos na autonomia da luz natural, nas iluminâncias úteis da luz natural, bem como na porcentagem de área atendida pelo sDA no modelo com dispositivo de controle solar.

**Figura 63. Análise Gráfica - Fachada Oeste - Caso 07**



O caso 08 apresenta modelo com vidro de controle solar com relação  $T_v/FS$  de 1,72 (um ótimo vidro em termos de transmissão luminosa). Neste caso, o vidro de controle solar apresentou melhor desempenho do que o dispositivo de proteção para as Autonomias da Luz Natural ( $DA_{300}$ ) e Autonomia da Luz Natural Espacial ( $sDA_{300-50\%}$ ). As Iluminâncias Úteis da Luz Natural ( $UDI_{100-2000}$ ) revelam que, apesar disso o dispositivo de controle foi capaz de reduzir as iluminâncias em excesso próximo a janela. Ainda que o caso com vidro de controle solar tenha apresentado um  $sDA_{300-50\%}$  acima dos 55% exigidos pelo Leed v4, o ASE de ambos os casos foi superior a restrição de 10% imposta pela certificação para obtenção dos créditos.

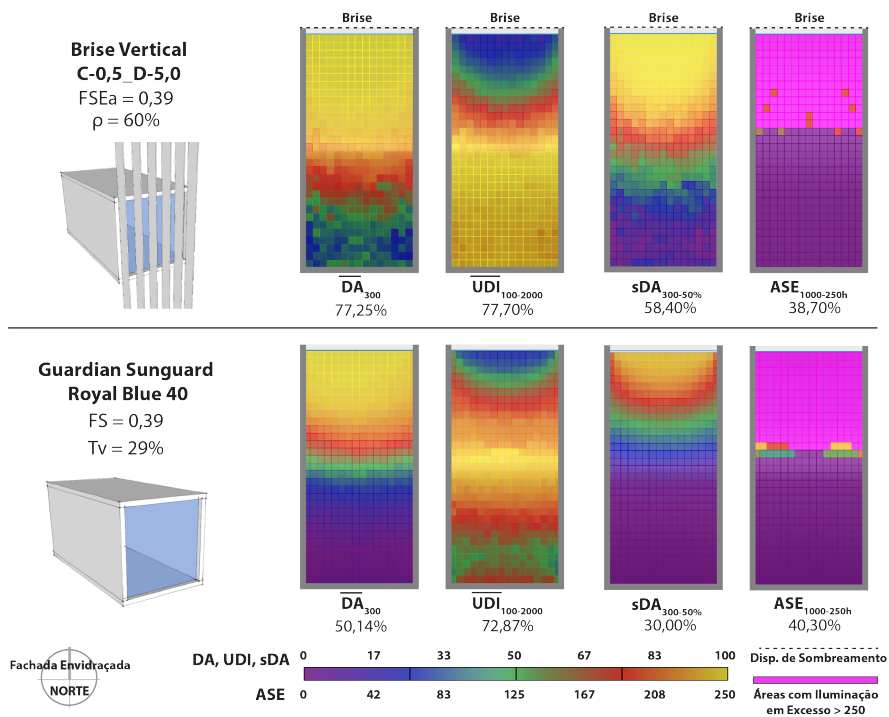
**Figura 64. Análise Gráfica - Fachada Oeste - Caso 08**



O Caso 09 apresenta o primeiro dispositivo vertical estudado. Os modelos para análise comparativa possuem sua fachada principal orientada para Norte. O desempenho do dispositivo de sombreamento foi melhor do que o do vidro de controle solar, apresentando  $DA_{300}$  médio de 77,25% contra 50,14%. O modelo com brise promoveu a luz nas áreas mais distantes da janela, mas, ao mesmo tempo, aumentou as iluminâncias em excesso próximo a mesma apresentando  $UDI_{100-2000}$  médias com variação de apenas 4,93 pontos percentuais. A área atingida pelo  $sDA_{300-50\%}$  aumentou de 30% para 58,40% enquanto os  $ASE_{1000-250h}$  apresentaram valores altos de 38,70% e 40,30%. Ao compararmos o desempenho ASE do brise caso 08 com o do caso 01, é possível identificar que elementos horizontais orientados para Norte são melhores em filtrar a radiação solar direta, corroborando com o apontado pela bibliografia.

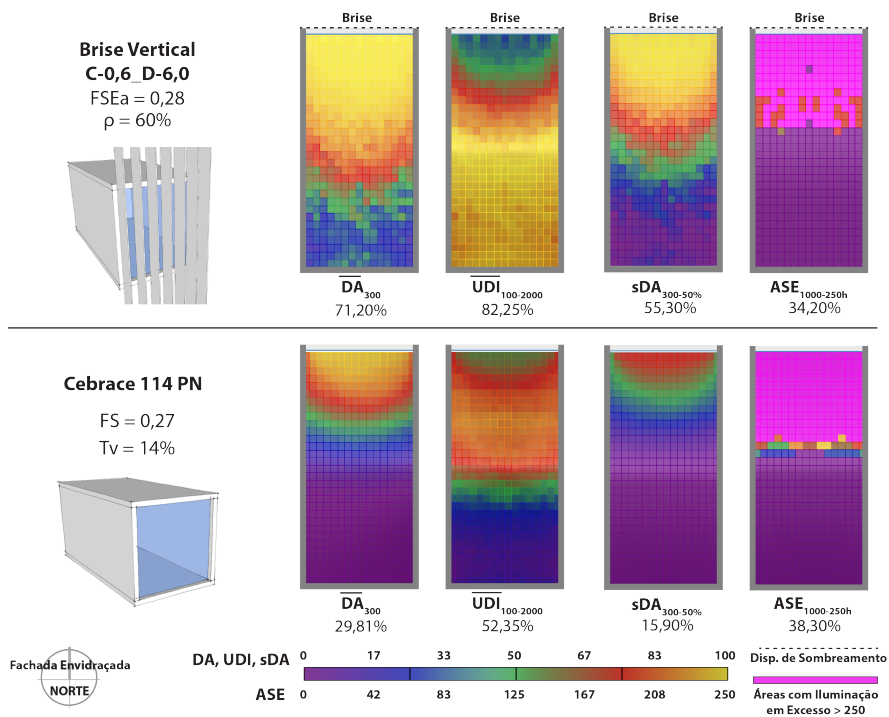


Figura 65. Análise Gráfica - Fachada Norte - Caso 09



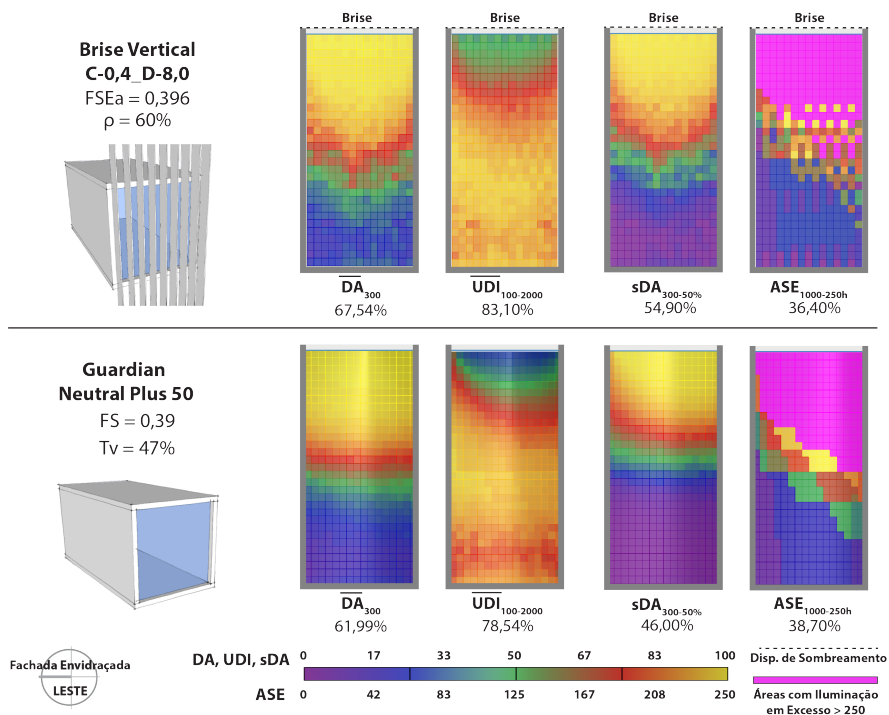
No caso 10 o dispositivo de sombreamento apresentou melhor desempenho frente ao vidro de controle solar. As diferenças para o  $DA_{300}$  foram bastante expressivas onde o DA médio para o vidro de controle apresentou uma magnitude 29,81% e o do dispositivo de controle 71,20%. As  $UDI_{100-2000}$  demonstram melhor distribuição da luz para o modelo com brise, que teve sua média elevada de 52,35% para 82,25%. O Vidro de Controle Solar empregado no Caso 10 possui baixa Transmitância Visível ( $T_v=14\%$ ), fazendo com que boa parte do ambiente tivesse índices baixos de iluminância.

Figura 66. Análise Gráfica - Fachada Norte - Caso 10



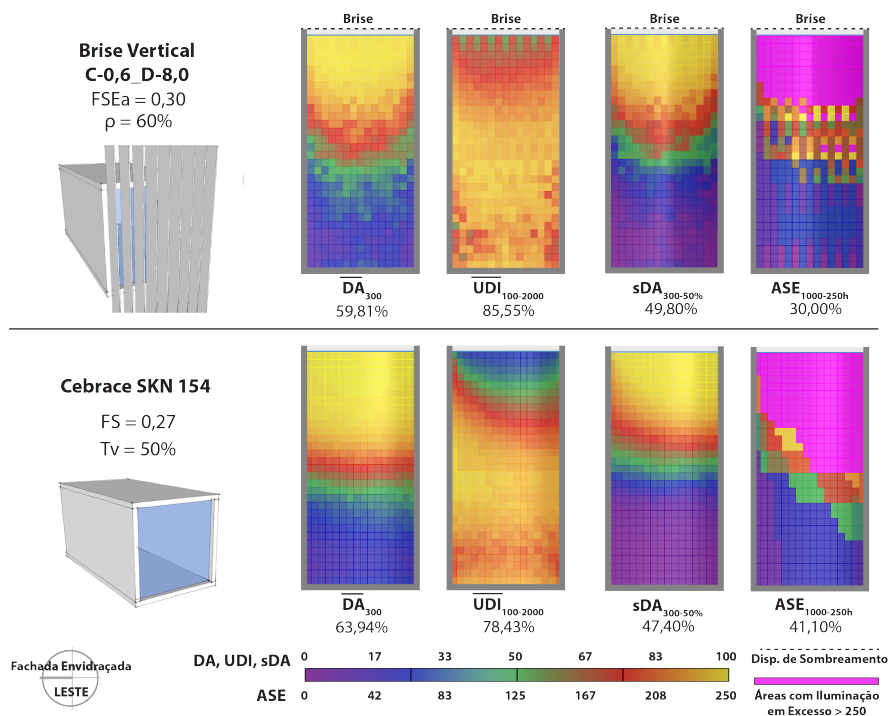
O caso 11 apresentou melhor comportamento da iluminação para o dispositivo de sombreamento. A média do  $DA_{300}$  apresentou uma diferença de apenas 5,55 pontos percentuais entre os modelos. As  $UDI_{100-2000}$  também foram maiores para o modelo com brise do que para o modelo com vidro de controle solar, 78,54% contra 83,10%. O modelo com brise também apresentou maior área atendida pelo  $sDA_{300-50\%}$  passando de 46,00% do modelo com vidro de controle solar para 54,90% para o modelo com dispositivo de sombreamento. Ocorreu também uma pequena redução no ASE de 38,7% para 36,40%.

Figura 67. Análise Gráfica - Fachada Leste - Caso 11



No caso 12, o vidro de controle apresentou maior média do  $DA_{300}$ , entretanto ao analisarmos as  $UDI_{100-2000}$  é perceptível a área com iluminação em excesso próxima a janela. O dispositivo de proteção elevou reduziu essas áreas e elevou a média das  $UDI_{100-2000}$  para 85,55%. Ao mesmo tempo, a área atingida pelo  $sDA_{300-50\%}$  subiu de 47,4 para 49,80% e o ASE foi reduzido de 41,10% para 30,00%.

Figura 68. Análise Gráfica - Fachada Leste - Caso 12

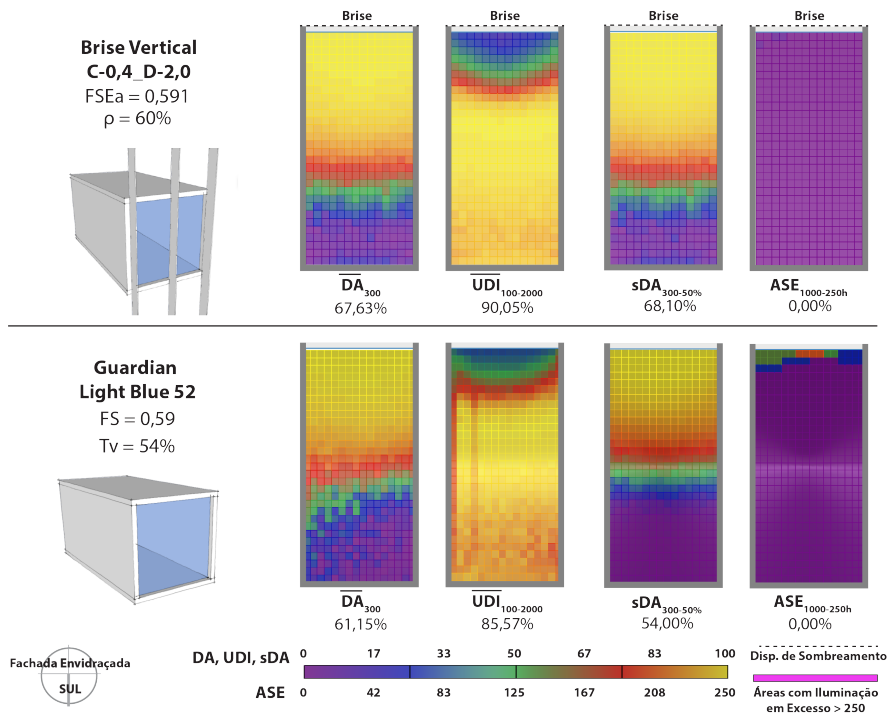


Neste caso, o brise apresentou média do  $DA_{300}$  superior ao caso com vidro de controle solar, 67,3% contra 61,15%. Além disso, proporcionou ganhos de 4,48 pontos percentuais na  $UDI_{1000-2000}$  média ao promover melhoria da distribuição da iluminação natural no fundo do ambiente. Todavia, o dispositivo de controle neste caso, aumentou as áreas com iluminâncias acima de 2000 lux próximo a janela.

A área atendida pelo  $sDA_{300/50\%}$  foi maior no caso com dispositivo de sombreamento apresentando 68,1% da área contra 54,00% do caso com vidro. Por se tratar de uma fachada Sul o ASE para ambos os sistemas foi 0,00%.

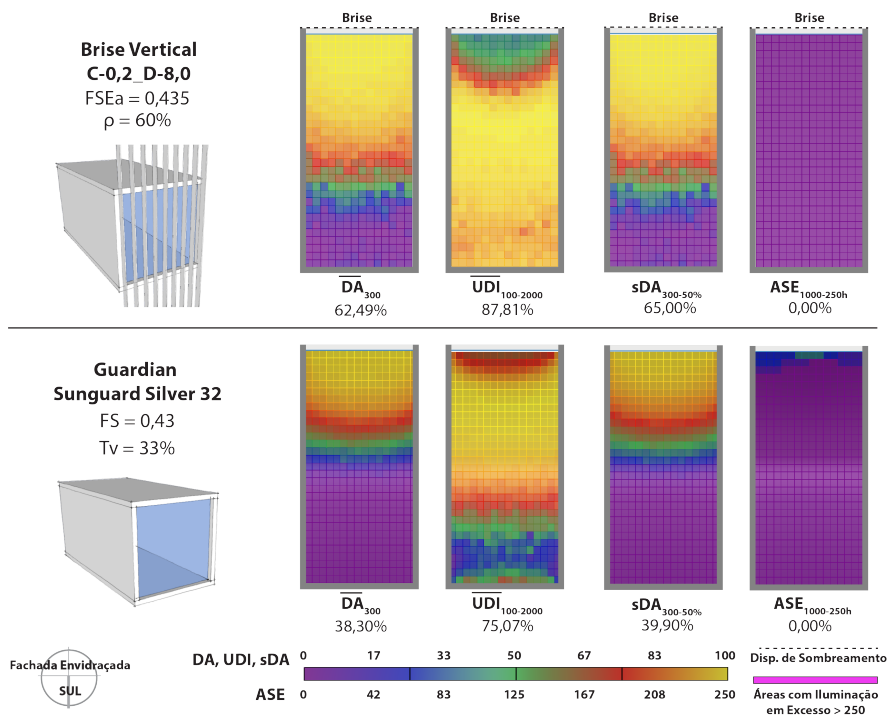


Figura 69. Análise Gráfica - Fachada Sul - Caso 13



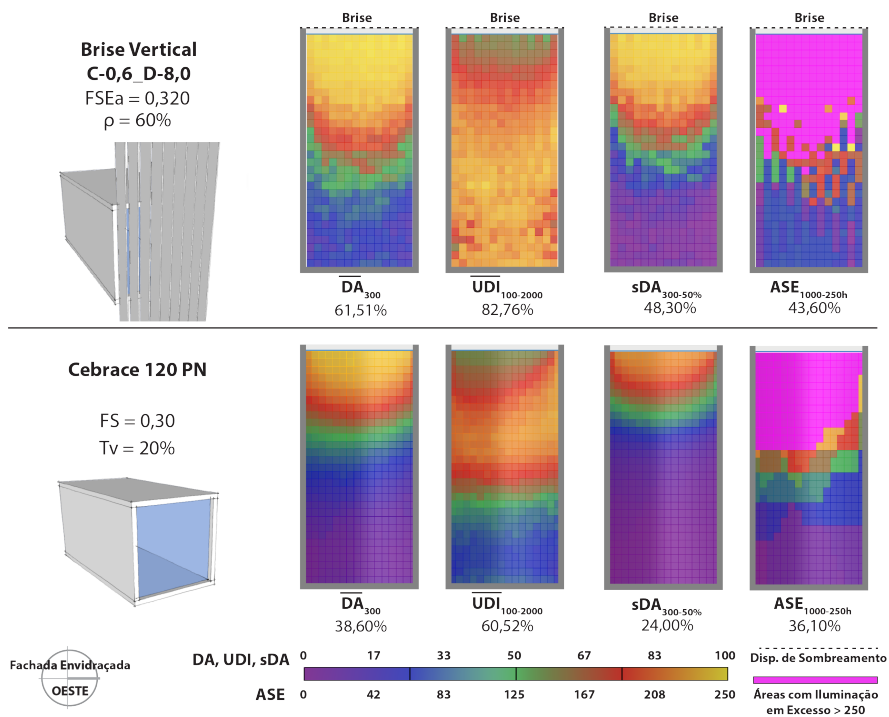
Orientado para Sul, o caso 14 apresentou melhor desempenho para o modelo com dispositivo de sombreamento. As médias do  $DA_{300}$  e  $UDI_{100-2000}$  foram maiores no modelo com brise do que no modelo com vidro de controle solar. No caso do DA médio houve uma diferença de 24,19 pontos percentuais enquanto da  $UDI_{100-2000}$  média foi de 12,74%. O DA espacial foi maior no caso com dispositivo de proteção 65,00% contra 39,90% do modelo com vidro de controle solar.

Figura 70. Análise Gráfica - Fachada Sul - Caso 14



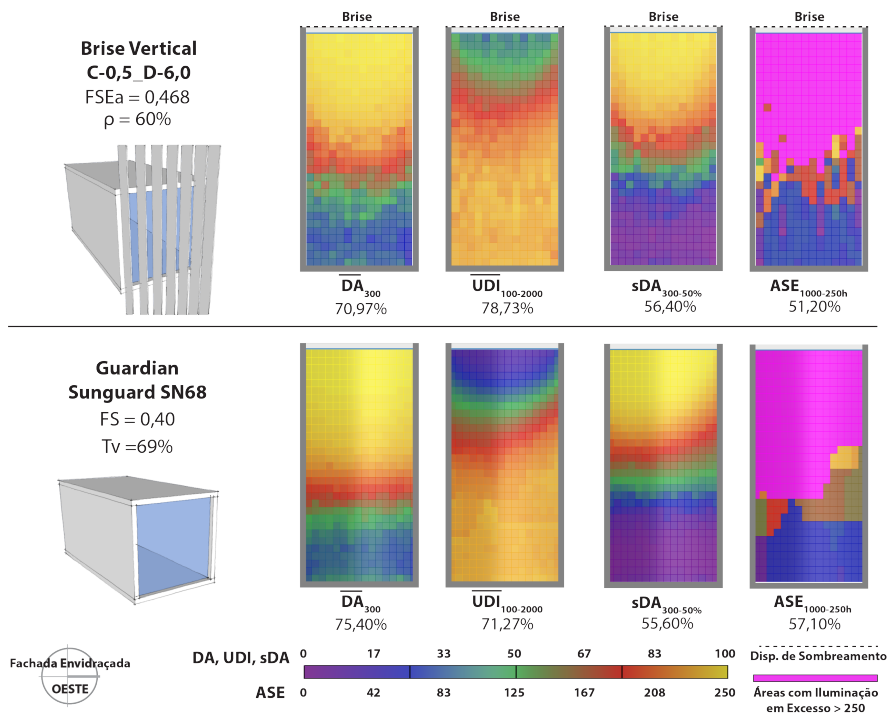
No caso 15, orientado para Oeste, o modelo com dispositivo de sombreamento apresentou  $DA_{300}$  Médio superior ao modelo com vidro de controle solar, 61,51% contra 38,60%. Também apresentou maior média das  $UDI_{100-2000}$ , 82,76% para o caso com brise e 60,52% para o caso com vidro de controle solar. A área atingida pelo  $sDA_{300-50\%}$  também foi maior para o caso com dispositivo de sombreamento atingindo 48,30% enquanto o modelo com vidro de controle apresentou 24,00%. Neste caso o  $ASE_{1000-250h}$  para o modelo com vidro de controle solar foi melhor do que para o dispositivo de sombreamento reduzindo a área de 43,60% para 36,10%.

**Figura 71. Análise Gráfica - Fachada Oeste - Caso 15**



Ainda que o  $DA_{300}$  médio tenha sido maior no caso com vidro de controle solar, os dispositivos de sombreamento apresentaram, no caso 16, melhor desempenho em relação a média das  $UDI_{100-2000}$  78,73% contra 71,27%. Este fato indica que o dispositivo de sombreamento contribuiu para o controle das Iluminâncias em excesso próximo a janela. Desta forma aumentando a área atendida pelo  $sDA_{300-50\%}$  em 0,8 pontos percentuais e reduzindo o  $ASE_{1000-250h}$  de 57,10% para 51,20%.

Figura 72. Análise Gráfica - Fachada Oeste - Caso 16



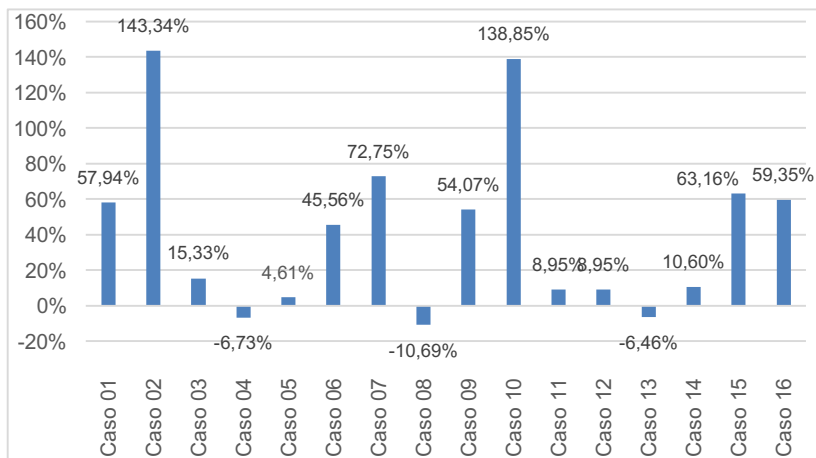
De maneira geral, é possível afirmar que os dispositivos de sombreamento analisados apresentaram melhor performance em relação a promoção da iluminação natural nos ambientes. Os resultados encontrados vão de acordo com o que foi exposto por Pereira (1992) e Bogo (2007) no capítulo de revisão bibliográfica. Onde os brises ao modificarem a transmitância bidirecional, foram capazes de alterar a distribuição da luz natural no ambiente interno.

Os gráficos a seguir apresentam o percentual de ganho ou perda do modelo com brise em relação ao caso com vidro de controle solar.

Na figura 73, os modelos com brises apresentaram ganhos de até 143,34% (caso 2) na média do  $DA_{300}$  em relação aos casos com vidro. Os casos 04, 08 e 13, apresentaram melhor comportamento do vidro de controle solar, apresentando uma diferença de -10,69% em relação aos modelos com brise. Deve-se ressaltar que Autonomia de Luz Natural falha em dar significado as iluminâncias abaixo do limite alvo estabelecido (300lux) e não informa a quantidade de iluminação em excesso frequentemente associada ao desconforto térmico e visual.



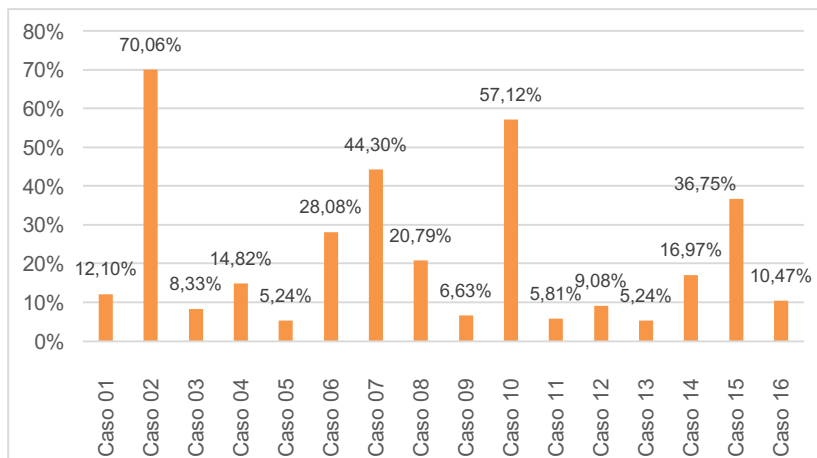
**Figura 73. Variação percentual entre Brises e Vidros de Controle - Média do DA300**



Fonte: O Autor

A figura 74 evidencia o melhor desempenho dos dispositivos de sombreamento frente aos vidros de controle solar. Em todos os casos a média das  $UDI_{100-2000}$  aumentou. O caso 02 apresentou a maior diferença com 70,06%. Pode-se atribuir este resultado ao baixo fator  $T_v/FS$  (0,51) do vidro de controle solar, ou seja, um vidro que transmite pouca luz. O aumento das  $UDI_{100-2000}$  indica que nos casos com brise houve melhor controle da radiação em excesso próximo a janela e melhora na distribuição da luz ao longo do ambiente.

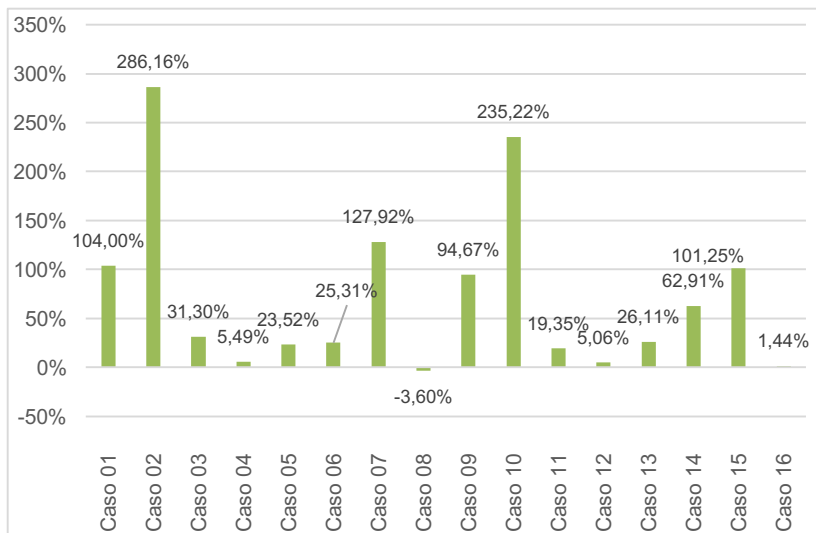
**Figura 74. Variação percentual entre Brises e Vidros de Controle - Média das UDI100-2000**



Fonte: O Autor

À exceção do caso 08 todos os demais casos apresentaram ganhos em relação a área atendida pelo  $sDA_{300-50\%}$  quando da utilização de dispositivos de sombreamento (Figura 57). O caso 02 novamente se destacou com um aumento de 286,16% do  $sDA_{300-50\%}$  do modelo com brise em relação ao modelo com vidro.

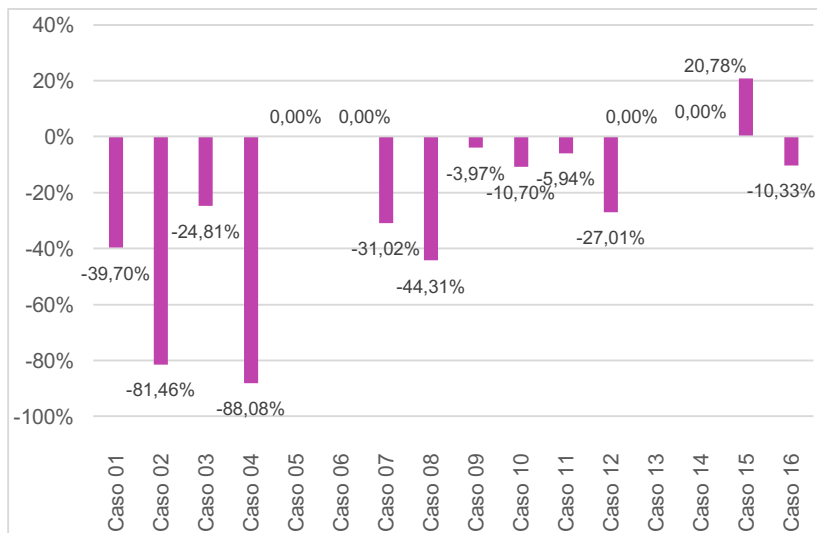
**Figura 75. Variação percentual entre Brises e Vidros de Controle - sDA300-50%**



Fonte: O Autor

O  $ASE_{1000-250h}$  reduziu em todos os casos exceto o caso 15 alcançando uma redução máxima no caso 04 onde a diferença encontrada foi de -88,08%. Os dispositivos de sombreamento foram mais efetivos em controlar a radiação solar direta incidente ao longo do ano. Ainda que as reduções tenham sido significativas, os limites de  $ASE_{1000-250h}$  utilizados pelo LEEDv4 demonstraram ser bastante restritivos penalizando os casos em que não há sombreamento da superfície seja por dispositivo de sombreamento mal projetado ou por vidros de controle solar.

**Figura 76. Variação percentual entre Brises e Vidros de Controle - ASE1000-250h**



Fonte: O Autor

## 5. CONCLUSÕES

O desempenho energético de um sistema de fachada está diretamente relacionado à sua geometria, características dos materiais e do clima onde a edificação está inserida. Ao mesmo tempo, a garantia de admissão e boa distribuição da luz natural tem demonstrado ser essencial na manutenção de aspectos tais como: desempenho luminoso, satisfação visual e a saúde dos ocupantes.

Vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento têm sido largamente empregados para controlar a carga térmica, reduzindo o ganho de calor solar das edificações. Seu desempenho luminoso, entretanto, pode diferir significativamente, sobretudo no que diz respeito à distribuição da luz no ambiente interno.

Com o objetivo de analisar comparativamente o comportamento luminoso e energético de vidros de controle solar e de dispositivos de sombreamento, este trabalho foi desenvolvido em duas grandes etapas:

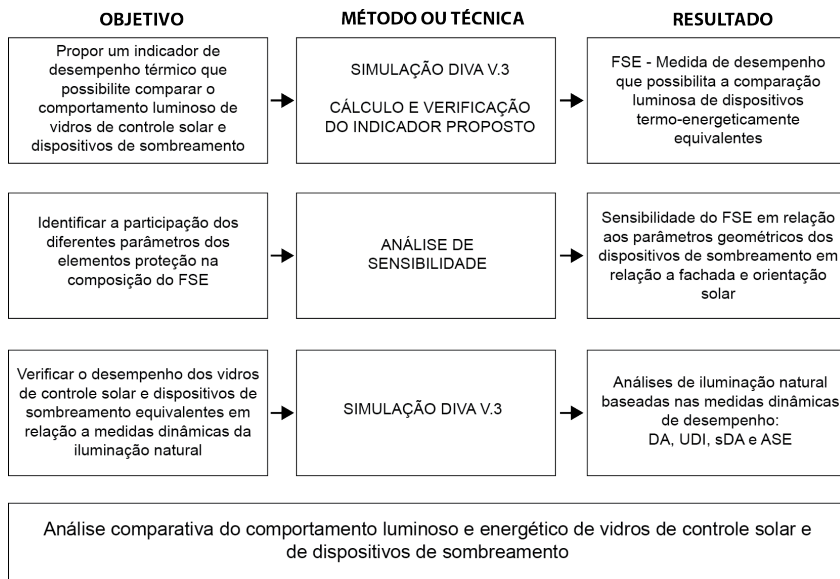
Na primeira etapa foi proposta e verificada a equiparação termo-energética de modelos com sistemas de vidros de controle solar e modelos com dispositivos de sombreamento por meio de seus valores de Fator Solar e Fator Solar Equivalente.

Na segunda etapa estes paredes termo-energéticas foram simulados para verificação de seu desempenho luminoso por meio de medidas dinâmicas de iluminação natural.

Os objetivos específicos propostos neste trabalho foram atingidos através de métodos e técnicas baseados na revisão de

bibliografia e foram essenciais no processo de atendimento ao objetivo geral (ver Figura 77).

**Figura 77. Objetivos e resultados alcançados**



## 5.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O FATOR SOLAR EQUIVALENTE

O Fator Solar Equivalente (FSE) foi proposto de modo a equiparar termo-energeticamente dispositivos de sombreamento a vidros de controle solar. Calculado com base em dois planos de análise, desobstruído e obstruído pelo dispositivo de sombreamento, este indicador representa a porcentagem da radiação incidente que atravessa o dispositivo de proteção solar.

Este apresentou-se como uma medida de desempenho importante que oferece uma alternativa aos projetistas quando da especificação de um sistema para redução de carga térmica, permitindo que se realize a análise do desempenho luminoso de tecnologias equivalentes sob o ponto de vista do ganho de calor.

Sua equivalência foi verificada por meio de simulações computacionais termo-energéticas de uma amostra de 768 modelos de dispositivos de sombreamento. Utilizando o plugin DIVA for Grasshopper para realização de simulações do EnergyPlus e adotando valores médios de densidade de carga interna ( $76,96\text{W}/\text{m}^2$ ) e refletância do dispositivo (60%), foram encontradas correlações e erros percentuais absolutos médios que indicam que o comportamento anual em termos de ganho de calor dos dispositivos de proteção pode ser representado por um valor de Fator Solar Equivalente Anual (FSEa) com razoável precisão -  $R^2$  superior a 0,93 - e erros percentuais absolutos médios inferiores a 9%.

Quando verificado o coeficiente de correlação  $R^2$  e EPAM em relação à variação das cargas internas e refletância dos dispositivos, o aumento da densidade de carga interna ocasionou a elevação do coeficiente de correlação  $R^2$ . Com o aumento das cargas internas, a diferença percentual diminuiu, diluindo a contribuição do ganho de calor solar no consumo total e consequentemente aumentando o coeficiente de correlação.

Também verificou-se que o aumento da refletância reduziu o Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ) e aumentou dos erros percentuais absolutos médios (EPAMs). Neste caso, houve maior influência da reflexão de radiação direta e difusa e aumento das interreflexões das aletas do dispositivo de sombreamento. Mesmo assim, as correlações encontradas apresentaram  $R^2$  acima de 0,93 e erros inferiores a 9% considerados aceitáveis para este tipo de estudo.

## 5.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A importância dos parâmetros dos dispositivos de controle solar: profundidade, número de divisões do plano de vidro e refletância na composição do FSEa foi verificada por meio de análise de sensibilidade relativa. A importância das variáveis depende do tipo da geometria (horizontal ou vertical) e da orientação da fachada analisada.

Para dispositivos de proteção horizontais orientadas para fachada Norte, foi verificada maior importância da profundidade das aletas, seguido do número de divisões do plano envidraçado. Isto demonstra que



este dispositivo, projetado para ser seletivo, é capaz de bloquear a radiação proveniente de alturas solar maiores e que este bloqueio tem grande participação na composição do FSE. As demais orientações tiveram a refletância das aletas como principal variável na composição do FSE, seguidas da profundidade e número de divisões.

No caso de dispositivos de proteção verticais, o número de divisões do plano de envidraçado e a profundidade do dispositivo foram os fatores com maior influência. Nota-se ainda que a refletância, tanto no caso dos dispositivos horizontais quanto no caso dos verticais, demonstrou possuir maior influência sobre a fachada Sul, onde é reduzida a incidência de radiação solar direta, e a radiação solar difusa não filtrada pelo dispositivo de sombreamento ocasionou aumento na proporção de energia que atinge a fachada obstruída.

### 5.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ANÁLISES DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Através de simulações dinâmicas da luz natural de modelos termo-energeticamente equivalentes, constatou-se que os dispositivos de controle solar obtiveram melhor desempenho luminoso frente os vidros de controle solar, apresentando aumentos de até 143,34% na média da Autonomia da Luz Natural ( $DA_{300}$ ), 70,06% na média das Iluminâncias Úteis da Luz Natural ( $UDI_{100-2000}$ ), 286,16% na área da Autonomia da Luz Natural Espacial ( $sDA_{300-50\%}$ ) e redução da área de Exposição Solar Anual ( $ASE_{1000-250h}$ ) de até 88,08%.

O aumento do DA apontou o potencial da utilização de dispositivos de sombreamento para a redução do consumo de energia elétrica com iluminação artificial. Ao mesmo tempo, o aumento das UDI demonstrou que os dispositivos de sombreamento reduziram as iluminâncias em excesso próximo às janelas quando comparados aos modelos com vidro de controle solar.

Uma vez que na grande maioria dos casos houve a redução dos valores de ASE e aumento do sDA quando da utilização de dispositivos de sombreamento, estes demonstraram realizar melhor uso da radiação solar direta para promoção da luz natural. Os valores para obtenção de créditos do sistema de certificação Leed v4 - sDA maior que 55% e ASE inferior a 10% da área, apresentaram ser bastante restritivos e penalizar aberturas que não são sombreadas. Estas medidas de desempenho, entretanto, foram de grande valia para caracterização luminosa dos ambientes uma vez que trabalham com uma relação de área atendida.

De forma distinta dos modelos com vidros de controle solar, que alteraram a intensidade da energia transmitida sem modificar significativamente a distribuição da iluminação natural, os modelos com dispositivos de sombreamento foram capazes de difundir a luz natural admitida no ambiente interno, atuando efetivamente como luminárias, promovendo uma distribuição espacial benéfica.

#### 5.4. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O TRABALHO

A visualização da relação direta entre os fenômenos térmico e luminoso, oferecidas por meio das análises comparativas deste trabalho, evidenciaram a frequente arbitrariedade com que os projetistas costumam especificar vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento para distintas orientações e condições bioclimáticas. Estas decisões seguidamente desconsideram a iluminação natural e tendem a implicar em ambientes luminosos inadequados e, por vezes, com maior consumo de energia elétrica com iluminação artificial.

Os benefícios em relação à distribuição luminosa, provenientes da utilização de dispositivos de sombreamento encontrados neste trabalho, carecem de ser ponderados por aspectos como o custo de implantação e a manutenção do sistema, onde os vidros de controle solar podem ser uma alternativa financeiramente mais atraente. Além disso, fatores como a permeabilidade visual, ocorrência de ofuscamento e o apelo estético também necessitam ser levados em consideração.

Sendo assim, o projeto das aberturas deve ser uma atitude consciente e baseada em indicadores de desempenho multicriteriais que considerem os aspectos termo-energéticos, luminosos, estéticos e econômicos.

## 5.5. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho abordou variáveis relacionadas às geometrias dos brises e à composição dos vidros de controle solar. Entretanto, existem inúmeras outras possibilidades de soluções que podem levar a desempenhos diferentes. As principais limitações do estudo são apresentadas abaixo.

- Os vidros utilizados para as análises comparativas são os revestidos de controle solar. Cabe ressaltar que o método aqui proposto pode ser aplicado para comparação de demais tipos de vidro de controle solar.
- Não foram considerados vidros com propriedades dinâmicas.
- Foi considerado somente a latitude e o clima da cidade de Florianópolis - SC.
- As simulações utilizadas para cálculo do FSE são baseadas na radiação solar admitida, sem considerar a parcela absorvida e retransmitida (radiação e convecção) pelos vidros e dispositivos de sombreamento para cálculo do FSE. Assumiu-se que este erro é pequeno uma vez que os dispositivos de

sombreamento são externos, situação na qual a maior parte desta parcela é dissipada ao exterior.

- Não foram consideradas obstruções do entorno do edifício nem a refletância do piso externo ao ambiente.
- As intervenções dos usuários sobre os dispositivos de controle solar não foram consideradas e nem a possibilidade de movimentação das aletas.

## 5.6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na investigação conduzida neste trabalho e em seus resultados, sugere-se como trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Testar o indicador FSE em relação a diferentes climas e orientações solares intermediárias.
- Verificar a influência da inclinação das aletas na composição FSE e na iluminação natural.
- Verificar dispositivos de sombreamento em grelha (vertical + horizontal).
- Utilizar simulação integrada para estimar o impacto dos dispositivos de sombreamento e vidros de controle solar na redução do consumo de energia elétrica com iluminação artificial.
- Realizar regressão linear multivariada com os valores de FSE e variáveis estudadas.

- Desenvolver técnicas para se projetar considerando a visibilidade externa e interna do protetor.
- Avaliar a probabilidade de ofuscamento através de análise de medidas de desempenho específicas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 15220. Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2005.

ABNT. NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho. , 2013. Rio de Janeiro.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Handbook of Fundamentals**. USA: ASHRAE, 2009.

ANDREIS, C.; BESEN, P.; WESTPHAL, F. S. Desempenho energético de fachadas envidraçadas em climas brasileiros. **XV Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**, , n. 1, p. 926–935, 2014.

AROZTEGUI, J. M. Método para projeto e avaliação de para-sóis externos visando à otimização de seu desempenho térmico para um clima dado. , 1981. São Paulo: IPT/USP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1 2013 Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais Prefácio. , p. 60, 2013.

ATHIENTIS, A. K.; TZEMPELIKOS, A. A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device. **Solar Energy**, v. 72, n. 4, p. 271–281, 2002.

Disponível

em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X02000166>>.

Acesso em: 7/8/2015.

BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 94, n. 2, p. 87–105, 2010.

BODART, M.; HERDE, A. DE. Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 5, p. 421–429, 2002.

BOGO, A. J. Influência da refletância das placas de elementos de controle solar na admissão de luz natural em janelas The Influence of Reflectance of Plates of Solar Control Devices in the Entrance of Natural Light in Windows Resumo. , , n. 1.

BOGO, J. . **Método para avaliação da admissão de luz natural através de aberturas com elementos de controle solar**, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

CALIFORNIA ENERGY COMISSION. Daylight Metrics PIER Daylighting Plus Research Program. , , n. June, 2014. Disponível em: <<http://www.energy.ca.gov/2012publications/CEC-500-2012-053/CEC-500-2012-053.pdf>>. .

CARLO, J. C. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-residenciais. **Universidade Federal de Santa Catarina**, p. 196, 2008.

CEBRACE. Vidro de Controle Solar: a solução para o conforto térmico na arquitetura. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/v2/noticias/306>>. Acesso em: 31/10/2013.



CIE. A ROADMAP FOR UPGRADING NATIONAL / EU STANDARDS FOR DAYLIGHT IN BUILDINGS School of Civil and Building Engineering , Loughborough University , VELUX A / S , Adalstej Guidelines , compliance schemes and the challenges ahead. . p.1–10, 2013.

CRAWLEY, B. D. B.; LAWRIE, L. K. EnergyPlus : Energy Simulation Program. *ashrae*, v. 42, p. 49–56, 2000.

DIDONÉ, E. L. **A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC**, 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.

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

DUBOIS, M.; MARCH, B. Shading devices and daylight quality : an evaluation based on simple performance indicators. , v. 1, p. 61–74, 2003.

DUTRA, L. **Uma Metodologia para a Determinação do Fator Solar Desejável em Aberturas**, 1994. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISERTACAO\\_Luciano\\_Dutra.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISERTACAO_Luciano_Dutra.pdf)>. .

ESQUIVIAS, P. .; MUNOZ, C. .; ACOSTA, I.; MORENO, D.; NAVARRO, J. Climate-based daylight analysis of fixed shading devices in an open-plan office. , p. 1–16, 2014.

FONSECA, R. W.; PEREIRA, F. O. R.; WESTPHAL, F. S.; SOGLIO, C. R.

D.; BESEN, P. Development of a Daylighting Index for Window Energy Labelling and Rating System for Residential Buildings in Brazil. **Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association**, p. 3002–3009, 2013.

FONTENELLE, M. R.; BASTOS, L. E. G. The multicriteria approach in the architecture conception: Defining windows for an office building in Rio de Janeiro. **Building and Environment**, v. 74, p. 96–105, 2014.

FREEWAN, A. A. Y. Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. **Solar Energy**, v. 102, p. 14–30, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14000279>>. Acesso em: 15/2/2016.

GRATIA, E.; HERDE, A. DE. The most efficient position of shading devices in a double-skin facade. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 3, p. 364–373, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806002106>>. Acesso em: 7/8/2015.

GUARDIAN. Glossário, 2012. Disponível em: <<http://www.sa.pt.sunguardglass.com/SpecificationsResources/TechnicalLibrary/GlossaryTerms/>>. .

INMETRO. Portaria nº50 Anexo Geral V - Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. , 2013.

JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. DIVA 2 . 0: INTEGRATING DAYLIGHT AND THERMAL SIMULATIONS USING RHINOCEROS 3D , DAYSIM AND ENERGYPLUS. Proceedings of Building Simulation.

**Anais...** . p.2202–2209, 2011.

JELLE, B. P. Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings - Measurement and calculation. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 116, n. 7465, p. 291–323, 2013. Elsevier.

KIM, G.; LIM, H. S.; LIM, T. S.; SCHAEFER, L.; KIM, J. T. Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 46, p. 105–111, 2012.

KIM, J. T.; TODOROVIC, M. S. Tuning control of buildings glazing's transmittance dependence on the solar radiation wavelength to optimize daylighting and building's energy efficiency. **Energy and Buildings**, 2013. Elsevier B.V.

KOTA, S.; HABERL, J. S. Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and Their Use in Energy Performance Simulations. **Proceedings of the Ninth International Conference for Enhanced Building Operations**, p. 9, 2009.

LABEEE. Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>. .

LABEEE. Simulação Termo-energética de Edificações. , 2014. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/simulacao-termo-energetica-de-edificacoes>>. .

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2014.

LBL. Software WINDOW. , 2013. U.S Department of Energy Office. Disponível em: <<http://www.lbl.gov/>>. .

LECHNER, N. Iluminación Natural. **Tectónica n°26**, p. 4–24, abr. 2008. Madrid.

LEE, E. S.; DIBARTOLOMEO, D. L.; SELKOWITZ, S. E. Daylighting control performance of a thin-film ceramic electrochromic window: Field study results. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 1, p. 30–44, 2006.

LEE, J. W.; JUNG, H. J.; PARK, J. Y.; LEE, J. B.; YOON, Y. Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. **Renewable Energy**, v. 50, p. 522–531, 2013.

LI, D. H. W. A review of daylight illuminance determinations and energy implications. **Applied Energy**, v. 87, n. 7, p. 2109–2118, 2010. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910000681>>. .

MANZAN, M. Genetic optimization of external fixed shading devices. **Energy and Buildings**, v. 72, p. 431–440, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814000309>>. Acesso em: 15/2/2016.

MARDALJEVIC, J. Daylight Simulation. **Daylight Simulation**, p. 341–390, 1998.

MARDALJEVIC, J. Rethinking Daylighting and Compliance. **Journal of Sustainable Design and Applied Research**, v. 1, n. 3, p. 9, 2013.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<<https://ben.epe.gov.br/>>>. Acesso em: 10/2/2015.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 905–913, 2006.

OLGYAY, V. **Design With Climate**. Princeton. EUA: Princeton University Press, 1963.

PALMER, C. M.; GENTRY, T. A Better Distinction for Standard Specifications of Low-E Coatings for Diverse Climate Conditions. **Plea**, , n. November, 2012.

PALMERO-MARRERO, A. I.; OLIVEIRA, A. C. Effect of louver shading devices on building energy requirements. **Applied Energy**, v. 87, n. 6, p. 2040–2049, 2010.

PEREIRA, F. O. R. **Luminous and thermal performance of windows shading and sunlighting reflecting devices**, 1992. University of Sheffield.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART, R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, 1990.

RADIANCE. Radiance Manual. , , n. 1, 1995. Disponível em: <<http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/manpages.pdf>>. .

RAMOS, G.; GHISI, E. Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus programme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010.

REINHART, C. F.; ANDERSEN, M. Development and validation of a Radiance model for a translucent panel. , v. 38, n. 7, p. 890–904, 2006.

REINHART, C. F.; MORRISON, M. The Lightswitch Wizard – reliable daylight simulations for initial design investigation THE LIGHTSWITCH

WIZARD – RELIABLE DAYLIGHT SIMULATIONS FOR INITIAL DESIGN INVESTIGATION The Lighting Group - Institute for Research in Construction National Research C. , p. 1093–1100, 2003.

REINHART, C. F.; WALKENHORST, O. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 7, p. 683–697, 2001.

ROCHA, A. P. DE A. **Caracterização do zoneamento da iluminação natural e sua influência no controle da iluminação artificial**, 2012. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.

ROCHE, L. Summertime performance of an automated lighting and blinds control system. **Lighting Research and Technology**, v. 34, n. 1, p. 11–27, 2002.

SANTANA, M. V. Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis–SC. **Universidade Federal de Santa Catarina**, p. 181, 2006.

SANTOS, J. P. DOS; RORIZ, M. Influência do ângulo de incidência nos ganhos de calor solar através de materiais transparentes. **Ambiente Construído**, v. 12, p. 149–161, 2012.

SARGENT, J. A.; NIEMASZ, J.; REINHART, C. F. SHADERADE: Combining rhinoceros and energyplus for the design of static exterior shading devices. **Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association**, p. 310–317, 2011. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84870213007&partnerID=tZOtx3y1>>. .

SORGATO, M. J.; MARINOSKI, D. L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Avaliação de desempenho térmico pela Norma NBR 15575 em consulta pública em 2012. , n. 48, p. 1–2, 2012.

TREGENZA, P. R.; WATERS, I. M. M. Daylight coefficients. **Lighting Research and Technology**, v. 15, n. 2, p. 65–71, 1983. Disponível em: <<http://lrt.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/096032718301500201>\n<http://lrt.sagepub.com/cgi/content/abstract/15/2/65>>. .

TSANGRASSOULIS, A.; BOURDAKIS, V.; GEROS, V.; SANTAMOURIS, M. A genetic algorithm solution to the design of slat-type shading system. **Renewable Energy**, v. 31, n. 14, p. 2321–2328, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148105003332>>. .

TZEMPELIKOS, A.; SHEN, H. Comparative control strategies for roller shades with respect to daylighting and energy performance. **Building and Environment**, v. 67, n. 0, p. 179–192, 2013.

WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**, 2007.

WILLIAMS, A.; PE, B. A.; GARBESI, K.; PE, E. P.; FIES, F. R. Lighting Controls in Commercial Buildings. **LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America**, v. 8, n. 3, p. 161–180, 2012.

WINKELMANN, F. C.; LOKMANHEKIM, M. Sun-control options in a high-rise office building. **Energy and Buildings**, v. 8, n. 1, p. 1–13, 1985.

WONG; ISTIADJI, A. D. Effect of external shading devices on daylighting

penetration in residential buildings. **Lighting Research and Technology**, v. 36, n. 4, p. 317–333, 2004.

YIN, R.; XU, P.; SHEN, P. Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai. **Energy and Buildings**, v. 45, n. 0, p. 132–140, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811005251>>. .



Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Santa Catarina, como requisito para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Florianópolis, 2016