UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

KAMILA MENDONÇA DE LIMA

**Avaliação de sistemas de janela para suporte a decisões de
projeto quanto à iluminação e uso de energia**

São Carlos-SP
2016

KAMILA MENDONÇA DE LIMA

Avaliação de sistemas de janela para suporte a decisões de projeto quanto à iluminação e uso de energia

Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em ciências.

Área de concentração: Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientadora: Profa. Dra. Rosana Maria Caram

Versão corrigida

São Carlos-SP
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

L732a Lima, Kamila Mendonça de
Avaliação de sistemas de janela para suporte a
decisões de projeto quanto à iluminação e uso de
energia / Kamila Mendonça de Lima; orientadora Rosana
Maria Caram. São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo,
2016.

1. Brises. 2. Simulação computacional. 3. Controles
dinâmicos. 4. Iluminação natural. 5. Ganhos solares. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Arquiteto e Urbanista **Kamila Mendonça de Lima**

Título da dissertação: **"Avaliação de sistemas de janela para suporte a decisões de projeto quanto à iluminação e uso de energia"**

Data da defesa: **16/02/2016**

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. Rosana Maria Caram (Orientador)
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo/USP)

Aprovada

Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo/USP)

APROVADA

Prof. Dr. Victor Figueiredo Roriz
(Faculdade Dom Pedro II)

APROVADA

Profa. Dra. Helenice Maria Sacht
(Universidade Federal da Integração Latino-Americana)

APROVADA

Prof. Dr. Fernando Antonio de Melo Sá Cavalcanti
(Universidade Federal de Alagoas)

APROVADA

Coordenadora e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Profa. Dra. Cibele Saliba Rizek.**

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pelas conquistas e desafios de cada dia desses quase quatro anos.

À **FAPESP**, pela concessão da bolsa de doutorado que permitiu este projeto de pesquisa ser concretizado.

À professora **Rosana Caram**, pelo acompanhamento e confiança na pesquisa.

A **Wellison**, pelo companheirismo ao longo de todo o doutorado, pelo “tutorial” de MATLAB que facilitou o tratamento dos dados e, sobretudo, pela paciência nos momentos de desafio encontrados.

A meus **pais e irmãos**, pelo suporte de sempre e compreensão das ausências decorrentes do doutorado.

Aos colegas do **grupo de pesquisa Arqtema**, pela convivência que tanto abrandou o andamento diário do trabalho e por compartilhar as dúvidas e soluções das mesmas, especialmente quanto aos programas de simulação computacional.

Aos professores **Karin Chvatal** e **Victor Roriz**, membros da banca da qualificação, pelas valiosas contribuições à continuidade da pesquisa.

A **Isabela**, pelo apoio imensurável e indispensável na fase final do doutorado.

A **Rosilene** e **Luciana**, pela prestatividade e apoio com os procedimentos administrativos que necessitaram ser realizados à distância.

Aos professores **Juliana Batista** e **Leonardo Bittencourt**, e demais membros dos grupos PET, GECA e GRILU, da Universidade Federal de Alagoas, pela base de pesquisa fornecida na graduação e mestrado, a qual foi fundamental para o direcionamento temático e ferramental desta pesquisa.

RESUMO

LIMA, K. M. **Avaliação de sistemas de janela para suporte a decisões de projeto quanto à iluminação e uso de energia**. 2016. 186p. Tese (Doutorado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Projetar sistemas de janela considerando a adequação climática envolve lidar com os efeitos do meio externo, que são dinâmicos, e com estratégias que podem ser conflitantes, tais como o controle do ganho de calor solar e aproveitamento da iluminação natural, ambos elementos provenientes da radiação do Sol. Parte-se do princípio de que isso é feito considerando o impacto de diferentes variáveis de projeto em diferentes indicadores de desempenho simultaneamente, para suporte a decisão. O estudo do efeito dessas variáveis de projeto da janela quando combinadas ainda não é consolidado, especialmente no caso de localidades de baixa latitude. O objetivo geral desta pesquisa de doutorado é avaliar sistemas de janela estáticos e dinâmicos para suporte a decisões de projeto arquitetônico, quanto a diferentes critérios de desempenho relacionados à iluminação natural e uso de energia, de forma integrada. São estudados sistemas de janela compostos por uma abertura envidraçada e proteções solares de aletas horizontais externas, fixas e móveis. O recorte engloba edificações com uso de escritório no contexto do clima quente e úmido da cidade de Maceió-AL. Para isso, simulações computacionais integradas utilizando os softwares Daysim e EnergyPlus foram realizadas, considerando o acionamento das lâmpadas apenas quando a luz natural não fosse suficiente para atender ao uso do ambiente. As variáveis de projeto analisadas foram: percentual de área de abertura, tipo de vidro, ângulo de sombreamento, quantidade de aletas, tipo de acionamento do sistema de proteção solar e orientação da abertura. As soluções arquitetônicas resultantes das combinações de todas as variáveis entre si foram avaliadas com relação à disponibilidade e distribuição da luz natural e demanda de energia elétrica para condicionamento do ar e iluminação artificial no ambiente interno, e classificadas segundo dois indicadores principais. Foram identificadas as variáveis de projeto dentre as analisadas com maior potencial de impacto no desempenho obtido em diferentes situações. Os resultados mostraram que é possível uma alternativa se encontrar em uma faixa de 10% melhores cenários nos dois indicadores ao mesmo tempo. Observou-se ainda que, apesar de a demanda de energia para condicionamento do ar ser frequentemente maior do que a demanda para iluminação, o desempenho da abertura quanto à iluminação pode ter um peso decisivo na escolha de projeto, pois este indicador de desempenho é mais sensível às variáveis da janela estudadas do que o primeiro. Por fim, observou-se que os protetores solares dinâmicos não são garantia de melhoria de desempenho em relação a sistemas estáticos.

Palavras-Chave: Brises. Simulação computacional. Controles dinâmicos. Iluminação natural. Ganhos solares.

ABSTRACT

LIMA, K. M. **Window systems evaluation for design decision support on daylight and energy use**. 2016. 186p. Tese (Doutorado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Designing window systems in a climate responsive way involves dealing with the effects of the external environment, which are dynamic, and strategies that may conflict, such as daylight and control of solar heat gains, both elements related to the sun. This research assumes that this is done considering the impact of different design variables in different performance indicators simultaneously, for decision support. The study of the effect of window design variables when combined is not yet consolidated, especially in case of low latitude locations. The general objective of this doctoral research is to evaluate static and dynamic window systems to support architectural design decisions regarding different performance criteria related to daylight and energy use, in an integrated manner. The studied window system consists of a glazed opening and external horizontal slat-type shading devices, fixed and mobile, in offices in the hot and humid climate of the city of Maceió-AL. For this, computer integrated simulations using Daysim and EnergyPlus software were carried out, considering the activation of the lighting system only when daylight is not sufficient to meet the usage requirements. The design variables analyzed were window-to-wall ratio, glazing type, cut-off angle, number of slats, type of shading control and orientation. Architectural solutions resulting from combinations of all variables were evaluated regarding the availability and distribution of daylight and electricity demand for air conditioning and artificial lighting in the indoor environment. The solutions were then rated and ranked according to two main indicators. The design variables among the analyzed with potential of high impact in the obtained performance in different situations were identified. The results showed that it is possible an alternative be in a range of 10% best scenarios in the two criteria at the same time. It was also observed that, although the energy demand for conditioning air often be greater than the lighting energy demand, the performance of the window on daylight can have a decisive weight on the design choice, because this performance indicator is more sensitive to the window variables than the first. Finally, it was observed that the dynamic shading systems are not performance-enhancing guarantee compared to static systems.

Keywords: Shading devices. Computer simulation. Dynamic control. Daylighting. Solar gains.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a25	Abertura com percentual de área de fachada igual a 25%
a50	Abertura com percentual de área de fachada igual a 50%
a75	Abertura com percentual de área de fachada igual a 75%
A₅₀₀₋₂₀₀₀	Percentual de pontos no plano de trabalho onde o somatório de horas ocupadas com iluminância entre 500 e 2000lx é maior que 50% do total de horas anuais ocupadas
E_{cl}	Somatório da demanda anual de energia elétrica para lâmpadas e condicionamento do ar
Ho-In	<i>Brise</i> dinâmico com controle das aletas - acionado o tempo todo; aletas inclinam 45° quando radiação solar acima de 50W/m ² atinge o plano de trabalho
Off-Ho	<i>Brise</i> dinâmico com controle liga-desliga - acionado apenas se radiação acima de 50W/m ² atinge o plano de trabalho
PAF	Percentual de abertura da região envidraçada em relação à fachada
q1	quantidade de aletas do <i>brise</i> igual a 5
q2	Quantidade de aletas do <i>brise</i> igual a 10
q3	Quantidade de aletas do <i>brise</i> igual a 20
s30	Ângulo de sombreamento igual a 30°, em relação ao plano horizontal
s60	Ângulo de sombreamento igual a 60°, em relação ao plano horizontal
s90	Ângulo de sombreamento igual a 90°, em relação ao plano horizontal
UDI₅₀₀₋₂₀₀₀	Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (Média de 30 pontos)
v1	Vidro do tipo refletivo na cor prata, com transmissão luminosa igual a 14%
v2	Vidro do tipo comum na cor cinza, com transmissão luminosa igual a 51%
v3	Vidro do tipo comum incolor, com transmissão luminosa igual a 86%

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Exemplo de janela comum no mercado	23
Figura 1-2 – Elementos vazados constituindo a janela.....	24
Figura 1-3 – Detalhe de uma fachada cortina	25
Figura 1-4 – Modelo de fachada dupla ventilada, com indicação de seus componentes	25
Figura 1-5 – Composição de envidraçamento e uma segunda “pele” com mecanismos móveis (1-5a e 1-5b)	26
Figura 1-6 - SEBRAE - Brasília, Brasil - Grupo SP e Luciano Margotto.....	26
Figura 1-7 - <i>Moravian Library</i> , em Brno, República Tcheca.	27
Figura 1-8 - <i>Kiefer Technic Showroom</i> – Áustria - <i>Giselbrecht + Partner</i>	27
Figura 1-9 – Fachada com placas prismáticas no interior do vidro e controle ambiental	27
Figura 1-10 – Critérios de qualidade ambiental e eficiência energética no setor de edificações Fonte: Adaptado de Kolokotsa <i>et al.</i> (2009, p.126).....	28
Figura 1-11 - Processo para projeto e seleção de janelas	35
Figura 1-12 – Fachada com dispositivos móveis, na configuração de inverno e de verão	39
Figura 1-13 – Diagrama de interação entre os comportamentos térmico e luminoso	42
Figura 2-1 – Etapas da simulação computacional	50
Figura 2-2 – Etapas da simulação computacional na prática projetual.....	50
Figura 2-3 – Diagrama dos passos típicos para análise de sensibilidade na simulação de edificações	56
Figura 2-4 – Principais aspectos a serem considerados num procedimento decisório sistematizado.....	60
Figura 2-5 – Exemplo de quadro de opções de envoltória ótimas	62
Figura 2-6 – Exemplo de gráfico de radar utilizado para suporte a decisão	63
Figura 3-1 - Localização de Maceió-AL.....	67
Figura 3-2 - Carta solar e dados em função da temperatura neutra (T_n)	69
Figura 3-3 – Edifício Lobão Barreto	70
Figura 3-4 - Edifício Walmap	70
Figura 3-5 – Edifício <i>Work Center</i>	70
Figura 3-6 – Edifício <i>Breda Center</i>	70
Figura 3-7 – Edifício <i>Avenue Center</i>	70
Figura 3-8 – Edifício <i>Norcon Empresarial</i>	70
Figura 3-9 – <i>The Square Park Office</i>	71
Figura 3-10 – Corporativo <i>Terra Brasilis</i>	71
Figura 3-11 - Corte esquemático de ambiente com tipologia de abertura estudada	74
Figura 3-12 – Esquema do modelo de ambiente simulado, que não possui configuração fixa de janela.....	74
Figura 3-13 – Esquema dos procedimentos metodológicos.....	75
Figura 3-14 – Percentuais de abertura na fachada (PAF) analisados	78
Figura 3-15 - Máscaras de sombra dos <i>brises</i> estáticos estudados.....	79

Figura 3-16 – Máscaras de sombra dos <i>brises</i> dinâmicos estudados	80
Figura 3-17 – Secções esquemáticas dos tipos de acionamento	81
Figura 3-18 – Esquema simplificado de entrada e saída de dados no <i>EnergyPlus</i>	92
Figura 3-19 – Tela de visualização de todos as classes com objetos ativos em um arquivo IDF utilizado	96
Figura 3-20 – Relação entre os indicadores e o desempenho avaliado	100
Figura 4-1 - Ocorrência de diferentes faixas de iluminâncias no plano de trabalho (média de 30 pontos)	104
Figura 4-2 – UDI ₅₀₀₋₂₀₀₀ no plano de trabalho, com a janela orientada a Norte (média de 30 pontos)	106
Figura 4-3 - UDI ₅₀₀₋₂₀₀₀ com a janela orientada a Oeste (média de 30 pontos)	109
Figura 4-4 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Norte – v1	112
Figura 4-5 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Norte – v2	114
Figura 4-6 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Norte – v3	115
Figura 4-7 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Oeste – v1	117
Figura 4-8 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Oeste – v2	118
Figura 4-9 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Oeste – v3	119
Figura 5-1 – Demanda de energia elétrica para iluminação e condicionamento do ar com a janela a Norte	139
Figura 5-2 - Demanda de energia elétrica para iluminação e condicionamento do ar com a janela a Oeste	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Características óticas para ângulo de incidência normal (0°). Fonte: Caram (2002, p. 130-135)	81
Tabela 3-2 - Matriz dos cenários estudados, com a respectiva nomenclatura utilizada.	82
Tabela 3-3 - Cenários estáticos.....	83
Tabela 3-4 - Cenários dinâmicos – situação com <i>brise</i> inclinado	84
Tabela 3-5 - Texto dos arquivos dos pontos/sensores.....	90
Tabela 3-6 - Propriedades térmicas dos materiais inseridos como dados de entrada da simulação no <i>EnergyPlus</i>	93
Tabela 3-7 - Dados inseridos na classe <i>WindowProperty:ShadingControl</i> do <i>IDFEditor</i> , para três condições de acionamento do <i>brise</i>	94
Tabela 3-8 - Memória de cálculo dos intervalos de classificação	100
Tabela 4-1 - Ocorrência de UDI ₅₀₀₋₂₀₀₀ em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s30 – v1	121
Tabela 4-2 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s30 – v2	122
Tabela 4-3 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s30 – v3	123
Tabela 4-4 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s60 – v1	124
Tabela 4-5 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s60 – v2	125
Tabela 4-6 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s60 – v3	126
Tabela 4-7 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s30 – v1.....	127
Tabela 4-8 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s30 – v2.....	128
Tabela 4-9 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s30 – v3.....	129
Tabela 4-10 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s60 – v1.....	130
Tabela 4-11 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s60 – v2.....	131
Tabela 4-12 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s60 – v3.....	132
Tabela 5-1 - Incremento percentual da demanda de energia em relação ao caso sem <i>brise</i> - Norte	145
Tabela 5-2 - Incremento percentual da demanda de energia em relação ao caso sem <i>brise</i> - Oeste.....	145

Tabela 5-3 - Incremento percentual da demanda de energia em relação ao caso com <i>brise</i> fixo – Norte.....	146
Tabela 5-4 - Incremento percentual da demanda de energia em relação ao caso com <i>brise</i> fixo – Oeste	146
Tabela 6-1 – Resultados de todos os cenários para os indicadores finais de desempenho	150
Tabela 6-2 – Legenda dos intervalos de classificação pela Regra 1.....	152
Tabela 6-3 - Classificação dos cenários por faixas, considerando os dois critérios separadamente	153
Tabela 6-4 - Classificação dos cenários por faixas, considerando os dois critérios ao mesmo tempo	156
Tabela 6-5 - Cenários na faixa alvo comum às duas orientações – Regra 2 – Indicadores separados.....	162

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1 – Dados de temperatura do ar, temperatura neutra e umidade relativa do ar de Maceió-AL.....	67
Gráfico 3-2 – Dados de intensidade de radiação solar em Maceió-AL	68
Gráfico 5-1 - Demanda de energia elétrica por uso final – Cenários estáticos - Norte...	135
Gráfico 5-2 - Demanda de energia elétrica por uso final – Cenários estáticos - Oeste ..	136
Gráfico 5-3 - Demanda de energia elétrica por uso final – Cenários dinâmicos <i>Off-Ho</i> – Norte e Oeste	137
Gráfico 5-4 - Demanda de energia elétrica por uso final – Cenários dinâmicos <i>Ho-In</i> – Norte e Oeste	138
Gráfico 5-5 – Redução da demanda de energia em relação ao cenário com pior desempenho - Norte.....	144
Gráfico 5-6 – Redução da demanda de energia em relação ao cenário com pior desempenho - Oeste	144
Gráfico 6-1 – Razão entre o resultado de cada cenário e o resultado do melhor cenário para as diferentes orientações e indicadores de desempenho analisados – Regra 2...	160

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-1 – Classificação das faixas de iluminância	30
Quadro 1-2 – Equações para cálculo da temperatura neutra.....	33
Quadro 1-3 - Indicadores usuais de desempenho térmico, luminoso e energético (destaque na cor cinza para os que foram explorados nesta pesquisa)	34
Quadro 2-1 - Dados de entrada de uma simulação de iluminação natural.....	51
Quadro 2-2 – Amostra das localidades estudadas na bibliografia consultada	52
Quadro 2-3 – Ferramentas computacionais citadas na bibliografia consultada	53
Quadro 2-4 - Métodos de análise de sensibilidade. Fonte: Adaptado de Tian (2013, p.412)	58
Quadro 3-1 - Características construtivas dos edifícios de escritório de Maceió-AL.	69
Quadro 3-2 – Variáveis indicadores utilizados nas simulações-teste.....	75
Quadro 3-3 - Arquivos de entrada e saída no <i>Daysim</i>	88
Quadro 3-4 – Texto de um arquivo de materiais (cenário Av1a25s30)	89
Quadro 3-5 – Resumo das configurações fixas dos modelos no <i>Daysim</i>	91
Quadro 3-6 – Principais configurações fixas dos modelos no <i>EnergyPlus</i>	93
Quadro 3-7 – Resumo esquemático dos procedimentos metodológicos.....	101

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	19
Objetivos	21
Estrutura da tese	21
1. SISTEMAS DE JANELA E O DESEMPENHO DE AMBIENTES INTERNOS	22
1.1 Tecnologias de sistemas de janela	23
1.2 Avaliação do desempenho de sistemas de janela	28
1.2.1 Critérios de avaliação.....	28
1.2.2 Variáveis e parâmetros de análise do sistema de janela	34
1.2.3 Parâmetros indiretamente relacionados à janela	44
2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO E O PROJETO DE JANELAS	46
2.1 Simulação computacional de desempenho para projeto de edificações	47
2.1.1 Procedimentos para simulação.....	49
2.1.2 Programas de simulação computacional	52
2.2 Análises de sensibilidade	55
2.3 Procedimentos de suporte à decisão	60
3. MATERIAL E MÉTODOS	64
3.1 Sobre o recorte: escritórios e clima quente e úmido.....	65
3.1.1 Sistemas de janela e o uso da edificação - escritórios	65
3.1.2 Sistemas de janela e o contexto climático - quente e úmido	66
3.1.3 Sistemas de janela em escritórios em Maceió-AL	66
3.2 Objeto.....	73
3.3 Abordagem e procedimentos	74
3.4 Estudos preliminares	75
3.5 Cenários analisados.....	77
3.6 Simulações	84
3.6.1 Características das ferramentas computacionais utilizadas.....	85
3.6.2 Configurações do modelo no Daysim	87
3.6.3 Configurações do modelo no EnergyPlus	91
3.6.4 Rotinas da simulação integrada	96

3.7. Forma de tratamento e análise dos dados.....	97
3.7.1 Ordenação e classificação das alternativas projetuais	99
3.9 Síntese.....	101
4. RESULTADOS – ILUMINAÇÃO NATURAL.....	102
4.1 Ocorrência de iluminâncias por faixa	103
4.2 UDI ₅₀₀₋₂₀₀₀ : Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx.....	105
4.3 Distribuição da UDI ₅₀₀₋₂₀₀₀ no plano de trabalho.....	111
4.3.1 Cenários estáticos	111
4.3.2 Cenários dinâmicos	120
5. RESULTADOS – USO DE ENERGIA	134
5.1 Demanda de energia por uso final	135
5.2 Impacto das variáveis do sistema de janela na demanda de energia	138
5.3 Potencial de redução da demanda de energia	143
6. RESULTADOS – CLASSIFICAÇÃO E ORDENAÇÃO	148
6.1 Regra 1 – Classificação e ordenação por faixas	151
6.1.1 Classificação para os indicadores separadamente	152
6.1.2 Classificação única considerando a operação dos dois indicadores	155
6.2 Regra 2 – Classificação e enquadramento em uma faixa-alvo	159
6.3 Considerações finais com base nas duas regras de classificação	162
CONCLUSÃO	164
Limitações.....	166
Recomendações e sugestões de trabalhos futuros	167
REFERÊNCIAS	168
APÊNDICES.....	179
ANEXOS	183

INTRODUÇÃO

Adaptar a edificação ao seu contexto climático por meio de estratégias passivas de projeto é uma ação que caracteriza o projeto arquitetônico bioclimático (MACIEL, 2006; OLGYAY, 1963). Essa ação possibilita a promoção de conforto aos usuários e o consumo energético eficiente (SANTAMOURIS; ASIMAKOPOULOS, 2006; GIVONI, 1994).

Dentre as diversas formas de se promover a referida adequação, as janelas são elementos que permitem a interação direta de um ambiente interno com os diferentes elementos físicos e ambientais do exterior (luz, calor, som etc.). Tais condições externas variam ao longo do dia, do ano e em função da localidade considerada, influenciando o ambiente interno. Dessa forma, as características das aberturas podem ser pensadas em função do desempenho desejado no ambiente interno.

Ao projetar sistemas de janela considerando a adequação climática, o projetista lida com os efeitos do meio externo, que são dinâmicos, e metas que podem ser conflitantes, tais como o controle do ganho de calor solar e o aproveitamento da iluminação natural, ambos elementos provenientes da radiação do sol. Outro exemplo seria o conflito entre ventilação natural e os ruídos que ela permite que cheguem ao ambiente.

O conhecimento do comportamento detalhado das janelas considerando diferentes situações e soluções auxilia uma escolha de projeto consciente, na medida em que fornece dados sobre o desempenho que poderá ser obtido por cada solução ao longo da vida útil da edificação.

Estudos recentes do impacto das variáveis de projeto na iluminação natural e cargas térmicas de aquecimento e resfriamento, dentre eles os dos autores Shen e Tzempelikos (2013) e Yildiz e Arsan (2011), demonstraram o impacto majoritário da janela em relação às demais características da edificação analisada.

Em regiões de clima quente este impacto é ainda mais evidente. Conforme destacado por Bittencourt (1993), nessas regiões, a principal demanda referente ao condicionamento passivo é por resfriamento, por meio de soluções que contemplem a necessidade simultânea de ventilação natural, sombreamento e filtro da iluminação natural. Esses aspectos estão diretamente relacionados ao projeto da janela.

Isso pode ser feito elencando as características da janela para avaliação quantitativa de desempenho (CARMODY *et al.*, 2004), desde a fase inicial de projeto (HENSEN,

LAMBERTS, 2011; STRUCK, 2012 e HYGH, 2012), processo que pode ser acompanhado da definição de indicadores para comparação e suporte a decisão (KOLOKOTSA *et al.*, 2009; ROULET *et al.*, 2002).

Nesse processo, é necessário considerar os seguintes aspectos fundamentais, com base no contexto atual de disponibilidade de informações e ferramentas de avaliação:

- Estudo e utilização de mecanismos adaptáveis às condições climáticas diárias e horárias, os sistemas dinâmicos, tais como os elementos de controle associados aos sistemas de proteção solar (PEREIRA, 1992; NIELSEN, SVENDSEN, JENSEN, 2011);
- Diferentes critérios de desempenho (OCHOA *et al.*, 2012; FONTENELLE; BASTOS, 2014);
- Integração de estratégias naturais e artificiais de condicionamento, para redução do consumo de energia de lâmpadas e condicionadores de ar, por meio de ventilação híbrida (RUPP; GHISI, 2013; BRUGNERA, 2014) e/ou sistemas de controle da iluminação que considerem a disponibilidade de luz natural (DIDONÉ; PEREIRA, 2010).

No contexto apresentado, as características da janela podem ser tratadas como variáveis de projeto, que caracterizam alternativas de soluções projetuais. A literatura fornece análises que podem auxiliar o processo decisório, concentrando-se principalmente na proporção de área de janela, propriedades do envidraçamento e propriedades do sistema de proteção/controlar solar. Tais características são frequentemente tratadas de forma isolada das demais, seja pelo interesse específico ou pelas limitações envolvidas.

Contudo, nas etapas iniciais do projeto arquitetônico, podem ser realizadas escolhas de combinações, ao invés da escolha de características isoladas. Diminuir o tamanho da janela e usar um vidro claro com um *brise* mediano, usar uma abertura maior com um vidro de baixa transmissão sem *brise* ou usar uma abertura grande com vidro mediano e um *brise* que sombreie por mais tempo são exemplos de diferentes opções que podem ser levantadas para uma solução de controle do ganho de calor solar com a maior quantidade de iluminação natural possível.

O estudo do efeito dessas variáveis de projeto da janela quando combinadas ainda não é consolidado, especialmente no caso de localidades de baixa latitude. Nessas localidades, o controle das propriedades da janela tem grande potencial de impacto no balanço dos ganhos térmicos e luminosos, dada a grande incidência de radiação solar. Esse procedimento permite

maior aproximação da realidade, onde há combinações de características diferentes e critérios diferentes, e é compatível com as informações e ferramentas disponíveis.

O presente trabalho atua nessa lacuna, tendo como principal aspecto inédito a abordagem de sistemas de janela com dispositivos dinâmicos no contexto do clima quente e úmido brasileiro.

Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa de doutorado é avaliar, de forma integrada, sistemas de janela estáticos e dinâmicos, para suporte a decisões de projeto arquitetônico quanto a diferentes critérios de desempenho, relacionados à iluminação natural e uso de energia.

São objetivos específicos da mesma:

- Definir critérios e variáveis de projeto do sistema de janela em ambientes de escritórios no contexto do clima quente e úmido;
- Quantificar o desempenho de sistemas de janela estáticos e dinâmicos quanto a diferentes indicadores de desempenho, referentes à iluminação natural e uso de energia no ambiente interno;
- Classificar e ordenar alternativas de soluções projetuais de sistemas de janela estáticos e dinâmicos quanto aos critérios analisados.

São estudados sistemas de janela compostos por uma abertura envidraçada e proteções solares de aletas horizontais externas, fixas e móveis, em edificações com uso de escritório no contexto do clima quente e úmido da cidade de Maceió-AL, com base em avaliação quantitativa comparativa, utilizando simulação computacional.

Estrutura da tese

A tese está organizada em capítulos. No capítulo 1, é apresentado o referencial teórico sobre o tema dos sistemas de janela e sua relação com o desempenho do ambiente interno. No capítulo 2, são tratados os procedimentos disponíveis na literatura para avaliação de desempenho por meio de simulação computacional. O capítulo 3 trata dos recortes, procedimentos, ferramentas computacionais, tratamento de dados e etapas do trabalho. Os resultados obtidos na pesquisa estão apresentados nos capítulos 4, 5 e 6. Os dois primeiros se referem à avaliação dos dados obtidos dos sistemas de janela com relação à iluminação natural e ao uso de energia para condicionamento do ambiente. O capítulo 6 trata da classificação e ordenação das soluções projetuais, apresentando possibilidades de sistematização dos dados para auxílio direto a decisões de projeto.

1. SISTEMAS DE JANELA E O DESEMPENHO DE AMBIENTES INTERNOS

Um sistema de janela consiste na forma através da qual uma edificação se relaciona diretamente com o meio externo, podendo ser de diferentes tipos.

1.1 Tecnologias de sistemas de janela

A depender do contexto e da ênfase dada, as aberturas da edificação são entendidas como fachada transparente, sistema de fenestração, ou, simplesmente, janela. Segundo JORGE (1995, p.21), “*janela* deriva do latim vulgar *januella*, diminutivo de *jannua* (ou *ianua*) que designava a porta, passagem, entrada, acesso”. No estudo do desempenho de edifícios, diante das diversas possibilidades tecnológicas atuais, a noção de sistema¹ parece apropriada para complementar a designação desse elemento que cumpre diversas funções.

Dessa forma, o termo sistema de janela (ou sistema de abertura) será usado neste trabalho para se referir aos diferentes arranjos da composição de abertura, vidro e elementos de controle localizados na envoltória de edificações. Para auxiliar a conceituação desse objeto, a seguir são brevemente destacados os principais tipos desses sistemas.

Janelas unitárias e/ou esquadrias industrializadas

São as janelas mais comuns, desde um vazio lateral da edificação aos sistemas industrializados compostos por uma esquadria (geralmente de metal, madeira ou materiais poliméricos) e uma ou mais camadas de vidro (Figura 1-1).

Figura 1-1 – Exemplo de janela comum no mercado
Fonte: Atenua Som, 2013

¹ No seguinte sentido, destacado do Dicionário Aurélio Online: “Combinação de partes que, coordenadas, concorrem para certo fim”.

Figura 1-2 – Elementos vazados constituindo a janela

Fonte: Gonzalo e Habermann, 2006, p.79

Podem conter também elementos vazados (tais como venezianas e telas), ou ainda ser completamente formada por estes (Figura 1-2). Diversos materiais transparentes à radiação solar são empregados nas aberturas, conforme destacado por Caram (2002), tais como vidros planos comuns, laminados, refletivos pirolíticos, refletivos metalizados à vácuo; além dos policarbonatos, acrílicos e películas de controle solar. Além disso, a cada dia surgem novas tecnologias de envidraçamento, tais como os abordados por Jelle *et al.* (2012).

Fachada Cortina ou Pele de Vidro

De acordo com a definição de Carmody *et al.* (2004), “uma fachada cortina é uma camada externa, sem função estrutural, que se destina a separar os ambientes interno e externo. Ao contrário de janelas manufaturadas ou claraboias, localizadas em uma abertura na parede ou teto, fachadas cortina podem compor toda a pele externa do edifício” (p.106, tradução nossa). A Figura 1-3 ilustra um exemplo desse tipo de fachada. Note-se que a estrutura que sustenta o vidro é totalmente interna.

Esse tipo de fachada caracteriza uma tipologia de edifícios comerciais internacionalmente difundida. Contudo, como sabido, pode apresentar sérias incompatibilidades do ponto de vista ambiental e energético em locais de clima quente (não favorece a ventilação natural, pode proporcionar efeito estufa no ambiente interno e não protege o interior dos efeitos da radiação solar excessiva).

Figura 1-3 – Detalhe de uma fachada cortina

Foto: Jean-François Neu. Fonte: Wikimedia Commons (2016)

Fachada Dupla

Como o nome sugere, as fachadas duplas apresentam basicamente dois panos de vidro com uma cavidade entre elas, na qual pode haver dispositivos de sombreamento (Figura 1-4). Essa cavidade reduz o impacto térmico do ambiente externo no ambiente interno. (ASCHEHOUG; PERINO, 2009; MARCONDES, 2007).

A aplicação dos sistemas de fachada dupla ventilada em edifícios no Brasil é tema de algumas pesquisas recentes. Barbosa *et al.* (2012) e Mazzarotto (2011) identificam o potencial de aplicação dos mesmos para melhoria do desempenho termoenergético de ambientes de escritório nas cidades de Viçosa-MG e Curitiba-PR, respectivamente.

Figura 1-4 – Modelo de fachada dupla ventilada, com indicação de seus componentes

Fonte: Adaptado de Mazzarotto, 2011, p.37

Nessas localidades e em localidades de clima mais quente, esse tipo de configuração não pode ser aplicado sem ressalvas, devido à possibilidade de sobreaquecimento da camada de ar entre as duas superfícies de vidro (ASCHEHOUG; PERINO, 2009; MARCONDES, 2007), tendo em vista que esta camada é um artifício que responde à necessidade de isolamento e amortecimento características de um clima frio. Apesar disso, a fachada dupla pode possuir vantagens sobre o sistema de fachada cortina para promover ventilação em ambientes de escritório em clima quente e úmido (WONG; PRASAD; BEHNIA, 2008).

Fachadas dinâmicas/integradas

A noção de fachadas dinâmicas se insere em um contexto de sistemas de abertura que podem ser considerados integrados e avançados. Segundo o texto compilado em 2009 pela Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency – IEA*), que apresenta resultados de estudos realizados por pesquisadores de 25 países, uma fachada avançada integrada (*Advanced Integrated Facade*) é a camada exterior de um edifício, que o protege das intempéries, contribuindo para o cumprimento dos requerimentos de aquecimento, resfriamento, ventilação e promover o conforto interior por meio de medidas de eficiência e economia de energia (ASCHEHOUG; PERINO, 2009, p. 24). As Figuras 1-5 a 1-9, a seguir, contêm exemplos desses sistemas.

(a)

Figura 1-5 – Composição de envidraçamento e uma segunda “pele” com mecanismos móveis (1-5a e 1-5b)
Fonte: Adaptado de Gonzalo e Habermann, 2006, p. 150 e 151.

(b)

Figura 1-6 - SEBRAE - Brasília, Brasil - Grupo SP e Luciano Margotto
Foto: Nelson Kon. Fonte: Rosso, 2011

Figura 1-7 - Moravian Library, em Brno, República Tcheca.

Fonte: Aschehoug e Perino, 2009, p.52

Figura 1-8 - Kiefer Technic Showroom – Áustria -
Giselbrecht + Partner

Fonte: Vinnitskaya, 2010

Figura 1-9 – Fachada com placas prismáticas
no interior do vidro e controle ambiental
automatizado

Fonte: Arcoweb, 2005

De acordo com o mesmo documento, as fachadas avançadas integradas apresentam características adaptativas que “respondem” às condições físicas/climáticas externas e aos requisitos ambientais internos, sendo o estágio atual do processo que se iniciou com princípios de arquitetura passiva e se encontra no estágio da inserção de dispositivos chamados inteligentes.

A ideia de se ter uma janela composta por elementos integrados entre si e com o funcionamento restante da edificação se mostra coerente e promissora. Explorar esse potencial em localidades de clima quente úmido é um dos objetivos deste trabalho, de forma que os sistemas de janela estudados são variações das tipologias de janela convencional, mas com princípios de concepção das fachadas dinâmicas. Tais princípios englobam os critérios de avaliação que serão discutidos a seguir.

1.2 Avaliação do desempenho de sistemas de janela

Os critérios de desempenho da abertura poderiam ser diversos (estéticos, de custo, estruturais etc.). Na pesquisa aqui desenvolvida, o aspecto de desempenho se refere especificamente ao ambiente com o qual a janela interage. Trata-se de questões relacionadas ao conforto ambiental do usuário e eficiência energética em ambientes internos não-residenciais, numa visão semelhante à abordada pelos autores Carmody *et al.* (2004):

Geralmente, um projeto de alto desempenho se destina a produzir edifícios que são energeticamente eficientes, saudáveis, econômicos em longo prazo, e que usem recursos sabiamente para minimizar o impacto ambiental. Um conceito importante para atingir esses objetivos é o projeto integrado, que considera todo o edifício e seus ocupantes como um sistema interativo. (p.8, tradução nossa)

Esse processo de projeto envolve a avaliação, desde as fases iniciais, dos sistemas que farão parte do edifício, considerando indicadores predominantemente quantitativos, tais como os abordados a seguir.

1.2.1 Critérios de avaliação

Quando se fala em alto desempenho (ou bom desempenho, desempenho ruim etc.), faz-se necessária a complementação com o critério determinado para se atribuir essa classificação. Os principais critérios relacionados à qualidade ambiental e eficiência energética em edificações são reunidos na Figura 1-10. São destacados em cor aqueles que são diretamente tratados nesta pesquisa.

Figura 1-10 – Critérios de qualidade ambiental e eficiência energética no setor de edificações

Fonte: Adaptado de Kolokotsa *et al.* (2009, p.126)

Neste tópico, são brevemente destacados requerimentos de iluminação natural, conforto térmico e demanda de energia elétrica para arrefecimento e iluminação artificial de ambientes internos.

Iluminação natural - disponibilidade e uniformidade

Os principais indicadores quantitativos de desempenho de ambientes em relação à iluminação natural são conforme segue. O conceito de *Fator de Luz do Dia*, que pode ser considerado o mais tradicional dentre eles, é a razão entre a quantidade de luz em um determinado ponto do ambiente interno e a quantidade de luz medida simultaneamente num plano horizontal do exterior, sob céu encoberto e uniforme. (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1966; MOORE, 1985; TREGENZA; LOE, 1998).

Trata-se de uma definição bastante conhecida e utilizada na área, para indicar a disponibilidade de luz no ambiente interno. É indiferente à orientação e à localidade. Não considera também requerimentos para diferentes tarefas visuais. Essas características o tornam de fácil uso, mas limitado para uma análise mais detalhada.

A *Autonomia de Luz Natural*, conforme discutido por Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006), é um indicador que consiste da definição de iluminâncias² mínimas a serem atingidas, para identificação dos períodos nos quais essa iluminância é alcançada ou superada sem necessitar da utilização de iluminação artificial. É uma medida dinâmica, ou seja, que considera as variações de condição de céu da localidade analisada, em função do tempo. No caso de escritórios, o valor indicado na NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013, p.19) varia entre 200 e 750lx, dependendo do uso específico, sendo 500lx para “escrever, teclar, ler, processar dados”. A autonomia de luz natural é dada em percentual, geralmente em relação às horas anuais ocupadas.

Já o conceito de *Iluminância Útil da Luz Natural*, concebido por Nabil e Mardaljevic (2006), também considera a análise de dados climáticos, mas se baseia na identificação de períodos nos quais intervalos de valores de iluminância (ao invés de níveis) são atingidos ou não. Com base em revisão de estudos e pesquisas de campo prévias, os autores partem da classificação de iluminâncias nas situações insuficiente, suficiente (podendo ou não haver complementação de iluminação artificial), desejável (ou, pelo menos, tolerável) e excessiva, conforme o Quadro 1-1.

² Grandeza fotométrica definida pela densidade de fluxo luminoso incidente numa superfície (razão entre fluxo luminoso e área). É expressa em lux. (TREGENZA; LOE, 1998; MOORE, 1985; HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1966)

Insuficiente	Iluminância útil		Excessiva
	Suficiente	Desejável	
< 100lx	Entre 100lx e 500lx	Entre 500lx e 2000lx	>2000lx

Quadro 1-1 – Classificação das faixas de iluminância

Fonte: Adaptado de Nabil e Mardaljevic (2006, p.907)

Os autores consideram, então, que iluminâncias entre 100 e 2000lx oferecem potencial para utilização pelos usuários, de forma que, numa avaliação que represente as variações de iluminância ao longo do tempo num plano de trabalho, os valores nessa faixa são considerados iluminância útil. Também é um indicador expresso em percentual, de forma que um total de iluminâncias úteis igual a 50%, por exemplo, indica que nesse percentual de horas anuais, a iluminância no ponto considerado está entre 100 e 2000lx.

Esses diferentes indicadores podem ser utilizados em conjunto, visto que fornecem diferentes naturezas de informação. Contudo, conforme destacado por Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006), ainda há uma necessidade de estudos para se indicar valores absolutos que sirvam de referência para informar se uma situação atende ou não atende a um determinado critério dinâmico de avaliação da luz natural.

Com relação à distribuição da luz, a NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) recomenda que a área da tarefa seja iluminada uniformemente. A norma define uniformidade como “razão entre o valor mínimo e o valor médio” e estabelece que “a uniformidade da iluminância na tarefa não pode ser menor que 0,7”; e que “a iluminância no entorno imediato não pode ser inferior a 0,5” (ABNT, 2013, p.6).

Os indicadores abordados até então referem-se às iluminâncias obtidas, aspecto destacado na pesquisa atual e que se refere ao critério de disponibilidade e distribuição de luz natural. Quanto aos critérios de conforto visual, que consideram as condições de recepção da luz pelo usuário, a literatura também apresenta diversos indicadores, tais como probabilidades de ofuscamento e razões entre luminâncias³ de diferentes porções do ambiente. Diferentes indicadores dessa natureza são descritos em revisão bibliográfica, no trabalho de Silva, Leal e Andersen (2012).

Buscando uma síntese desses diferentes aspectos relacionados ao desempenho da iluminação natural em ambientes, Reinhart e Wienold (2011) propõem um painel para visualização de indicadores de disponibilidade, conforto e de uso de energia, para compor a

³ Grandeza fotométrica que mede o brilho objetivo (razão entre intensidade luminosa e área; o brilho subjetivo envolveria a sensação do usuário); depende do fluxo luminoso na direção do observador e da área projetada ortogonalmente da superfície que emite ou reflete a luz. É expressa em cd/m². (TREGENZA; LOE, 1998; MOORE, 1985; HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1966).

análise de iluminação natural por meio de simulação computacional integrada à análise termoenergética. Os autores chamam atenção para o fato de o projetista poder definir as metas de desempenho na própria ferramenta de análise, para que a avaliação seja adequada às necessidades específicas de cada situação. O painel proposto inclui essa possibilidade e pode servir de inspiração para avaliações que considerem o estado-da-arte dos indicadores de desempenho de ambientes em que há aproveitamento da luz natural.

Conforto Térmico

O sistema de abertura possui um desempenho térmico determinado por suas características de especificação, tais como o ganho solar e a transmissão de calor. Tais características influenciam as condições térmicas no ambiente interno. A avaliação destas condições levando em consideração requerimentos dos usuários é feita por meio de indicadores de conforto térmico.

Quando se fala de conforto térmico, comumente se trata da condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico (ASHRAE, 2004). Os fatores objetivos que influenciam essa condição são a temperatura do ar e temperatura radiante, umidade, velocidade do ar, vestimenta e taxa metabólica (TREECK, 2011; ASHRAE, 2004; ISO, 2005). Apesar de envolver diversos fatores subjetivos, uma análise quantitativa é possível, e pode auxiliar o projeto das partes componentes da envoltória da edificação.

O conforto térmico está diretamente relacionado às estratégias passivas⁴ de condicionamento incorporadas à edificação, e pode ser buscado a partir do projeto de estratégias bioclimáticas⁵. Tais estratégias podem ser sintetizadas em diagramas, tais como a *carta bioclimática* (OLGYAY, 1963), a *carta psicrométrica* (GIVONI, 1976) e suas respectivas adaptações.

Esse conforto é tratado nas pesquisas por meio de duas abordagens principais: o modelo do balanço térmico e o modelo adaptativo. A abordagem do balanço térmico entende que a sensação térmica de uma pessoa está principalmente relacionada ao balanço térmico do seu corpo como um todo, que é influenciado pelos fatores anteriormente mencionados. Busca-se, então, neste modelo, a definição de uma temperatura ou condições “ideais” de

⁴ As estratégias passivas atuam de forma preventiva ao invés de corretiva; aproveitam as condições climáticas externas, demandando menor ou nenhuma participação de sistemas artificiais para oferecer condições de conforto. Essas estratégias são discutidas por Santamouris e Asimakopoulou (1996), Givoni (1994), Baker (1987) e por diversos autores desde então.

⁵ No sentido descrito por Maciel (2006): utilização de elementos e tecnologias que aproveitem/se adaptem ao clima, para controle dos processos de transferência de calor, contribuindo para conforto dos usuários e conservação de energia.

conforto. Esta abordagem está presente nas normas ISO 7730 (ISO, 2005) e ASHRAE *Standard 55* (ASHRAE, 2004), na forma do índice chamado de voto médio predito (do inglês *Predicted Mean Vote* – PMV) e do percentual de pessoas insatisfeitas (do inglês *Predicted Percentage Dissatisfied* – PPD), que têm como base os estudos em câmara climática com condições estáveis, de Fanger (1970). Ela possui, por sua própria natureza, limitações razoáveis, por tratar de condições fixas e típicas de localidades de clima frio.

O PMV prevê o valor médio dos votos de um grupo de pessoas numa escala de -3 (muito frio) a 3 (muito quente), sendo a condição neutra representada pelo zero desta escala. Já o PPD é um índice que estabelece a previsão do percentual de pessoas que estão sentindo desconforto por frio ou desconforto por calor. Pode ser apresentado em função do PMV.

A abordagem adaptativa do conforto térmico parte do princípio de que as pessoas tomam atitudes para se adaptar às condições térmicas, tais como ajustes da vestimenta e o controle das janelas, e se baseia em estudos de campo. Considera, assim, o contexto no qual os indivíduos se encontram (clima, natureza da edificação e variação no tempo). Quanto ao clima, devido ao fenômeno da aclimação, as condições de conforto variam para cada localidade. Quanto à natureza da edificação, há uma divisão entre as condições de conforto em edifícios condicionados artificialmente e edifícios de “funcionamento livre” (naturalmente ventilados). Em relação ao tempo, a avaliação de conforto deve considerar as flutuações de temperatura. (NICOL; HUMPHREYS, 2002).

Sobre esse último aspecto, a maior parte dos estudos considera as variações mensais da temperatura do ar, mas Roriz (2003) chama atenção para a viabilidade de se considerar as flutuações horárias.

Nicol e Humphreys (2002, p.566) discutem que, apesar de as condições de conforto dependerem de outros aspectos além da temperatura do ar, esses outros aspectos estão também relacionados à temperatura, tais como a vestimenta e os mecanismos de controle disponíveis no ambiente, de forma que a utilização apenas da temperatura do ar externa como referência pode satisfatoriamente ser considerada para aplicações reais.

Os diferentes modelos de índices adaptativos que relacionam temperatura do ar interno com temperatura do ar externo possuem indicação de uma temperatura de conforto mensal (ou temperatura neutra), e de uma faixa de temperatura considerada aceitável (para mais e para menos), em função desta primeira.

Pereira e Assis (2010) buscam identificar quais desses principais modelos são mais adequados para utilização em análises para casos brasileiros, com base na comparação com os índices de conforto térmico identificados em três estudos nacionais, para as localidades de

Natal, Belo Horizonte e Florianópolis, e depois para outras localidades, por meio de simulações computacionais. Os modelos analisados pelas autoras foram reunidos no Quadro 1-2. O último deles é o modelo que foi incorporado à norma ASHRAE 55 (2004), para aplicação em edifícios naturalmente ventilados.

Autores	Equação	Faixa de conforto
Auliciems (1981)	$T_n = 0,314 \cdot T + 17,6^{\circ}\text{C}$	Sem definição
Humphreys (1978)	$T_n = 0,534 \cdot T + 12,9^{\circ}\text{C}$	$T_n \pm 2$ a 3°C e em condições de umidade relativa elevada, $T_n \pm 1^{\circ}\text{C}$
Nicol e Humphreys (2002)	$T_n = 0,540 \cdot T + 13,5^{\circ}\text{C}$	$T_n \pm 2^{\circ}\text{C}$ em situações onde não há possibilidades de mudança de vestimenta, nível de atividade ou taxa de ventilação
De Dear e Brager (2002)	$T_n = 0,310 \cdot T + 17,8^{\circ}\text{C}$	$T_n \pm 2,5^{\circ}\text{C}$ (90% de aceitabilidade) e $T_n \pm 3,5^{\circ}\text{C}$ (80% de aceitabilidade)

T_n =temperatura de conforto ou neutralidade; T = temperatura média mensal externa

Quadro 1-2 – Equações para cálculo da temperatura neutra

Fonte: Pereira e Assis (2010, p. 8)

A pesquisa mostrou que apenas o modelo de Nicol e Humphreys “não apresentou aproximação com as faixas definidas pelos autores nacionais em nenhuma das cidades avaliadas” (p. 49). Considerando localidades sem grande amplitude térmica, o modelo de 1978, de Humphreys, “mostrou boa aproximação” (p.49), mas o melhor resultado geral foi apresentado pelos modelos de Auliciems e de De Dear e Bragger. A temperatura neutra de Auliciems apresentou melhor compatibilidade quando utilizada nos estudos de caso realizados pelas autoras para dimensionamento de protetores solares.

Formas complementares de avaliar o conforto térmico vêm sendo estudadas, tais como a incorporação da tolerância ao movimento do ar (CANDIDO *et al.*, 2010) e outros índices citados no trabalho de Kolokotsa *et al.* (2009).

Eficiência Energética

A eficiência energética de edificações refere-se à promoção de conforto ambiental aos usuários com baixo consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). É diferente de conservação energética, que trata da redução ou supressão de um serviço para economizar energia (LBNL, 2013). A primeira está relacionada ao uso de equipamentos eficientes e às estratégias passivas de condicionamento da edificação. Contudo, conforme ressaltado por Pacheco, Ordóñez e Martínez (2012), um projeto energeticamente eficiente nem sempre coincide com o projeto mais econômico ou de menor impacto ambiental.

As análises com critério de eficiência energética podem envolver desde a energia incorporada nos processos necessários para obtenção do serviço até o consumo final ao longo

do uso da edificação, seja qual for a fonte. Neste trabalho, trata-se do uso de energia elétrica para arrefecimento e iluminação de ambientes internos, de forma que os indicadores de desempenho tratados estão relacionados à capacidade/potência de condicionadores de ar e lâmpadas e, principalmente, ao consumo de energia pelos mesmos (previsto, visto que se trata da fase de projeto).

Quadro dos indicadores

O Quadro 1-3 a seguir traz os principais indicadores encontrados na bibliografia consultada, com destaque para aqueles que foram utilizados nesta pesquisa, devido à sua aplicabilidade para análises de dados anuais e às ferramentas disponíveis.

INDICADORES		UNIDADES	REFERÊNCIAS
Conforto térmico	PMV	Escala de -3 a 3	ISO (2005)
	PPD	%	ISO (2005)
	Faixas de temperatura do ar e umidade relativa	°C e %	MARCONDES (2007)
	Horas de conforto/desconforto	Horas ou %	ASHRAE (2004)
Iluminação natural - disponibilidade	Iluminâncias	lux	CARMODY <i>et al.</i> (2004)
	Fator de luz do dia	% de horas	HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1966
	Autonomia de luz natural - DA		REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006
	Iluminância útil - UDI		NABIL; MARDALJEVIC (2006)
Iluminação natural - conforto	Fator de visão	Adimens.	CARMODY <i>et al.</i> (2004)
	Índice de ofuscamento - DGI	Adimens.	CARMODY <i>et al.</i> (2004)
	Probabilidade de ofuscamento - DGP	Adimens.	WIENOLD (2007)
Eficiência energética	Consumo total de energia	kWh	PACHECO; ORDÓÑEZ; MARTÍNEZ (2012)
	Consumo de energia por área útil	kWh/m ²	SILVA; LEAL; ANDERSEN (2012); WIENOLD (2007)
	Carga térmica/Demanda de resfriamento e/ou aquecimento;	W	TZEMPELIKOS; ATHIENTIS (2007)
	Demanda de pico	W/m ²	CARMODY <i>et al.</i> (2004)

Quadro 1-3 - Indicadores usuais de desempenho térmico, luminoso e energético (destaque na cor cinza para os que foram explorados nesta pesquisa)

1.2.2 Variáveis e parâmetros de análise do sistema de janela

Tendo sido definidos os critérios da avaliação do sistema de abertura, parte-se para a identificação dos elementos a serem avaliados. As características dos sistemas de abertura,

particularmente os aspectos relacionados à geometria e às propriedades termofísicas de suas partes constituintes, podem ser tratadas como variáveis e/ou parâmetros da avaliação.

A geometria da abertura engloba aspectos tais como o percentual de abertura da fachada, bem como a tipologia de sistema estudado, o posicionamento da janela na parede e a área de abertura para ventilação. Isso se estende ao protetor solar, na definição de seu tipo e potencial mascaramento. Carmody *et al.* (2004) apontam aspectos que devem ser observados no projeto das aberturas (Figura 1-11), identificando o desempenho de diversas configurações de abertura para diferentes localidades dos Estados Unidos.

Figura 1-11 - Processo para projeto e seleção de janelas

Fonte: Adaptado de Carmody *et al.* (2004, p.131)

Os trabalhos de Bittencourt *et al* (1995) e Bokel (2007) analisam a influência da forma, localização e dimensão da abertura na iluminação natural de ambientes no Brasil e Holanda, respectivamente. Os primeiros observaram que a dimensão da janela tem maior

influência nas iluminâncias do que os demais parâmetros. O segundo, considerando a demanda de energia para aquecimento, resfriamento e iluminação artificial resultante do aproveitamento da luz natural, observou que a janela em posição inferior da parede apresentou o pior desempenho quanto à demanda total de energia, e que percentuais de abertura entre 20 e 40% da área de fachada apresentaram melhor desempenho. Destacou ainda que, se inseridos controles automatizados do sistema de iluminação e das persianas, uma faixa maior de tamanhos da abertura podem apresentar o mesmo melhor desempenho.

Com relação às propriedades termofísicas da abertura, que podem ser do vidro e/ou do dispositivo de sombreamento, pode-se citar:

- Fator solar e Coeficiente de sombreamento (adimensionais);
- Transmitância térmica ou Coeficiente global de transferência de calor (W/m^2K);
- Transmitância visível e Refletância (adimensionais).

A avaliação das características mencionadas aparece na literatura na forma de estudos de caso, análises paramétricas envolvendo o dimensionamento e propriedades termofísicas dos componentes ou na forma de avaliações comparativas entre diferentes sistemas para determinados contextos climáticos.

Os autores Santos e Bastos (2008), analisando simulações de iluminação natural de configurações de fachada para escritórios de planta livre no Rio de Janeiro, notam:

[...] as simulações dos sistemas de fachada que utilizam duplamente os vidros de alta e baixa transmissão visível – com vidros de baixa transmissão visível na altura dos olhos do usuário e alta transmissão visível na parte superior das janelas - aliados à presença de elementos de proteção solar externos (*brises* ou prateleiras de luz), colaboram para uma melhor distribuição da luz natural no interior do pavimento, sem com isso prejudicar o conforto visual do usuário. (p.10)

Já Tzempelikos *et al* (2010) e Tsikaloudaki *et al* (2012) analisam como o conforto térmico e o consumo energético são afetados pelas características do envidraçamento e dos dispositivos de proteção solar. O primeiro trabalho mostra que fachadas com alto desempenho (nesse caso, associado a essa escolha do sombreamento e do envidraçamento) podem manter condições de conforto no ambiente interno e mesmo eliminar a necessidade de aquecimento secundário em climas frios. Já o segundo, avaliando situações em localidades de clima mediterrâneo, onde a preocupação também se encontra na carga térmica de aquecimento, enfatiza o papel-chave da transmitância solar e térmica das janelas.

Também enfatizando a caracterização térmica das janelas, os autores Eicker *et al* (2008) quantificam a energia que entra pelo edifício através do sistema de abertura, por meio

de medições em laboratório, medições em um edifício real e por simulação computacional, considerando janelas simples e duplas, com diferentes combinações de dispositivos de proteção solar em ambientes na Alemanha. É destacado o potencial da janela como elemento redutor da transmitância térmica no verão, em uma localidade de clima moderado.

Com relação ao desempenho de dispositivos externos de sombreamento das aberturas compostos por aletas paralelas, Moore (1985) elenca alguns parâmetros principais para o projeto de dispositivos horizontais, que podem ser, portanto, parâmetros de análise do desempenho dos mesmos: ângulo de sombreamento, inclinação das aletas, refletância, difusividade da superfície (espelhada ou fosca, por exemplo) e forma da aleta.

Sobre esses dispositivos (os *brises*), diversos trabalhos analisam o efeito de sua caracterização nos desempenhos térmico, luminoso ou energético do ambiente. A inserção de *brises* tende a reduzir a quantidade de luz no ambiente interno, mas eles podem ser empregados como fonte de luz secundária (refletida), a depender da escolha de suas propriedades e geometria. O direcionamento do fluxo luminoso pode ser alterado, por meio de prateleiras de luz (ARAÚJO; CAVALCANTE; CABÚS, 2005), componentes que combinem sombreamento e iluminação natural indireta por reflexão por meio de aletas com material espelhado (PEREIRA, 1992) e modificações na combinação de quantidade e espaçamento das aletas (FIUZA, 2008; DIDONÉ; BITTENCOURT, 2006; BITTENCOURT; MELO; FERREIRA, 1999), elementos estes que influenciam também a uniformidade da iluminação.

Os *brises* também podem reduzir o consumo de energia com condicionamento do ar (DIDONÉ; BITTENCOURT, 2008; MARTINS, 2007) e a temperatura do ar interno. No trabalho de Gutierrez e Labaki (2005), considerando experimentos em células-teste com janela de vidro incolor, dentre as configurações de dispositivo horizontal, vertical e misto, a configuração mista apresentou melhor desempenho. Já se combinando três tipos de vidro diferentes (incolor, verde e fumê) com os tipos de *brise* (Idem, 2011), os melhores resultados foram obtidos para a associação de vidro verde e protetor horizontal. Considerando o próprio *brise* sendo constituído de vidro, Miana (2005) destacou o bom desempenho térmico comparado do vidro *float* azul e do vidro metalizado a vácuo de cor prata, com a ressalva de que este último reduziu muito a iluminação natural.

Quanto à ventilação natural, os autores Bittencourt, Biana e Cruz (1995) observam que “protetores mais próximos e menos profundos produzem um padrão de ventilação natural mais eficiente que aqueles mais afastados e mais profundos” (p.388).

A questão do sombreamento também vem sendo apresentada na forma do conflito entre as estratégias relacionadas a esse dispositivo, tal como o ganho de luz natural que pode

ser acompanhado de um ganho de calor indesejado, e, inversamente, o controle solar que pode causar escurecimento do ambiente. Os trabalhos de David *et al* (2011) e Lima (2012), avaliando casos em localidades de clima tropical, e de Pereira (1992), em localidade europeia, evidenciaram como a escolha da geometria e propriedades do dispositivo permite equilibrar o controle de luz natural e de ganhos térmicos. Esse procedimento também permite otimizar o consumo de energia elétrica em função do aproveitamento da iluminação natural, conforme apontam Alzoubi e Al-Zoubi (2010), também analisando situações em clima quente.

Sobre a associação de *brises* e fachadas duplas, os autores Gratia e De Herde (2007), analisando diferentes formas de posicionamento do dispositivo de sombreamento em relação a uma fachada dupla para uma localidade na Bélgica, observaram que a atenção para a localização e cor das aletas, bem como para a abertura da fachada dupla, pode reduzir a carga térmica de resfriamento em até 23,2%, sendo este melhor resultado encontrado para o caso dos modelos com *brises* centralizados em relação à cavidade, com cores claras e na condição da fachada dupla aberta.

A tipologia da abertura completa (diferentes combinações de camadas de vidro e protetores) pode ser avaliada levando em consideração sua adequação a uma determinada realidade climática ou seu desempenho comparado ao de outras tipologias, conforme será exemplificado a seguir.

Haase, Marques da Silva e Amato (2009) analisam três tipos de sistema de abertura com relação ao consumo de energia: uma janela simples, uma janela dupla com cortina de ar externa e uma janela dupla com cortina de ar interna, considerando-se a estação quente e úmida de Hong Kong (China). Os autores, utilizando para simulação as ferramentas TRNSYS e TRNFLOW, indicam que o percentual de área envidraçada, o tipo de vidro e a orientação tem uma grande influência na carga térmica de resfriamento anual.

Em uma linha semelhante, Saelens, Roels e Hens (2008) avaliaram três sistemas de abertura com múltiplas camadas (uma janela com sistema de ventilação mecânica para insuflamento, uma janela com sistema de ventilação mecânica para exaustão e uma fachada dupla ventilada naturalmente), além de dois sistemas tradicionais (janelas com dispositivo de sombreamento externo e interno). Eles desenvolveram um ambiente de modelagem (fachadas, zonas, sistema de aquecimento e resfriamento e sistema de gerenciamento de energia do edifício) combinado ao software TRNSYS 15.3. O resultado do estudo foi a otimização do

desempenho energético a partir da modificação das configurações das janelas e do sistema HVAC⁶ para condições climáticas da Bélgica.

Marcondes (2010) apresenta e analisa, por meio de simulação computacional com o programa TAS, uma série de soluções projetuais de fachadas em tipologias de escritórios da cidade de São Paulo, selecionando aquelas que atingem um desempenho equivalente a 80% de horas de conforto com a utilização apenas de ventilação natural.

Alguns trabalhos utilizam a análise da caracterização da abertura para desenvolver novos sistemas com alto desempenho. Baldinelli (2009) desenvolveu um sistema de fachada dupla com dispositivos de sombreamento móveis integrados (Figura 1-12), mostrando o potencial de melhoria do desempenho energético em relação a sistemas tradicionais, na Itália.

Figura 1-12 – Fachada com dispositivos móveis, na configuração de inverno e de verão

Fonte: Baldinelli (2009, p.1108)

Sacht (2012), por sua vez, desenvolveu um sistema modular de fachada composto de partes que podem ser ajustadas e combinadas de acordo com as necessidades da edificação. O sistema inclui a grelha estruturante do mesmo e diferentes módulos (tais como de vidro fixo ou móvel, de proteção solar, parede trombe e fotovoltaico). Com o auxílio de simulação computacional e ensaios de espectrofotometria e em túnel de vento, foi demonstrado pela autora o potencial deste sistema para melhoria do desempenho energético em relação a dois sistemas de fachada convencional, em diferentes realidades climáticas de Portugal.

Observa-se que o estudo do desempenho de sistemas de abertura envolve diferentes aspectos, que podem ser analisados de forma integrada. Entender a janela como um elemento

⁶ Do inglês *Heating, ventilation and air conditioning*, sendo, portanto, o conjunto dos sistemas de aquecimento, resfriamento do ar e ventilação natural.

composto por dispositivos de controle ambiental interligados entre si e com os demais sistemas da edificação é uma concepção crescente no âmbito das pesquisas e práticas relacionadas ao ambiente construído.

Tal concepção é condizente com os benefícios que a capacidade de a edificação “responder” às condições ambientais traz em termos de conforto e uso de recursos energéticos para promoção desse conforto, ultrapassando a concepção de apenas uma abertura fixa na fachada. Diante disso, alguns pontos passam a ser incorporados ao escopo do desempenho da abertura, alguns dos quais serão abordados a seguir.

“Novas” variáveis: Sistemas estáticos x sistemas dinâmicos

Os mecanismos de controle dinâmicos (que se alteram em função de algum critério que considera o tempo) são exemplos de destaque dentre os sistemas que fazem parte do escopo atual da análise do desempenho de aberturas em edificações. O controle do sombreamento e da ventilação natural refere-se à forma de acionamento dos protetores solares e das aberturas para ventilação.

Os *brises*, quando móveis, podem possuir controle baseado nos seguintes índices (MOESEKE; BRUYÈRE; DE HERDE, 2007; ROCHA; PEREIRA, 2011; SILVA; LEAL; ANDERSEN, 2012; CHAN, TZEMPELIKOS, 2013):

- Intensidade de radiação solar;
- Temperatura do ar interno;
- Combinação da temperatura interna e intensidade de radiação solar;
- Nível de iluminação natural interna (iluminância ou iluminância útil);
- Desconforto visual relacionado a ofuscamento – luminância ou índices de ofuscamento;
- Ângulos de redirecionamento da luz por aletas com superfícies especulares;

Dentre esses, a intensidade de radiação solar e a iluminância são mais recorrentes. Observa-se que é possível enfatizar os critérios de desempenho térmico ou de desempenho luminoso, no que se refere ao controle dos dispositivos de sombreamento. Os protetores solares que possuem esses elementos de controle são uma possibilidade de a edificação responder às condições ambientais externas, de forma adaptativa.

O controle da ventilação natural pode ser determinado pelos seguintes fatores (MOESEKE; BRUYÈRE; DE HERDE, 2007):

- Temperatura interna;

- Combinação da temperatura interna e diferença entre temperatura interna e externa;
- *Setpoint* da temperatura interna e variações de intensidade de fluxo seguindo a temperatura externa.

Como visto, os sistemas de controle tratados referem-se, geralmente, a padrões de funcionamento baseados em limites ou faixas a partir dos quais uma determinada ação de controle seria ativada/desativada, os *setpoints*.

A avaliação de sistemas de abertura que considera a utilização conjunta de estratégias naturais de condicionamento (tais como a iluminação natural e a ventilação natural) e dos sistemas artificiais refere-se a essa existência de sistemas de controle, da janela e/ou dos sistemas de resfriamento, aquecimento e iluminação artificial. Os trabalhos destacados a seguir constituem formas de explorar essa relação.

Considerando o acionamento dos sistemas artificiais de forma complementar aos sistemas naturais (de iluminação e ventilação/condicionamento do ar), Brugnera (2014) e Rupp e Ghisi (2013) identificaram o potencial de redução do consumo de energia em relação a sistemas completamente artificiais, em diferentes climas brasileiros, potencial esse que foi de até 64,9%.

A influência da configuração de sistemas de abertura na otimização do consumo energético final a partir do aproveitamento da iluminação natural vem sendo abordada. Os autores Franzetti, Fraisse e Achard (2004) avaliam como as diferentes escolhas de dimensionamento e das tecnologias de controle alteram o desempenho final do edifício. Eles abordam o problema do ponto de vista de um balanço entre soluções tecnológicas e arquitetônicas:

A reflexão global sobre projeto tecnológico e arquitetônico é importante para ser bem-sucedido numa abordagem consistente de gerenciamento de consumo energético. Por exemplo, a opção por um sistema de controle da iluminação muito caro deve ser justificada por uma grande redução de consumo energético, não apenas com lâmpadas, mas também com o consumo total, que inclui aquecimento e resfriamento (p.125, tradução nossa).

O diagrama da Figura 1-13 sintetiza as diferentes interações entre comportamento térmico e luminoso da edificação, conforme apresentado pelos autores em questão.

Figura 1-13 – Diagrama de interação entre os comportamentos térmico e luminoso

Fonte: Adaptado de Franzetti, Fraisse e Achard (2004, p.118)

Também nesse sentido, Tzempelikos e Athienitis (2007) realizaram um estudo para ambientes de escritório situados no Canadá, através de análise integrada do desempenho térmico e luminoso. A análise da iluminação natural levou à determinação de um percentual de janela na fachada orientada a sul igual a 30%, que foi considerado nas demais simulações. Os resultados permitiram identificar um equilíbrio ótimo entre utilização da luz natural e redução da demanda de energia para resfriamento e iluminação artificiais nessas condições.

Com protetores solares de 20% de transmitância, atingiu-se uma redução de 50% na carga térmica de resfriamento, que resultou em 12% de redução no consumo total (aquecimento + resfriamento + iluminação artificial). Os autores ressaltam que os indicadores de desempenho são bastante sensíveis à orientação e tipo de clima. Shen e Tzempelikos (2012) realizam estudo semelhante, mas com ênfase nas cidades de Chicago e Los Angeles (EUA), identificando as melhores especificações dentre as analisadas, com relação a uso de energia e iluminação natural.

Com relação à inserção de mecanismos automatizados para otimizar o consumo energético, Lee, Dibartolomeo e Selkowitz (1998), por meio de experimentos em protótipos na cidade de Oakland, nos Estados Unidos, compararam os resultados obtidos pelos

dispositivos de sombreamento fixos e pelos dispositivos com controle automatizado. Os autores afirmam que o balanço ótimo entre o controle da carga térmica a ser removida e a admissão de luz natural foi alcançado de forma consistente através do sistema dinâmico, considerando-se diversas condições de insolação ao longo do ano. Os sistemas fixos não alcançaram o mesmo balanço.

Nielsen, Svendsen e Jensen (2011) analisam três condições de sombreamento (sem protetores, com protetores fixos e com protetores dinâmicos automatizados) quanto ao desempenho energético (aquecimento, resfriamento, iluminação artificial e demanda total), considerando o aproveitamento da iluminação natural, no contexto climático da Dinamarca. Com relação ao consumo total de energia para condicionamento, os dispositivos automatizados apresentaram o melhor desempenho na maioria dos casos.

A diferença na demanda total de energia entre os casos que apresentaram o melhor e o pior desempenho para uma dada orientação chegou a 16%. Já quando se tratou da análise do fator de luz do dia, a diferença de desempenho entre o sombreamento fixo e o sombreamento dinâmico foi bastante significativa (a área iluminada aumenta em 70 a 150%)⁷. Os autores chamam ainda atenção para o fato de que o sistema automatizado pode não ser a melhor escolha quando se consideram as questões financeiras (de aquisição e manutenção) ou estéticas, por exemplo.

De forma semelhante, Manzan *et al.* (2014), avaliando diferentes soluções de acionamento e geometria do dispositivo e sombreamento para o caso de Trieste (Itália), verificaram uma redução de até 18% em relação a situações sem sombreamento.

Por fim, os autores Olbina e Hu (2012) desenvolveram um método para controle de venezianas automatizadas por meio de divisão da janela em três partes (*split-controlled blinds*), identificando, por meio de simulação computacional no *EnergyPlus* de modelos de ambientes no clima quente e úmido da Flórida (EUA), o potencial desse sistema para melhoria do desempenho de ambientes. Cada conjunto de venezianas, referente a uma porção da janela, e consequentemente, a uma posição da sala, pode ser ajustada de forma independente, em função, por exemplo, da possibilidade de maior reflexão de luz para o fundo da sala por meio da diferenciação na inclinação das referidas porções.

Os autores Yun, Yoon, Kim (2014), realizando medições em protótipos e simulações nos programas *DIVA* e *EnergyPlus*, destacam o desempenho de sistemas de aletas dinâmicas para melhoria do conforto visual, para o caso de Seul, na Coreia do Sul. Nessa mesma

⁷ Moore (1985) já afirmava que a otimização no ajuste dos dispositivos móveis (especialmente o automatizado) poderia dobrar a iluminância disponível no plano de trabalho (p.83).

direção, Chan e Tzempelikos (2013) indicam estratégias de acionamento para controle da luz natural e do ofuscamento, no contexto da cidade de Filadélfia.

Observou-se que, nos estudos apresentados, o impacto dos sistemas dinâmicos é quantitativamente maior na iluminação natural do que no uso de energia para condicionamento do ambiente.

1.2.3 Parâmetros indiretamente relacionados à janela

Alguns aspectos da edificação que não fazem parte da abertura podem influenciar o desempenho da mesma, de forma que a escolha de que elementos serão considerados para análise podem alterar o resultado da avaliação realizada. Tais aspectos podem ser encarados como parâmetros da análise e são citados a seguir.

Os parâmetros do local, o contexto climático e a orientação da edificação são fatores que influenciam diretamente o conforto ambiental no ambiente interno e as trocas energéticas referentes a fenômenos ambientais.

Os parâmetros construtivos referem-se principalmente aos materiais da envolvente opaca e suas propriedades. As propriedades relacionadas à transmissão, absorção e reflexão de calor e luz são exemplos. Já os parâmetros de uso e ocupação são informações sobre o número de pessoas presente no ambiente, o tipo de atividade elas estão realizando e em que horários. Essa condição também está relacionada ao acionamento dos sistemas de controle.

Quanto ao tipo de sistema de condicionamento térmico, o ambiente pode ser naturalmente condicionado (por meio de ventilação natural ou outra estratégia passiva de resfriamento/aquecimento) ou apresentar sistemas ativos de refrigeração, aquecimento e ventilação mecânica. No caso da tipologia de ambiente não-residencial estudada nesta pesquisa, devido à carga térmica alta de equipamentos e pessoas, é recorrente haver pelo menos um sistema ativo de condicionamento do ar (refrigeração).

O controle dos sistemas artificiais de condicionamento refere-se aos mecanismos de acionamento dos sistemas de resfriamento, aquecimento e ventilação mecânica e forma de acionamento das lâmpadas.

Segundo Rocha e Pereira (2011, p. 4), “os sistemas de controle de iluminação artificial são divididos em duas categorias principais: estado liga-desliga do aparelho e sistema de dimerização.”. Possuem controle baseado em (SILVA; LEAL; ANDERSEN, 2012; ROCHA; PEREIRA, 2011):

- Iluminância e/ou luminância internas;
- Presença de pessoas.

Os sistemas de acionamento dos condicionadores de ar geralmente são representados por termostatos, onde se define uma temperatura a partir do qual o aparelho seria ligado (podendo ou não esta ser a temperatura que deve ser mantida constante no ambiente), e um limite de temperatura abaixo do qual o aparelho seria desligado. A identificação desta temperatura pode estar relacionada à abordagem adaptativa do conforto térmico, tal como demonstrado por Brugnera, Roriz e Chvatal (2013).

Observa-se que os períodos de acionamento dos sistemas de iluminação artificial e dos condicionadores de ar podem estar diretamente relacionados ao sistema de controle do sombreamento, mencionados anteriormente.

2.SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO E O PROJETO DE JANELAS

Processos decisórios são característicos do projeto arquitetônico, sendo realizados quando se tem um grupo de propriedades gerais que serão combinadas e reduzidas a uma ou mais soluções definitivas. Informações sobre o desempenho das alternativas com relação a critérios específicos podem auxiliar esse processo. Neste capítulo, aborda-se como a simulação computacional pode auxiliar a avaliação de desempenho para decisões no projeto de sistemas de janela quanto às condições de conforto e uso de energia no ambiente interno.

2.1 Simulação computacional de desempenho para projeto de edificações

A simulação computacional se caracteriza pelo uso de programas computacionais que trabalham basicamente com três procedimentos: entrada de dados, processamento e saída de dados. Os programas de simulação computacional de edificações simulam o comportamento de modelos representativos desta edificação quanto a um critério ou resultado de interesse definido (dados de saída), com base em informações detalhadas sobre tal modelo (dados de entrada), sob condições determinadas e utilizando um algoritmo interno que constitui um modelo computacional. É possível também utilizar programas que possuem diferentes módulos de simulação integrados (energético, de iluminação e ventilação natural, por exemplo).

Os programas de avaliação de desempenho aqui tratados são aqueles referentes à simulação da luz natural e das trocas térmicas e energéticas, que sejam sensíveis à caracterização das aberturas da edificação. Segundo Struck (2012, p.22) e Augenbroe (2011, p. 16), o uso dessas ferramentas para projeto na atualidade pode ser relacionado ao fato de que especificações para edificações estão deixando de ser prescritivas para serem baseadas no desempenho que se busca alcançar.

O potencial de utilização da simulação computacional para o projeto arquitetônico pode ser abordado enquanto direto ou indireto. Como contribuições diretas, entendem-se aquelas situações na qual essa ferramenta auxilia os processos de escolha, tais como as análises paramétricas, testes de sensibilidade, procedimentos de otimização e avaliação do desempenho de alternativas com relação a uma ou mais estratégias bioclimáticas. De forma indireta, têm-se os testes de materiais e soluções inovadoras que poderão ser aplicadas em projetos futuros, bem como o auxílio para procedimentos de certificação ambiental, tais como o sistema LEED (do inglês *Leadership in Energy and Environmental Design*), e de certificação de eficiência energética, tais como o RTQ-C - Regulamento Técnico da

Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (BRASIL, 2010).

A simulação computacional pode ser usada, portanto, em diferentes fases do projeto e ao longo da vida útil da edificação (LANL, 2002, p.55), para elaboração de diretrizes gerais (válidas para edifícios em geral) ou para ser utilizada como parte de um projeto arquitetônico específico; para projeto de edifícios novos ou de intervenções em edifícios existentes.

Desde as fases iniciais de projeto, a simulação pode ser empregada, conforme discutido por Struck (2012), Hygh (2012) e por Lam, Huang e Zhai (2004). Dessa forma, os projetistas podem prever interações entre o meio externo, a edificação (envoltória e equipamentos) e os usuários, o que pode auxiliar os processos decisórios característicos dessa fase, com vistas à promoção de conforto aos usuários e do consumo consciente de recursos não renováveis durante a posterior construção e utilização da edificação (HENSEN; LAMBERTS, 2011; TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010; LANL, 2002).

Tal aplicação não é irrestrita, nem sempre necessária. Além disso, como qualquer ferramenta que trabalha com previsões, possui limitações para representar a realidade, de forma que é importante verificar as situações em que seu uso é vantajoso, tais como para os objetivos mencionados.

A respeito da prática projetual, pode-se dizer que a aplicação da simulação em escritórios de projeto requer um contexto interdisciplinar e com um alto grau de controle do fluxo de informações. O uso dessa simulação de desempenho com relação a fatores de conforto ambiental e eficiência energética nessas situações é discutido por diversos autores (KRAUSE *et al*, 2012; BAMBARDEKAR; POERSCHKE, 2009; PEDRINI; SZOKOLAY, 2005; LAM; HUANG; ZHAI, 2004; HOBBS *et al*, 2003).

Hobbs *et al* (2003), por exemplo, relatam a experiência acumulada de uma equipe de projeto que desenvolve e aplica uma ferramenta de avaliação energética e ambiental, destacando as seguintes barreiras para utilização da simulação (p.492), que envolvem possíveis desvantagens do uso e também limitações dos próprios usuários:

- Aumento do risco da responsabilidade da prática arquitetônica;
- Falta de familiaridade com os métodos de trabalho;
- Falta de conhecimento em modelagem energética;
- Aumento da carga de trabalho.

No que se refere à falta de familiaridade e conhecimento dos métodos, o processo de modelagem ainda é um dos aspectos que pode limitar a utilização de ferramentas de

simulação como recurso de projeto. A construção dos modelos é de tal forma que requer o fornecimento de informações que ainda não estão definidas nessa fase. O “teste” de diversas possibilidades é possível, sim, mas o projetista apresenta as possibilidades para compará-las, não havendo condições para o “surgimento” de outras possibilidades que não essas. Isso é uma característica inerente à maioria das ferramentas, pois a simulação, pela sua própria natureza e formato, permitirá analisar alternativas, não criá-las.

Alguns programas, tais como o pacote comercial *DesignBuilder*, apresentam opções de simulações específicas para essa fase de projeto, mas mesmo neste caso não é possível manipular de forma esquemática a volumetria, e sim, escolher informações menos detalhadas, o que já é um avanço nesse sentido de ferramentas cujo público-alvo seriam projetistas.

Entendendo-se tais potencialidades e limitações, esta pesquisa explora o uso da simulação computacional para auxiliar a identificação de tendências gerais referentes ao critério de desempenho ao qual ela está relacionada, por comparação de diferentes alternativas de sistema de janela. Esse é um procedimento que pode ser realizado no dia-a-dia de projeto ou estar relacionado a um estágio anterior, como é o caso aqui tratado, de busca de produção de conhecimento com potencial para chegar às equipes de projeto em um formato já tratado.

2.1.1 Procedimentos para simulação

Conforme apontado por Augenbroe (2011, p. 16), “a simulação não é mais a arte de realizar simulações de alta fidelidade, mas sim a arte de realizar o tipo certo de experimento virtual com o modelo/ferramenta certa” (tradução nossa). O autor se refere à identificação de todos os aspectos que não afetam a resposta buscada com a simulação, e eliminação destes.

Nesse mesmo sentido, Hensen e Lamberts (2011, p.10) discutem que “a implicação disso [essa seleção de aspectos para simplificação da realidade no modelo] é que, para um mesmo artefato físico (por exemplo, um edifício, uma fachada ou um componente HVAC), uma abordagem de modelagem diferente é preferível, dependendo do objetivo da simulação” (tradução nossa). Os mesmos autores destacam as etapas para realização da simulação, as quais estão sintetizadas na Figura 2-1. No lado esquerdo do esquema, encontram-se as etapas gerais; no lado direito, o detalhamento dos passos.

Especificamente sobre o uso da simulação incorporada ao projeto de edificações ou elementos da mesma, a Figura 2-2 especifica os passos a serem realizados. Note-se que as etapas da Figura 2-1 estão resumidas nas duas primeiras etapas da Figura 2-2.

Figura 2-1 – Etapas da simulação computacional

Fonte: Augenbroe (2011, p.16); Banks e Gibson (1996) *apud* Hensen e Lamberts (2011, p. 12)

Figura 2-2 – Etapas da simulação computacional na prática projetual

Fonte: Adaptado de LANL (2002, p.55) e Hobbs *et al.* (2003, p.495)

Sobre a caracterização do modelo

O modelo a ser trabalhado nos programas de simulação computacional de desempenho tratados constitui a representação da edificação a ser avaliada, nos seus aspectos climáticos,

geométrico, de uso e ocupação. No caso do modelo geométrico, é possível haver a visualização tridimensional do mesmo, a depender do programa. A esta representação, serão associadas informações sobre os parâmetros necessários para a simulação. Se o programa for de iluminação natural, os dados de entrada são estes referidos no Quadro 2-1.

Dados da edificação	Condição de céu
<ul style="list-style-type: none"> • Geometria • Propriedades ópticas dos materiais • Estado da iluminação artificial • Estado dos protetores solares <ul style="list-style-type: none"> • Elementos do entorno • Refletância do solo externo 	<ul style="list-style-type: none"> • Data, hora • Localização geográfica • Dados de radiação solar • Distribuição de luminâncias

Quadro 2-1 - Dados de entrada de uma simulação de iluminação natural

Fonte: Adaptado de Reinhart (2010, p.18)

Sendo o programa computacional referente ao desempenho termoenergético, os parâmetros indicados nas seções 1.2.2 e 1.2.3 deste texto podem ser especificados, a fim de serem caracterizados os dados de atividade (uso), dados construtivos, de iluminação artificial e dos sistemas HVAC. Podem ainda ser incluídas informações sobre certificações locais, quando o programa possui um banco de dados com as mesmas.

No caso das avaliações de sistemas de janela para projeto arquitetônico, quando se trabalha comparando diferentes alternativas, o detalhamento geométrico do restante do modelo da edificação (aqueles que não fazem parte da janela) adquire um papel secundário. Sua caracterização deve ser completa, mas sua geometria geralmente é tratada de forma bastante simplificada, de modo que é comum serem avaliados edifícios de formato prismático.

No caso dos modelos geométricos para simulações termoenergéticas, recorrentemente reduz-se o modelo a uma zona térmica, representada por um ambiente único, caso em que é possível inserir outras zonas e admitir que as trocas de calor entre a primeira e estas são nulas. No caso de simulações de luz natural, as espessuras, por exemplo, podem ser eliminadas, pois não interferem significativamente a iluminação.

Na literatura consultada sobre o tema abordado, as ocorrências de geometria de modelos foram as seguintes:

- Ambientes únicos, de planta quadrada ou retangular;
- Edifício completo, prismático, de planta retangular;

- Diferentes configurações de ambientes num mesmo edifício, prismáticos, de planta retangular.

Cabe ainda acrescentar que a caracterização do modelo geométrico pode ser decisiva para a análise de sistemas de janela. A escolha do modelo de referência, ou seja, aquele que servirá de base para as comparações, pode informar a abrangência do estudo. Por exemplo, num caso onde se quer avaliar diferentes tipos de vidro, pode-se chegar à conclusão que esse aspecto não tem influência significativa no desempenho final da janela. Contudo, tal conclusão pode ser válida apenas para um sistema construtivo, de forma que, testando-se alguns sistemas construtivos diferentes, essa conclusão não se verificaria.

Como visto anteriormente, para se analisar o comportamento da janela com relação a aspectos de conforto ambiental e eficiência energética, a informação sobre o contexto climático é uma delimitação importante. Na simulação, ela define as condições ambientais externas para trocas de calor e/ou disponibilidade de luz natural. Para se ter uma noção da abrangência dos estudos que vem sendo realizados na temática da avaliação de desempenho de sistemas de abertura por meio de simulação computacional, o Quadro 2-2, a seguir, apresenta localidades que foram estudadas na bibliografia consultada.

Brasil	Europa	Ásia	América do Norte
Curitiba-PR	(Alemanha)	Hong Kong	Chicago e Los Angeles
Florianópolis-SC	Uccle (Bélgica)	(China)	(EUA)
Maceió-AL	(Bélgica)	Technion	Filadélfia (EUA)
Natal-RN	(Dinamarca)	(Israel)	Montreal (Canadá)
Rio de Janeiro-RJ	Reunion Island (França)	Aman	Toronto (Canadá)
São Paulo-SP	(França)	(Jordania)	
Viçosa-MG	Zona mediterrânea	(Singapura)	
Campinas	Lisboa, Porto, Lajes e Funchal		
	(Portugal)		
	Porto (Portugal)		
	(Holanda)		

Quadro 2-2 – Amostra das localidades estudadas na bibliografia consultada

O contexto desse trabalho é o do clima tropical quente e úmido da região nordeste do Brasil, o qual será destacado na Capítulo 3.

2.1.2 Programas de simulação computacional

Os autores Bambardekar e Poerschke (2009, p.1310) classificam as ferramentas de simulação em simplificadas e sofisticadas, atribuindo às mesmas o uso provável por projetistas e por especialistas, respectivamente. Aqui serão brevemente abordadas algumas

ferramentas que podem ser usadas para projeto, mas que exigem uma descrição detalhada da edificação e utilizam algoritmos também detalhados de representação dos fenômenos físicos, sendo, portanto, “sofisticadas”. O Quadro 2-3, a seguir, reúne as principais ferramentas computacionais utilizadas nas pesquisas da bibliografia consultada.

Iluminação natural	Desempenho termoenergético	Ventilação natural	Análises múltiplas (pacotes)
Radiance Daysim TropLux Lightscape LightSwitch LUMEN MICRO Luz do Sol NatLite Modelos “autorais”	ESP-r EnergyPlus VisualDOE Arquitrop TAS TRNSYS TRNFLOW Modelos “autorais”	Airpak PHOENICS Ansys CFX Modelos “autorais”	DesignBuilder Autodesk Ecotect

Quadro 2-3 – Ferramentas computacionais citadas na bibliografia consultada

Ramos e Ghisi (2008), comparando as iluminâncias obtidas internamente e externamente por quatro dessas ferramentas de simulação da luz natural citadas (*Radiance*, *TropLux*, *Daysim/Radiance* e *EnergyPlus*), verificaram que “os valores das iluminâncias têm maior relação com o modelo de céu⁸ do que com o método de cálculo utilizado pelos programas (p. 9)”.

Foi identificado que os programas que utilizam o modelo de céu estático (*TropLux* e *Radiance*) apresentam sempre valores mais baixos do que os que utilizam o modelo dinâmico de céu (*EnergyPlus* e *Daysim/Radiance*). Comparando-se com as medições reais de iluminância horizontal externa em Florianópolis, os resultados podem ser próximos aos reais, maiores em até 20klux, ou menores que os reais. Essas considerações mostram a importância de se conhecer as particularidades e limitações da ferramenta utilizada para avaliação.

Com relação às ferramentas para execução dos procedimentos de simulação energética, o Departamento de Energia dos Estados Unidos disponibiliza um diretório⁹, com informações sobre 455 programas de diferentes países para avaliação de eficiência energética, energia renovável e sustentabilidade em edificações, incluindo breves avaliações dos mesmos quanto a vantagens, desvantagens, pontos fortes e pontos fracos.

⁸ Um modelo de céu simula as distribuições de luminância da abóbada celeste com base em informações de data, hora, localização geográfica e radiação solar. Modelos estáticos indicam condições para um dado momento, tais como os modelos da CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*). Já um modelo dinâmico simula todas as condições, ao longo de um ano, com base nas informações de radiação solar direta e difusa do local, tal como o modelo de Perez (REINHART, 2010, p. 19-20).

⁹ Disponível em <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/>. Acessado em 29 nov. 2015.

Já os programas do tipo CFD¹⁰ simulam a dinâmica dos fluidos, no caso, da ventilação natural, permitindo análises detalhadas de direção e velocidade do ar, bem como a visualização desses fluxos na forma de vetores.

Ferramentas Integradas

Pode-se dizer que todo o processamento do edifício por meio de simulação computacional com o uso de programas que permitam análises horárias consiste de uma simulação integrada, realizada a partir da alimentação de dados entre módulos de simulação diferentes, na medida em que são tratadas as diferentes trocas (fluxos energéticos, caminhos da luz etc.) em um mesmo sistema (a edificação), que é composto por diferentes subsistemas (aberturas, fechamentos, equipamentos de condicionamento etc.).

Os programas atuais consideram desde as condições dinâmicas do sistema HVAC, que engloba aquecimento, resfriamento do ar e ventilação natural, para análise do desempenho termoenergético da edificação (ATHIENITIS, 1993), passando pela consideração do aproveitamento da iluminação natural nesse desempenho (TZEMPELIKOS, 2005), à previsão do impacto de formas de utilização desses sistemas ao longo da vida útil da edificação (MATHEWS; BOTHA, 2003).

É possível, mesmo sem a “acoplagem” direta de ferramentas, realizar procedimentos combinados, que resultarão na referida análise integrada. Didoné e Pereira (2010), por exemplo, analisaram modelos referentes à cidade de Florianópolis a partir da geração de relatórios de ocupação e acionamento do sistema de iluminação artificial no *Daysim* (programa de análise da iluminação natural), inseridos no *EnergyPlus*, onde foi realizada a simulação termoenergética.

Os autores constataram que tal procedimento permite avaliar o potencial de aproveitamento da luz natural para redução do consumo energético da edificação, suprindo as limitações do módulo correspondente do *EnergyPlus* quanto ao fato de este superestimar a luz natural nos ambientes internos, aspecto destacado por outros autores, tais como Ramos e Ghisi (2010).

O procedimento também foi adotado por Rocha e Pereira (2011), que identificaram o potencial de redução do consumo de energia de diferentes sistemas de controle da iluminação e de sistemas de sombreamento, destacando a influência dos modelos comportamentais de usuário (passivos ou ativos) utilizado.

¹⁰ Dinâmica dos fluidos computacional, do inglês *Computational Fluid Dynamics*.

Já com relação à análise conjunta dos fenômenos de ventilação natural e de desempenho termoenergético, tal integração ainda é pouco explorada. Para se prever, por exemplo, a redução no consumo com ar condicionado devido à utilização de ventilação natural cruzada, a definição dos dados de entrada no programa de simulação termoenergética, referentes à ventilação, é feita assumindo-se um determinado número de renovações de ar ou outra forma de delimitação de *setpoints*.

É possível, contudo, utilizar as diferentes taxas de renovação de ar obtidas a partir do programa de CFD no programa de desempenho energético, tal como feito por Trindade, Pedrini e Duarte (2010) ou, de forma inversa, utilizar as temperaturas do ar exterior e interior obtida por simulação termoenergética como dado de entrada do programa CFD, tal como feito por Barbosa *et al.* (2012).

2.2 Análises de sensibilidade

A avaliação/simulação computacional de desempenho termoenergético pode permitir identificar que parâmetro(s) de projeto apresenta(m) maior ou menor influência em um determinado critério de desempenho, por meio de testes de sensibilidade e/ou análises paramétricas em um modelo de referência que representa a edificação em questão.

Ao se determinar uma edificação para análise, uma das maneiras de avaliar a mesma seria alterar apenas uma dentre as várias características que a constituem e influenciam seu desempenho, mantendo-se as demais fixas, e verificar qual influência gerada por essa característica em um ou mais critérios de desempenho, e assim sucessivamente, com diversos parâmetros, com a finalidade de encontrar quais são os mais influentes nesse critério, ampliando-se ou restringindo-se soluções para o projeto. Esta é a forma mais simples de análise de sensibilidade.

Conforme discutido nos trabalhos de Saltelli, Chan e Scott (2000, p.4) e Westphal (2007, p.4), análise de sensibilidade é o estudo de como a variação no resultado de interesse obtido através de um modelo pode ser atribuída a diferentes fontes de variação, e de como o referido modelo depende das informações que o alimentam. Ou simplesmente, como sintetizam os primeiros autores: a análise de sensibilidade estuda as relações entre as informações que entram e as que saem do modelo.

Existem diversas ocasiões no âmbito da simulação computacional que justificam uma análise desse tipo. A análise de sensibilidade permite (LOMAS; EPPEL, 1992, p.21-22; SALTELLI; CHAN; SCOTT, 2000, p.6):

- a) Identificar os dados de entrada aos quais os dados de saída são particularmente sensíveis, por exemplo, que características do edifício influenciam mais o consumo de energia;
- b) Identificar aqueles dados de entrada aos quais um ou mais dados de saída são insensíveis e que, portanto, podem ser eliminados do modelo final;
- c) Identificar os dados de entrada aos quais os programas são sensíveis, mas para os quais dados adequados ainda não estão disponíveis, de forma que experimentos de campo possam ser sugeridos e para produzir valores exatos;
- d) Identificar parâmetros cujo controle pelo usuário deveria ser evitado, porque valores suficientemente precisos não poderiam (exceto talvez por usuários muito especializados) ser atribuídos a esses dados;
- e) Identificar se um modelo se assemelha ao sistema ou processo em estudo.

Esta descrição refere-se a modelos em geral (computacionais/ numéricos), mas quando se usa simulação com um programa ou modelo já validado e conhecido, como é o caso de muitas das simulações de desempenho de edificações, essa análise de sensibilidade se refere, comumente, a parâmetros do modelo geométrico da edificação e às informações associadas a ele, que constituem a maior parte dos dados de entrada nos programas de simulação, tais como de simulação termoenérgica, de iluminação natural e ventilação.

O autor Tian (2013), em revisão sobre o tema na área de energia e edificações, esquematiza os principais passos para realização da análise de sensibilidade na área de energia e edificações (Figura 2-3).

Figura 2-3 – Diagrama dos passos típicos para análise de sensibilidade na simulação de edificações

Fonte: Adaptado de Tian (2013, p. 412)

Diversas abordagens podem ser aplicadas para realização da análise de sensibilidade. Lomas e Eppel (1992) dividem essas abordagens em individual (que descreve a influência das em cada dado de entrada individual) e total (relativas às incertezas em todos os dados de entrada).

A respeito de tais incertezas, cabe aqui uma breve contextualização. Segundo Wit (1997), as incertezas nas previsões de desempenho de edificações devem-se aos seguintes aspectos:

- Edifícios não serem construídos exatamente como especificados;
- No momento das simulações, as especificações do projeto ainda não estão definidas. As decisões e projeto não são conhecidas e, portanto, tem um efeito incerto no desempenho previsto;
- Complexidade dos processos físicos a serem modelados requerem pressuposições e simplificações, que introduzem incerteza.

Novamente considerando que o usuário de simulação de desempenho de edificações para projeto já utiliza uma ferramenta validada, quando se fala aqui em incerteza, fala-se do segundo caso, que considera o momento das decisões de projeto. Dessa forma, pode-se assumir que todos os valores da variável de entrada possuem a mesma probabilidade de ocorrência. A análise de incerteza pode ser associada à análise de sensibilidade, na medida em que esta última identifica os parâmetros cujos dados de entrada devem ser definidos com mais cuidado, por influenciarem mais o modelo computacional.

A análise das incertezas pode ser utilizada como forma de conhecer as distribuições das variáveis analisadas, tal como em Wit e Augenbroe (2002), ou para conhecer a variação total dos dados de saída devido a essas incertezas, com fizeram Shen e Tzempelikos (2013) e Hopfe e Hensen (2011). No caso da calibração de modelos, pode ser usada para identificação do erro na estimativa dos resultados, tal como realizado por Westphal (2007).

Isso tendo sido dito, parte-se para a classificação Saltelli, Chan e Scott (2000, p.16), que considera três abordagens para a análise de sensibilidade, um pouco mais detalhada que a de Lomas e Eppel (1992). Os três tipos seriam:

- Métodos de triagem (*“Screening”*) – quando se busca identificar apenas quais são os fatores mais influentes, sem atribuir a contribuição individual dos mesmos;
- Local – quando a ênfase é no efeito local, relacionado a uma variável apenas;

- Global – considera o efeito de todas as variáveis combinadas entre si e as incertezas nos seus valores.

Tian (2013) resume os principais métodos/indicadores para análises de sensibilidade, conforme o quadro a seguir:

	Método/Índice	Subtipo*	Características
Local	Local	-	Explorar um espaço reduzido do fator de entrada em torno de um caso-base; baixo custo computacional; simples de implementar; fácil de interpretar; não considera interações entre dados de entrada; sem auto-verificação
Global	Regressão	Coefficientes de regressão padronizados (SRC)	SRC - adequado para funções lineares; SRRC - adequado para funções não lineares que sejam monótonas; Custo computacional moderado para modelos energéticos; fáceis de calcular; fáceis de implementar e entender; SRC alto significa maior importância da variável
		Coefficientes de regressão padronizados transformados (SRRC)	
	Triagem	Morris	Adequado para um número maior de dados de entrada e modelos
	Baseados na variância	FAST	Decompõe a variância dos dados de saída do modelo para cada dado de entrada; considera os efeitos individuais e as interações entre os parâmetros; medidas quantitativas; alto custo computacional; o FAST não é adequado para distribuições discretas
		Sobol	
	Meta-modelos	Análise de regressão multivariada (MARS)	Adequado para modelos complexos e computacionalmente mais intensos; quantifica a variação dos dados de saída devido a diferentes dados de entrada; a precisão depende do meta-modelo
		ACOSSO	
		SVM	

*SRC = Standardized regression coefficients; SRRC = standardized rank regression coefficient; FAST= Fourier amplitude sensitivity test; MARS = Multivariate adaptive regression splines, ACOSSO = Adaptive component selection and smoothing operator, SVM = Support vector machine.

Quadro 2-4 - Métodos de análise de sensibilidade. Fonte: Adaptado de Tian (2013, p.412)

Para análises em projeto arquitetônico que considerem a sensibilidade global, os coeficientes de regressão linear parecem atender às necessidades de trabalho, sendo também de fácil determinação. O coeficiente de regressão linear padronizado - SRC, por exemplo, é obtido a partir do quociente entre o coeficiente de regressão da reta e o desvio-padrão dos dados de saída, sendo equivalente ao coeficiente de correlação de Pearson (SALTELLI; CHAN; SCOTT, 2000; DE FRANCISCO, 1993).

Diversos trabalhos aplicam princípios da análise de sensibilidade na avaliação de desempenho de edificações, por meio de estudos paramétricos. Temos como exemplo a aplicação para análises de sensibilidade local para identificação do impacto de diferentes características da edificação no conforto e uso de energia no ambiente interno, por meio de

simulação computacional. Nesse sentido, citam-se alguns exemplos dentre os inúmeros existentes: utilizando simulação computacional, Lam e Hui (1996), analisando casos no contexto climático da China; e Silva, Leal e Andersen (2012), em estudo para Portugal; e utilizando dados obtidos em campo, os autores Dornelles e Roriz (2005) e Ghisi e Pereira (2011), tratando de estudos de caso no Brasil.

A respeito da análise de sensibilidade global, as pesquisas com essa proposta consideram vários parâmetros combinados entre si e as incertezas relacionadas aos mesmos. Os autores Shen e Tzempelikos (2013) realizaram uma análise envolvendo sete parâmetros (área de abertura em relação à área de piso, transmitância solar, refletância da face frontal e posterior das aletas dos protetores solares, relações de volumetria, resistência térmica e tipo de vidro), determinando os que apresentam mais impacto na iluminância útil, carga anual de iluminação, de aquecimento e de resfriamento e no consumo anual de fontes energéticas para escritórios no contexto climático de Filadélfia (Estados Unidos). Utilizando a ferramenta *SimLab* para amostragem e para índices de sensibilidade pelo método FAST, eles observaram, por exemplo, que a proporção entre área de abertura e área de piso e o tipo de vidro tem impacto significativo em todos os indicadores analisados.

Yildiz e Arsan (2011), também usando a ferramenta *SimLab* e utilizando como índice de sensibilidade os SRRCs, avaliaram um edifício residencial multifamiliar existente na Turquia. Os índices variaram de acordo com o tipo de carga (aquecimento ou resfriamento) e o a posição vertical do apartamento (térreo, intermediário e cobertura), sendo os parâmetros de maior influência no desempenho analisado: a área total de abertura, a transmitância térmica do vidro, bem como o fator de ganho de calor solar do mesmo.

Em termos de aplicação da análise de sensibilidade na avaliação de desempenho de edificações, mas em relação ao ferramental computacional e não à comparação entre alternativas, temos as contribuições de Westphal (2007), que desenvolveu um método para calibração de modelos em simulações de desempenho energético; e as contribuições de Hygh *et al.* (2012), que desenvolve um modelo de regressão multivariada do desempenho termoenergético para utilização nas fases iniciais de projeto. Utilizando coeficientes de regressão padronizados (SRCs), para análises em quatro cidades dos Estados Unidos, identificou que os cinco parâmetros aos quais o consumo de energia foi mais sensível foram área da edificação, percentual de abertura na fachada e número de andares da edificação.

Por fim, com relação aos modos de apresentação desses resultados das análises tratadas nesse tópico, pode-se citar: para a análise de incerteza, histogramas, gráficos de caixa e de colunas; para as regressões, os gráficos de dispersão; para as análises de sensibilidade

local, gráficos de linha e, para os índices globais de sensibilidade, os gráficos de tornado (barras horizontais ordenadas).

O presente trabalho se inspira nessas metodologias de análise de sensibilidade para restringir o universo de casos simulados e na identificação de índices quantitativos que permitam comparar os diferentes casos, com o objetivo final de suporte a decisões de projeto.

2.3 Procedimentos de suporte à decisão

Dois procedimentos podem ser agregados ao processo de avaliação de desempenho de sistemas de janela, para oferecer suporte a decisões: métodos operacionais para classificação/ordenação de alternativas e análise multicritério. Tais procedimentos são frequentemente relacionados um ao outro e envolvem os seguintes passos: seleção dos critérios e das alternativas, avaliação das alternativas, possível atribuição de pesos aos critérios, classificação quanto ao desempenho global, *ranking* das alternativas, possível análise de sensibilidade e, por fim, as escolhas. (GOLOLOV, YEZIORO, 2007; KOLOKOTSA *et al.*, 2009; ROULET *et al.*, 2002).

Os principais componentes desse procedimento estão destacados na Figura 2-4. A classificação e ordenação podem ou não ser feitos em conjunto.

Figura 2-4 – Principais aspectos a serem considerados num procedimento decisório sistematizado

Foram identificadas as seguintes abordagens para aplicar tais princípios de suporte a decisão em avaliações de edificações considerando diferentes critérios na fase de projeto:

- Definição de índices e análise comparativa com base no resultado obtido por cada alternativa;
- Definição de metas e identificação gráfica de soluções projetuais que as atingem;

- Elaboração de ferramentas computacionais que classifiquem e ordenem as alternativas;
- Aplicação de metodologias específicas de avaliação multicritério.

Os trabalhos de Gololov e Yezioro (2007) propõem e apresentam uma ferramenta para auxiliar a escolha dentre diferentes tecnologias construtivas referentes à envoltória, na forma de um programa computacional voltado para projetistas e empresários do setor. O programa classifica as alternativas atribuindo notas quanto ao desempenho obtido em cada critério e fazendo operações para obtenção da nota final de cada alternativa, ordenando-as da maior nota para a menor.

No mesmo sentido, Castro (2005) desenvolve uma ferramenta para suporte a decisão que considera o desempenho térmico, luminoso e energético de uma edificação, para o caso de escritórios na cidade do Rio de Janeiro, utilizando o método ELECTRE¹¹ de análise multicritério. Fontenelle e Bastos (2014) aplicam este mesmo método em estudo de caso de seis alternativas de abertura para um edifício na cidade do Rio de Janeiro, identificando as soluções mais favoráveis quanto a três critérios diferentes.

A aplicação de índices ou indicadores específicos que traduzem diferentes aspectos de desempenho, para comparação entre alternativas, é comum. O trabalho de David *et al.* (2011) é um exemplo desta abordagem. Augenbroe e Park (2005) afirmam que os indicadores de desempenho, além de quantificar o desempenho, permitem delimitar expectativas. Os autores desenvolvem uma ferramenta *on-line* para auxílio ao projeto, voltado para uso nos Estados Unidos, em edifícios existentes, propondo diversos indicadores objetivos baseados no desempenho quanto a diferentes aspectos.

Já Ünver *et al.* (2004) propõem e aplicam um processo de projeto para estimar o potencial de promoção de conforto (térmico, acústico e visual) decorrente da especificação da envoltória da edificação, definindo metas de conforto e nomeando “ótimo” o conjunto de cenários que atingem ou ultrapassam essa meta. O trabalho permite visualizar os resultados em dois grupos, sendo a classificação em “atende” ou “não atende”.

Os autores Ochoa *et al.* (2012), por sua vez, discutem diferentes requisitos de desempenho que podem ser utilizados em termos de conforto visual e uso de energia influenciados pelos sistemas de abertura. Eles mostram como a sobreposição gráfica de funções e pré-requisitos permite combinar a identificação de alternativas que atingem valores específicos de desempenho e que minimizam o consumo de energia. Nesse caso, além de

¹¹ Método de ordenação de alternativas. A sigla vem do francês *EL*imination *Et* *Choix* Traduisant la *RE*alité.

identificar o atendimento ou não a um critério, é possível identificar se qualquer uma das alternativas é melhor ou pior que qualquer outra.

Por fim, realizando uma aplicação na prática projetual, os autores Hopfe, Augenbroe e Hensen (2013) apresentam um estudo de caso de um processo de projeto no qual foram avaliados dados quantitativos considerando análise de incertezas e critérios subjetivos de diferentes pessoas envolvidas no projeto.

A visualização desse desempenho pode ser feita por meio da utilização de diversas formas de apresentação. A Figura 2-5 permite a visualização de alternativas que atendem e não atendem a um nível de conforto ambiental desejado.

Opções ótimas em termos de calor, som e luz - indicados com células cinza

Leste			Sem obstruções				Com obstruções				Sul			Sem obstruções				Com obstruções				
RT	TR	W	O1	O2	O3	O4	O1	O2	O3	O4	RT	TR	W	O1	O2	O3	O4	O1	O2	O3	O4	
R1	0.20	W1									R1	0.20	W1									
		W2																				
		W3																				
	0.50	W1										0.50	W1									
		W2																				
		W3																				
R2	0.20	W1									R2	0.20	W1									
		W2																				
		W3																				
	0.50	W1										0.50	W1									
		W2																				
		W3																				
R3	0.20	W1									R3	0.20	W1									
		W2																				
		W3																				
	0.50	W1										0.50	W1									
		W2																				
		W3																				

(RT: Tipo de sala; TR: Proporção de vidro no fachada; O: Componente opaca; W: Largura da janela)

Figura 2-5 – Exemplo de quadro de opções de envoltória ótimas

Fonte: Ünver *et al.* (2004, p. 151)

Pode-se exemplificar a visualização de muitos critérios pelo uso de gráficos de radar, como o da Figura 2-6, que ilustra o desempenho de duas alternativas de materiais (granito e alumínio), com relação a nove indicadores diferentes.

Considerando-se as questões expostas, a previsão do comportamento de sistemas de janela quanto aos aspectos de conforto ambiental e consumo de energia envolvem a manipulação de informações de natureza distintas, mas que interagem entre si, de forma que o a estimativa de impactos finais dessa interação pode ser utilizada como forma de escolha dentre alternativas de soluções projetuais.

Figura 2-6 – Exemplo de gráfico de radar utilizado para suporte a decisão

Fonte: Augenbroe (2011, p. 27)

É importante lembrar que os procedimentos de suporte a decisão utilizados em projeto visam ao auxílio à escolha, mas não necessariamente à identificação de uma alternativa considerada “a melhor” ou “ótima”, auxiliando, por outro lado, a ponderação dos diferentes desejos e desempenhos buscados pelos interessados nas decisões.

Além disso, buscam-se “soluções de compromisso”, de forma que, quando não é possível que todos os critérios sejam atendidos, são identificadas combinações que “equilibrem” o desempenho, tal como a escolha de uma alternativa que possua um desempenho térmico ruim, mas cujo desempenho energético final seja bom e cujo custo-benefício seja de acordo com os propostos pelos clientes, por exemplo. Uma das motivações para a utilização de simulação computacional e procedimentos objetivos de auxílio à escolha pode ser, portanto, lidar com conflitos sobre os quais nem sempre é possível apenas intuir.

3.MATERIAL E MÉTODOS

Após definidos o referencial teórico e a contextualização temática do trabalho desenvolvido, são descritos a seguir os procedimentos metodológicos e a forma de abordagem e análise dos dados utilizados na mesma.

Sendo o objetivo desta pesquisa avaliar sistemas de abertura estáticos e dinâmicos quanto ao desempenho luminoso e energético para suporte a decisões de projeto, foram definidas as seguintes etapas principais para atingir esse intuito:

- Revisão bibliográfica;
- Caracterização do recorte e do objeto;
- Definição de cenários e critérios de análise;
- Simulações computacionais;
- Tratamento dos dados;
- Análise comparativa dos resultados;
- Classificação e ordenação de alternativas quanto aos diferentes critérios de desempenho;
- Redação do documento final.

3.1 Sobre o recorte: escritórios e clima quente e úmido

As simulações e análises desenvolvidas referem-se a edificações com uso de escritório em localidades de clima quente e úmido.

3.1.1 Sistemas de janela e o uso da edificação - escritórios

As edificações de escritório são aqui entendidas como aquelas que se destinam ao uso de serviços comerciais ou públicos. Possuem uma tipologia caracterizada pela presença de salas com dimensões modulares ou por possuírem planta livre, em edifícios de andares múltiplos. Diferente do uso residencial, por exemplo, que agrega à edificação um caráter pessoal e, muitas vezes, personalizado, escritórios podem possuir características padronizadas: arquitetônicas, ambientais e de uso de energia, pois possuem atividades semelhantes em todos os ambientes.

Do ponto de vista dos ganhos térmicos, esse uso se caracteriza pela alta carga térmica interna de equipamentos e pessoas. Somam-se a essa carga os ganhos solares decorrentes do uso de fachadas com altos percentuais de fechamento transparente desprotegido.

Considerando edifícios de escritório a partir do final da década de 90 por meio de exemplares de diferentes países, Marcondes (2010, pp.76-83) destaca, como parte das características dessa tipologia, a presença das certificações ambientais e o uso de fachadas de alto desempenho, associadas ao uso de estratégias de condicionamento diversas do sistema de condicionamento do ar tradicional.

Essas estratégias se referem à utilização, por exemplo, de sistemas de ventilação híbrida, que permitem o uso alternado da ventilação natural e da ventilação mecânica, ou de ventilação natural e sistemas de condicionamento do ar, de forma controlada.

De uma forma geral, no sentido de reincorporação do aspecto local que foi colocado em segundo plano pelo Estilo Internacional¹² que caracterizou essa tipologia de edificação, os exemplares recentes de maior visibilidade tendem a apresentar o uso de sistemas que respondam às características climáticas da localidade na qual estão inseridas, de forma integrada aos sistemas artificiais. Isso pode ser feito como ação de projeto arquitetônico, que engloba o desenho de sistemas de abertura de alto desempenho.

3.1.2 Sistemas de janela e o contexto climático - quente e úmido

Segundo classificações de Hyde (2000, p.22) e Baker (1987, p.13), as localidades que possuem clima quente e úmido encontram-se na região delimitada a 15° ao norte e ao sul da linha do equador, possuindo pouca variação sazonal de temperatura.

Conforme destacado por Bittencourt (1993, p.84), nessas regiões, a principal demanda referente ao condicionamento passivo é por resfriamento, por meio de soluções que contemplem a necessidade simultânea de ventilação natural, sombreamento e controle da iluminação natural (que tende a ser excessiva). Esses aspectos estão diretamente relacionados ao projeto da abertura. O caso da cidade de Maceió-AL é destacado a seguir.

3.1.3 Sistemas de janela em escritórios em Maceió-AL

Maceió está localizada no estado de Alagoas, na latitude oficial 9.66° sul e longitude 35.73° oeste (Figura 3-1). Segundo dados de 2010, possui uma área de 503km², população de 932.748 habitantes e está inserida no bioma Mata Atlântica (IBGE, 2012).

¹² Nome atribuído ao estilo arquitetônico difundido com o movimento Moderno, caracterizado pelo racionalismo construtivo e expresso em ações tais como a ausência de ornamentos e otimização do uso de material. O termo se refere comumente mais ao estilo formal do que às origens ideológicas, tendo como referências visuais o uso de janelas padronizadas de vidro e volumes prismáticos retangulares.

Figura 3-1 - Localização de Maceió-AL

Fonte: IBGE, 2012

A localidade apresenta clima quente úmido (NIMER, 1979), caracterizando-se por pequenas variações de temperatura (diárias, sazonais e anuais), radiação solar intensa e alta umidade (ver Gráfico 3-1 e Gráfico 3-2, com dados de arquivos climáticos¹³). Quanto ao movimento do ar, a média mensal da velocidade do vento está sempre acima dos 2m/s, chegando a 4m/s, com direção sudeste predominante (PASSOS, 2009, p.116).

Gráfico 3-1 – Dados de temperatura do ar, temperatura neutra e umidade relativa do ar de Maceió-AL

Fonte: LABEEE (2013), Roriz (2013)

¹³ Arquivo do tipo TRY (Test Reference Year), que possui dados horários de um Ano Climático de Referência, cuja forma de obtenção é conforme a descrita por Pereira et al. (2005).

Gráfico 3-2 – Dados de intensidade de radiação solar em Maceió-AL

Fonte: LABEEE (2013)

Observa-se que, especialmente nos meses de verão, a radiação solar direta apresenta altos índices de ocorrência em relação à radiação difusa. Segundo Cabús (2002, p.3-4), a probabilidade mensal de haver insolação em Maceió varia entre 49,9% (em julho) e 73,7% (em novembro). Além disso, segundo o autor, as condições de céu predominantes na localidade podem ser suficientemente expressas utilizando três tipos de céu (nublado, parcialmente nublado e claro), sendo que o segundo tem maior probabilidade de ocorrência (61,8%), enquanto os tipos nublado e claro possuem 25,8% e 12,4% de probabilidade de ocorrência, respectivamente (CABÚS, 2002, p. 3-10).

A Figura 3-2 mostra uma carta solar da cidade de Maceió, tratada, com dados de temperatura do ar registrados sobre a mesma de acordo com a metodologia descrita por Pereira e Souza (2008). Segundo esta, a temperatura neutra (T_n) calculada foi marcada sobre as trajetórias solares. Com relação ao fato de que cada trajetória representa dois períodos, foram indicadas na representação as temperaturas mais extremas. Observa-se que, não foram registradas médias abaixo da T_n , que varia mensalmente em função da temperatura externa.

Para o desenvolvimento deste trabalho, além do conhecimento das características climáticas de Maceió-AL, faz-se necessário caracterizar a tipologia de edificações de escritório quanto às especificações construtivas, as quais são minimamente destacadas no Quadro 3-1, conforme dados de relatórios nacional e local. O relatório local referido (CABÚS; ARAÚJO; MONTENEGRO, 2006) registrou 11 edificações de escritório que atendiam aos critérios do levantamento realizado (tais como o uso comercial e possuir mais de cinco pavimentos).

Figura 3-2 - Carta solar e dados em função da temperatura neutra (Tn)

Fonte: LABCON (2013)

Paredes
100% parede de bloco cerâmico de seis furos, com 15cm de espessura
Cobertura
91% laje impermeabilizada; 9% laje protegida por telhado
Sistemas de abertura
64% <i>maxim-ar</i> ; 36% corredeira
Vidros
82% comum transparente; 18% reflexivo
Percentual de área de janela na fachada
Maior parte dos edifícios (70%) possuem PJF superior a 10%

Quadro 3-1 - Características construtivas dos edifícios de escritório de Maceió-AL.

Fonte: Relatórios CT-Energ (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006; CABÚS; ARAÚJO; MONTENEGRO, 2006)

Contudo, após esse levantamento, pelo menos mais seis edificações dessa natureza foram construídas ou estão em construção, conforme consulta, realizada em 2011 (LIMA, 2012), ao arquivo da Superintendência Municipal de Controle do Convívio Urbano (SMCCU) da cidade de Maceió-AL, órgão responsável pela concessão de alvarás de construção para edificações nessa localidade.

Pela observação empírica dos exemplares atuais, nota-se que as características construtivas das edificações se mantêm semelhantes, exceto pelo uso do vidro refletivo: atualmente, uma parcela maior de edificações usa esse material. O relatório referido não registrou dados de uso e ocupação dos edifícios referentes a Maceió.

Da Figura 3-3 à Figura 3-10 são ilustrados alguns exemplares das edificações comerciais tratadas. Observa-se que as principais características recorrentes na fachada são o uso de cores claras e de janelas de correr ou *maxim-ar*.

Figura 3-3 – Edifício Lobão Barreto
Fonte: A autora, 2013

Figura 3-4 - Edifício Walmap
Fonte: A autora, 2013

Figura 3-5 – Edifício Work Center
Fonte: EXPO IMÓVEL (2013)

Figura 3-6 – Edifício Breda Center
Fonte: A autora (2013)

Figura 3-7 – Edifício Avenue Center
Fonte: A autora (2013)

Figura 3-8 – Edifício Norcon Empresarial
Fonte: A autora (2013)

Figura 3-9 – *The Square Park Office*
Fonte: A autora (2013)

Figura 3-10 – *Corporativo Terra Brasilis*
Fonte: A autora (2013)

No aspecto compositivo, a divisão da fachada em linhas horizontais se destaca. Quanto à proporção de área envidraçada em relação à área opaca, a comparação entre as quatro primeiras figuras (edifícios construídos e ocupados até a década de 90) e as quatro últimas (edifícios dos anos 2000) ilustram o aumento dessa proporção ao longo dos anos.

Quanto à presença de estratégias bioclimáticas e de eficiência energética, há indícios da preocupação com os ganhos térmicos na escolha da orientação da fachada com maior quantidade aberturas, para que estas não recebam o Sol poente. Além disso, quando há maiores percentuais de abertura, utilizam-se vidros refletivos, nas cores azul, verde ou cinza. Acredita-se que isso está relacionado a uma preocupação de conforto ambiental, devido à seleção das orientações mencionada, mas, naturalmente, esses vidros também estão associados a uma proposta estética para o edifício comercial.

Foi observado que, apesar da localização, a maior parte das edificações não possui dispositivos de proteção solar das aberturas. Exemplos contrários são o edifício *Work Center* (Figura 3-5), que possui elementos vazados, e o edifício *Breda Center* (Figura 3-6), que possui alguma proteção das aberturas. Além disso, não se observam possibilidades evidentes de aproveitamento da ventilação natural cruzada. Seria possível, por exemplo, aproveitá-la nos pavimentos superiores, onde as velocidades são mais altas e haveria possibilidade de reduzir a necessidade de condicionamento artificial.

Existe, então, no tratamento das aberturas, contradições no que se refere a critérios de conforto ambiental e eficiência energética. Os motivos para isso não são precisamente conhecidos nem fazem parte do escopo deste trabalho, mas podem estar relacionados com a promoção de uma imagem de edificação comercial que é difundida no mercado.

Acredita-se que adequação climática, que se constitui como um dos pontos norteadores da discussão aqui proposta, pode ser alcançada a partir de uma postura projetual que adote as características do local como condicionantes de projeto tanto quanto os demais condicionantes, por meio da incorporação, ao projeto, de estratégias tais como os protetores solares, os quais parecem esquecidos nessa tipologia representada pelos casos ilustrados.

Visto que os referidos protetores são elementos que permitem controlar a radiação solar e também a ventilação, sua adoção é um importante ponto a ser considerado no projeto de sistemas de abertura para essa localidade, aspecto que traz à tona a escolha dentre as inúmeras configurações possíveis, considerando-se os ganhos do ponto de vista térmico e luminoso. Alguns aspectos referentes à escolha desses dispositivos são apresentados a seguir.

3.1.3.1 *Desempenho de protetores solares em Maceió-AL*

Como visto, o sombreamento das aberturas, assim como a ventilação natural, é uma importante estratégia bioclimática para as localidades de clima quente e úmido tal como Maceió-AL, de forma que dispositivos para esse fim foram incorporados aos sistemas de abertura estudados nesta tese. Observou-se que as implicações do uso dos mesmos são constantemente estudadas e difundidas. Contudo, o efeito da escolha de suas características específicas merece aprofundamento, especialmente quando se considera o efeito combinado em relação a diferentes critérios de desempenho.

Algumas pesquisas envolvendo o uso de *brises* de aletas paralelas foram discutidos nos capítulos 1 e 2. A seguir, são apresentados alguns aspectos específicos do recorte de casos dessa pesquisa, que contribuíram para a avaliação realizada.

Estudos anteriores (LIMA; BITTENCOURT, 2012; LIMA; BITTENCOURT; CARAM, 2013), com base em simulação computacional de um ambiente de escritório genérico (5mx6mx3m), avaliaram *brises* estáticos quanto a aspectos de iluminação natural e ganhos térmicos solares pela janela, considerando o ambiente condicionado artificialmente (condicionador de ar e predominância da iluminação por lâmpadas), situação que é recorrente na localidade analisada.

Foi constatado que *brises* com mesma máscara de sombra podem apresentar desempenhos consideravelmente diferentes. As características de refletância e inclinação das aletas do dispositivo de sombreamento podem provocar alterações significativas no desempenho do ambiente interno quanto a quantidade de luz e de ganhos térmicos solares. Além disso, situações com janela sombreada apresentam maior potencial de alto desempenho do que janelas expostas, mesmo com relação à iluminação natural.

Observou-se que um equilíbrio de luz e calor dificilmente seria alcançado com a janela orientada a Leste ou Oeste, que necessitariam de proteções solares bastante restritivas e com potencial escurecimento do ambiente. Somando-se a isso o efeito da inclinação das aletas e aponta-se para o potencial de *brises* dinâmicos. Foram observadas também tendências semelhantes entre os resultados das orientações Norte e Sul e das orientações Leste e Oeste, em termos de quantidade de luz e ganhos solares.

Duas características de avaliação, dentre outras, não foram contempladas nesses estudos e foram incorporadas a esta tese: a primeira delas é a manutenção de uma máscara de sombra fixa independente da orientação, para auxiliar procedimentos de escolha que considerem dispositivos que não tenham sido projetados para uma edificação específica. A segunda consiste no acionamento das lâmpadas em função da disponibilidade de luz natural, para permitir avaliar o desempenho dos sistemas de abertura considerando a integração de estratégias naturais e artificiais.

Os aspectos desenvolvidos contribuíram, portanto, para a definição desta pesquisa de doutorado, no que se refere ao recorte climático, tipo de edificação considerados e estratégias bioclimáticas relevantes.

3.2 Objeto

Conforme o direcionamento apresentado, o objeto de estudo desta tese consiste de sistemas de abertura compostos por um envidraçamento e um dispositivo de proteção solar externo, horizontal de aletas paralelas móveis e retráteis, em um ambiente com características do uso de escritório e localizado na cidade de Maceió-AL, localidade de clima quente e úmido. A Figura 3-11 ilustra esse sistema, considerando também os parâmetros do ambiente (estratégias passivas e ativas de condicionamento).

O ambiente que servirá de base para as análises é parte de um módulo de uma edificação de escritórios típica e hipotética, contendo duas salas de 30m² cada, e um corredor, conforme indicado na Figura 3-12. O valor de área de piso refere-se à média das salas comerciais listadas no relatório de pesquisa (CABÚS; ARAÚJO; MONTENEGRO, 2006) mencionado anteriormente, conforme feito em pesquisa anterior (LIMA, 2012). A definição de um módulo com duas salas foi realizada para permitir os testes de simulação da ventilação natural.

A janela, como visto, não possui uma configuração fixa, sendo tratada como diferentes possibilidades (cenários), as quais serão geradas a partir da combinação de variáveis, tais como a área de abertura. O trabalho se refere à fase inicial de projeto, e aborda a identificação de tendências que possam servir de suporte à decisão em situações semelhantes à simulada.

Figura 3-11 - Corte esquemático de ambiente com tipologia de abertura estudada

Figura 3-12 – Esquema do modelo de ambiente simulado, que não possui configuração fixa de janela

3.3 Abordagem e procedimentos

Trata-se aqui de uma pesquisa com elementos das abordagens experimental, quantitativa e sistêmica, nos termos de Serra (2006). A principal ferramenta utilizada é simulação computacional integrada e a principal forma de análise são análises comparativas e classificação e ordenação de alternativas com base em diferentes critérios de avaliação. A Figura 3-13 ilustra os principais procedimentos metodológicos empregados neste trabalho. Em seguida, estes procedimentos são detalhados.

Naturalmente, os procedimentos possuem uma sequência lógica conforme a apresentada, mas um determinado passo pôde ser retroalimentado ou modificado a partir de passos posteriores. Por exemplo, os primeiros resultados obtidos influenciaram os ajustes nos modelos das simulações e estas foram realizadas novamente. Os novos resultados, por sua vez, levantam novas questões, e assim sucessivamente.

Figura 3-13 – Esquema dos procedimentos metodológicos

3.4 Estudos preliminares

Esta etapa consistiu nas simulações-teste e delimitação dos cenários e indicadores a serem adotados em seguida. Foram definidas quatro variáveis do sistema de abertura e três critérios de desempenho (Quadro 3-2), considerando diferentes formas de condicionamento.

Variáveis	Indicadores de desempenho
<ul style="list-style-type: none"> • Percentual de abertura na fachada <ul style="list-style-type: none"> • Ângulo de sombreamento • Quantidade de aletas do protetor solar <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de vidro 	<ul style="list-style-type: none"> • Ocorrência de iluminâncias na faixa entre 500 e 2000lx - luz natural; • Médias mensais e anuais da temperatura do ar interno e temperaturas operativas; • Demanda anual de energia elétrica para condicionamento do ar e iluminação natural

Quadro 3-2 – Variáveis indicadores utilizados nas simulações-teste

As estratégias de condicionamento do ambiente foram:

- Ambiente condicionado de forma totalmente natural (ventilação e iluminação) – de onde foram extraídos os dados de temperatura do ar e iluminância;
- Ambiente condicionado de forma integrada (sistema de condicionamento do ar e iluminação artificial funcionando apenas quando os meios naturais não atenderiam a condições de conforto determinadas) – de onde foram extraídos os dados de uso de energia;

Foi realizada uma análise de sensibilidade dos indicadores de desempenho em relação às variáveis consideradas. Além disso, foi identificada a viabilidade de execução e o potencial de algumas estratégias propostas para a pesquisa. O detalhamento dos dados de entrada foi similar ao que será apresentado posteriormente neste capítulo, utilizando os programas *Daysim* e *EnergyPlus*, mas as definições estavam ainda em fase de testes e consideraram apenas cenários de janelas com *brises* estáticos.

Análise de sensibilidade

Foi analisada a variação total dos resultados em função da variação nas alternativas de abertura simuladas. Em seguida, foram atribuídos os índices de sensibilidade para os três critérios de desempenho considerados. Isolando-se cada uma das quatro variáveis de entrada, foi calculado o Coeficiente de correlação de Pearson (definido no Capítulo 2, p.58). Dessa forma, foi possível observar quais variáveis dentre as analisadas teriam maior correlação linear com os resultados de desempenho considerados, a partir de gráficos de barras.

Os principais resultados desta etapa encontram-se publicados em artigo (LIMA; CARAM, 2014). Foi identificado o impacto predominante das variáveis tipo de vidro e ângulo de sombreamento nos três indicadores de desempenho, o efeito da área de abertura como sendo bastante diferente a depender do valor fixado para as demais variáveis consideradas. Para efeito da continuidade da tese, os aspectos destacados a seguir puderam ser definidos.

Delimitações decorrentes dos testes

Sobre a utilização de uma estratégia combinada de ventilação natural e condicionamento artificial do ar: primeiramente, o ambiente analisado foi simulado como possuindo um sistema que permite a esses sistemas funcionarem de forma alternada, mas os dados de temperatura do ar encontrados indicaram que o sistema artificial estaria ativo durante a expressiva maioria do tempo. A temperatura do ar a ser mantida no ambiente adotada foi 25°C, o que significa que a ventilação natural estaria disponível apenas quando a

temperatura interna estaria abaixo desse valor, situação que ocorreu apenas em algumas semanas do ano na situação analisada.

As altas temperaturas apresentadas na análise do desempenho térmico indicaram, portanto, que a tipologia arquitetônica não permitiria explorar a ventilação natural. Isso pode estar relacionado, além da grande carga térmica proveniente dos ganhos solares e de ganhos internos, ao fato de a configuração não permitir a ventilação cruzada, por possuir abertura em apenas uma face vertical do ambiente.

Em segundo lugar, o módulo *AirflowNetwork* do programa *EnergyPlus*, referente à ventilação natural, apresenta limitações para representar o protetor solar na janela. Conforme já apontado pelos autores Bayraktar e Ok (2009, p. 985), o efeito dos protetores solares na velocidade do ar nas regiões próximas da janelas não são considerados no cálculo dos ganhos da zona térmica. Além disso, o objeto *WindowMaterial:Blind*, utilizado para descrição dos modelos das aletas do *brise*, não é considerado na simulação do módulo *AirflowNetwork*. Além disso, a análise referida requer os valores de coeficiente de descarga específicos para cada configuração de *brise*, pois os coeficientes de pressão e de descarga que são calculados automaticamente pelo programa referem-se a superfícies regulares.

Com relação à análise de sensibilidade à variável quantidade de aletas, foram analisados brises com 5, 10 e 20 aletas, com base na geometria possibilitada pela combinação da dimensão da área envidraçada e ângulos de sombreamento. Tal variação foi feita mantendo-se a máscara de sombra fixa, de forma que alterar a quantidade de aletas significou, ao mesmo tempo, variar a profundidade das mesmas e o espaçamento entre elas. O efeito da quantidade de aletas observado com relação aos critérios analisados foi muito inferior ao das demais variáveis. Esse efeito poderia ser maior em relação a outros critérios de desempenho não incluídos no escopo da pesquisa.

Diante destas constatações, optou-se por não dar prosseguimento à análise da ventilação natural e à utilização da variável quantidade de aletas.

3.5 Cenários analisados

Após a realização das simulações-teste e respectiva análise prévia dos resultados, foram definidos os cenários de análise definitivos da pesquisa. Foram estudadas as seguintes variáveis do sistema de abertura, combinadas entre si:

1. Percentual de abertura na fachada (PAF): 3 valores;
2. Ângulo de sombreamento: 3 valores;
3. Tipo de vidro: 3 valores;

4. Forma de acionamento do protetor solar: 3 valores (não se aplica ao caso com ângulo de sombreamento 90, que pode ser considerada a situação onde o protetor nunca está acionado);

Considerando-se as combinações possíveis que serão detalhadas a seguir, as duas orientações analisadas (Norte e Oeste) e os dois programas utilizados, resulta-se um total de 252 chamadas de simulações, referentes a 63 cenários de configuração da janela. Esse total foi definido de acordo com o tempo de duração da pesquisa e as ferramentas utilizadas, e consiste do quantitativo final após sucessivos testes.

Com relação à orientação da abertura, foram estudadas duas situações: ambiente com janela voltada para Norte e ambiente com janela voltada para o Oeste. Estas podem ser consideradas respectivamente uma orientação favorável e uma orientação crítica em termos de disponibilidade de luz e incidência de radiação solar na localidade estudada. Na primeira, ocorrem alturas solares maiores e incidência solar inclinada em relação à fachada (ângulos de incidência elevados) nos períodos do ano mais amenos. Na segunda, há radiação solar direta todos os dias do ano no período da tarde, com baixos ângulos de incidência com relação à janela.

Já com relação à área envidraçada, foram analisados três valores de percentual de abertura em relação à fachada (PAF), os quais estão ilustrados na Figura 3-14. O eixo horizontal da parede foi utilizado como referência para o dimensionamento, sendo esta medida mantida fixa e igual a 4,7m.

Figura 3-14 – Percentuais de abertura na fachada (PAF) analisados

O ângulo de sombreamento e a quantidade de aletas do *brise* são dois aspectos relacionados. O primeiro refere-se ao ângulo vertical formado entre o plano normal à janela e a extremidade externa de cada aleta do dispositivo de proteção solar, tendo em vista que estão sendo avaliados *brises* horizontais. Os três valores considerados foram 30°, 60° e 90°, sendo este último referente aos casos em que a janela estaria totalmente exposta, sem *brises*.

A esse respeito, a Figura 3-15 e a Figura 3-16 ilustram as máscaras de sombra¹⁴ dos diferentes cenários analisados, sobrepostas à carta solar da latitude $-9,51^\circ$, correspondente à cidade de Maceió-AL. Para elaboração das figuras, foram utilizadas imagens de fundo extraídas do programa computacional SOL-AR (LAMBERTS; MACIEL; ONO, 2014). Um transferidor de ângulos auxiliar em arquivo digital de extensão .dwg (LABAUT, 2014) foi utilizado e as sobreposições foram feitas utilizando um programa CAD¹⁵.

Figura 3-15 - Máscaras de sombra dos brises estáticos estudados

Note-se que, quanto maior o ângulo de sombreamento, menor de fato é o mascaramento da radiação solar, pois foi utilizada como referência a medida em relação à normal da janela, uma referência já presente inclusive no programa de onde foram extraídas as imagens de base. O ângulo lateral de sombreamento parcial sofre uma pequena variação em

¹⁴ Foi utilizada a representação descrita por Dutra (1994, p.23), para incluir a informação do sombreamento parcial, facilitando a visualização do efeito do *brise*, já que o sombreamento total fica representado apenas por uma linha (largura do *brise* corresponde à largura da janela).

¹⁵ Sigla para designar ferramentas de desenho assistido por computador – do inglês *Computer Aided Design*

função do tamanho da abertura. Para evitar a repetição de imagens, essa variação, que é muito pequena, foi representada nas máscaras por um preenchimento entre o valor correspondente à maior e à menor abertura, na cor cinza escuro, conforme indicado nas imagens.

Figura 3-16 – Máscaras de sombra dos brises dinâmicos estudados

Foram, portanto, analisadas situações com aletas de dimensão entre 0,05m e 0,42m. A espessura das mesmas foi considerada como sendo desprezível.

Quanto aos três tipos de vidro utilizados nas simulações, a Tabela 3-1 contém os dados utilizados para caracterização dos mesmos nas simulações. Assim como feito com as variáveis anteriores, buscou-se utilizar uma escala de valores que contém um valor próximo do extremo máximo, um valor próximo do extremo mínimo e um valor que pode ser considerado médio. No caso dos vidros, esses valores referem-se particularmente aos índices de transmissão (luminosa e total). As especificações se referem a vidros com espessura de 5mm. A nomenclatura considera a ordem crescente de transmissão (luminosa e solar).

Tabela 3-1 - Características óticas para ângulo de incidência normal (0°). Fonte: Caram (2002, p. 130-135)

Material	Reflexão (%)				Transmissão (%)			
	UV	Vis	IV	Total	UV	Vis	IV	Total
	300 a 380nm	380 a 780nm	780 a 2000nm	300 a 2000nm	300 a 380nm	380 a 780nm	780 a 2000nm	300 a 2000nm
Vidro refletivo a vácuo prata médio – v1	40	33	31	32	8	14	9	12
Vidro comum cinza – v2	6	7	7	7	21	51	48	49
Vidro comum incolor – v3	9	10	9	10	63	86	75	81

Quanto aos tipos de acionamento do *brise* analisados, foram consideradas situações estáticas e dinâmicas, conforme a Figura 3-17 a seguir.

Figura 3-17 – Secções esquemáticas dos tipos de acionamento estudados

Todos os valores assumidos para cada uma das variáveis estudadas estão reunidos na Tabela 3-2 e ilustrados na Tabela 3-3 e na Tabela 3-4. As combinações resultaram num total de 63 cenários/possibilidades de abertura para cada orientação.

Tabela 3-2 – Matriz dos cenários estudados, com a respectiva nomenclatura utilizada

Acionamento		Vidro	PAF	Ângulo de sombreamento	Nomenclatura
Estáticos	SEM BRISE	v1	a25	s90	Av1a25s90
			a50	s90	Av1a50s90
			a75	s90	Av1a75s90
		v2	a25	s90	Av2a25s90
			a50	s90	Av2a50s90
			a75	s90	Av2a75s90
		v3	a25	s90	Av3a25s90
			a50	s90	Av3a50s90
			a75	s90	Av3a75s90
	FIXO	v1	a25	s30	Bv1a25s30
				s60	Bv1a25s60
			a50	s30	Bv1a50s30
				s60	Bv1a50s60
			a75	s30	Bv1a75s30
				s60	Bv1a75s60
		v2	a25	s30	Bv2a25s30
				s60	Bv2a25s60
			a50	s30	Bv2a50s30
				s60	Bv2a50s60
			a75	s30	Bv2a75s30
				s60	Bv2a75s60
		v3	a25	s30	Bv3a25s30
				s60	Bv3a25s60
			a50	s30	Bv3a50s30
				s60	Bv3a50s60
			a75	s30	Bv3a75s30
				s60	Bv3a75s60
Dinâmicos	OFF-HO	v1	a25	s30	Cv1a25s30
				s60	Cv1a25s60
			a50	s30	Cv1a50s30
				s60	Cv1a50s60
			a75	s30	Cv1a75s30
				s60	Cv1a75s60
		v2	a25	s30	Cv2a25s30
				s60	Cv2a25s60
			a50	s30	Cv2a50s30
				s60	Cv2a50s60
			a75	s30	Cv2a75s30
				s60	Cv2a75s60
		v3	a25	s30	Cv3a25s30
				s60	Cv3a25s60
			a50	s30	Cv3a50s30
				s60	Cv3a50s60
			a75	s30	Cv3a75s30
				s60	Cv3a75s60
	HO-IN	v1	a25	s30	Dv1a25s30
				s60	Dv1a25s60
			a50	s30	Dv1a50s30
				s60	Dv1a50s60
			a75	s30	Dv1a75s30
				s60	Dv1a75s60
		v2	a25	s30	Dv2a25s30
				s60	Dv2a25s60
			a50	s30	Dv2a50s30
				s60	Dv2a50s60
			a75	s30	Dv2a75s30
				s60	Dv2a75s60
		v3	a25	s30	Dv3a25s30
				s60	Dv3a25s60
			a50	s30	Dv3a50s30
				s60	Dv3a50s60
			a75	s30	Dv3a75s30
				s60	Dv3a75s60

Tabela 3-3 – Cenários estáticos

v1a25s30		v2a25s30		v3a25s30
v1a25s60		v2a25s60		v3a25s60
v1a25s90		v2a25s90		v3a25s90
v1a50s30		v2a50s30		v3a50s30
v1a50s60		v2a50s60		v3a50s60
v1a50s90		v2a50s90		v3a50s90
v1a75s30		v2a75s30		v3a75s30
v1a75s60		v2a75s60		v3a75s60
v1a75s90		v2a75s90		v3a75s90

Tabela 3-4 – Cenários dinâmicos – situação com *brise* inclinado

v1a25s30		v2a25s30		v3a25s30
v1a25s60		v2a25s60		v3a25s60
v1a50s30		v2a50s30		v3a50s30
v1a50s60		v2a50s60		v3a50s60
v1a75s30		v2a75s30		v3a75s30
v1a75s60		v2a75s60		v3a75s60

Nota-se, portanto, que a nomenclatura utilizada para os cenários apresenta sempre as letras representativas das variáveis de projeto seguidas pelo valor ao qual aquele cenário corresponde, de forma que, por exemplo, o cenário v2a50s60 representa a situação com o vidro do tipo 02 (cinza), percentual de área de abertura igual a 50% e ângulo de sombreamento igual a 60°. Os cenários apresentados foram representados em modelos computacionais e tiveram seu desempenho simulado conforme as descrições a seguir.

3.6 Simulações

As principais ferramentas computacionais utilizadas nesta pesquisa para obtenção dos dados de desempenho das aberturas foram os programas *Daysim* (REINHART, 2013) e *EnergyPlus* (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2013). Os programas computacionais foram escolhidos, inicialmente, por serem constantemente validados na área de estudo desta pesquisa e por possuírem licença livre.

O *EnergyPlus* possui como principais pontos fortes a simulação integrada e os tutoriais e documentação bastante detalhados. A inserção pouco intuitiva dos dados do modelo geométrico da edificação é o principal ponto fraco do programa quando é utilizado no âmbito de projeto arquitetônico. Já o *Daysim* tem como pontos fortes a utilização de um modelo comportamental do usuário baseado em pesquisas de campo e os tipos de dados de saída (condizentes com o estado-da-arte na área de iluminação natural), e como principal ponto fraco o fato de que a versão que possui interface gráfica deixou de ser documentada e atualizada (é uma versão *legacy*).

Tanto o *Daysim* quanto o *EnergyPlus* permitem o detalhamento das características da janela, sendo sensíveis às propriedades de transmissão pelo vidro e refletância e geometria das aletas, de maneira suficientemente detalhada para pesquisas na escala de componentes da edificação. Além disso, apresentam a possibilidade de fazer simulações anuais que considerem condições dinâmicas de céu e clima. Por fim, permitem também variação dinâmica do *status* do *brise*.

3.6.1 Características das ferramentas computacionais utilizadas

O *Daysim* é uma ferramenta desenvolvida pelo Conselho Nacional de Pesquisas do Canadá (*National Research Council Canada*) e pelo Instituto *Fraunhofer* para Sistemas de Energia Solar (*Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*), na Alemanha. Utiliza o algoritmo do programa *Radiance* (método do raio traçado¹⁶) junto com o método dos coeficientes de luz natural¹⁷ para simular condições de iluminância e luminância considerando a variação das condições de céu ao longo de um ano (REINHART, 2010, p.29).

Seu uso possibilita, portanto, gerar perfis anuais de iluminâncias e luminâncias, com medidas dinâmicas (que consideram as variações horárias, diárias e sazonais das condições de céu). Além disso, possui integrado no seu formato um modelo de comportamento do usuário, o *Lightswitch* (REINHART, 2004), que gera um relatório com relação aos horários e formas de acionamento de lâmpadas e dos dispositivos de sombreamento, em função da disponibilidade da luz natural. Esse relatório pode ser extraído em formato *.csv* para utilização em outros programas. Para o desenvolvimento da pesquisa, foi utilizada a versão 3.1, que

¹⁶ Método do raio traçado (para trás): consiste em traçar o caminho percorrido pelo raio de luz do ponto medido até a fonte. O cálculo pode ser dividido em três partes principais: componente direta, componente indireta especular e componente indireta difusa (RADSITE, 2015).

¹⁷ Descrito por Tregenza e Waters (1983). Utilizado para calcular iluminâncias devido a diferentes condições de céu. Baseia-se na divisão teórica do céu em “pedaços”, relacionando a iluminância no ponto do ambiente com a luminância de cada “pedaço”. Uma vez obtidos os coeficientes, basta conhecer as diferentes distribuições de luminâncias para se obter as iluminâncias internas.

possui uma interface gráfica. O *Daysim* utiliza pelo menos quatro executáveis principais, brevemente descritos a seguir:

- O *gen_directsunlight* gera dados de radiação solar direta para efeito de ofuscamento na localização dos sensores, para o ano todo com base no arquivo climático. O arquivo gerado (*.dir*) pode ser usado posteriormente na simulação para determinar o *status* do protetor solar;
- O *gen_dc* gera os coeficientes de luz natural direta e difusa. É alimentado por uma versão modificada do *rtrace* (do programa *Radiance*), que calcula diversos coeficientes de luz natural ao mesmo tempo utilizando o método do raio traçado. É a parte da simulação que requer mais tempo.
- O *ds_illum* combina os coeficientes de luz natural gerados (*.dc*) com os dados de radiação solar do arquivo climático, para gerar as iluminâncias nos sensores em todos os intervalos de tempo simulados, utilizando o modelo de céu de Perez (PEREZ; SEALS; MICHALSKY, 1993) para definir as distribuições de luminâncias do céu. Gera um arquivo (*.ill*) para cada situação do protetor solar;
- O *ds_el_lighting*, pós-processamento, gera os dados dos indicadores de desempenho (iluminância útil, autonomia de luz natural etc., em arquivos de extensão *.DA*), bem como os perfis de acionamento das lâmpadas e protetores solares (*.csv*) e um relatório dos resultados (*.html*). O acionamento e modificação do estado das lâmpadas e protetores pode ser automático (com base apenas em *setpoints* definidos) ou pelo usuário (com base nos *setpoints* e no perfil de usuário – ativo ou passivo), opção na qual o programa utiliza o modelo comportamental *LightSwitch* mencionado.

O *EnergyPlus* é um programa computacional de análise térmica e energética, do Departamento de Energia dos Estados Unidos (U. S. Department of Energy). Com base nos dados de entrada, calcula as cargas térmicas de aquecimento e/ou resfriamento para se atingir valores de referência que podem ser alterados pelo usuário (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012-1, p.1). Considera os fluxos energéticos entre pessoas, edificação e meio externo, além da ventilação natural e sistemas de iluminação e condicionamento artificial, por meio de balanço térmico.

Originado dos programas BLAST e DOE-2, possui como importante desenvolvimento em relação aos mesmos uma estrutura modular (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012-1, p.3), que permite a acoplagem de diferentes módulos de simulação. Além disso, o *EnergyPlus*

trabalha com simulação de forma integrada (e não sequencial como seus predecessores), de maneira que as zonas térmicas (superfícies e ar que trocam calor), os equipamentos (de refrigeração, aquecimento, iluminação, ventiladores etc.) e as instalações (de energia elétrica, por exemplo) são resolvidos simultaneamente e com troca de dados entre eles, por meio de um gerenciador de simulação integrada (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012-2, p.6).

Os módulos representam três grupos de fatores, citados a seguir:

- Para trocas de calor entre superfícies: sombreamento, vidros, iluminação natural, dentre outros;
- Para trocas de calor por meio do ar, o módulo *AirflowNetwork*, que permite a simulação de ventilação natural entre zonas;
- Representação dos sistemas da edificação: circuitos de fluidos de equipamentos de ventilação e refrigeração, circuito de instalações, placas fotovoltaicas, dentre outros.

Além dos módulos principais, há os programas auxiliares, tais como os citados a seguir (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012-3, p.1):

- *IDF Editor*: permite editar o arquivo de entrada;
- *ParametricPreprocessor*: permite gerar séries de arquivos de entrada com base em expressões paramétricas;
- *EPDraw*: Gera arquivos do tipo .dxf, de visualização dos modelos geométricos definidos nos dados de entrada.

O programa possui inúmeros dados de saída e de entrada possíveis e é extensivamente documentado¹⁸, reconhecido e validado, além de possuir código de acesso livre, em linguagem FORTRAN e, na versão atual (8.1), linguagem C++.

Considerando os aspectos apresentados, esses programas definidos atendem às necessidades da pesquisa, especialmente quanto à possibilidade de complementação direta entre as duas simulações, pois o arquivo de dados de acionamento das lâmpadas em função da disponibilidade de luz natural obtida no *Daysim* pode ser utilizado como arquivo de entrada da simulação do *EnergyPlus* para cálculo do consumo de energia desse sistema. A seguir, serão descritos os dados de entrada inseridos nos dois programas.

3.6.2 Configurações do modelo no Daysim

O Quadro 3-3 a seguir relaciona dados de entrada e de saída do programa Daysim.

¹⁸ Uma pasta de arquivos digitais chamada *Documentation* acompanha o programa, com dados e manuais para diferentes finalidades e públicos.

Arquivos de entrada brutos	Arquivos de entrada do Daysim	Arquivos de saída brutos	Arquivos de saída do Daysim
<ul style="list-style-type: none"> • Modelo 3D (.obj, .dxf, .3ds, ...) • Arquivo climático (.epw) 	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo da cena (.rad) • Arquivo dos pontos/sensores (.pts) • Arquivo do ponto de visualização (.vf) • Arquivo climático (.wea) 	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil de ofuscamento (.dir) • Coeficientes de luz natural (.dc) • Perfis anuais de iluminância (.ill) • Probabilidade de ofuscamento (.dgp) 	<ul style="list-style-type: none"> • Métricas (.DA) • Ganhos internos (.csv) • Relatório (.htm)

Quadro 3-3 - Arquivos de entrada e saída no *Daysim*

Fonte: Adaptado de Reinhart (2015)

Observa-se que o uso do programa requer dois arquivos de entrada brutos, indispensáveis para se iniciar uma simulação, os quais são um arquivo contendo o modelo geométrico do ambiente e um arquivo contendo dados climáticos da localidade a ser considerada.

Os mesmos servem de base para gerar quatro tipos de arquivos de entrada principais, que são, conforme apresentado no Quadro 3-3, o arquivos da cena, que deve estar em extensão adequada para o *Radiance* (.rad), o arquivo dos pontos/sensores de medição (.pts), o arquivo com o ponto de referência para visualização da sala (.vf) e o arquivo climático (.wea). Na versão utilizada, os arquivos da cena são divididos em dois arquivos: o da geometria e o dos materiais.

A criação dos arquivos de entrada pode ser feita de três formas. A primeira seria diretamente preenchendo os arquivos de texto. A segunda seria gerando os mesmos a partir da interface gráfica (que utiliza os subprogramas *radfiles2daysim* e *epw2wea* para escrever os dados no formato utilizado pelo Daysim). Por fim, há a opção de simular diretamente os subprogramas com os dados de entrada brutos, pois todos os executáveis são disponibilizados na página do programa na web (<<http://daysim.ning.com/>>), de forma livre, na sua versão 4.0. Nesta pesquisa, foram utilizadas a primeira e a segunda opção.

Os modelos tridimensionais das diferentes condições analisadas foram elaborados utilizando o programa *SketchUp* (GOOGLE, 2010). Utilizando um *plug-in* chamado *su2ds* (disponível *on-line* através do *Google Project Hosting*), foi gerada a descrição dos materiais compatível com o *Daysim* e exportados os arquivos em extensão .3ds. A interface do *Daysim* permite importar esse arquivo e convertê-lo para dois arquivos de extensão .rad, que, como dito anteriormente, contém os dados da geometria e dos materiais do modelo. O arquivo da geometria está associado ao dos materiais, contendo as coordenadas dos polígonos

correspondentes a cada nome descritivo de um material específico. Nesta pesquisa, esse arquivo varia para cada simulação realizada.

A seguir, o Quadro 3-4 apresenta um exemplo do arquivo de materiais utilizado. Os parâmetros para os tipos de material (transparentes e opacos, sem fonte de luz artificial) são os mesmos do programa *Radiance*. Devem ser observadas as diferenças no tratamento dos materiais entre o *Radiance* e o *Daysim*, que para a descrição precisa dos materiais.

```
void plastic GenIntWa 0 0 5 0.6000 0.6000 0.6000 0.0000 0.0000
void glass GenericS 0 0 3 0.1400 0.1400 0.1400
void plastic GenIntCe 0 0 5 0.7500 0.7500 0.7500 0.0000 0.0000
void plastic GenIntFl 0 0 5 0.3000 0.3000 0.3000 0.0000 0.0000
void plastic OutsideF 0 0 5 0.5000 0.5000 0.5000 0.0000 0.0000
```

Quadro 3-4 – Texto de um arquivo de materiais (cenário Av1a25s30)

Como o arquivos da cena (*.rad*) foram semelhantes para grupos de simulação, uma vez gerados os arquivos definitivos, não foi utilizado mais o *SketchUp* nem as demais etapas, apenas foram alterados os materiais necessários diretamente no arquivo de *.rad*, que possui o conteúdo de texto.

As condições de céu simuladas têm como base o arquivo climático correspondente à localidade analisada. O arquivo utilizado consiste em um ano climático de referência com base em dados do período de 1962 a 2005 (LABEEE, 2013), em extensão *.epw*. Um resumo do mesmo encontra-se no ANEXO A. O arquivo é convertido, pelo próprio *Daysim*, para a extensão *.wea*, através da chamada ao executável *ds_shortterm*, tendo as informações reduzidas aos intervalos de tempo desejados e definidos na interface.

Quanto aos pontos/sensores onde são medidos os dados pelo programa, a Tabela 3-5 contém a descrição dos arquivos utilizados, mostrando as coordenadas dos pontos. Os modelos dos ambientes foram girados para se obter a orientação desejada e os pontos correspondem ao ambiente onde as iluminâncias foram medidas. A malha de pontos analisada é condizente com o cálculo da NBR 15215-4 (ABNT, 2005-a), para medição experimental da luz natural, que é igual a 16 (no caso da janela média ou grande) ou 25 (no caso da janela pequena) para um ambiente com as dimensões do modelo utilizado.

As refletâncias definidas para as superfícies internas correspondem a piso de cor média e paredes e teto em cor clara (sendo o teto mais próximo do branco), características que são recorrentes na tipologia de ambiente analisada. As cores de tintas que seriam equivalentes

às utilizadas e citadas no Quadro 3-4 podem ser ilustradas com base nos valores obtidos por Dornelles e Roriz (2007, p.120), disponíveis no ANEXO B.

Tabela 3-5 – Texto dos arquivos dos pontos/sensores

Norte				Oeste			
x	y	z	Face	x	y	z	Face
4.5	13.5	0.85	0 0 1	0.5	-0.50	0.85	0 0 1
4.5	12.5	0.85	0 0 1	1.5	-0.50	0.85	0 0 1
4.5	11.5	0.85	0 0 1	2.5	-0.50	0.85	0 0 1
4.5	10.5	0.85	0 0 1	3.5	-0.50	0.85	0 0 1
4.5	9.5	0.85	0 0 1	4.5	-0.50	0.85	0 0 1
4.5	8.5	0.85	0 0 1	5.5	-0.50	0.85	0 0 1
3.5	13.5	0.85	0 0 1	0.5	-1.50	0.85	0 0 1
3.5	12.5	0.85	0 0 1	1.5	-1.50	0.85	0 0 1
3.5	11.5	0.85	0 0 1	2.5	-1.50	0.85	0 0 1
3.5	10.5	0.85	0 0 1	3.5	-1.50	0.85	0 0 1
3.5	9.5	0.85	0 0 1	4.5	-1.50	0.85	0 0 1
3.5	8.5	0.85	0 0 1	5.5	-1.50	0.85	0 0 1
2.5	13.5	0.85	0 0 1	0.5	-2.50	0.85	0 0 1
2.5	12.5	0.85	0 0 1	1.5	-2.50	0.85	0 0 1
2.5	11.5	0.85	0 0 1	2.5	-2.50	0.85	0 0 1
2.5	10.5	0.85	0 0 1	3.5	-2.50	0.85	0 0 1
2.5	9.5	0.85	0 0 1	4.5	-2.50	0.85	0 0 1
2.5	8.5	0.85	0 0 1	5.5	-2.50	0.85	0 0 1
1.5	13.5	0.85	0 0 1	0.5	-3.50	0.85	0 0 1
1.5	12.5	0.85	0 0 1	1.5	-3.50	0.85	0 0 1
1.5	11.5	0.85	0 0 1	2.5	-3.50	0.85	0 0 1
1.5	10.5	0.85	0 0 1	3.5	-3.50	0.85	0 0 1
1.5	9.5	0.85	0 0 1	4.5	-3.50	0.85	0 0 1
1.5	8.5	0.85	0 0 1	5.5	-3.50	0.85	0 0 1
0.5	13.5	0.85	0 0 1	0.5	-4.50	0.85	0 0 1
0.5	12.5	0.85	0 0 1	1.5	-4.50	0.85	0 0 1
0.5	11.5	0.85	0 0 1	2.5	-4.50	0.85	0 0 1
0.5	10.5	0.85	0 0 1	3.5	-4.50	0.85	0 0 1
0.5	9.5	0.85	0 0 1	4.5	-4.50	0.85	0 0 1
0.5	8.5	0.85	0 0 1	5.5	-4.50	0.85	0 0 1

Onde: x= coordenada de largura; y=coordenada de profundidade; z= coordenada de altura; Face: 001=para cima

Ainda com relação à cena, a simulação engloba diferentes parâmetros que são exigidos no *Radiance*, tais como precisão e número de interreflexões. Os valores utilizados foram os recomendados no manual do *Daysim* (REINHART, 2010), indicado para análises que possuem protetores solares e identificado na interface como “complexidade 2”.

Os demais parâmetros (período ocupado, controle das lâmpadas e dos *brises*, comportamento do usuário e escolha dos pontos que são sensores do sistema de iluminação) fazem parte do pós-processamento, no grupo de dados de entrada que aparece com o nome *Analysis information* na interface do programa. O valor de referência da radiação solar no plano de trabalho definido para acionamento e mudança de estado do *brise* é igual a 50W/m², pré-definido no programa.

Todos os dados de entrada e parâmetros da simulação são escritos em um arquivo chamado *header file*, de extensão *.hea* e conteúdo ASCII¹⁹.

Os principais dados de entrada e parâmetros inseridos no *Daysim* estão resumidos no Quadro 3-5. Um exemplo de um *header file* completo pode ser encontrado no APÊNDICE A.

Arquivo climático	Correspondente à cidade de Maceió-AL
Plano de trabalho	0,85m do piso
Pontos de medição	Malha ortogonal de 30 pontos
Refletâncias	piso=0,3, teto=0,75, paredes=0,6, brises=0,5
Modelo do brise	Acionado e estático;
	Dinâmico com 2 situações: Não acionado e acionado
	Dinâmico com 2 situações: Ativo com aletas horizontais e ativo aletas inclinadas
Complexidade da cena	Complexidade 2 = ab 7; ad 1500; as 100; ar 300; aa 0,1; lr 6; st 0,15; sj 1,00; lw 0,004; dj 0,00; ds 0,20; dr 2; dp 512
Período simulado	Ano todo
Ocupação	8h às 18h, com intervalo no almoço (1h) e dois intervalos de 30min (um de manhã e um à tarde) – Rotina gerada pelo programa
Iluminância mínima a ser mantida*	500lx
Comportamento do usuário	Opção <i>Equal mix of active and passive behavior</i>
Controle do brise	Estático – sempre acionado ou sempre desativado; Dinâmico – acionado ou alterado se radiação solar acima de 50W/m ²
Controle das lâmpadas	Manual <i>on/off</i> próximo à porta
Sensores p/ acionamento dos controles	Em todos os pontos

Quadro 3-5 – Resumo das configurações fixas dos modelos no *Daysim*

Os dados de saída consistem em arquivos *.html* (relatório dos principais resultados), que apresenta dados tratados e informações sobre a simulação e o arquivo *.csv* com o perfil de acionamento das lâmpadas e protetores solares. Conforme descrito anteriormente, os resultados brutos são encontrados em arquivos *.DA*, *.ill* e *.dc*. Nesta pesquisa, foram utilizados o relatório *.html* e o arquivo *.csv*.

3.6.3 Configurações do modelo no *EnergyPlus*

O esquema básico de entrada e saída de dados no *EnergyPlus* está indicado na Figura 3-18. O arquivo IDD (*Input Data Dictionary*) contém a lista de todos os objetos possíveis do programa e as especificações que eles exigem. O arquivo IDF (*Input Data File*) contém os dados do modelo da edificação e sistemas a serem simulados. É dividido em grupos, classes,

¹⁹ Do Inglês: *American Standard Code for Information Interchange*

objetos e campos. O arquivo EPW (*EnergyPlus weather file*) contém os dados climáticos horários e subhorários. Como dados de saída, é possível obter relatórios em formato de planilha e página da *web*, bem como é possível visualizar os erros que porventura ocorreram.

Figura 3-18 – Esquema simplificado de entrada e saída de dados no *EnergyPlus*

Fonte: U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (2012-1, pp.23-24; 2012-5, p.1)

A criação e edição do arquivo de entrada pode ser feita por quatro meios (U.S. ENERGY DEPARTMENT, 2012-3, p.207):

- Utilizando o programa auxiliar *IDFeditor*;
- Programa auxiliar *BLAST Translator* - conversor de arquivos do BLAST;
- Programa auxiliar *DOE-2 Translator* - conversor de arquivos do DOE-2;
- Edição manual de um arquivo existente - do tipo ASCII.

Esta pesquisa utilizou o primeiro e o último método. O Quadro 3-6 contém os principais dados inseridos para configuração do modelo simulado no *EnergyPlus*.

O arquivo climático utilizado é o mesmo utilizado nas simulações da iluminação natural. Já a definição das paredes e lajes simuladas segue a caracterização dos edifícios apresentada na seção 3.1.3 e as propriedades térmicas descritas na Tabela 3-6.

Tais propriedades foram extraídas do documento (ORDENES *et al.*, 2003) a partir do qual foi gerada a biblioteca do programa *VisualDOE*, utilizando o cálculo do componente equivalente, segundo o qual os diferentes materiais de um componente são compilados em camadas homogêneas. Para se inserir, por exemplo, dados de um tijolo furado e com reboco, são utilizados os dados de um componente com cinco camadas compactas (reboco, cerâmica, ar, cerâmica e reboco), na classe de objetos *Construction* (APÊNDICE B), do *EnergyPlus*.

A parede gerada equivale a um sistema com transmitância térmica de $2,48\text{W/m}^2\text{K}$, conforme a “Tabela D.3” da NBR 15220-3 (ABNT, 2005-c). Os elementos de vedação opaca que não contém janelas foram considerados adiabáticos, simulando, portanto, uma situação de adjacência entre ambientes de um edifício, com trocas de calor nulas entre os mesmos.

Arquivo climático	Correspondente à cidade de Maceió-AL
Padrões Construtivos	
Paredes e lajes	Paredes com janela: Bloco cerâmico com seis furos de seção quadrada + argamassa branca; Demais paredes, piso e teto: adiabáticas
Material dos brises	<i>Aluzinc</i> - condutividade = 176,9W/m.K no objeto <i>WindowMaterial:Blind</i>
Padrões de uso e ocupação	
Horários ocupados	8h às 18h, de segunda à sexta; 8h às 12h, aos sábados.
Ocupantes	4 pessoas; vestimenta de 0,8clo no inverno e 0,5clo no verão
Atividade	120W/pessoa
Equipamentos	16W/m ²
Iluminação artificial	10W/m ²
HVAC	
Ventilação natural	Módulo <i>AirflowNetwork:Multizone</i>
	Janelas não-pivotantes, com três <i>status</i> de abertura na direção horizontal (totalmente fechada, 50% aberta e 100% aberta)
	Acionada quando temperatura do ar $\geq 22^{\circ}\text{C}$
Condicionamento do ar	Classe de objetos <i>IdealLoadsAirSystem</i> , ativo em todo o período ocupado
Termostato	Temperatura do ar = 25°C
Taxa de infiltração	1 ren/h

Quadro 3-6 – Principais configurações fixas dos modelos no *EnergyPlus*Tabela 3-6 – Propriedades térmicas dos materiais inseridos como dados de entrada da simulação no *EnergyPlus*

	Espessura equivalente (cm)	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade equivalente (kg/m³)	Calor específico (kJ/kg.K)	Resistência térmica (m².K/W)	Absortância
Argamassa de reboco (2,5cm)	2,5	1,15	2000	1,00	0,022	0,3
Câmara de ar (2-5cm)	-	-	-	-	0,160	-
Ceram Tijolo 6 furos quadrados (9cm)	1,4	0,90	2290	0,92	0,016	0,725
Laje mista (12cm)¹	9,5	1,05	1087	0,92	0,090	0,725
Argamassa de emboço (2,5cm)	2,5	1,15	2000	1,00	0,022	0,3
Piso cerâmico (10mm)	1,0	0,90	1600	0,92	0,011	0,6
Madeira	-	0,135	450	2,3	-	0,5

Fontes: ORDENES *et al.*, 2003 e ABNT (2005-b, pp.12 e 15)1-“A espessura e densidade consideradas na laje mista são valores equivalentes calculados para um material cerâmico” (Ordenes *et al.*, 2003, p.13)

Os valores de absorvência solar foram extraídos da “Tabela B.2” da norma 15220-2 (ABNT, 2005-b, p.12). Os dados de madeira compensada das duas portas do modelo foram conforme os dados constantes na “Tabela B.3” da norma citada (p.15).

Foram considerados dispositivos de proteção solar externos, feitos de *aluzinc*, um material composto de alumínio (55%), zinco (43,4%) e silicone (1,6%), utilizado no setor de fabricação de *brises* (mais detalhes no ANEXO C).

Eles foram descritos utilizando o objeto *WindowMaterial:Blind* (exemplo no APÊNDICE B), que é indicado na documentação do programa para quando se trata de dispositivos de sombreamento compostos por aletas paralelas. O objeto permite descrever as propriedades de aletas planas igualmente espaçadas entre si, com transmissão e reflexão (visível e solar) dependentes do ângulo de incidência da radiação solar e do ângulo das mesmas (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012-4, pp.106 e 110). Com relação ao acionamento do *brise*, as condições Fixo, *Off-Ho* e *Ho-In* foram definidas na classe de objetos *WindowProperty:ShadingControl*, conforme os exemplos especificados na Tabela 3-7, a seguir, reproduzidos de cenários simulados.

Tabela 3-7 – Dados inseridos na classe *WindowProperty:ShadingControl* do *IDFEditor*, para três condições de acionamento do *brise*

		Brise fixo	Brise Off_Ho	Brise Ho_In
<i>Field</i>	<i>Units</i>	<i>Obj1</i>	<i>Obj1</i>	<i>Obj1</i>
<i>Name</i>		<i>Brise</i>	<i>Brise</i>	<i>Brise</i>
<i>Shading Type</i>		<i>ExteriorBlind</i>	<i>ExteriorBlind</i>	<i>ExteriorBlind</i>
<i>Construction with Shading Name</i>				
<i>Shading Control Type</i>		<i>\$ShadingControlType</i>	<i>OnIfScheduleAllows</i>	<i>AlwaysOn</i>
<i>Schedule Name</i>			<i>Sch_Shad_Off_Ho</i>	
<i>Setpoint</i>	<i>W/m², W or deg</i>			
<i>Shading Control Is Scheduled</i>		<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>
<i>Glare Control is Active</i>		<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>
<i>Shading Device Material Name</i>		<i>=\$Brise</i>	<i>=\$Brise</i>	<i>=\$Brise</i>
<i>Type of Slat Angle Control for Blinds</i>		<i>FixedSlatAngle</i>	<i>FixedSlatAngle</i>	<i>ScheduledSlatAngle</i>
<i>Slat Angle Schedule Name</i>				<i>Sch_Shad</i>
<i>Setpoint 2</i>	<i>W/m² or degC</i>			

Quanto às configurações de uso e ocupação, foi definido o horário de funcionamento correspondente a uma jornada de trabalho de 8h às 18h, de segunda a sexta-feira, e de 8h às 12h, aos sábados, utilizando os objetos da classe *Schedules*. Foi considerada uma densidade de ocupação média. Por média entende-se uma ocupação equivalente a 14 pessoas por 100m², conforme a classificação da “Tabela 1” da norma NBR16401 – Parte 3 (ABNT, 2008-b, p.5). A vestimenta dos ocupantes foi diferenciada para inverno e verão (0,8clo e 0,5clo, respectivamente).

A atividade definida para os ocupantes foi um trabalho de escritório leve, utilizando-se uma taxa metabólica de 120W/pessoa²⁰. Quanto aos equipamentos, a densidade de carga utilizada foi 16W/m², considerando que o ambiente possuiria de 3 a 4 computadores e uma impressora/fax. Segundo a “Tabela C.6” da NBR16401 – Parte 1 (2008-a, p.56), o valor equivale a uma densidade de carga de equipamentos média-alta.

Considerou-se um sistema de lâmpadas para atender à iluminância mínima de 500lx em complementação à iluminação natural, com densidade de potência instalada 10W/m², suficiente para se obter um nível de eficiência igual a B segundo a classificação do RTQ-C (BRASIL, 2010), que é de, no máximo, 11,2 W/m² (tabela no ANEXO D).

A respeito da ventilação natural pelas aberturas, foram consideradas aberturas não pivotantes e com três *status* de abertura (totalmente fechada, parcialmente fechada e totalmente aberta), dimensionadas em objetos do módulo *AirflowNetwork* do EnergyPlus.

Quanto ao sistema de condicionamento do ar, a saída *IdealLoadsAirSystem* do programa permite calcular a carga térmica total a ser removida pelo sistema de condicionamento do ar, sem a necessidade de detalhar o tipo deste sistema de ar condicionado. Seria o equivalente a um sistema ideal e hipotético, sem consumo de energia.

Para o cálculo do consumo de energia, o valor obtido para a carga térmica foi dividido por um Coeficiente de Performance²¹ (COP) determinado. De forma semelhante ao feito com o sistema de iluminação, foi identificado o valor do COP mínimo do sistema para se obter a etiqueta de eficiência energética com classificação A ou B. Utilizando os dados de saída de nome *Ideal Loads Zone Total Cooling Rate*, foi estimada a capacidade térmica mínima para o sistema de condicionamento do ar. Nas condições analisadas, o valor seria inferior a 19kW (aprox. 64.800Btu/h), de forma que o COP mínimo para se obter o referido nível de eficiência

²⁰ Valor utilizado em *template* do programa computacional *DesignBuilder*, indicado neste como sendo derivado do *Ashrae Book of Fundamentals* (Tabela 05, Capítulo 8), equivalente a um trabalho de escritório leve, de um homem adulto com superfície de 1,8m².

²¹ “Para resfriamento: segundo a norma ASHRAE 90.1, [COP] é a razão entre o calor removido do ambiente e a energia consumida, para um sistema completo de refrigeração ou uma porção específica deste sistema sob condições operacionais projetadas” (BRASIL, 2010, p. 6).

seria igual a 3,5, conforme a Tabela 5.4 do RTQ-C (BRASIL, 2010), disponível no ANEXO E. Por fim, o controle de temperatura foi feito considerando-se a temperatura do ar interno, estabelecendo-se 25° como fixa, valor que representa a média da temperatura neutra mensal de Maceió (valores no APÊNDICE C), pela fórmula de Auliciems (1983).

A Figura 3-19 apresenta uma tela de visualização de classes que contém objetos em um dos arquivos utilizados para simulação energética, referente aos cenários estáticos na orientação Norte.

Figura 3-19 – Tela de visualização de todas as classes com objetos ativos em um arquivo IDF utilizado

3.6.4 Rotinas da simulação integrada

A seguir, são destacados os principais passos das simulações realizadas. A descrição não considera as simulações-teste e as repetições de procedimentos, referindo-se aos

procedimentos definitivos e que originaram os resultados que serão apresentados. Foi utilizado um computador com processador Intel® i7 e memória RAM de 8GB.

1. Primeiramente, foram realizados os processamentos em cada um dos programas:
 - a. Processamento no *Daysim* – utilizando pacotes de arquivos (*Batch*) – denominação progressiva iniciando em 1;
 - b. Processamento no *EnergyPlus*, utilizando o arquivo de final *intgain.csv* (resultante da simulação no *Daysim*) como entrada no objeto *Lighting Schedule*;
2. Em seguida, foram extraídos os resultados da iluminação natural:
 - c. Conversão do relatório *.html* em planilhas (*.xlsx*) com os dados dos indicadores de desempenho (*Daylight autonomy*, *UDI₀₋₁₀₀*, *UDI₁₀₀₋₅₀₀* e *UDI₂₀₀₀*);
 - Operações para obter os resultados referentes ao intervalo de iluminâncias entre 500 e 2000lx;
 - d. Utilização de código em linguagem MATLAB para ler os resultados e transcrevê-los em tabelas *.xlsx* correspondentes a cada cenário, a partir das quais foram gerados os gráficos.
3. Por fim, foram extraídos os resultados do desempenho energético:
 - e. Utilização de código em linguagem MATLAB para:
 - Ler os resultados de energia das colunas *Ideal Loads Total Cooling Energy (J)* e *Zone Lights Total Heat Gain (J)* (carga térmica de resfriamento e devido à iluminação artificial, respectivamente) da zona térmica com a orientação desejada;
 - Operação para converter os resultados em kWh;
 - Para o condicionamento do ar, o valor obtido é dividido pelo coeficiente de performance (3,5);
 - Divisão dos resultados pela área do ambiente (obtendo-se kWh/m²/ano);
 - Transcrever os resultados para tabelas em planilhas (*.xlsx*) correspondentes a cada cenário, onde foram gerados os gráficos.

3.7. Forma de tratamento e análise dos dados

Os dados foram sistematizados e avaliados quanto aos indicadores de desempenho correspondentes aos critérios analisados (iluminação natural e uso de energia).

Os indicadores de iluminação são:

- **Ocorrência de iluminâncias por faixa (%):** tomando como base o conceito de iluminância útil (NABIL; MARDALJEVIC, 2006), foram indicados os percentuais de horas anuais ocupadas em que a iluminância no plano de trabalho estaria: abaixo de 100 lx, entre 100 e 500lx, entre 500 e 2000lx e acima de 2000lx, em gráficos de barras. Isso foi feito para 30 pontos do plano de trabalho, sendo depois calculada a média dos resultados de todos os pontos;

O resultado permitiu analisar o potencial de aproveitamento da luz natural no ambiente de escritório analisado, pela identificação visual dos intervalos de iluminâncias predominantes ao longo do tempo.

- **Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx - $UDI_{500-2000}$ (%):** foi isolado o intervalo entre 500 e 2000lx, permitindo comparar as diferentes alternativas de sistema de janela e verificar o efeito de cada variável de projeto em um indicador isolado, por meio de gráficos de linha.

Essa análise refletiu a condição onde a luz natural como única fonte é suficiente para permitir a realização de tarefas de escritório e considera como desnecessárias e potencialmente causadoras de ofuscamento as iluminâncias acima de 2000lx. Portanto, além do registro das iluminâncias de tarefa, este indicador busca uma referência da possibilidade de evitar ofuscamento por excessos de iluminação.

- **Distribuição da $UDI_{500-2000}$ no plano de trabalho (%):** são apresentados gráficos de superfície com o resultado dos 30 pontos simulados, sendo um ponto para cada $1m^2$.

Esse resultado ofereceu uma visualização da correspondência entre os valores analisados e a região do ambiente a qual o percentual obtido se refere. Os gráficos permitiram ainda analisar quais regiões são mais independentes da iluminação artificial, de modo a indicar, dentre outros aspectos, possibilidades de divisão do ambiente para um projeto do sistema de iluminação artificial. Esse pode considerar, por exemplo, o acionamento parcial das lâmpadas. Nas tabelas de resultados, são ilustradas também as cartas solares referentes aos cenários apresentados, para auxiliar a análise.

Já os indicadores do desempenho energético são:

- **Demanda anual de energia elétrica por uso final ($kWh/m^2/ano$):** os valores extraídos das simulações foram apresentados em gráficos de barra.

Esse resultado permitiu identificar a participação de cada sistema (lâmpadas e condicionamento do ar) no consumo final de energia, para cada uma das diferentes alternativas de sistema de janela.

- **Somatório anual da demanda de energia elétrica para condicionamento do ar e iluminação (kwh/m²/ano):** conforme definição, foi obtido o somatório dos resultados obtidos para os dois usos finais estudados.

De forma semelhante à análise das iluminâncias entre 500 e 2000lx, esse indicador foi utilizado para comparar todos os cenários e discutir o impacto das variáveis de projeto no desempenho, com base em gráficos de linha.

- **Incremento percentual em relação a diferentes bases de referência dentre os resultados:** Utilizando tabelas e gráficos de barras horizontais, foram apresentados os valores de incremento percentual da demanda de energia em relação ao cenário que obteve pior desempenho em cada orientação (aquele com maior valor de demanda de energia), em relação aos cenários sem *brise* e em relação aos cenários com *brise* fixo.

Dessa forma, foi possível graduar os resultados e identificar o potencial comparado de redução da demanda de energia elétrica para condicionamento do ambiente, que é um dos objetivos do projeto de sistemas de janela.

3.7.1 Ordenação e classificação das alternativas projetuais

Esta etapa consiste da escolha das metas de desempenho e posterior classificação e ordenação das alternativas de sistema de janela. Apenas um indicador representativo do desempenho luminoso e um indicador referente ao desempenho energético foram utilizados, definindo uma escala de classificação referente a cada critério.

Com relação à iluminação, uma variação da métrica UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ foi utilizada para definir os casos que se enquadravam em um grupo definido de resultados. Já com relação à demanda de energia, a meta de desempenho consistiu em minimizar somatório de energia para condicionamento e iluminação, principal métrica analisada anteriormente (tendo em vista que as demais eram operações percentuais em função desta). A nomenclatura e especificações dos indicadores finais foram conforme segue:

- **A₅₀₀₋₂₀₀₀ (%)** Percentual da área do ambiente onde o somatório de horas ocupadas com iluminância no plano de trabalho entre 500 e 2000lx é maior que 50% do total de horas anuais ocupadas. Foram somadas as áreas correspondentes aos pontos do plano de trabalho onde o valor de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ foi maior que 50%. Finalmente, essa área foi dividida pela área total do ambiente, resultando em um percentual final, aqui chamado de A₅₀₀₋₂₀₀₀. Esse indicador engloba quatro aspectos diferentes: a distribuição da luz nos diferentes pontos do plano de trabalho, a variação anual dos dados, a prevenção ao ofuscamento e a independência do sistema artificial.

- **E_{cl} (kWh/m²/ano)** A nomenclatura foi atribuída ao somatório da demanda anual de energia para condicionamento do ar e iluminação artificial, extraídos diretamente das simulações. O valor por metro quadrado pode ser utilizado para comparações futuras com ambientes de uso semelhante ao simulado.

Observa-se que a relação entre os indicadores numéricos e o desempenho desejado é inversa, conforme ilustrado no esquema da Figura 3-20 a seguir:

Figura 3-20 – Relação entre os indicadores e o desempenho avaliado

Regra 1 – Classificação e ordenação por faixas

A primeira regra utilizada para agrupar os resultados de forma a oferecer suporte a decisão foi dividi-los em cinco faixas iguais, tendo como extremos o máximo e mínimo valor obtido para os indicadores de desempenho utilizados e explicados anteriormente. Essa classificação permitiu definir uma escala comum para resultados que se enquadram em intervalos absolutos diferentes (conforme o indicador). Ela tem como objetivo comparar o desempenho dos casos entre si, não podendo necessariamente ser considerada para classificar casos diferentes dos analisados. A classificação foi feita para os dois indicadores separadamente e também considerando a operação dos mesmos em uma só classificação.

Tabela 3-8 – Memória de cálculo dos intervalos de classificação

	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5
Iluminação: $A_{500-2000}$ (%)	$A_{500-2000} < \text{Mín.} + 1 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5$	$\text{Mín.} + 1 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5 \leq A_{500-2000} < \text{Mín.} + 2 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5$	$\text{Mín.} + 2 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5 \leq A_{500-2000} < \text{Mín.} + 3 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5$	$\text{Mín.} + 3 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5 \leq A_{500-2000} < \text{Mín.} + 4 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5$	$A_{500-2000} \geq \text{Mín.} + 4 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5$
Energia: E_{cl} (kWh/m ² .ano)	$E_{cl} \geq \text{Mín.} + 4 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5$	$\text{Mín.} + 3 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5 \leq E_{cl} < \text{Mín.} + 4 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5$	$\text{Mín.} + 2 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5 \leq E_{cl} < \text{Mín.} + 3 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5$	$\text{Mín.} + 1 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5 \leq E_{cl} < \text{Mín.} + 2 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5$	$E_{cl} < \text{Mín.} + 1 * (\text{Máx.} - \text{Mín.}) / 5$

Regra 2 – Classificação e enquadramento em uma faixa-alvo

A segunda regra consiste na operação de divisão do resultado de cada alternativa pelo resultado do melhor cenário e, por fim, indicação da distância desse resultado último em relação ao valor 1. Dessa forma, foi possível dividir visualmente todas as alternativas entre as que atendem e não atendem a uma distância determinada do melhor resultado possível nas condições analisadas, permitindo que haja a avaliação dos dois critérios em relação a uma meta comum. Essa classificação também apresenta uma escala comum para indicadores diferentes, mas sempre em função de um dado, o que não permite que o observador identifique de forma direta o intervalo de dados absolutos em que o resultado se encontra.

3.9 Síntese

Com base nas questões apresentadas, o Quadro 3-7 apresenta o resumo dos principais procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa, relacionando-os com os objetivos específicos da mesma:

Objetivos	Etapas	Ações	Produtos	Det. dos produtos
Definir critérios e variáveis de projeto do sistema de janela em localidade de clima quente e úmido	Referencial teórico	Revisão bibliográfica	Delimitação do objeto, dos indicadores de desempenho, do método e das ferramentas da avaliação; Caracterização do modelo do ambiente	PAF Tipo de vidro ...
	Análise de sensibilidade	Simulações-teste	Dados de quantidade de luz natural, temperaturas internas e demanda de energia para iluminação artificial e condicionamento do ar, com aproveitamento da luz e ventilação natural	Gráficos
		“Filtragem” das variáveis e cenários	Correlação linear entre as variáveis e os indicadores de desempenho	
Quantificar o desempenho luminoso e termoenergético integrado dos cenários/alternativas	Avaliação de desempenho das diferentes alternativas	Simulações dos sistemas estáticos (Grupo I) e dos sistemas dinâmicos (Grupo II)	Dados de quantidade e distribuição da luz natural, e de demanda de energia para iluminação artificial e condicionamento do ar, com aproveitamento da luz natural	Gráficos
		Análise comparativa		
Classificar e ordenar as alternativas de solução de projeto	Suporte a decisões de projeto	Definição de indicadores	Visualização de todas as alternativas, classificadas conforme escala única	Quadros e gráficos
		Aplicação da Regra 1 e da Regra 2		

Quadro 3-7 – Resumo esquemático dos procedimentos metodológicos

4. RESULTADOS – ILUMINAÇÃO NATURAL

Os resultados obtidos referentes à iluminação natural no ambiente interno são apresentados e discutidos a seguir.

4.1 Ocorrência de iluminâncias por faixa

O primeiro aspecto a ser observado é a ocorrência dos intervalos de iluminâncias, na Figura 4-1. Todos os valores indicados são a média dos 30 pontos simulados do plano de trabalho. Essa figura permite visualizar a distribuição dos diferentes intervalos de iluminâncias para todos os cenários analisados.

Observa-se que os totais obtidos para os diferentes intervalos avaliados são semelhantes para as duas orientações simuladas. Naturalmente, a disponibilidade de luz é maior conforme se aumenta a área de abertura, a transmissão luminosa do vidro e o ângulo horizontal de sombreamento (reitera-se que se trata do ângulo em relação à normal ao plano da janela, de forma que ângulos menores indicam mais obstrução).

Nota-se que, se por um lado algumas alternativas proporcionariam menor quantidade de luz natural na comparação com outras, por outro isso pode significar melhoria de desempenho, quando há diminuição da ocorrência de iluminâncias acima de 2000lx, aqui consideradas desnecessárias. Nesse sentido, observa-se que, quando o vidro é incolor (v3) ou cinza (v2), alternativas com maior obstrução apresentam maior ocorrência de iluminância útil (entre 100 e 2000lx) do que nas condições com a janela mais exposta, ainda que as primeiras apresentem menos luz no somatório total. Tal comportamento ocorre mesmo quando a abertura analisada é pequena (a25).

Diante desse aspecto, relacionado à disponibilidade de luz na localidade analisada, indica-se a necessidade de estar atento às iluminâncias excessivas, para que não se assuma que um projeto de iluminação que resulte em maior quantidade de luz é sempre desejado.

Por fim, observa-se que o vidro refletivo de cor prata (v1), que possui apenas 12% de transmissão visível, apresenta um desempenho muito pobre quando comparado aos demais vidros simulados, dada a grande ocorrência média de iluminâncias abaixo de 100lx (no cenário v1a25s30, por exemplo, atinge-se mais de 90% de horas anuais com iluminâncias médias nesse intervalo, nos cenários estáticos e com *brise* dinâmico *Ho_In* na orientação Norte). Observa-se que a mudança para o vidro de transmissão média (v2) é suficiente para diminuir significativamente essa ocorrência.

Figura 4-1 - Ocorrência de diferentes faixas de iluminâncias no plano de trabalho (média de 30 pontos)

4.2 UDI₅₀₀₋₂₀₀₀: Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx

A seguir, são apresentados os resultados das simulações referentes ao percentual de horas anuais ocupadas em que a iluminância ficam no intervalo entre 500 e 2000lx (UDI₅₀₀₋₂₀₀₀), obtido a partir da média dos 30 pontos do plano de trabalho. As iluminâncias nesse intervalo constituem a faixa considerada desejável, no contexto da pesquisa que se desenvolve, representando a possibilidade de iluminação do ambiente de escritório tendo a luz natural como única fonte e sem excessos potencialmente causadores de ofuscamento, conforme indicado no Capítulo 3.

Analisa-se primeiramente a Figura 4-2, que apresenta os cenários com a janela orientada a Norte. Observa-se que a escolha adequada do sistema de janela pode permitir a independência do sistema de iluminação artificial em uma média de até 75% das horas anuais ocupadas no ambiente estudado (Figura 4-2e). Por outro lado, esse percentual pode ser muito baixo quando a janela é pequena (a25) combinada com sombreamento (s30) e vidro cinza (v2) ou em todas as condições que combinam vidro refletivo (v1) e *brise* fixo ou *Ho-In* (Figura 4-2a). Neste último caso, o percentual tratado chega a ser nulo. Trata-se, portanto, de um indicador consideravelmente restritivo, mas que mesmo assim pode ter bons resultados em diferentes cenários dentre os estudados.

A presença de protetores solares também pode aumentar a ocorrência de iluminâncias úteis entre 500 e 2000lx em relação aos casos com a janela exposta, nos cenários com vidro incolor (v3) e abertura média (a50) ou grande (a75). Isso também é válido para os casos v2a75s60 e v2a50s60 (Figura 4-2d), de forma que mesmo a combinação de vidro cinza e protetores solares pode proporcionar independência do sistema artificial no ambiente estudado em uma média de mais da metade das horas anuais ocupadas nas duas orientações simuladas.

Dentre as variáveis de projeto analisadas, o tipo de vidro apresenta uma significativa influência neste indicador de desempenho da iluminação natural (ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx), seguido pelo percentual de abertura na fachada.

Considerando 50% das horas ocupadas como o mínimo desejado para se obter um bom desempenho, por exemplo, os cenários que apresentam vidro cinza (v2) ou incolor (v3) combinado com janela média (a50) ou grande (a75) ultrapassam essa faixa. Quando o vidro é incolor, apenas se a janela for sombreada. Já quando o vidro é cinza, todos os cenários com janela grande atingem esse total, assim como os cenários com janela média que não possuem sombreamento fixo ou *Ho-In* com ângulo de 30° (s30).

Figura 4-2 – UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ no plano de trabalho, com a janela orientada a Norte (média de 30 pontos)

Os resultados da Figura 4-2 indicam ainda que, quando o ângulo de sombreamento é 30° combinado com vidro cinza ou incolor, pode haver uma diferença significativa entre as diferentes situações de acionamento do *brise*. De forma geral, o desempenho do caso onde o *brise* nunca é acionado é semelhante ao desempenho do caso *Off-Ho* e o desempenho do caso onde o *brise* está sempre acionado é semelhante ao caso *Ho-In*.

Tal semelhança dois a dois pode indicar que o valor de radiação solar direta utilizado como referência para modificação do *brise* de forma automatizada (50W/m²) é alcançado em poucos momentos, seja na situação *Off-Ho* ou na situação *Ho-In*. Isso ocorreria de forma que, no caso *Off-Ho*, a janela passa a maior parte do tempo sem *brise*, e no caso *Ho-In*, ela passa a maior parte do tempo com as aletas na posição horizontal. A constatação desse fato, contudo, dependeria da análise dos valores absolutos de iluminâncias. Ocorre que, considerando o intervalo de iluminâncias estudado (entre 500 e 2000lx), não há diferença significativa entre os cenários referidos.

No cenário com *brise* de ângulo 60° e vidro cinza ou incolor (Figura 4-2d e 4.2f), há maior semelhança entre os diferentes acionamentos. Nesses cenários e nos cenários da Figura 4-2e, há um exemplo da relação entre o efeito da abertura e do ângulo de sombreamento. Com a abertura pequena (PAF=25%), os casos em que há a possibilidade de janela exposta apresentam maior ocorrência de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ (*Off-Ho* e Sem *brise*). Enquanto isso, nos cenários com abertura grande (PAF=75%), os casos com acionamento Fixo ou *Ho-In* apresentam maior ocorrência de iluminâncias úteis do que os demais.

Nota-se que, nos cenários que apresentam transmissão luminosa do vidro incolor (que é de 86%) e ângulo de sombreamento 60° na orientação Norte, a escolha da combinação de área de abertura e ângulo de sombreamento merece mais atenção do que as situações com os demais vidros, onde as tendências da variação dos resultados foram mais previsíveis. Quando houve aumento do percentual de abertura, houve a tendência de aumento da ocorrência de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ nos cenários com vidro refletivo (v1) ou cinza (v2), tendência semelhante ao que ocorreria caso se estivesse considerando a quantidade absoluta de luz.

Já com vidro incolor (v3), o total aumentou no sentido da janela pequena para média, mas os valores de abertura média e grande podem ser semelhantes nos cenários Fixo e *Ho-In*. Considerando a janela sem *brise* ou com acionamento *Off-Ho*, o aumento da área de abertura provocou a redução das iluminâncias na faixa analisada. Isso ocorre nesse último caso pois o aumento da transparência do vidro ocasionaria o aumento das iluminâncias acima de 2000lx, para qualquer dos acionamentos.

Os resultados apresentados na Figura 4-3 referem-se à orientação Oeste. Nessa orientação, a faixa de iluminâncias entre 500 e 2000lx é atingida em uma média de até 64% das horas anuais ocupadas (Figura 4-3e). Atingem mais de 50% das horas anuais nessa faixa apenas cenários com vidro incolor e sombreamento 30°, ou com vidro cinza e sombreamento (30 ou 60°). Os totais apresentados são menores do que os obtidos na orientação Norte, devido às iluminâncias excessivas apresentadas anteriormente. Tal característica indica ser mais difícil controlar a iluminação natural nesta orientação.

Lembra-se que os valores dos resultados não indicam necessariamente que o consumo de lâmpadas seria maior na orientação Oeste do que na orientação Norte. Iluminâncias fora da faixa UDI₅₀₀₋₂₀₀₀, estando acima ou abaixo da mesma, podem ser aproveitadas de forma complementar à iluminação artificial. Sobre as iluminâncias abaixo dessa faixa, seria possível haver aproveitamento das mesmas por meio de um controle dimerizável da iluminação. Iluminâncias maiores que 2000lx estão acima da iluminâncias de tarefa e, portanto, podem dispensar o uso da luz artificial, contudo, como citado anteriormente, o indicador UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ busca uma referência da possibilidade de ofuscamento por esses excessos de iluminação.

Para detalhar os resultados obtidos na condição de janela orientada a Oeste, é oportuno dividir a avaliação, considerando uma variável de projeto por vez: acionamentos, área de abertura, sombreamento e vidros, pois tendências foram mais facilmente detectadas aqui do que na orientação Norte.

Em termos de comparação entre os **acionamentos**, os resultados podem ser apresentados de acordo com as seguintes tendências: a que ocorre com os cenários de vidro refletivo (Figuras 4.3a e 4.3b), a que ocorre nos cenários com sombreamento 30° e vidro cinza (Figura 4-3c), a que ocorre no cenário com sombreamento 30° e vidro incolor (Figura 4-3e), e as que ocorrem e nos demais casos (Figuras 4.3d e 4.3f). Com vidro refletivo, o comportamento dos acionamentos em relação à ocorrência de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ é o previsível: cenários com acionamento que permitem a janela exposta (Sem *brise* e *Off_Ho*) apresentam maiores valores que aqueles com janela mais sombreada (Fixo e *Ho_In*).

Tratando-se dos cenários com aletas s30 e vidro cinza, observa-se que o acionamento *Off-Ho* apresenta o melhor desempenho e o acionamento *Ho_In* tem o pior desempenho, apresentando os maiores e menores valores de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀, respectivamente. Nesse grupo, a janela sem *brise* pode apresentar melhor desempenho que os casos com *brise* fixo e com acionamento *Ho-In*. Isso ocorre porque, com a janela pequena (PAF=25%) ou média (PAF=50%) sombreada com as aletas grandes (s30), certamente há bloqueio de radiação solar resultando em iluminâncias que não atingem o mínimo de 500lx nos pontos simulados.

Figura 4-3 - UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ com a janela orientada a Oeste (média de 30 pontos)

No grupo de resultados que indicam as alternativas de janela com sombreamento s30 e vidro incolor (Figura 4-3e), as alternativas com *brise* fixo e aquelas com acionamento *Ho-In* apresentam tendências e valores de $UDI_{500-2000}$ semelhantes entre si. Diferente do que ocorreu na Figura 4-3c, aqui esses podem ser os resultados mais altos ou os mais baixos, conforme se observa na comparação com os demais casos deste gráfico. Com esses acionamentos, o percentual de horas dentro da faixa de iluminâncias desejada fica parecido quando se compara janela média e janela grande, pois o ganho de luz que ocorreria com esse aumento ocorre na faixa acima de 2000lx. Isso havia ocorrido também na situação da janela orientada a Norte.

Comparando-se os resultados dos diferentes acionamentos nos cenários das Figuras 4.3d e 4.3f, os melhores resultados são alcançados quando o acionamento é *Ho_In* e a área de abertura é média (PAF=50%), para os dois tipos de vidro apresentados. Novamente, os resultados indicam que o aumento da área de abertura pode ser indesejado mesmo com relação ao critério da iluminação natural, pois aberturas com 75% de percentual de abertura na fachada apresentaram menor ocorrência de iluminâncias úteis na faixa desejada do que janelas com PAF=50%, devido ao aumento da ocorrência de iluminâncias excessivas.

Por fim, quanto aos acionamentos, ocorre o mesmo que na orientação Norte, com relação à semelhança entre os resultados dos acionamentos do tipo Sem *brise* e *Off_Ho*, e entre os resultados dos acionamentos Fixo e *Ho_In*.

Comparando os resultados quanto à influência isolada do **percentual de abertura na fachada**, observa-se que a variação da área de abertura pode causar o aumento, a redução ou a manutenção dos valores de $UDI_{500-2000}$ obtidos.

Os dados apresentados indicam que a opção por uma abertura que ocupe 75% da área de fachada, além dos prejuízos que certamente trará do ponto de vista de ganhos de calor no ambiente, também pode reduzir significativamente a média do percentual de horas nas quais as iluminâncias no plano de trabalho se encontram entre 500 e 2000lx na orientação Oeste. Contudo, se essa mesma janela possuir *brises* de ângulo de sombreamento 30°, é possível atingir uma média de mais de 60% do tempo dentro da referida faixa, sendo esses os maiores valores encontrados dentre os cenários analisados nesta orientação (Figura 4-3e). Esse percentual de horas pode ser atingido mesmo com *brises* menores e vidro cinza (Figura 4.3d), se o acionamento for com o controle do ângulo das aletas (*Ho_In*).

Comparando os resultados a partir dos dois **ângulos de sombreamento**, observa-se que, com aletas maiores (s30), o cuidado com o acionamento passa a ser mais significativo para definir o resultado obtido pelo sistema de janela.

Isso é exemplificado observando-se o cenário com vidro cinza e área de abertura 50% e sombreamento de 30° (Figura 4-3c), onde o percentual de horas na faixa de iluminâncias útil desejada fica entre 32 e 58%. Já com ângulo de sombreamento s60, essa diferença entre os acionamentos é menor, podendo ser quase nula ou chegar ao mesmo intervalo dos cenários com ângulo de sombreamento s30, e passando a ser mais significativa à medida que a área de abertura aumenta.

O tipo de **vidro** tem grande influência no comportamento geral dos resultados, e possui uma relação com a área de abertura: com o vidro refletivo, a ocorrência de iluminâncias úteis aumenta com o aumento da área de abertura. Com vidro cinza, o aumento da área de abertura pode aumentar ou manter o valor de $UDI_{500-2000}$. Já com o vidro incolor, a ocorrência de iluminâncias úteis tende a reduzir com o aumento da área de abertura, exceto nos dois cenários com sombreamento fixo de 30°.

Em uma avaliação de iluminação natural, a verificação completa de desempenho depende de diferentes indicadores. Neste trabalho, será destacada a seguir a distribuição espacial desses valores de $UDI_{500-2000}$ no plano de trabalho, o outro indicador aqui considerado para complementar a análise quantitativa do desempenho dos sistemas de janela quanto ao critério da iluminação natural.

4.3 Distribuição da $UDI_{500-2000}$ no plano de trabalho

A seguir, analisa-se o percentual de ocorrência de iluminâncias na faixa entre 500 e 2000lx, sendo agora considerados os 30 pontos do plano de trabalho. São apresentados os dados em gráficos de superfície, acompanhados das máscaras de sombra ilustrativas dos cenários, para permitir uma compreensão mais detalhada do comportamento da luz natural que chega ao ambiente. Os resultados foram subdivididos em estáticos e dinâmicos, e em subgrupos a partir dos mesmos, para facilitar a organização dos dados no texto.

4.3.1 Cenários estáticos

Os cenários referentes à orientação Norte e vidro refletivo estão apresentados na Figura 4-4. Anteriormente, quando se observaram as médias dos 30 pontos, a ocorrência dessas iluminâncias entre 500 e 2000lx foi muito baixa. Aqui, isso também se verifica, contudo, os valores absolutos chegam próximo dos 60% quando a abertura é grande (a75) e sem sombreamento (s90).

Figura 4-4 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Norte – v1

Quando o ângulo de sombreamento é igual a 30° (s30), os resultados mostram valores nulos em todos os pontos do ambiente, para qualquer um dos três percentuais de abertura. Isso indica que, nessas condições, sempre haveria necessidade de iluminação artificial para se atingir a iluminância mínima de 500lx nos pontos analisados do plano de trabalho.

Naturalmente, os percentuais obtidos podem formar uma curva no sentido da profundidade do ambiente, pois a abertura é lateral. Nos três casos em que não há

sombreamento (s90), essa curva é acentuada, ou seja, partindo-se das regiões próximo à janela em direção ao fundo da sala, há uma diferença significativa entre os valores de ocorrência de iluminâncias registrados. Há, inclusive, regiões do ambiente com valores nulos, o que indica a possibilidade de ofuscamento por contraste de iluminação. A ocorrência de tal desconforto dependeria da localização do(s) usuário(s) no ambiente e do horário solar.

A Figura 4-5 continua a análise dos resultados da distribuição de $UDI_{500-2000}$ na orientação Norte, apresentando os cenários com vidro cinza (v2). Já se observa uma grande diferença em relação ao desempenho do vidro refletivo (v1), pois foram atingidos percentuais de ocorrência das iluminâncias tratadas desde 0 até 80% de horas anuais ocupadas.

Pode haver uma diferença considerável entre os percentuais de tempo em que essa faixa ocorre nas diferentes porções do ambiente, especialmente nos cenários v2a25s60, v2a25s90 e v2a50s30. Em tais casos, seria favorável o acionamento dimerizável ou o acionamento por setor do plano de trabalho, dividindo as lâmpadas em grupos na direção da profundidade do ambiente.

Quando a abertura é média (a50) ou grande (a75) e exposta (s90), as regiões de meio e fundo da sala possuem maior percentual do tempo dentro da faixa de iluminação desejada do que as demais áreas do ambiente. Na região próxima da janela, essa ocorrência é baixa devido às iluminâncias excessivas. Isso também ocorreu nos casos que combinam vidro cinza com abertura média ou grande e ângulo de sombreamento 60°.

Em termos de projeto de iluminação, esses cenários exigiriam uma observação cuidadosa do caso real específico a ser considerado, pois seria possível dizer que não há a necessidade de iluminação artificial nessa região próxima da janela. Mas se houver necessidade de sombreamento que obstrua a luz solar nessa área, em função de ofuscamento ou de presença de radiação solar direta sobre o usuário, a complementação com iluminação artificial teria potencial para ser mais favorável do que a utilização única e indiscriminada da luz natural, em termos de conforto visual e térmico.

Se forem buscadas as configurações, dentre essas com vidro cinza, cujos resultados indiquem uma maior porção do ambiente que apresentaria ocorrência de iluminâncias úteis desejáveis, os cenários com abertura média ou grande combinada com sombreamento 60° são mais favoráveis. Por outro lado, os resultados obtidos para o cenário com abertura pequena e sombreamento 30° foram muito pobres, próximos aos obtidos com o vidro refletivo, discutidos anteriormente. A condição com abertura grande e sombreamento 30° pode ser igualmente favorável se as áreas de trabalho estiverem na porção do ambiente correspondente à metade que contém a janela.

Figura 4-5 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Norte – v2

Ainda com relação à orientação Norte, a Figura 4-6 ilustra os resultados dos cenários com vidro incolor (v3). Conforme já indicado na análise das médias dos pontos, com esse vidro é possível se obter resultados de alta qualidade de iluminação natural ou de iluminação muito pobre, a depender da condição de sombreamento proporcionada pelo *brise* e do tamanho da abertura.

No cenário com vidro incolor, abertura grande e sombreamento de 30°, a curva dos resultados observada no sentido da profundidade do ambiente é muito pouco acentuada, havendo uma distribuição de luz favorável para a realização de atividades em diferentes locais do ambiente ao longo de mais da metade do ano em todos os pontos do plano de trabalho.

Figura 4-6 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Norte – v3

Isso é evidenciado pela predominância da cor verde no gráfico, que se refere a percentuais do tempo entre 75 e 100% das horas anuais ocupadas em que a iluminância encontra-se dentro da faixa desejada (entre 500 e 2000lx).

Já no cenário que combina vidro incolor e área de abertura grande (a75) sem sombreamento (s90) ou com sombreamento 60° (s60), por exemplo, há uma variação acentuada na ocorrência desses percentuais em função da profundidade do ambiente, que devido às iluminâncias excessivas, são baixos não só nas regiões próximas à janela, mas também em uma porção significativa do mesmo.

Quando a abertura é pequena (a25), há variação dos resultados também no sentido da largura do ambiente. Atribui-se esse fato ao possível maior contraste entre as regiões nas quais a radiação solar é bloqueada e aquelas em que há incidência de radiação solar direta, de acordo com o ângulo vertical de visibilidade de céu correspondente ao tamanho da abertura. No caso de aberturas maiores, essa diferença seria compensada pela maior porção de céu desobstruído que é “vista” a partir do ambiente em todas as porções na dimensão da largura, mantendo-se, nesse caso, apenas a diferenciação no sentido da profundidade do ambiente. A mesma compensação ocorre quando não há sombreamento (note-se que o cenário v3a25s90 apresenta apenas a curva no sentido da profundidade).

As Figuras 4-7, 4-8 e 4-9, a seguir, mostram os resultados obtidos em relação aos cenários simulados considerando a janela orientada a Oeste.

No primeiro grupo (Figura 4-7), que se refere ao vidro refletivo, observa-se que as condições de iluminação apresentadas são semelhantes às aquelas obtidas na orientação Norte, valendo, portanto, as mesmas considerações. A maior diferença refere-se aos cenários com janela exposta, que na orientação Oeste apresentaram ocorrência de iluminâncias úteis desejáveis em uma porção maior do ambiente, ao passo em que houve diminuição da ocorrência dessas iluminâncias úteis no primeiro 1,5m de profundidade.

Nessa orientação, há maior incidência de radiação solar do que na orientação Norte, o que provoca novamente a ocorrência de iluminâncias excessivas nessa porção do ambiente, e em contrapartida, maior penetração da luz no sentido da profundidade, devido ao posicionamento do Sol em relação à mesma.

Conforme os resultados, esse vidro apresenta um potencial baixo de aproveitamento da iluminação natural, seja com relação aos valores médios anteriormente destacados, seja com relação aos diferentes pontos do plano de trabalho, mesmo quando a janela foi simulada com percentual de abertura na fachada igual a 75%.

Figura 4-7 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Oeste – v1

Com relação aos cenários com vidro cinza na orientação Oeste (Figura 4-8), notam-se resultados mais favoráveis do que na orientação Norte, na medida em que são atingidos percentuais de $UDI_{500-2000}$ acima de 50% em porções maiores do plano de trabalho. Lembra-se novamente que isso não quer dizer que há mais ou menos luz em um dado momento, pois se trata de maior ocorrência anual de iluminâncias na faixa entre 500 e 2000lx.

Figura 4-8- Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Oeste – v2

Observa-se que cenários com abertura média e sombreamento 60° e cenários com abertura grande (a75) sombreada (s30 ou s60) apresentam ocorrência de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ em mais da metade das horas ocupadas em diferentes pontos do ambiente. Isso indica que mesmo com vidro cinza é possível haver aproveitamento da luz natural na maior parte das horas anuais e na maior parte do ambiente. Em relação aos resultados obtidos para a orientação Norte, as curvas são menos acentuadas, mas ainda se observam variações que indicam a viabilidade de um projeto de iluminação que permita o controle por setor do ambiente. São identificados

novamente a curva no sentido da largura do ambiente, em um cenário com janela pequena (v2a25s30), e o tipo de distribuição da iluminação que indica a necessidade de projeto de iluminação com sombreamento da porção da frente do ambiente (caso v2a75s90).

Para finalizar a análise da distribuição de $UDI_{500-2000}$ no ambiente com *brises* estáticos, a Figura 4-9 apresenta as isocurvas referentes aos cenários da orientação Oeste com vidro incolor. São identificadas várias das tendências já discutidas anteriormente.

Figura 4-9 - Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Oeste – v3

Como destaque específico desse grupo de resultados, tem-se a uniformidade verificada nos cenários v3a50s30 e v3a75s30, onde todos os 30 pontos do ambiente apresentaram ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em um somatório de horas entre 50 e 75% das horas anuais ocupadas. Essa uniformidade global não equivale necessariamente a uma uniformidade instantânea (percebida pelo usuário hora a hora), mas é um indício da mesma.

Destaca-se que os altos percentuais de horas anuais ocupadas com independência da luz artificial (acima de 50%), obtidos na análise das médias dos pontos, podem ser alcançados também de forma predominante no plano de trabalho. No mesmo sentido, mas com efeito contrário, o desempenho pobre obtido na análise das médias dos pontos simulados também pôde ser observado ao longo de todo o ambiente (exemplo de cenários com vidro refletivo). Os resultados dessa análise dos cenários estáticos permitiram observar, portanto, que a ocorrência de $UDI_{500-2000}$ pode ser de diferentes formas em relação ao plano de trabalho (de forma constante ou de forma a favorecer as atividades em porções diferentes do ambiente).

4.3.2 Cenários dinâmicos

Essa análise também relaciona as ocorrências de iluminâncias entre 500 e 2000lx com os diferentes pontos do plano de trabalho. Como o efeito das diferentes configurações de abertura já foi discutido na análise dos cenários estáticos, nesta subseção o foco encontra-se na comparação entre os dois acionamentos dinâmicos estudados. Para facilitar a visualização, os resultados são apresentados e discutidos em tabelas, entre a Tabela 4-1 e a Tabela 4-12.

Observou-se a possibilidade de haver diferenças significativas entre os cenários com *brise* com controle das aletas (*Ho_In*) e com controle *Off_Ho*. Tal fato pode ir de encontro, inclusive, a resultados observados anteriormente quanto à média do resultado quantitativo de todos os pontos, onde houve casos em que diferentes acionamentos apresentaram resultado semelhante (exemplo na Figura 4-2, p.106).

Em termos da distribuição da $UDI_{500-2000}$ dos cenários dinâmicos estudados, todas as variáveis analisadas também podem influenciar significativamente o resultado obtido. Contudo, considerando uma comparação visual, o efeito do ângulo de sombreamento quando o acionamento é *Off_Ho* tende a ser menor que o identificado nos cenários estáticos. Atribui-se esse fato à possibilidade de ajuste da condição de sombreamento possibilitada pelos cenários dinâmicos, a qual não depende apenas do dimensionamento do *brise*. A respeito desses ângulos de sombreamento, sabe-se que, em uma situação que considere as variações horárias, a atuação dos *brises* como superfícies refletoras pode influenciar o conforto visual do usuário.

Tabela 4-1 – Ocorrência de $UDI_{500-2000}$ em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s30 – v1

	<i>Off_Ho</i>	<i>Ho_In</i>	Discussão
Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%)			<p>v1a25s30 – Nos dois cenários de acionamento apresentados, há uma condição pobre de iluminação natural em termos da ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx. Com acionamento <i>Ho_In</i>, em nenhuma das horas ocupadas a luz natural estaria nesse intervalo. Já com acionamento <i>Off_Ho</i>, atinge-se percentuais próximos de 50% do tempo, mas apenas na região muito próxima da janela.</p>
	<p>v1a50s30 – Nesse cenário com janela média, também há uma predominância de valores nulos de $UDI_{500-2000}$, contudo há uma ocorrência maior dessa faixa de iluminâncias, próximo da janela, em relação aos cenários com janela pequena.</p> <p>Além disso, na situação com acionamento <i>Ho_In</i>, passa-se de 20% apenas em um ponto. Atribui-se isso à possível visibilidade de uma porção do céu com radiação direta neste ponto, no período da tarde (o valor se refere à lateral Oeste). O mesmo comportamento poderia ocorrer na lateral Leste da janela, mas o gráfico não contém essa informação porque não há ocupação no período da manhã cuja incidência solar seria equivalente a essa.</p>
	<p>v1a75s30 – Semelhante aos casos v1a25s30 e v1a50s30. Há aumento de ocorrências da iluminâncias da faixa em questão na região próxima da janela. Mesmo a janela grande e a luz possivelmente refletida pelas aletas não é suficiente para atingir o fundo do ambiente com 500lx, dada a pouca transmissão luminosa do vidro.</p>

Tabela 4-2 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s30 – v2

	Off_Ho	Ho_In	Discussão
<div>Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%)</div> <div><div>■ 0-25</div><div>■ 25-50</div><div>■ 50-75</div><div>■ 75-100</div></div> <div>P = profundidade (m); L = largura (m)</div>			<p>v2a25s30 – Comportamento semelhante ao dos casos anteriores. Aqui, contudo, já há uma possibilidade de se aproveitar a iluminação natural próxima da janela no cenário com automação <i>Off_Ho</i> em uma área de trabalho afastada até 2,5m da janela, por mais de 1/4 das horas ocupadas.</p>
			<p>v2a50s30 – Pela curva descrita, há indicações de que com esse cenário e acionamento <i>Off_Ho</i> começam a aparecer iluminâncias excessivas nas proximidades da janela. Além disso, a porção do meio do ambiente se mostra favorável para execução das atividades sem o auxílio da iluminação artificial, entre 50 e 100% das horas anuais ocupadas (porções vermelha e verde, respectivamente). Com acionamento <i>Ho_In</i>, as iluminâncias entre 500 e 2000lx ainda se concentram na porção frontal do ambiente.</p>
			<p>v2a75s30 – Os dois acionamentos resultaram em condições para o aproveitamento da luz natural em diferentes porções do ambiente. Em ambos, há a predominância das UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ por mais de 50% do tempo no plano de trabalho. Com acionamento <i>Off_Ho</i>, tais condições seriam atingidas nas porções central e de fundo, enquanto com acionamento <i>Ho_In</i>, isso ocorreria nas porções frontal e central. Nessa última condição, os resultados apresentados indicam também condições de uniformidade da luz elevadas, contudo, conforme visto anteriormente, a constatação dessa uniformidade dependeria de mais dados.</p>

Tabela 4-3 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s30 – v3

	<i>Off_Ho</i>	<i>Ho_In</i>	Discussão
Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%) ■ 0-25 ■ 25-50 ■ 50-75 ■ 75-100 P = profundidade (m); L = largura (m)			<p>v3a25s30 – Com acionamento <i>Off_Ho</i>, há indicações das iluminâncias excessivas na região próxima da janela. Isso não ocorre com acionamento <i>Ho_In</i>, onde o <i>brise</i> fica ativo o tempo todo, inviabilizando a ocorrência de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ na região central e do fundo do ambiente.</p>
			<p>v3a50s30 – Com acionamento <i>Off-Ho</i>, com o aumento da área de abertura e da transmissão do vidro em relação aos outros cenários apresentados até então, a ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx “caminha” em direção ao fundo da sala, de forma que na porção frontal essa faixa não é mais predominante em função das iluminâncias excessivas. Com acionamento <i>Ho_In</i>, no entanto, há uma predominância de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ em mais de 50% do tempo, em todo o plano de trabalho.</p>
			<p>v3a75s30 – O desempenho da situação com acionamento <i>Ho_In</i> permitiria um aproveitamento considerável da luz natural. Com a distribuição obtida, haveria possibilidades de leiautes com áreas de trabalho em todas as regiões do ambiente utilizando a luz natural como única fonte. No fundo do ambiente com acionamento <i>Off_Ho</i>, ocorre UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ em mais de 75% das horas anuais ocupadas e novamente a curva apresenta baixos percentuais no centro e na porção frontal, indicando predominância no ambiente de iluminâncias potencialmente causadoras de ofuscamento do usuário.</p>

Tabela 4-4 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s60 – v1

Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%) P = profundidade (m); L = largura (m)	Off_Ho	Ho_In	Discussão
	v1a25s60 – Observa-se predominância de iluminâncias nulas, mas há uma disponibilidade de luz pouco maior que nos cenários com mesmo vidro, PAF e orientação, mas ângulo de sombreamento de 30° . Valores de $UDI_{500-2000}$ são atingidos em pouco mais de $\frac{1}{4}$ das horas ocupadas apenas na região muito próxima da janela, que possui maior visão de céu e Sol.
	v1a50s60 – Com ângulo de sombreamento de 60° , não ocorreram valores sobressaindo-se aos demais em um lado no sentido transversal do ambiente, tal como no cenário v1a50s30, apenas no sentido da profundidade, tal como na maior parte dos casos analisados.
	v1a75s60 – Seguindo a tendência dos últimos quatro cenários, há uma ocorrência significativa de percentuais nulos de iluminâncias na faixa entre 500 e 2000lx, especialmente com acionamento <i>Ho_In</i> . Entende-se que essa é uma configuração pobre para esta orientação e demais condições analisadas. Já com acionamento <i>Off_Ho</i> , a ocorrência de $UDI_{500-2000}$ em mais de 50% do tempo na porção frontal do ambiente indica a viabilidade de se utilizar um sistema de lâmpadas com controle por setor do ambiente.

Tabela 4-5 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s60 – v2

	<i>Off_Ho</i>	<i>Ho_In</i>	Discussão
Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%) ■ 0-25 ■ 25-50 ■ 50-75 ■ 75-100 P = profundidade (m); L = largura (m)			<p>v2a25s60 – Os dois acionamentos proporcionam distribuições de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ semelhantes e que favorecem apenas as regiões próximas da janela. Esse comportamento indica a viabilidade de um sistema de controle das lâmpadas que permita o acionamento parcial, por setores do ambiente. Além disso, há a possibilidade de mitigar esse contraste pelo uso de prateleiras de luz na janela ou de outra forma de direcionamento da luz natural para o fundo da sala.</p>
			<p>v2a50s60 – O cenário <i>Off_Ho</i> indica a necessidade de limitar a visão de céu e Sol da porção frontal do ambiente, pois novamente a ocorrência de valores baixos de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ indica o excesso de luz nessa região. Os percentuais acima de 50% atingidos nas demais regiões do plano de trabalho indicam a viabilidade de se aproveitar a luz natural em um ambiente com essa configuração de abertura. Já com acionamento <i>Ho_In</i>, a região do fundo do ambiente apresentou resultados que indicam a necessidade de complementação com a luz artificial para se atingir os 500lx desejados.</p>
			<p>v2a75s60 – Essa configuração apresentou desempenho muito favorável com o acionamento <i>Ho_In</i>, havendo ocorrência de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ em mais de 50% do tempo em todos os pontos, e sendo essa ocorrência maior que 75% na porção central do ambiente.</p>

Tabela 4-6 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Norte – s60 – v3

	Off_Ho	Ho_In	Discussão
<div>Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%)</div> <div>■ 0-25 ■ 25-50 ■ 50-75 ■ 75-100</div> <div>P = profundidade (m); L = largura (m)</div>			<p>v3a25s60 – A mudança para o vidro claro é suficiente para aumentar significativamente as iluminâncias – mesmo com acionamento <i>Ho_In</i>, na porção central do ambiente há ocorrência de iluminâncias no intervalo em questão em mais de 50% das horas anuais ocupadas.</p>
			<p>v3a50s60 – Com os dois acionamentos, houve desempenho muito favorável ao aproveitamento da luz natural no fundo da sala. O comportamento indica a viabilidade de uma solução de proteção solar em uma seção da janela, com dimensionamento que atinja prioritariamente a região frontal do ambiente.</p>
			<p>v3a75s60 – De forma semelhante ao caso v3a75s30, aqui as duas situações de acionamento apresentam uma variação que é indicativa de iluminâncias excessivas na maior parte do ambiente, sendo essa uma configuração de abertura com pouco potencial para execução de atividades no plano de trabalho.</p>

Tabela 4-7 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s30 – v1

	Off_Ho	Ho_In	Discussão
<div>Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%)</div> <div><div><div>■ 0-25</div><div>■ 25-50</div><div>■ 50-75</div><div>■ 75-100</div></div><div>P = profundidade (m); L = largura (m)</div></div>			<p>v1a25s30 – Novamente, observa-se a predominância de valores nulos de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀. Mesmo no cenário <i>Off_Ho</i>, não há transmissão de luz suficiente para se atingir os 500lx na maior parte do tempo e do plano de trabalho.</p>
			<p>v1a50s30 – Novamente, no cenário com acionamento <i>Ho_In</i>, há a presença de maiores iluminâncias no lado Oeste do ambiente, conforme ocorrido com o cenário v1a50s30 na orientação Norte.</p>
			<p>v1a75s30 – A situação <i>Ho_In</i> novamente apresenta desempenho muito pobre quanto ao aproveitamento da luz natural como fonte única de iluminação, com essa configuração de abertura, que possui um sombreamento e um tipo de vido com uma restrição significativa da entrada de radiação solar.</p>

Tabela 4-8 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s30 – v2

	Off_Ho	Ho_In	Discussão
<div>Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%)</div> <div>■ 0-25 ■ 25-50 ■ 50-75 ■ 75-100</div> <div>P = profundidade (m); L = largura (m)</div>			<p>v2a25s30 - No cenário <i>Ho_In</i>, novamente, há indícios da visibilidade de alguma porção mais iluminada do céu ou de ocorrência de radiação solar direta em um lado do ambiente mais do que do outro, próximo à janela. Nesse caso, o lado Norte do plano de trabalho.</p>
			<p>v2a50s30 – Com acionamento <i>Ho_In</i>, observa-se desempenho mais pobre do que a mesma configuração quando foi orientada a Norte. Já com acionamento <i>Off_Ho</i>, a distribuição e valores de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ obtidos são semelhantes aos obtidos naquela orientação e favoráveis a um leiaute centralizado no plano de trabalho.</p>
			<p>v2a75s30 - No cenário com controle <i>Off_Ho</i>, o resultado de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ na proximidade da janela é baixo, o que implica considerar no projeto a possibilidade significativa de haver ofuscamento.</p>

Tabela 4-9 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s30 – v3

Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%) ■ 0-25 ■ 25-50 ■ 50-75 ■ 75-100 P = profundidade (m); L = largura (m)	Off_Ho	Ho_In	Discussão
			v3a25s30 – Há uma diferença expressiva entre as distribuições obtidas com os diferentes acionamentos. Na situação similar, mas com a orientação Norte, essa relação também havia ocorrido. Mesmo com a diferença no ângulo de incidência solar entre as orientações, o desempenho quanto à UDI ₅₀₀₋₂₀₀₀ pode ser similar.
			v3a50s30 – Com acionamento <i>Ho_In</i> , uma solução de janela com prateleira de luz teria potencial para tornar a distribuição de UDI ₅₀₀₋₂₀₀ com essa configuração bastante favorável à execução das tarefas de escritório em todas as regiões do plano de trabalho estudado.
			v3a75s30 – Com acionamento <i>Ho_In</i> , há uma condição de ocorrência de UDI ₅₀₀₋₂₀₀₀ em mais da metade do tempo em todos os pontos do plano de trabalho. Os resultados são mais favoráveis do que na configuração v3a75s30 na orientação Norte. O bloqueio da radiação solar aqui aparece atingir de forma mais eficiente os ângulos de sombreamento necessários em função dessa área de abertura. As horas ocupadas que recebem insolação Oeste são atingidas pelo Sol quando ele está mais próximo da perpendicular à janela. Já com acionamento <i>Off_Ho</i> , a distribuição apresentada indica novamente a ocorrência de iluminâncias excessivas na maior parte do ambiente.

Tabela 4-10 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s60 – v1

	Off_Ho	Ho_In	Discussão
<div>Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%)</div> <div><div>■ 0-25</div><div>■ 25-50</div><div>■ 50-75</div><div>■ 75-100</div></div> <div>P = profundidade (m); L = largura (m)</div>			<p>v1a25s60 – Observa-se desempenho similar aos demais cenários com vidro refletivo, sombreamento e janela pequena, apresentando desempenho pobre em relação ao aproveitamento da luz natural como única fonte de iluminação.</p>
			<p>v1a50s60 – Configuração <i>Off_Ho</i> com potencial de aproveitamento da luz natural como única fonte em mais da metade das horas anuais ocupadas, mas apenas na porção frontal do ambiente. Já a configuração <i>Ho_In</i> apresenta desempenho pobre em relação ao mesmo critério.</p>
			<p>v1a75s60 – Valem as mesmas considerações feitas para o cenário anterior (v1a50s60).</p>

Tabela 4-11 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s60 – v2

Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%) ■ 0-25 ■ 25-50 ■ 50-75 ■ 75-100 P = profundidade (m); L = largura (m)	Off_Ho	Ho_In	Discussão
			<p>v2a25s60 – Observa-se um desempenho semelhante para os dois acionamentos, apresentando um desempenho baixo na região do fundo do ambiente. O resultado indica a possível viabilidade de uma configuração de <i>brise</i> que mantenha esse ângulo de sombreamento, mas possua uma prateleira de luz.</p>
			<p>v2a50s60 – Nos dois casos, há distribuição de UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ favorável a leiautes que priorizem a região central do plano de trabalho. A baixa ocorrência de iluminâncias nesse intervalo na região próxima da janela, no cenário <i>Off_Ho</i>, indica que pode haver iluminâncias excessivas nessa região, mesmo utilizando vidro cinza e proteção solar.</p>
			<p>v2a75s60 – Há um potencial significativo de aproveitamento da iluminação natural nas porções central e de fundo do ambiente.</p>

Tabela 4-12 – Ocorrência de iluminâncias entre 500 e 2000lx em função dos pontos no ambiente – Dinâmicos - Oeste – s60 – v3

Percentual de horas anuais ocupadas com iluminâncias entre 500 e 2000lx (%) P = profundidade (m); L = largura (m)	Off_Ho	Ho_In	Discussão
	<p>v3a25s60 – Há potencial para aproveitamento significativo da luz natural na porção central do ambiente. A distribuição indica que a utilização de um desenho diferenciado do <i>brise</i> que atinja a região frontal, aliada à utilização de um sistema de iluminação com controle por setor do ambiente poderia ser adequada a edificações que já possuem essa configuração de abertura.</p>
	<p>v3a50s60 – A proteção solar de 60° não é suficiente para bloquear radiação suficiente para manter as iluminâncias entre 500 e 2000lx na porção até 3,5m em relação à janela, mesmo com acionamento <i>Ho_In</i>, que possui aletas inclinadas.</p>
	<p>v3a75s60 - A distribuição das UDI₅₀₀₋₂₀₀₀ aqui possui uma tendência inversa ao que se espera quando se trata da quantidade de luz (baixos percentuais na região próxima da janela e valores altos no fundo da sala, quando em termos de quantidade absoluta de luz há mais luz na região próxima da janela e menos no fundo), nos dois cenários de acionamento. Há portanto, a possibilidade de se utilizar essa opção de janela com aproveitamento apenas para um leiaute que utilize com mais frequência o fundo do ambiente.</p>

Os resultados apresentados quanto à distribuição de $UDI_{500-2000}$ no plano de trabalho apontam uma possibilidade de variação significativa das ocorrências de iluminâncias nas diferentes regiões do ambiente, fato que evidencia a importância de se considerar essa análise em conjunto com a análise da média dos pontos.

Houve predominância de cenários que apresentaram pelo menos uma porção do ambiente na qual a iluminação natural como principal fonte de luz é possível em mais de 50% das horas anuais ocupadas. Não se enquadraram nesse conjunto a maior parte dos cenários com vidro refletivo e o cenário v2a25s30 com acionamento estático ou *Ho_In*.

Em diversos cenários, foi observado o problema das iluminâncias excessivas (essa visualização foi de forma indireta, pela presença de índices baixos de $UDI_{500-2000}$ nas proximidades da janela e pelo que já se conhecia da análise de ocorrência de iluminâncias por faixa). A esse respeito, indica-se a possibilidade de projeto de que os *brises* possam ser dimensionados de acordo com as diferentes porções da janela, de forma a bloquear mais ou menos radiação solar e visão de céu de acordo com a região do plano de trabalho.

5. RESULTADOS – USO DE ENERGIA

Com relação à demanda de energia elétrica para iluminação artificial e condicionamento do ar, as análises a seguir tratam dos resultados referentes ao ambiente de escritório com as características anteriormente descritas.

5.1 Demanda de energia por uso final

O Gráfico 5-1 e o Gráfico 5-2 apresentam a demanda total de energia obtida a partir das simulações dos cenários estáticos. São indicadas as parcelas destinadas a cada sistema (lâmpadas e condicionadores de ar) e o somatório das duas, considerando as horas anuais ocupadas.

Gráfico 5-1 - Demanda de energia elétrica por uso final – Cenários estáticos - Norte

Os resultados na orientação Norte indicam que a necessidade de energia elétrica para iluminação artificial é sempre inferior à necessidade de energia para condicionamento do ar, o que é esperado para os sistemas e localidade considerados. Chama a atenção, contudo, a elevada proporção que o consumo com iluminação artificial pode adquirir em relação ao total, quando o vidro possui baixa transmissão (v1): 20kWh dos 53kWh totais.

Observam-se cenários em que os ganhos de calor e de iluminação provocados pela combinação das demais características da janela são compensados entre si, tais como os casos com vidro refletivo ou cinza combinado com PAF=25% (a25). Nesses casos, ao se comparar situações com ângulo de sombreamento 30° com as de ângulo 60°, por exemplo, observa-se que há aumento do consumo com ar condicionado e redução do consumo de iluminação do

segundo caso em relação ao primeiro, numa proporção tal que o consumo total fica semelhante.

Na orientação Oeste (Gráfico 5-2), observa-se que os totais de energia aumentam significativamente em relação à orientação Norte. Nessa orientação, há incidência de radiação solar no período da tarde ao longo de todo o ano na localidade estudada, o que pode causar excessos de carga térmica de resfriamento. Além disso, o ângulo de sombreamento passa a ter um impacto significativamente maior nos resultados.

Gráfico 5-2 - Demanda de energia elétrica por uso final – Cenários estáticos - Oeste

Os cenários com menor demanda de energia apresentam sombreamento com ângulo de 30°. Seria possível afirmar que isso ocorre exclusivamente devido ao papel da carga térmica de resfriamento na demanda total de energia. Contudo, isolando-se os casos com *brises* de aletas maiores (s30) combinadas com PAF=25 ou 50%, nota-se que as alternativas com menor demanda total de energia são aquelas que apresentam menor demanda para iluminação artificial, sendo o cenário com menor demanda de energia o que combina vidro incolor, sombreamento 30° e percentual de abertura na fachada igual a 50%.

Apesar da parcela significativa que as cargas de resfriamento representam, a carga referente à iluminação pode ser decisiva, pois, como visto anteriormente, o resultado da iluminação natural é bastante sensível à variação das características da janela, o que não ocorre na mesma intensidade com a demanda de energia para condicionamento do ar referida. Há ainda o fato de os *brises* poderem atuar como fonte de iluminação refletida, ao passo que bloqueiam a radiação solar antes que ela chegue ao vidro, de forma que a estratégia de

controle solar pelo sombreamento se mostra mais eficiente que a de controle apenas pela transmissão do vidro.

Nesse sentido, os resultados referentes às duas orientações indicam que as alternativas que representam janelas mais sombreadas podem apresentar menor demanda de energia elétrica no somatório final em relação aos cenários com janela mais exposta, mesmo com a possível redução das iluminâncias em relação aos casos de janela sem sombreamento. Além disso, os vidros comuns (cinza e incolor), quando sombreados, apresentam melhor desempenho que o vidro refletivo de baixa transmissão, pois permitem aproveitamento da luz natural e bloqueio da radiação solar ao mesmo tempo.

O Gráfico 5-3 e o Gráfico 5-4 apresentam os resultados obtidos a partir das simulações dos cenários com *brises* dinâmicos. Observa-se que as tendências são semelhantes aos casos estáticos. Em relação ao total absoluto encontrado, os cenários dinâmicos atingem valores máximos de demanda de energia elétrica menores que os primeiros.

Gráfico 5-3 - Demanda de energia elétrica por uso final – Cenários dinâmicos Off-Ho – Norte e Oeste

Em termos de comparação entre a demanda de energia obtida para a orientação Norte e Oeste considerando todos os tipos de acionamento, observa-se que o impacto das características da janela é limitado pela influência da orientação, pois, em todos cenários, o resultado da orientação Oeste representa maior demanda de energia do que o mesmo cenário na orientação Norte. Nota-se ainda que as parcelas de energia elétrica destinadas às lâmpadas são semelhantes nas duas orientações, sendo a parcela destinada ao ar condicionado a que causa a maior diferença nos totais.

Gráfico 5-4 - Demanda de energia elétrica por uso final – Cenários dinâmicos *Ho-In* – Norte e Oeste

Com base nos dados apresentados anteriormente da carta solar de Maceió-AL, o padrão de iluminação certamente não é o mesmo para estas duas orientações, contudo este indicador (demanda de energia destinada à iluminação artificial) considera apenas o momento em que se atinge 500lx e o momento em que essa iluminância deixa de ser atingida, sem considerar as variações de iluminação entre o acionamento e desligamento das lâmpadas.

Isso ocorre, pois, o sistema de controle das lâmpadas considerado foi manual, de forma que todas as lâmpadas acendem quando qualquer ponto do ambiente fica com iluminância abaixo de 500lx; elas só estão apagadas quando todos os pontos apresentam iluminâncias acima desse valor. Há, portanto, um indicativo de que as diferenças entre as orientações ocorreriam na faixa de iluminâncias acima de 500lx, e, portanto, não são evidenciadas na demanda total de energia.

Ressalta-se que são considerados sistemas de ar condicionado e de iluminação com eficiência energética alta, suficiente para se obter A ou B pela classificação da etiqueta PROCEL. Dessa forma, a demanda total poderia ser ainda menor caso fosse utilizado um outro sistema de controle da iluminação mais dinâmico, tal como um sistema dimerizável.

5.2 Impacto das variáveis do sistema de janela na demanda de energia

A Figura 5-1 contém os resultados referentes à demanda anual de energia para a orientação Norte, permitindo a comparação entre os diferentes tipos de acionamento do dispositivo de proteção solar, de forma semelhante ao que foi apresentado na análise da iluminação natural.

Figura 5-1 – Demanda de energia elétrica para iluminação e condicionamento do ar com a janela a Norte

Nas situações estudadas com orientação Norte, quando o vidro considerado foi o refletivo de baixa transmissão (v1), a alteração no ângulo de sombreamento e o percentual de abertura não apresentaram efeito significativo na demanda total de energia elétrica: os resultados ficaram em torno de 50 kWh/m²/ano para as três condições de sombreamento (s30, s60 e s90, esta última condição representada pelas situações “sem *brise*”). Já quanto ao acionamento, os cenários com *brise* dinâmico do tipo *Ho_In* se diferenciam dos demais, sendo menores. A alteração da inclinação das aletas, que só ocorre nesse tipo de acionamento, provoca o bloqueio quase total da radiação solar direta.

Essas tendências não ocorrem nas situações com os demais tipos de vidro (v2 e v3), casos em que a transparência à radiação solar é maior e o efeito das demais características da janela no resultado passa a ser mais significativo. Nota-se, por exemplo, como a escolha da área de abertura pode alterar o resultado quando o vidro é incolor e não há *brise*.

Em tais casos, a mudança na área de abertura com o mesmo tipo de vidro tem uma tendência linear (quanto maior o percentual de abertura, maior a demanda de energia). Considerando o *brise* fixo ou o *brise* com controle das aletas (*Ho_In*), por outro lado, o percentual de abertura na fachada não tem o mesmo efeito na demanda de energia, chegando a ter quase nenhuma influência no resultado.

Tal fato indica o cuidado com a área de abertura quando o vidro é incolor, pois o aumento da mesma pode aumentar visivelmente a demanda de energia. Isso ocorre com menos intensidade quando o vidro é cinza, onde, se houver sombreamento (seja fixo, *Ho_In* ou *Off_Ho*), a mudança da área de abertura não altera a demanda de energia. Observa-se que quando as aletas são maiores (s30), há maior diferenciação entre os resultados obtidos para os diferentes acionamentos.

Nas situações analisadas, a condição sem *brise* sempre apresenta o maior consumo de energia. Mesmo com a grande disponibilidade de luz na localidade analisada, o consumo que é reduzido com as lâmpadas devido à presença de protetores solares não é suficiente para compensar o gasto extra com condicionamento do ar que é resultante da condição de janela exposta em relação às três condições onde há possibilidade de sombreamento. Observa-se que não há uma diferença significativa entre a condição de sombreamento fixo e a condição com controle das aletas (*Ho_In*), conforme ocorreu também na análise da iluminação natural.

Na orientação Oeste (Figura 5-2), o impacto da escolha das alternativas é mais significativo para a variação da demanda de energia. Isso é indicado pela maior diferenciação entre os resultados das diferentes alternativas.

Figura 5-2 - Demanda de energia elétrica para iluminação e condicionamento do ar com a janela a Oeste

Nessa orientação, como já visto, há maior carga térmica de resfriamento. É possível notar ainda a diferença significativa que há entre os casos sem *brise* e com *brise*, de maneira que esta diferença se sobressai em relação àquela entre os tipos de controle das aletas, principalmente quando o vidro é cinza ou incolor.

Quando se considera apenas os casos com *brise*, portanto, não há alteração significativa do consumo de energia total obtido. Observa-se a proximidade das curvas indicando esse fato, principalmente com aletas de ângulo de sombreamento 60°. Apenas com vidro incolor e sombreamento de 30°, há uma diferenciação visível entre os valores obtidos quando o acionamento do *brise* é fixo, *Ho_In* ou *Off_Ho*.

O cuidado necessário com a área de abertura escolhida para a janela também é evidenciado nesta orientação, especialmente quando se combina vidro cinza ou incolor com ângulo de sombreamento 60°, casos nos quais a demanda de energia pode aumentar significativamente quando se utiliza maiores áreas envidraçadas, em relação a áreas menores.

Aqui já não se vê uma possibilidade tão clara de agrupamento dos resultados dois a dois, como ocorreu na análise da iluminação natural. Naturalmente, isso não quer dizer que o usuário necessariamente não perceberá diferenças sazonais ou diárias relacionadas ao consumo de energia no ambiente com *brises* de diferentes acionamentos. Além disso, foi visto como essa variável influencia a iluminação natural, por exemplo. Os resultados fornecem uma quantificação do consumo total anual para permitir uma comparação do custo-benefício de diferentes cenários, mesmo que os consumos parciais e ao longo do ano possam ser diferentes.

Os aspectos apresentados indicam que o efeito de cada variável considerada isoladamente (área de abertura, tipo de vidro e ângulo de sombreamento) depende muito do valor fixado para as demais, de forma a ser difícil identificar uma tendência clara para cada variável isoladamente.

Nas duas orientações, aparecem evidências dessas interdependências entre as variáveis analisadas, de forma que informar se o aumento de uma área de abertura terá efeito significativo no consumo de energia, por exemplo, depende de outras considerações. Toda análise que envolve diferentes critérios e diferentes variáveis está sujeita a essas ponderações, o que se chama atenção aqui é o fato de que, se isso não for considerado na avaliação de sistemas de abertura, pode haver a completa descaracterização do objetivo inicial (diminuir a demanda de energia ou aumentar a disponibilidade de luz natural). Isso indica que, em um processo de escolha, há maiores chances de se obter bom desempenho quando se consideram as combinações, ao invés de escolher cada elemento da janela individualmente.

Quanto às diferenças entre as duas orientações, observa-se que, com a janela voltada para o Norte, os acionamentos do *brise* e o tipo de vidro são as variáveis dentre as analisadas com maior impacto na demanda de energia tratada. Já na orientação Oeste, a área de abertura e o ângulo de sombreamento também foram significativos.

5.3 Potencial de redução da demanda de energia

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos quanto ao incremento percentual da demanda de energia, considerando diferentes bases de referência para comparação entre todos os resultados obtidos.

O Gráfico 5-5 e o Gráfico 5-6 mostram as alternativas de janela ordenadas a partir do caso que obteve maior demanda de energia para iluminação e condicionamento do ar ao caso com menor demanda, para as duas orientações estudadas.

O resultado de cada cenário é apresentado na forma de percentual em relação ao pior cenário, para as duas orientações estudadas. Foi considerado o pior cenário aquele que obteve a maior demanda de energia anual dentre os analisados, que correspondeu à combinação de vidro incolor e abertura grande, sem *brise*, representada pela nomenclatura Av3a75s90.

Os resultados apresentados indicam que a combinação de vidro incolor com ângulo de sombreamento igual a 30° e acionamento dinâmico está entre os cenários com maior potencial de redução da demanda de energia nas duas orientações, apresentando melhor desempenho do que janelas pequenas com vidro de menor transmissão e sem sombreamento. Cenários com vidro cinza também podem estar entre os melhores, tal como o cenário Dv2a50s30.

Comparando-se todos os casos analisados, há um potencial máximo de redução da demanda de energia de até 36% em relação ao pior caso, na orientação Norte, e de 48%, na orientação Oeste, resultado obtido pelo cenário Dv3a50s30 nas duas orientações.

Conforme se observa, o potencial de redução da energia elétrica para um dado cenário é sempre maior na orientação Oeste. Como há maior incidência de radiação solar nessa orientação, o impacto da alteração do sistema de janela também é maior.

Gráfico 5-5 – Redução da demanda de energia em relação ao cenário com pior desempenho - Norte

Gráfico 5-6 – Redução da demanda de energia em relação ao cenário com pior desempenho - Oeste

A Tabela 5-1 e a Tabela 5-2 apresentam o incremento percentual da demanda de energia dos casos com *brise* em relação aos casos sem *brise*. Há a predominância de cenários com potencial de reduzir a demanda de energia quando se põe *brises*.

Tabela 5-1 – Incremento percentual da demanda de energia em relação ao caso sem *brise* - Norte

		v1			v2			v3		
		a25	a50	a75	a25	a50	a75	a25	a50	a75
s30	B - Fixo	0,7	-1,3	-8,8	5,1	-16,8	-22,5	-6,3	-23,8	-32,9
	C - Off-Ho	0,7	-0,8	-1,7	-1,0	-10,7	-17,6	-8,0	-15,5	-20,5
	D - Ho-In	-9,6	-9,4	-15,1	-5,2	-21,1	-22,1	-11,0	-26,7	-32,9
s60	B - Fixo	-1,8	-0,6	-7,4	1,3	-11,8	-15,1	-6,1	-16,0	-19,8
	C - Off-Ho	1,6	-0,3	-1,4	-1,9	-5,6	-10,5	-1,2	-9,4	-12,7
	D - Ho-In	-7,6	-10,6	-11,9	-5,4	-14,6	-15,7	-10,2	-16,9	-19,3

Tabela 5-2 - Incremento percentual da demanda de energia em relação ao caso sem *brise* – Oeste

		v1			v2			v3		
		a25	a50	a75	a25	a50	a75	a25	a50	a75
s30	B - Fixo	-1,2	-8,1	-10,7	-9,6	-21,2	-33,2	-14,7	-32,7	-40,2
	C - Off-Ho	-2,5	-7,0	-12,9	-11,2	-21,2	-28,1	-16,1	-26,8	-32,1
	D - Ho-In	-10,4	-14,5	-14,7	-15,7	-27,4	-37,0	-20,6	-36,9	-43,4
s60	B - Fixo	-0,4	-2,6	-6,1	-4,1	-12,0	-15,2	-7,8	-16,5	-19,2
	C - Off-Ho	1,3	-3,5	-5,4	-4,0	-10,1	-13,4	-6,8	-13,3	-16,1
	D - Ho-In	-5,7	-7,4	-11,5	-9,1	-12,9	-13,9	-9,8	-15,6	-17,7

As análises anteriores mostravam essa possibilidade, e aqui ela pode ser quantificada como sendo de até 40% em comparação direta dos totais obtidos. Há casos em que há aumento da energia, o que mostra a importância do cuidado na escolha da alternativa de janela, mesmo em termos de se escolher entre a opção exposta e a opção sombreada. Esse aumento da demanda de energia obtida no cenário sombreado em relação ao cenário de mesmas características, mas sem sombreamento, atingiu 5% no cenário Bv2a25s30 e orientação Norte.

Por fim, as tabelas a seguir permitem comparar o incremento percentual de energia dos cenários com acionamento dinâmico em relação aos cenários com *brise* fixo. Na orientação Norte (Tabela 5-3), observa-se que as maiores diferenças percentuais ocorrem no sentido de haver prejuízo (aumento da demanda de energia elétrica), tal como no caso com abertura

grande (a75) e aletas grandes (s30), onde há um aumento de até 18,5% do consumo de energia nos casos com controle *Off-Ho* (em que se alterna entre as situações sem *brise* e com *brise* horizontal), em relação ao caso com *brise* fixo.

Tabela 5-3 - Incremento percentual da demanda de energia em relação ao caso com *brise* fixo – Norte

		v1			v2			v3		
		a25	a50	a75	a25	a50	a75	a25	a50	a75
s30	C - Off-Ho	0,0	0,5	7,8	-5,8	7,3	6,3	-1,8	10,9	18,5
	D - Ho-In	-10,3	-8,2	-7,0	-9,8	-5,2	0,5	-5,0	-3,9	0,1
s60	C - Off-Ho	3,4	0,4	6,5	-3,1	7,0	5,3	5,3	7,8	8,9
	D - Ho-In	-5,9	-10,0	-4,8	-6,5	-3,1	-0,8	-4,3	-1,1	0,6

Quando se trata dos casos com acionamento *Ho_In* (alternando entre aletas fixas horizontais e aletas fixas inclinadas), observa-se que há redução do consumo em relação aos casos com *brise* fixo, na maior parte dos cenários de janela analisados, contudo essa diferença não passou dos 10,3%, o que, em se tratando de simulação computacional, pode ser considerado um valor baixo, dadas as possíveis imprecisões dos modelos.

Na orientação Oeste (Tabela 5-4), a maior redução encontrada do acionamento dinâmico em relação ao estático foi de 9,3%. Novamente, em comparação com o caso fixo, o valor do prejuízo (13,5%) foi maior que o valor da redução do consumo encontrado.

Tabela 5-4 - Incremento percentual da demanda de energia em relação ao caso com *brise* fixo – Oeste

		v1			v2			v3		
		a25	a50	a75	a25	a50	a75	a25	a50	a75
s30	C - Off-Ho	-1,3	1,2	-2,5	-1,8	0,1	7,6	-1,6	8,9	13,5
	D - Ho-In	-9,3	-7,0	-4,5	-6,8	-7,9	-5,7	-6,9	-6,2	-5,4
s60	C - Off-Ho	1,7	-1,0	0,8	0,1	2,1	2,2	1,1	3,9	3,9
	D - Ho-In	-5,4	-5,0	-5,8	-5,3	-1,1	1,6	-2,1	1,2	1,9

Considerando os parâmetros analisados e do ponto de vista da demanda de energia elétrica para condicionamento, uma vez que se decide pôr o *brise* horizontal, não há vantagem garantida ao se optar por sistemas automatizados em relação aos sistemas fixos e ativos o tempo todo, pois essa alteração resultou tanto no aumento como na redução dessa demanda de energia elétrica, a depender do cenário.

Esse resultado pode ser considerado como indo de encontro ao que seria a impressão inicial a ser tida quando se comparam *brises* móveis e *brises* fixos. Ao se considerar a adaptabilidade que o acionamento automatizado permite, esta primeira impressão seria de que sempre ele apresentaria um resultado melhor que a opção estática.

Contudo, os resultados indicam que isso não pode ser tido como premissa para todos os projetos. Os critérios que determinam o acionamento ou não do sistema podem ser determinantes para o resultado. O valor disponibilizado para definir a mudança de estado do protetor solar nas ferramentas utilizadas foi de 50W/m^2 . Conforme discutido na análise da iluminação natural, os resultados obtidos mostram que, dentro das condições analisadas, esse valor pode não provocar uma situação constantemente dinâmica, pois ele não seria frequentemente atingido no plano de trabalho estudado, de forma que o *brise* passa a maior parte do tempo em uma mesma condição.

Para se ter maiores detalhes sobre esse aspecto de análise, um estudo que considere diferentes *setpoints* de mudança de estado da janela permitiria uma compreensão mais aprofundada do desempenho dos cenários dinâmicos em questão. Dentro do recorte estudado, reitera-se que o observado foi que pode não haver diferença significativa entre o acionamento estático e o acionamento dinâmico.

6. RESULTADOS – CLASSIFICAÇÃO E ORDENAÇÃO

O desenvolvimento da pesquisa levou à definição de dois indicadores finais de desempenho, os quais serviram de base para os procedimentos de classificação e ordenação dos cenários de sistema de janela estudados.

O primeiro indicador é o percentual da área no plano de trabalho no qual o somatório de horas com iluminância entre 500 e 2000lx é maior que 50% do total de horas anuais ocupadas, representado pela sigla $A_{500-2000}$ (%). O segundo é o somatório da demanda anual de energia elétrica para lâmpadas e condicionamento do ar, representado pela sigla E_{cl} (kWh/m².ano). A forma de obtenção dos mesmos foi definida no Capítulo 3.

A Tabela 6-1 reúne todas as alternativas de sistema de abertura estudadas, indicando o resultado obtido para cada uma em relação aos dois indicadores de desempenho tratados.

Em termos do indicador $A_{500-2000}$, observa-se que os resultados variam entre 0 e 100%. Isto significa que apenas alterando as características da janela em função das variáveis de projeto estudadas, há o potencial de se modificar significativamente o desempenho do ambiente quanto ao aproveitamento da iluminação natural.

Verifica-se ser possível atingir o mínimo de 50% de horas anuais com iluminâncias entre 500 e 2000lx em todos os 30 pontos do plano de trabalho. Isso ocorreu nos cenários Bv3a75s30 e Dv3a75s30. Tais dados ilustram que não somente há um potencial significativo de aproveitamento da iluminação natural no ambiente analisado, mas que este aproveitamento poderia ser atingido por meio de diferentes tipos de leiaute, nestes dois cenários, tendo em vista que todos os pontos do plano de trabalho atingiriam a meta mínima de 50% de horas anuais ocupadas com independência do sistema artificial de iluminação.

Em termos de demanda de energia elétrica para condicionamento do ar e lâmpadas, os resultados obtidos para o indicador E_{cl} variam entre 34,94kWh/m² e 79,31 kWh/m². A diferença entre o valor máximo e o valor mínimo alcançados para esse consumo de energia, em função de todas as variáveis analisadas e considerando a área do ambiente analisado foi, portanto, de 1331,10kWh. Para se ter uma noção do significado deste resultado por meio de referências rotineiras, é possível fazer algumas comparações, tais como as apontadas a seguir.

Tabela 6-1 – Resultados de todos os cenários para os indicadores finais de desempenho

Acionamento	Vidro	PAF	Ângulo	Norte		Oeste	
				A ₅₀₀₋₂₀₀₀	E _{cl}	A ₅₀₀₋₂₀₀₀	E _{cl}
A - SEM BRISE	v1	a25	s90	0,0	52,4	0,0	58,6
		a50	s90	16,7	50,4	13,3	60,6
		a75	s90	26,7	51,2	16,7	61,9
	v2	a25	s90	26,7	42,7	30,0	53,8
		a50	s90	66,7	47,6	66,7	61,8
		a75	s90	66,7	50,4	66,7	71,6
	v3	a25	s90	56,7	41,0	50,0	53,1
		a50	s90	56,7	47,7	50,0	65,6
		a75	s90	40,0	54,9	33,3	79,3
B - FIXO	v1	a25	s30	0,0	52,8	0,0	57,9
			s60	0,0	51,5	0,0	58,4
		a50	s30	0,0	49,7	0,0	55,7
			s60	0,0	50,1	0,0	59,0
		a75	s30	0,0	46,7	0,0	55,3
			s60	0,0	47,4	0,0	58,2
	v2	a25	s30	0,0	44,8	0,0	48,7
			s60	33,3	43,2	33,3	51,6
		a50	s30	30,0	39,6	30,0	48,7
			s60	60,0	42,0	50,0	54,4
		a75	s30	60,0	39,1	60,0	47,8
			s60	83,3	42,8	73,3	60,7
	v3	a25	s30	26,7	38,4	33,3	45,3
			s60	43,3	38,4	50,0	49,0
		a50	s30	96,7	36,3	100,0	44,2
			s60	66,7	40,1	66,7	54,8
		a75	s30	100,0	36,8	96,7	47,4
			s60	50,0	44,0	50,0	64,1
C - OFF-HO	v1	a25	s30	0,0	52,8	0,0	57,1
			s60	0,0	53,2	0,0	59,4
		a50	s30	16,7	50,0	16,7	56,4
			s60	16,7	50,2	16,7	58,5
		a75	s30	23,3	50,3	16,7	54,0
			s60	26,7	50,4	16,7	58,6
	v2	a25	s30	20,0	42,2	40,0	47,8
			s60	26,7	41,8	30,0	51,7
		a50	s30	50,0	42,5	70,0	48,7
			s60	66,7	44,9	66,7	55,6
		a75	s30	73,3	41,5	73,3	51,4
			s60	66,7	45,1	66,7	62,0
	v3	a25	s30	50,0	37,7	56,7	44,6
			s60	46,7	40,5	53,3	49,5
		a50	s30	66,7	40,3	66,7	48,1
			s60	63,3	43,2	53,3	56,9
		a75	s30	50,0	43,6	46,7	53,8
			s60	46,7	47,9	33,3	66,5
D - HO-IN	v1	a25	s30	0,0	47,4	0,0	52,5
			s60	0,0	48,4	0,0	55,2
		a50	s30	0,0	45,6	0,0	51,8
			s60	0,0	45,0	0,0	56,1
		a75	s30	0,0	43,4	0,0	52,8
			s60	0,0	45,1	0,0	54,8
	v2	a25	s30	0,0	40,4	0,0	45,4
			s60	33,3	40,4	33,3	48,9
		a50	s30	30,0	37,6	20,0	44,9
			s60	66,7	40,7	60,0	53,8
		a75	s30	53,3	39,3	50,0	45,1
			s60	86,7	42,5	76,7	61,6
	v3	a25	s30	30,0	36,5	13,3	42,2
			s60	46,7	36,8	50,0	48,0
		a50	s30	90,0	34,9	70,0	41,4
			s60	66,7	39,6	66,7	55,4
		a75	s30	100,0	36,8	100,0	44,9
			s60	53,3	44,3	50,0	65,3

Sendo considerada uma tarifa de R\$0,29/kWh²², a diferença de consumo de energia elétrica mencionada seria equivalente a uma diferença de custo financeiro de R\$386,02 mais impostos, por ano, em um único ambiente com as características analisadas. Se for considerado o sistema de tarifas atual por bandeiras²³, a referida diferença de custo financeiro passa a ser ainda mais significativa.

Outra forma de visualizar o potencial de energia economizada no período de um ano decorrente do desenho otimizado da janela, em função das variáveis de projeto estudadas, é considerar os equipamentos do próprio escritório que poderiam ser mantidos com essa energia. Considerando um consumo mensal de 15,12 kWh²⁴ como sendo equivalente a um computador que é utilizado 8h/dia, por exemplo, a referida energia economizada seria suficiente para manter quatro unidades desse equipamento funcionando durante 22 meses, pelo menos, no escritório simulado, mesmo sem excluir os dias não ocupados do cálculo.

Tendo como ponto de partida a variação significativa dos resultados obtidos, os cenários de sistema de janela são classificados a seguir, utilizando duas regras diferentes, permitindo o auxílio a procedimentos de escolha de projeto.

6.1 Regra 1 – Classificação e ordenação por faixas

Após a atribuição dos resultados de cada alternativa conforme os indicadores finais apresentados, os resultados foram classificados pela Regra 1. Conforme descrito no capítulo da Material e Métodos, esta regra considera cinco faixas de resultados, tendo como referência para definição dos intervalos os resultados de todos os cenários obtidos nesta pesquisa. A legenda das cores dos intervalos de classificação é conforme a Tabela 6-2.

A escala do pior ao melhor desempenho é, portanto, da cor vermelha para a cor verde-escuro. Quando mais próxima da cor verde-escuro a classificação, melhor foi o resultado obtido pela alternativa de janela, significando maior percentual do ambiente com iluminâncias entre 500 e 2000lx e menor demanda de energia para condicionamento do ar e iluminação.

²² Tarifa média de fornecimento de energia elétrica para uso de comércio e serviços em Alagoas (R\$285,71/MWh), de 2003 a 2015, sem tributos. Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=550>>. Acesso em: 03. out. 2015.

²³ A tarifa atual, sem tributos, varia entre R\$0,41402/kWh (bandeira verde) e R\$0,46902/kWh (bandeira vermelha) para a classe B3, que inclui o uso comercial. Fonte: Eletrobras. Disponível em <http://www.eletrobrasalagoas.com/tarifas_tabela.aspx>. Acesso em: 03. out. 2015.

²⁴ Dados da tabela com “estimativa de consumo médio mensal de eletrodomésticos de acordo com um uso hipotético” do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL INFO. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D>> Acesso em 03. out. 2015.

Tabela 6-2 – Legenda dos intervalos de classificação pela Regra 1

	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5
Iluminação: $A_{500-2000}$ (%)	$A_{500-2000} < 20$	$20 \leq A_{500-2000} < 40$	$40 \leq A_{500-2000} < 60$	$60 \leq A_{500-2000} < 80$	$A_{500-2000} \geq 80$
Energia: E_{cl} (kWh/m ² .ano)	$E_{cl} \geq 70,4$	$61,6 \leq E_{cl} < 70,4$	$52,7 \leq E_{cl} < 61,6$	$43,8 \leq E_{cl} < 52,7$	$E_{cl} < 43,8$

6.1.1 Classificação para os indicadores separadamente

A Tabela 6-3 apresenta uma possibilidade de classificação pela Regra 1, considerando os dois critérios de desempenho separadamente. Através dela, é possível comparar os resultados de todos os cenários entre si, com relação a cada critério analisado, ao mesmo tempo em que se permite comparar o desempenho luminoso com o desempenho energético de cada cenário. Além disso, é possível também ter uma visualização direta de grupos de alternativas com resultados semelhantes entre si.

O primeiro aspecto observado se refere à dispersão dos resultados. De forma comparada, as classificações obtidas para a iluminação apresentam maior variação total e maior número de resultados que se aproximam das classificações mínimas (cor vermelha). Já com relação ao indicador da energia, chama atenção a maior uniformidade e o maior número de resultados que se aproximam dos melhores obtidos (cor verde-escuro).

O número expressivo de cenários com classificação na faixa vermelha do indicador $A_{500-2000}$ chama atenção. Esses são, prioritariamente, cenários com vidro refletivo de baixa transmissão luminosa (v1). No que se refere à iluminação natural, portanto, esse tipo de vidro obteve desempenho comparado muito inferior aos demais tipos de vidro analisados. Já com relação à demanda de energia, havia uma expectativa inicial de que o desempenho desse vidro fosse melhor, devido ao controle do ganho solar por transmissão, contudo, mesmo quanto ao critério E_{cl} , foram obtidas classificações até na faixa de cor laranja (segunda “pior”).

Conforme a análise do Capítulo 5, a demanda de energia avaliada é resultado da soma da demanda para condicionamento do ar com a demanda para o sistema de iluminação artificial. Reitera-se que a demanda de energia para as lâmpadas tem um peso importante para a escolha do sistema de janela, por ser muito sensível aos parâmetros desse elemento de projeto. Esse fator pode ter causado a classificação que favorece as alternativas com vidro cinza (v2) e incolor (v3).

Tabela 6-3 - Classificação dos cenários por faixas, considerando os dois critérios separadamente

REGRA 1 - Dividindo os resultados encontrados em cinco faixas iguais				Norte		Oeste	
				A ₅₀₀₋₂₀₀₀	E _{cl}	A ₅₀₀₋₂₀₀₀	E _{cl}
A - SEM BRISE	v1	a25	s90				
		a50	s90				
		a75	s90				
	v2	a25	s90				
		a50	s90				
		a75	s90				
	v3	a25	s90				
		a50	s90				
		a75	s90				
B - FIXO	v1	a25	s30				
			s60				
		a50	s30				
			s60				
		a75	s30				
			s60				
	v2	a25	s30				
			s60				
		a50	s30				
			s60				
		a75	s30				
			s60				
	v3	a25	s30				
			s60				
		a50	s30				
			s60				
		a75	s30				
			s60				
C - OFF-HO	v1	a25	s30				
			s60				
		a50	s30				
			s60				
		a75	s30				
			s60				
	v2	a25	s30				
			s60				
		a50	s30				
			s60				
		a75	s30				
			s60				
	v3	a25	s30				
			s60				
		a50	s30				
			s60				
		a75	s30				
			s60				
D - HO-IN	v1	a25	s30				
			s60				
		a50	s30				
			s60				
		a75	s30				
			s60				
	v2	a25	s30				
			s60				
		a50	s30				
			s60				
		a75	s30				
			s60				
	v3	a25	s30				
			s60				
		a50	s30				
			s60				
		a75	s30				
			s60				

Por sua vez, chama atenção o número de resultados com classificação nas faixas de cor verde no indicador E_{cl} . As classificações dos resultados quanto a esse indicador não só são mais uniformes como são mais próximas dos melhores valores possíveis dentre os analisados.

Essa uniformidade nas classificações obtidas é expressiva na orientação Norte. Isso indica que, considerando tal classificação, essa é uma orientação onde a escolha dentre as alternativas analisadas não afetaria significativamente o desempenho quanto ao indicador E_{cl} , e pode, portanto, ser secundária nas condições descritas nesta pesquisa. Com relação ao consumo de energia ainda nesta orientação, todos os resultados com o acionamento do tipo *Ho-In* ficaram classificados em uma das duas faixas indicativas de melhor desempenho (cores verde-claro e verde-escuro) dentre as soluções analisadas.

A Tabela 6-3 indica ainda alguns cenários com janela sem dispositivos de sombreamento que obtiveram resultado dentro das faixas de cor verde, quanto à iluminação natural (tais como os cenários Av2a50s90 e Av2a75s90). Quanto ao consumo de energia, isso ocorreu na orientação Norte e não ocorreu na orientação Oeste, sendo evidenciado que a maior carga térmica resultante nessa última orientação demanda a necessidade de se possuir sombreamento para se obter resultado dentro dessas faixas indicativas de melhor desempenho.

É com a janela voltada para Oeste que estão os cenários que se encontram na faixa que corresponde ao maior consumo de energia obtido, e, portanto, pior resultado desse indicador: os cenários Av2a75s90 e Av3a75s90, que representam condições de abertura grande com vidro incolor ou cinza e sem dispositivos de proteção solar, são os únicos a obter classificação na faixa de cor vermelha no indicador E_{cl} .

Observa-se que, quanto à iluminação natural, aberturas médias ou grandes, sombreadas, compostas de vidros cinza ou incolor, apresentaram desempenho comparado melhor do que aberturas pequenas sem sombreamento e com vidro refletivo ou cinza. Já com relação à demanda de energia na orientação Oeste, aberturas pequenas com vidro cinza ou incolor e sombreadas são garantia de classificação na faixa verde. Na orientação Norte, eleger alternativas que se destacam com relação à classificação obtida nesse critério específico é uma ação de pouco efeito, pois, como visto anteriormente, quase todas as alternativas obtiveram classificação semelhante.

Com relação aos diferentes tipos de acionamento do *brise* estudados, foi possível obter classificação em todas as faixas definidas, qualquer que seja o acionamento. Observa-se ainda que as diferenças entre as orientações Norte e Oeste são maiores com relação à demanda de energia elétrica do que com relação ao indicador de desempenho da iluminação natural.

6.1.2 Classificação única considerando a operação dos dois indicadores

A Tabela 6-4 apresenta um resultado das classificações como “média” das classificações dos dois indicadores, de três formas diferentes: indicadores com o mesmo peso, indicador referente à iluminação natural com o dobro do peso do indicador referente à energia e indicador referente à energia com o dobro do peso do indicador referente à iluminação.

Crítérios com o mesmo peso na classificação

A primeira coluna de resultados da Tabela 6-4 mostra os resultados obtidos quando a classificação toma por base a média aritmética das classificações obtidas nos dois indicadores de desempenho. Essa situação equivale ao caso de um processo decisório onde é atribuído o mesmo grau de prioridade aos dois critérios de escolha.

A primeira observação de destaque se refere ao fato de que nenhuma alternativa obteve classificação na faixa vermelha, que nesse caso significaria que o cenário obteve a pior classificação nos dois indicadores quando considerados separadamente.

Isso ocorre devido ao fato de que os cenários que haviam apresentado desempenho na faixa mais desfavorável com relação ao critério da demanda de energia para condicionamento, Av2a75s90 e Av3a75s90, haviam apresentado resultados indicativos de alta disponibilidade de luz, o que os faz ficar até na faixa verde, na orientação Norte, nessa classificação conjunta. Do mesmo modo, os cenários que haviam obtido o desempenho menos favorável com relação à iluminação natural (todos aqueles com vidro refletivo, por exemplo), teriam potencial para serem classificados entre os melhores casos em relação à demanda de energia, devido à redução da carga térmica de resfriamento que define a demanda de energia para condicionamento do ar.

Por outro lado, quando se considera a faixa de melhores resultados (faixa de cor verde-escuro), há alternativas que atingiram esse desempenho, que é o melhor possível por essa classificação. É o caso das situações v3a50s30 e v3a75s30 com *brises* fixos e com *brises* de acionamento do tipo *Ho-In*. Tal resultado mostra que é possível atender aos dois critérios de desempenho estudados de forma simultânea. Assim, mesmo com o aparente conflito de ganhos de luz e calor provenientes de uma configuração de janela, é possível se obter alto desempenho luminoso e alto desempenho energético ao mesmo tempo, considerando as médias dos resultados obtidos nos indicadores estudados.

Tabela 6-4 - Classificação dos cenários por faixas, considerando os dois critérios ao mesmo tempo

REGRA 1 - Dividindo os resultados encontrados em cinco faixas iguais				1.1 – Pesos iguais (1/1)		1.2 – Peso maior p/ iluminação (2/1)		1.3 – Peso maior p/ energia (2/1)	
				Norte	Oeste	Norte	Oeste	Norte	Oeste
A - SEM BRISE	v1	a25	s90						
		a50	s90						
		a75	s90						
	v2	a25	s90						
		a50	s90						
		a75	s90						
	v3	a25	s90						
		a50	s90						
		a75	s90						
B - FIXO	v1	a25	s30						
			s60						
		a50	s30						
			s60						
		a75	s30						
			s60						
	v2	a25	s30						
			s60						
		a50	s30						
			s60						
		a75	s30						
			s60						
	v3	a25	s30						
			s60						
		a50	s30						
			s60						
		a75	s30						
			s60						
C - OFF-HO	v1	a25	s30						
			s60						
		a50	s30						
			s60						
		a75	s30						
			s60						
	v2	a25	s30						
			s60						
		a50	s30						
			s60						
		a75	s30						
			s60						
	v3	a25	s30						
			s60						
		a50	s30						
			s60						
		a75	s30						
			s60						
D - HO-IN	v1	a25	s30						
			s60						
		a50	s30						
			s60						
		a75	s30						
			s60						
	v2	a25	s30						
			s60						
		a50	s30						
			s60						
		a75	s30						
			s60						
	v3	a25	s30						
			s60						
		a50	s30						
			s60						
		a75	s30						
			s60						

Outro aspecto observado nos resultados ilustrados na coluna 1.1 refere-se ao desempenho inferior do vidro refletivo de baixa transmissão (v1) em relação aos outros dois tipos, que ocorreu novamente (ver cenários com classificação na faixa de cor laranja), mesmo considerando a orientação Oeste, que em princípio, necessitaria de controle solar na maior parte do tempo. Em termos de projeto, aponta-se que o possível ganho no controle da radiação solar decorrente da utilização desse vidro pode não compensar a perda na iluminação natural.

Há uma ressalva nessa observação, referente aos cenários com vidro refletivo (v1), acionamento do tipo *Ho-In*, abertura pequena (a25) e sombreamento de 30° (s30). Nessas condições, há um bloqueio considerável da radiação solar no ambiente. A classificação na faixa de cor amarela, ao invés de na faixa de cor laranja obtida pelos demais tipos de acionamento, pode ser a indicação de que nesses casos o total de ganho solar que é evitado pode ser equivalente à variação da demanda de energia para iluminação que definiu a classificação de outros cenários (a exemplo do cenário Dv2a50s30).

Crítérios com peso diferenciado na classificação

A classificação dos cenários obtida considerando o maior peso da iluminação (coluna 1.2) é semelhante à encontrada quando foi atribuído o mesmo peso aos dois critérios (1.1), cujas tendências identificadas já foram discutidas na subseção anterior. O fato de os resultados para o indicador de desempenho da iluminação apresentarem maior variação dos resultados do que para a demanda de energia, mesmo com a participação significativa da demanda de energia para condicionamento do ar no total, já foi discutido em termos de resultados absolutos, no início deste capítulo, e agora pode explicar o comportamento obtido.

Há, portanto, a possibilidade de o indicador da iluminação ter maior potencial de influenciar o enquadramento final da alternativa numa ordenação que considere os dois indicadores de desempenho, analisados com o mesmo peso. Dessa forma, ao considerar tais indicadores quantitativos e desejando-se escolher alternativas de janela com maior potencial de obter bom desempenho nos dois, atribuindo o mesmo grau de importância a cada um deles, seria possível concentrar esforços e recursos no conhecimento do desempenho com relação ao critério de iluminação natural.

Como destaque para os resultados da coluna 1.3 (situação em que se prioriza a demanda de energia), observa-se que há cenários com janela com PAF = 25% e vidro cinza, que aparecem com classificação na faixa verde-claro (segunda melhor), o que não ocorre quando se prioriza a iluminação natural. Tal resultado indica que, quando a prioridade é a

demanda de energia elétrica, reduzir a área de abertura pode ter um importante impacto positivo no desempenho, mesmo com um vidro de 51% de transmissão visível, como é o caso do vidro cinza simulado.

Percebe-se que, na orientação Oeste, os cenários classificados na faixa verde-escuro são sempre os mesmos, independentemente dos pesos atribuídos aos indicadores. Além disso, a maior diferença entre os resultados da coluna 1.3 em relação às outras duas formas de operação dos critérios (colunas 1.1 e 1.2) é a diminuição significativa dos cenários classificados na faixa laranja, que em sua maioria passam para a faixa amarela. Esses aspectos mostram que há a possibilidade de que a diferenciação de pesos dos indicadores na forma realizada não influencie a classificação obtida, em adição à possibilidade anteriormente destacada de os resultados com peso maior da iluminação serem semelhantes aos resultados em que os dois critérios possuíam o mesmo peso.

Ainda quanto à prioridade dos indicadores, já foi observado, na mesma Tabela 6-4, que não aparecem cenários com classificação na faixa vermelha, mesmo quando se prioriza um ou outro indicador na classificação realizada. Assim, os pesos aqui considerados na definição da classificação ponderada não são suficientes para que um critério seja definidor absoluto do desempenho final, e a relação inversa entre os resultados dos dois critérios de desempenho continua a ocorrer mesmo quando são atribuídos pesos diferentes aos mesmos.

Como indicações de projeto com base na classificação das alternativas pela Regra 1, é possível apontar as seguintes diretrizes gerais para um maior potencial de obtenção de bom desempenho:

- com indicadores $A_{500-200}$ e E_{cl} considerados com o mesmo peso, recomenda-se evitar vidro refletivo na orientação Oeste;
- com maior peso para a iluminação natural, recomenda-se evitar vidro refletivo nas duas orientações, mesmo nos casos sem *brise*;
- com maior peso para a demanda de energia: evitar janela sem *brise* com janela grande (a75) na orientação Oeste, bem como o cenário Cv3a75s60;

Essas indicações se referem aos cenários que obtiveram classificação na faixa laranja, aqui consideradas alternativas a serem evitadas. Considerou-se que o desempenho da faixa amarela em diante está dentro ou acima da média de resultados possíveis, e são, portanto, alternativas aceitáveis, comparativamente às demais. As melhores delas seriam aquelas na classificação verde, que são apresentadas a seguir. Elas são mais semelhantes para os diferentes pesos dos critérios, e mais distintas em função da orientação.

A utilização de vidro claro combinado com sombreamento de 30°, janela média grande e acionamento fixo ou *Ho-In* apresentou desempenho dentro das faixas verdes em todas as classificações da Regra 1, sendo essa uma classificação comum às duas orientações.

Na orientação Norte, apareceram alguns resultados de cenários de janela sem *brise* dentro de uma das duas faixas de desempenho mais favorável (cor verde) em todas as classificações que combinam os dois critérios (1.1, 1.2 e 1.3), mesmo, portanto, quando o peso é maior da demanda de energia. Já na orientação Oeste, isso ocorre com apenas um caso (Av2a50s90), quando se considera o peso maior da iluminação natural na classificação. Esse é um dos resultados que mostram que a interpretação dos dados da tabela não pode ser aplicada sem ressalvas ou sem o conhecimento do contexto real de projeto, pois já existem inúmeros trabalhos anteriores que mostram que janelas sombreadas apresentam melhor desempenho do que janelas expostas, em termos de ofuscamento e uniformidade da iluminação natural, em localidades tropicais.

Por fim, em termos de comparação entre as duas orientações analisadas, a análise visual dos resultados indica que a orientação Norte apresenta maior potencial de bom desempenho. Tendo como referência o desempenho que é comum às duas orientações, observa-se que *brises* com aletas grandes (s30) e vidro incolor (v3) são elementos que aparecem em todas as combinações com melhor classificação (cor verde). Isoladamente, pensar em janela com muito sombreamento pode significar escurecimento do ambiente, assim como vidro incolor pode pressupor excesso de radiação solar. No entanto, os resultados indicam que esses elementos combinados tendem a fornecer o buscado equilíbrio entre ganhos de luz e ganhos de calor.

6.2 Regra 2 – Classificação e enquadramento em uma faixa-alvo

A aplicação da Regra 2 para classificação e ordenação das alternativas consiste, primeiramente, na divisão do resultado obtido para cada cenário pelo melhor resultado dentre os obtidos, para um indicador de desempenho e uma orientação. Em seguida, o resultado dessa divisão é incluído ou não em uma faixa-alvo de resultados, em função da distância em relação à melhor classificação, a qual seria o resultado da divisão ser igual a 1.

É destacada como faixa-alvo aquela em que o resultado da divisão fica entre 0,9 e 1,1, referindo-se, portanto, a um conjunto de resultados entre os 10% melhores dentre todos os obtidos por meio da operação de divisão. A aplicação da Regra 2 nos resultados encontra-se no Gráfico 6-1.

Gráfico 6-1 – Razão entre o resultado de cada cenário e o resultado do melhor cenário para as diferentes orientações e indicadores de desempenho analisados – Regra 2

A operação realizada permite comparar de forma direta os resultados de indicadores de desempenho que possuem unidades diferentes, que é o caso desta pesquisa. Não se trata da classificação de todos os resultados em faixas, como na Regra 1, mas da busca pelos resultados que se encontram em uma faixa específica de desempenho, considerado o máximo possível nas condições analisadas. A faixa de 10% definida pode ser considerada bastante restritiva. Ela foi utilizada como forma de identificar os resultados que seriam considerados “ótimos”, e tem como referência os resultados de $A_{500-200} = 100\%$ e o resultado de $E_{cl} = 34,94\text{kWh/m}^2$, indicados no início da seção.

Os valores de classificação que se referem à demanda de energia (indicador E_{cl}) estão sempre acima de 1, pois o melhor cenário é aquele com menor demanda de energia, de forma que todos os demais resultados obtidos são maiores que este. Já com relação à iluminação natural ocorre o contrário, estando todos os resultados abaixo de 1, visto que o melhor resultado é aquele com maior valor de $A_{500-2000}$.

Este Gráfico 6-1 possibilita a visualização de como todos os resultados analisados se relacionam entre si. As comparações feitas ao longo da pesquisa até então agora podem ser feitas tendo como referência a faixa-alvo de resultados, ao invés dos cenários entre si.

Naturalmente, tomando-se por base apenas esse gráfico, perde-se a noção do valor absoluto obtido para os indicadores de desempenho. Contudo, a informação comparativa disponibilizada é aquela que pode ser mais importante no momento do projeto arquitetônico, constituindo uma informação direta para suporte a decisões, na medida em que permite visualizar graficamente quais opções de projeto se enquadram em um determinado padrão de desempenho.

Nota-se que o cenário v3a50s30 com *brise* fixo e o cenário v3a75s30 com acionamento *Ho-In* apresentaram os quatro pontos (referentes às duas orientações e aos dois critérios analisados) dentro da faixa-alvo. Observa-se também que há cenários que, apesar de não atingirem esse desempenho, se aproximaram do mesmo, tais como o cenário Bv3a75s30, que apresentou três pontos dentro da faixa-alvo e um ponto próximo da mesma.

Conforme já mencionado, o intervalo definido para a faixa-alvo é significativamente restritivo, o que pode ser observado pelo número reduzido de alternativas dentre as estudadas que se localizaram dentro da região de cor verde do gráfico. O objetivo dessa restrição foi identificar os cenários que se destacam entre todos os demais, sendo essa uma classificação que pode ser considerada para se identificar janelas de alto desempenho em relação a alternativas semelhantes.

Essa faixa pode ser expandida, ou podem ser acrescentadas outras faixas que permitam a ordenação de todas as alternativas. Nesta pesquisa, essa ação já foi parcialmente realizada quando foi realizada a classificação pela Regra 1. As sistematizações gráficas realizadas pelas duas Regras descritas são diferentes entre si e, conseqüentemente, servem a diferentes propósitos, tal como descrito.

A Tabela 6-5 a seguir destaca os cenários classificados na faixa-alvo da Regra 2, considerando os resultados que são comuns às duas orientações. Observa-se que, tal como ocorreu com a Regra 1, é possível que um cenário se enquadre dentro da faixa indicativa de melhor desempenho nos dois indicadores ao mesmo tempo.

Tabela 6-5 - Cenários na faixa alvo comum às duas orientações – Regra 2 – Indicadores separados

<i>A₅₀₀₋₂₀₀₀</i>	<i>E_{cl}</i>
Bv3a50s30	Bv3a25s30
Bv3a75s30	Bv3a50s30
Dv3a75s30	Cv3a25s30
	Dv2a50s30
	Dv3a25s30
	Dv3a50s30
	Dv3a75s30

Observa-se que um cenário com acionamento *Off-Ho* ficou entre os melhores nas duas orientações, em relação ao indicador da demanda de energia. À exceção desse cenário, apenas resultados com acionamento *Fixo* ou *Ho-In* ficaram dentro da faixa alvo nas duas orientações analisadas, todos com ângulo de sombreamento igual a 30°. Esses cenários haviam obtido classificação na faixa de cor verde pela Regra 01, com indicadores considerados separadamente.

6.3 Considerações finais com base nas duas regras de classificação

A classificação e ordenação dos resultados com base nas duas regras utilizadas constituem duas formas possíveis de se oferecer suporte a decisões de projeto. As diferenças de tipos de informações que as mesmas proporcionam já foram identificadas no decorrer da análise. Aqui cabe a reafirmação de que ambas se mostraram adequadas para tratar de forma sistemática as informações de desempenho da janela obtidas a partir de simulação computacional, de uma forma que se aproxima mais do que é necessário para suporte a escolhas nos estágios iniciais de projeto do que o produto direto da simulação.

Lembra-se que, dentro dos critérios de aproveitamento da luz natural e uso de energia para condicionamento do ar e lâmpadas, podem existir outros fatores e subcritérios que não fizeram parte do escopo dessa análise, tais como o conforto visual, a sensação térmica provocada pela radiação solar direta que atinge o plano de trabalho, o consumo de energia do sistema de automação dos *brises* etc.

Além disso, não houve comparação com uma referência de desempenho obtida em campo, e sim entre as diferentes alternativas. Pode ocorrer que todas as alternativas e condições analisadas estejam dentro de um padrão considerado “acima da média”, ou que todas elas estejam abaixo, por exemplo, do padrão existente. Esses aspectos podem ser decisivos para se considerar a utilização das constatações feitas nesta pesquisa como diretrizes de projeto, as quais devem sempre ser contextualizadas.

Feitas tais ressalvas e considerando o conhecimento adquirido ao longo da pesquisa, os principais destaques de indicações de projeto arquitetônico com potencial de alto desempenho, em relação ao uso e contexto climático estudados, são apresentados a seguir:

- Utilizar janelas com vidro incolor ou cinza e sombreadas o tempo todo (acionamento do tipo *Fixo* ou *Ho-In*);
- Combinar janelas médias com *brises* de aletas grandes;
- Evitar vidro refletivo de baixa transmissão;
- Evitar toda configuração de janela sem *brise* na orientação Oeste;
- Se a prioridade for a demanda de energia elétrica para condicionamento do ar e iluminação artificial, utilizar janelas médias ou pequenas;

As classificações realizadas, portanto, têm potencial para auxiliar de maneira informativa as escolhas de projeto relacionadas ao desempenho do sistema de janela em relação à iluminação natural e uso de energia para condicionamento do ambiente, considerando o conflito de ganho de luz e de calor em uma localidade de clima quente e úmido.

CONCLUSÃO

Nesta tese de doutorado, foram avaliados sistemas de janela estáticos e dinâmicos para suporte a decisões de projeto arquitetônico, quanto a diferentes critérios de desempenho relacionados à iluminação natural e uso de energia elétrica no ambiente interno, de forma integrada. Isso foi realizado por meio de avaliação quantitativa comparativa, com base em dados obtidos por simulação computacional utilizando os programas *Daysim* e *EnergyPlus*.

Os principais produtos do trabalho foram:

- Dados quantitativos gráficos de iluminância por faixas e distribuição da luz no ambiente, considerando informações horárias de 30 pontos no plano de trabalho analisado;
- Dados quantitativos gráficos de demanda de energia elétrica para condicionamento do ar e iluminação artificial, por uso final e total;
- Dados quantitativos gráficos de incremento percentual da demanda de energia elétrica em relação às alternativas com pior desempenho;
- Esquemas de auxílio direto a decisões de projeto arquitetônico, considerando duas regras diferentes de classificação, em formato de tabela e formato de gráfico, contendo a classificação de todas as alternativas analisadas. A classificação considera os critérios separadamente e a operação dos mesmos.

Os métodos e ferramentas aplicados permitiram concretizar os objetivos da pesquisa, bem como identificar pontos a ser repensados em pesquisas futuras.

Com relação às ferramentas de obtenção de dados, reafirmou-se que a simulação computacional apresenta diversas possibilidades de se explorar o conhecimento do desempenho esperado para os sistemas de janela na fase de projeto.

Dentre os principais aspectos positivos, está o fato de as simulações da iluminação natural realizadas terem permitido analisar informações horárias de 30 pontos do plano de trabalho, considerando dados de um ano inteiro e o acionamento dos *brises* em resposta aos valores obtidos, por meio de métodos de simulação amplamente validados. A simulação com o *EnergyPlus*, por sua vez, além de considerar o clima do local, permitiu uma caracterização detalhada do modelo. Como ponto limitante, temos a utilização do *Daysim* em versão *legacy* (o início do trabalho ocorreu durante o início de uma grande transição de versões e forma de

distribuição do programa). Além de datar o trabalho, o fato de a versão não ser mais documentada e atualizada limitou a resolução de dúvidas e dificuldades encontradas no processo das simulações.

Quanto à utilização de duas regras de classificação, foi possível observar dois tipos diferentes de suporte à decisão, sendo um focado na comparação entre as alternativas e o outro focado na identificação direta daquelas que atendem a uma meta de desempenho em função dos critérios considerados.

Dentre os principais resultados das análises realizadas e contribuições do trabalho, tem-se:

- Foram identificadas as variáveis de projeto dentre as analisadas com maior impacto nos diferentes indicadores de desempenho;
- Observou-se que, apesar de a demanda de energia elétrica para condicionamento do ar ser frequentemente maior do que a demanda para iluminação, o desempenho da abertura quanto ao aproveitamento da iluminação natural pode ter peso decisivo na escolha de projeto, pois este indicador de desempenho foi mais sensível às variáveis da janela estudadas do que o primeiro;
- Constatou-se que protetores solares dinâmicos não são garantia de melhoria de desempenho em relação a sistemas estáticos, no contexto estudado;
- Os resultados mostraram soluções arquitetônicas que apresentaram desempenho em uma faixa dos 10% melhores resultados nos dois indicadores utilizados para classificação, ao mesmo tempo. Assim, mesmo com o aparente conflito de ganhos de luz e calor provenientes de uma configuração de janela, é possível se obter alto desempenho luminoso e alto desempenho energético ao mesmo tempo, considerando os resultados obtidos nos indicadores estudados.

Com relação às constatações específicas válidas para escritórios em Maceió-AL, com base no modelo estudado (ambiente de 30m², janela em uma lateral, carga interna de 42W/m² e termostato com temperatura fixa de 25°C), foi observado que:

- Tanto o tipo de vidro quanto o ângulo de sombreamento do *brise* podem alterar significativamente o desempenho da abertura. Contudo, considerando o controle dos ganhos solares com o máximo de disponibilidade de luz, a estratégia de controle solar pelos *brises* apresentou predominantemente melhor desempenho que o controle pela redução da transmissão do vidro. O impacto do percentual de área de abertura foi bastante dependente desses aspectos, de forma que a influência provocada pela

alteração desta variável pode mudar significativamente a depender do vidro e do ângulo de sombreamento com os quais ela é combinada;

- Na orientação Norte, as classificações obtidas evidenciaram maior uniformidade de desempenho entre as diferentes alternativas do que com janela voltada para Oeste;
- Da mesma maneira, foi observada uma maior uniformidade entre os resultados referentes aos indicadores de energia do que em relação aos indicadores de desempenho relacionados à iluminação natural;
- Os extremos dos resultados com relação ao indicador $A_{500-2000}$ (percentual da área no plano de trabalho onde o somatório de horas com iluminância entre 500 e 2000lx é maior que 50% do total de horas anuais ocupadas) foram 0 e 100%, o que ilustra o impacto potencial da escolha dentre diferentes alternativas neste critério;
- Comparando-se todos os casos analisados, foi obtido um potencial máximo de redução do somatório da demanda anual de energia elétrica para lâmpadas e condicionamento de até 36% em relação ao pior caso, na orientação Norte, e de 48%, na orientação Oeste, em função das diferentes alternativas analisadas;
- A combinação de aberturas médias com *brises* de maior obstrução (fixos ou com controle dinâmico do ângulo das aletas) e vidro mais transparente foi a combinação com maior potencial de alto desempenho nas diferentes condições analisadas;
- Com relação à estratégia de acionamento do *brise* dinâmico, o controle do ângulo das aletas se mostrou mais eficiente, no contexto analisado, do que o controle liga-desliga.

Tais constatações, além de atuar como auxílio direto ao projeto arquitetônico, podem servir de apoio para elaboração de normativas ou leis (tais como o Código de Obras municipal), na forma de diretrizes gerais de dimensionamento dos sistemas de janela.

Limitações

Os seguintes aspectos podem ser apontados como limitações desta pesquisa:

- Todos os pontos do ambiente foram considerados como sensores para acionamento do sistema de lâmpadas e dos *brises* automatizados. Dessa forma, quando qualquer ponto atingia o *setpoint* de acionamento do *brise* ou das lâmpadas, a condição de todos os *brises* e/ou todas as lâmpadas era alterada. Essa abordagem permite atender ao pior cenário dentre diferentes leiautes, mas é limitada para interpretação do desempenho no plano de trabalho como um todo, pois há a possibilidade de esse ponto ser uma região

muito pequena, representativa de um efeito localizado, mas que, no caso, foi utilizado como critério para alterar a situação de todo o ambiente;

- O programa de simulação natural utilizado possui apenas uma possibilidade de critério para definir o momento de acionamento dos *brises* (modificar o estado dos mesmos quando a radiação solar incidente no plano de trabalho é maior que 50W/m^2).
- A análise de sensibilidade realizada utilizou apenas coeficientes de regressão linear, para auxiliar a visualização do efeito dos critérios; uma análise mais específica dependeria da utilização de índices que considerassem a variação não-linear e incertezas.

Recomendações e sugestões de trabalhos futuros

- Realizar comparação de consumo de energia com *benchmarks* da tipologia de edificação estudada, para se ter uma ideia mais precisa do quanto uma alternativa é melhor ou pior que a outra, em função do que é possível e do que é comum no mercado;
- Confrontar os dados encontrados com a percepção do desempenho pelos usuários, em termos de ofuscamento e sensação térmica provocada, por exemplo, pela incidência de radiação solar direta na área de trabalho, realizando análise com a consideração de índices horários de conforto térmico e visual;
- Considerar como variáveis os seguintes parâmetros utilizados: contexto climático, refletância dos *brises* e do teto, tipo de sistema de controle das lâmpadas e temperatura do termostato;
- Analisar sistemas específicos de automação de janelas, disponíveis no mercado.

Ao final do trabalho, conclui-se que é possível fornecer informações que levem a um projeto de sistemas de janela com potencial de alto desempenho, em relação à iluminação natural e uso de energia elétrica para condicionamento do ambiente interno, ao mesmo tempo, mesmo sob condições de radiação solar intensa. A pesquisa realizada forneceu dados sobre tal desempenho, bem como diretrizes específicas para suporte a decisões de projeto de janelas.

REFERÊNCIAS

ALZOUBI, H. H.; AL-ZOUBI, A. H. Assessment of building façade performance in terms of daylighting and the associated energy consumption in architectural spaces: Vertical and horizontal shading devices for southern exposure facades. **Energy Conversion and Management**, [S.l.], v.51, n.9, p. 1592–1599, ago. 2010.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta, 2004.

ARAÚJO, I. A. L. de; CAVALCANTE, M. R. C. CABÚS, R. C. Influência de prateleira de luz sob marquise na uniformidade da iluminação natural em interiores. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. p. 83-91. CD-ROM.

ARCOWEB. **Construção sustentável –Sistema informatizado movimenta a fachada**. Disponível em <<http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/construcao-sustentavel-sistema-informatizado-25-05-2005.html>> Acesso em 05mar.2012.

ASCHEHOUG, Ø.; PERINO, M. (Editores). IEA ECBCS **Annex 44 Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings: Expert Guide – Part 2 Responsive Building Elements**. St Albans-UK: AECOM Ltd, 2009. Disponível em: <www.civil.aau.dk/Annex44> Acesso em 02jul.2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16401-1**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro, 2008-a.

_____. **NBR 16401-3**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008-b.

_____. **NBR 15215-4**: Iluminação natural - Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - Método de medição. Rio de Janeiro, 2005-a.

_____. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005-b.

_____. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005-c.

_____. **NBR ISO/CIE 8995-1**: Iluminação de ambientes de trabalho - Parte 1: Interior. Rio de Janeiro, 2013.

ATENUA SOM. Disponível em <<http://janeladepvc.com.br/janela-de-pvc/>>. Acesso em 31 out. 2013

ATHIENTIS, A. K. A Methodology for Integrated Building – HVAC System Thermal Analysis. **Building and Environment**, Grã-Bretanha, v. 28, n. 4. p. 483-496, 1993.

AUGENBROE, G. **The role of simulation in performance based building**. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (Ed.) *Building Simulation for design and operation*. Oxon: Spon Press, 2011.

AUGENBROE, G.; PARK, C. Quantification methods of technical building performance. **Building Research & Information**, [S.l.], v. 33, n.2, p.159-172, 2005.

AULICIEMS, A. Psycho-Physiological Criteria for Global Thermal Zones of Building Design. In: Proceedings of the Ninth International Biometeorology Congress. **Journal of Biometeorology**, Lisse, complemento do vol.26, p.69-86, 1983.

BAYRAKTAR, N.T.; OK, V. A method for evaluating external shading device influences on zone gains by Energyplus simulation programme. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 11., 2009. Glasgow - Scotland. **Proceedings...** Glasgow: [S. ed.], 2009. p.984-991.

BAKER, N. **Passive and low energy building design for tropical island climates**. Londres: Commonwealth Science Council, 1987.

BALDINELLI, G. Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. **Building and Environment**, [S.l.], v. 44, [S.n.], p. 1107–1118, 2009.

BAMBARDEKAR, S.; POERSCHKE, U. The architect as performer of energy simulation in the early design stage. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 11., 2009. Glasgow - Scotland. **Proceedings...** Glasgow: [S. ed.], 2009. p.1306-1313.

BANKS, J.; GIBSON, R. R. **Getting started in simulation modelling**. 1996 *apud* HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. **Introduction to building performance simulation**. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (Ed.) **Building Simulation for design and operation**. Oxon: Spon Press, 2011.

BARBOSA, S. A.; TIBÚRCIO, T. M. S.; CARLO, J. C.; TIBIRIÇÁ, A. M. B. Fachadas duplas em clima tropical de altitude: análise do potencial de ventilação de ambientes por meio de simulação computacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012. p. 4050-4059. CD-ROM.

BITTENCOURT, L.S. **Ventilation as a Cooling Resource for Warm-Humid Climates: Na Investigation on Perforated Block Wall Geometry to Improve Ventilation Inside Low-Rise Buildings**. Tese (Doutorado em Environment and Energy Studies). Architectural Association Graduate School, 1993.

BITTENCOURT, L.S.; OITICICA, M.L.G.R.; PÁDUA, A.; FONTAN, R. Influência da localização, dimensão e forma das janelas nos níveis de iluminação natural produzidos por céus encobertos. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 3.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1., 1995, Gramado. **Anais...** Gramado: ANTAC, 1995.

BITTENCOURT, L. S.; BIANA, G.; CRUZ, J. M. Efeito de protetores solares verticais e horizontais na ventilação natural de salas de aula do 2º grau. IN: ENCONTRO NACIONAL E ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 3º E 1º, GRAMADO, 1995. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 1995. p. 383-388.

BITTENCOURT, L. S.; MELO, M. C.; FERREIRA, D. B. A influência dos protetores solares verticais na iluminação natural de edificações escolares no município de Maceió-Alagoas. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2., 1999, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: [S. ed.], 1999. CD-ROM.

BOKEL, R. M. J. The effect of window position and window size on the energy demand for heating, cooling and electric lighting. In: BUILDING SIMULATION, 10., 2007, Delft. **Proceedings...** Delft: [S. ed.], 2007. p. 117-121.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional De Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO. **Portaria n.º 372, de 17 de setembro de 2010**. Rio de Janeiro: [S.ed.], 2010.

BRUGNERA, R. R.; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. Temperaturas de acionamento de condicionadores de ar e ventiladores. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO

AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2013, Brasília. **Anais...** Brasília: [S. ed.], 2013. CD-ROM.

BRUGNERA, R. R. **Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com estratégias de ventilação híbrida**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CABÚS, R. C. **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil**. Tese (Doutorado em Arquitetura). School of Architectural Studies, University of Sheffield, 2002.

CABÚS, R. C.; ARAÚJO, M.; MONTENEGRO, V. **Impactos da adequação climática sobre a eficiência energética e o conforto térmico de edifícios de escritório no Brasil**. Relatório de pesquisa. Florianópolis, 2006. Disponível em:

<http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_CT_Energ_Z8.pdf>. Acesso em 2012.

CANDIDO, C.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L.; DEAR, R. de. Aplicabilidade dos limites da velocidade do ar para efeito de conforto térmico em climas quentes e úmidos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 59-68, out./dez. 2010.

CARAM, R. M. **Estudo e caracterização de fachadas transparentes para uso na arquitetura: ênfase na eficiência energética**. Tese (Livre-Docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CARMODY, J.; SELKOWITZ, S.; LEE, E.S.; ARASTEH, D. **Window systems for high-performance buildings**. Nova York: Norton, 2004.

CASTRO, E. B. P. **Método de auxílio à concepção arquitetônica baseado na análise multicritério e em dados simulados dos comportamentos da edificação**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

CHAN, Y. C.; TZEMPELIKOS, A. Efficient venetian blind control strategies considering daylight utilization and glare protection. **Solar Energy**, v. 98, p. 241-254, dez. 2013.

DAVID, M.; DONN, M.; GARDE, F.; LENOIR, A. Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades. **Building and Environment**, [S.l], v. 46, [S.n.], 2011.

DE FRANCISCO, W. **Estatística básica**. Piracicaba: Unimep, 1993.

DIDONÉ, E.; BITTENCOURT, L. S. O impacto dos protetores solares na eficiência energética de hotéis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2008. CD-ROM

_____. Avaliação do desempenho de diferentes configurações de protetores solares na iluminação natural de salas de aula. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006. p. 294-303. CD-ROM.

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

DORNELLES, K.; RORIZ, M. Métodos alternativos para identificar a absorvância solar de superfícies opacas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n.3, p. 109-127, jul./set. 2007.

_____. Efeitos da inércia térmica sobre as temperaturas internas de edificações na cidade de São Carlos, SP. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. p. 586-594. CD-ROM.

DUTRA, L. **Uma metodologia para determinação do fator solar desejável em aberturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1994.

EICKER, U.; FUX, V.; BAUER, U.; MEI, L.; INFELD, D. Façades and summer performance of buildings. **Energy and Buildings**, [S.l.], v.40, [S.n.], p.600-611, 2008.

EXPO IMÓVEL. **Edif. Maceió Work Center**. Disponível em: < <http://www.expoimovel.com/imovel/salas-comerciais-comprar-vender-farol-maceio-alagoas/239954/pt/BR>>. Acesso em 11out.2013.

FANGER, P.O. **Thermal Comfort**: Analysis and applications in environmental engineering. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1970.

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

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**, [S.l.], v. 74, [S.n.], p. 96-105, abr. 2014.

FRANZETTI, C.; FRAISSE, G.; ACHARD, G. Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings. **Energy and Buildings**, [S.l.], v.36, [S.n.], p.117-126, 2004.

GHISI, E.; PEREIRA, C. D. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 43, [S.n.], p. 3391–3399, 2011.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 1994.

GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. 2.ed. Barking: Applied Science Publishers Ltd, 1976.

GOLOLOV, I.; YEZIORO, A. A computer system for multi-criteria comparative evaluation of building envelopes. In: BUILDING SIMULATION, 10., 2007, Delft. **Proceedings...** Delft: [S. ed.], 2007. p. 1895-1902. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p551_final.pdf>. Acesso em: 04mar.2012.

GONZALO, R.; HABERMANN, K. J. **Energy-Efficient Architecture**: Basics for planning and construction. Basel; Boston; Berlin: Birkhäuser – Publishers for Architecture, 2006.

GOOGLE. **Google SketchUp Pro**. Version 8.0. 2010.

GRATIA, E.; DE HERDE, A. The most efficient position of shading devices in a double-skin façade. **Energy and Buildings**, [S.l.], v.39, [S.n.], p.364-373, 2007.

GUITIERREZ, G. C. R.; LABAKI, L. C. Avaliação de desempenho térmico de três tipologias de *brise-soleil* fixo. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. p. 864-873. CD-ROM.

GUITIERREZ, G.C.R.; LABAKI, L.C. Associação de vidros e brise-soleil em sistemas de aberturas: análise das temperaturas interna. In: XI ENCONTRO NACIONAL E VII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2011, Búzios - RJ. **Anais do XII ENCAC e VII ELACAC**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2011. v. 1. 10p.

HAASE, M.; MARQUES DA SILVA, F.; AMATO, A. Simulation of ventilated facades in hot and humid climates. **Energy and Buildings**, [S.l.], v.41, [S.n.], p.361–373, 2009.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. **Introduction to building performance simulation**. In: _____. (Ed.) *Building Simulation for design and operation*. Oxon: Spon Press, 2011.

HOBBS, D.; MORBITZER, C.; SPIRES, B.; STRACHAN, P.; WEBSTER, J. Experience of using building simulation within the design process of an architectural practice. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 8., 2003, Eindhoven - Netherlands. **Proceedings...** Eindhoven: [S. ed.], 2003.

HOPFE, C. J.; AUGENBROE, G. A.; HENSEN, J. L. M. Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment. **Building and Environment**, [S.l.], v. 69, [S.n.], p. 81–90, ago. 2013.

HOPFE, C. J.; HENSEN, J. L. M. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 43, [S.n.], p. 2798–2805, 2011.

HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Iluminação natural**. Tradução e prefácio: António Sarmiento Lobato de Faria. 2.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1966.

HYDE, R. **Climate responsive design: a study of buildings in moderate and hot humid climates**. New York: E & FN Spon, 2000.

HYGH, J. S.; DECAROLIS, J. F.; HILL, D. B.; RANJITHAN, S. R. Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design. **Building and Environment**, [S.l.], v. 57, [S.n.], p. 165–175, nov. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Cidades@**: Maceió-AL. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=270430>>. Acesso em 07jan.2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **Standard 7730: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Genebra, 2005.

JORGE, L. A. **O desenho da janela**. São Paulo: ANNABLUME, 1995.

JELLE, B.P.; HYND, A.; GUSTAVSEN, A.; ARASTEH, D.; GOUDEY, H.; HART, R. Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, [S.l.], v. 96, [S.n.], pp. 1–28, 2012.

KOLOKOTSA, D.; DIAKAKI, C.; GRIGOROUDIS, E.; STAVRAKAKIS, G.; KALAITZAKIS, K. Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings. **Advances in Building Energy Research**, [S.l.], v.3, n.1, pp. 121-146, 2009.

KRAUSE, C. B.; BASTOS, L. E. G.; NIEMEYER, M. L. A. de; ZAMBRANO, L. M. A.; SANTOS, C. M. L.; SALGADO, M.S. Princípios de alta qualidade ambiental aplicados ao processo de seleção de projetos: O projeto NUTRE. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 7, n. 1, p. 73-89, 30 maio. 2012.

LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - LABAUT. **Cartas solares Cad. dwg**. Disponível em <<http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html>>. Acesso em 01 dez. 2015.

LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LABEEE. **Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN**. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>. Acesso em: 01nov. 2013.

LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES - LABCON. **Proteção Solar**. Disponível em <http://www.arq.ufmg.br/labcon/?pag=texto&id_ref=43>. Acesso em: 08nov. 2013.

- LAM, J. C.; HUI, S. C. M. Sensitivity Analysis of Energy Performance of Office Buildings. **Building and Environment**, [S.l.], v. 31, No. 1, p. 27-39, 1996.
- LAM, K. P.; HUANG, Y. C.; ZHAI, C. **Energy modeling tools assessment for early design phase**. Final Report. Center for Building Performance and Diagnostics, School of Architecture, Carnegie Mellon University. Pittsburgh: [S.ed.], 2004.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3.ed.rev. [S.l.]: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.
- LAMBERTS, R.; GHISI, E.; RAMOS, G. **Impactos da adequação climática sobre a eficiência energética e o conforto térmico de edifícios de escritório no Brasil**. Relatório de pesquisa. Florianópolis, 2006. Disponível em:
<http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_CT_Energ.pdf> Acesso em 2012.
- LAMBERTS, R.; MACIEL, A. A.; ONO, E. T. **Analysis SOL-AR**. Versão 6.2. Disponível em
<<http://www.labee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-sol-ar>>. Acesso em 01 dez. 2015.
- LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY - LBNL. **What is energy efficiency?** Disponível em: <<http://eetd.lbl.gov/ee/>>. Acesso em: 27out. 2013.
- LEE, E. S.; DIBARTOLOMEO, D. L.; SELKOWITZ, S. E. Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 29, [S.n.], 1998.
- LIMA, K. M. de. **Desempenho térmico e luminoso de brises externos em escritórios em Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, 2012.
- LIMA, K. M. de; BITTENCOURT, L. S.; CARAM, R. M. Ranking Configurations of Shading Devices by Its Thermal and Luminous Performance. In: PLEA 2013 - Sustainable Architecture for a Renewable Future, 29., 2013, Munich - Germany. **Proceedings...** Munich: IRB Verlag, 2013.
- LIMA, K. M. de.; CARAM, R. M. The influence of window-related design variables on thermal, daylight and energy performance of offices. In: BUILDING SIMULATION AND OPTIMIZATION CONFERENCE, 2., 2014, London - UK. **Proceedings...** Liora Malki-Epsthein, Catalina Spataru, Ljiljana Marjanovic Halburd and Dejan Mumovic (Editors). London: UCL, 2014.
- LIMA, K. M. de; BITTENCOURT, L. S. Efeito do espaçamento, inclinação e refletância de brises horizontais com mesma máscara de sombra na iluminação natural e ganhos térmicos em escritórios em Maceió-AL. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: ANTAC, 2012.
- LOMAS, K. J.; EPPEL H. Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 19, p. 21-44, 1992.
- LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY - LANL. The Building Architectural Design. In: **Los Alamos National Laboratory Sustainable Design Guide**. 2002. Disponível em:
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/commercial_initiative/sustainable_guide_ch4.pdf> Acesso em 12.set 2012.
- MACIEL, A. A. O projeto bioclimático no processo de projeto. In: _____. **Integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- MANZAN, M.; PADOVAN, R.; CLARICH, A.; RIZZIAN, L. Energy and daylighting optimization for an office with fixed and moveable shading devices. In: BUILDING SIMULATION AND OPTIMIZATION

CONFERENCE, 2., 2014, London - UK. **Proceedings...** Liora Malki-Epstein, Catalina Spataru, Ljiljana Marjanovic Halburd and Dejan Mumovic (Editors). London: UCL, 2014.

MARCONDES, M. P. **Soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo**. 224p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

_____. Fachada dupla ventilada em edifícios altos de escritórios em São Paulo: uma solução ambientalmente eficiente?. **Pós. Revista do Programa Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP** [online]. 2007, n.21, pp. 112-126. ISSN 1518-9554.

MARTINS, T. L. O. G. **Dispositivos de proteção solar e eficiência energética em edifícios de escritório: Uma avaliação para a cidade de Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, 2007.

MATHEWS, E. H.; BOTHA, C. P. Improved thermal building management with the aid of integrated dynamic HVAC simulation. **Building and Environment**, [S.l.], v.38, n.12, p. 1423-1429, ago. 2003.

MAZZAROTTO, A. C. E. K. **Uso do sistema de fachadas duplas ventiladas em edifícios em Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2011.

MIANA, A. C. **Avaliação do desempenho térmico de brises transparentes: ensaio em células-teste**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

van MOESEKE, G.; BRUYÈRE, I.; DE HERDE, A. Impact of control rules on the efficiency of shading devices and free cooling for office buildings. **Building and Environment**, [S.l.], v. 42, n.2, p. 784-793, 2007.

MOORE, F. **Concepts and practice of architectural daylighting**. New York: VNR comp., 1985.

NABIL, A; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 38, n. 7, p. 905-913, jul. 2006.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, [S.l.], v.34, n.6, p. 563-572, 2002.

NIELSEN, M. V.; SVENDSEN, S.; JENSEN, L. B. Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office through integrated simulations of energy and daylight. **Solar Energy**, [S.l.], v. 85, [S.n.], p. 757-768, 2011.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. v.4. Rio de Janeiro: IBGE, 1979.

OCHOA, C. E.; ARIES, M. B. C.; van LOENEN, E. J.; HENSEN, J. L. M. Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. **Applied Energy**, [S.l.], v. 95, [S.n.], p. 238-245, jul. 2012.

OLBINA, S.; HU, J. Daylighting and thermal performance of automated split-controlled blinds. **Building and Environment**, [S.l.], v. 56, [S.n.], p. 127-138, 2012.

OLGYAY, V. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism**: Some chapters based on cooperative research with Aladar Olgyay. Princeton University Press, New Jersey, 1963. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=eSkzAAAAMAAJ&dq=design+with+clima+te&q=bioclimatic#search_anchor> Acesso em 17set.2011.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VisualDOE-3.1**. 2003. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/node/266>> Acesso em 04jun.13.

PACHECO, R.; ORDÓÑEZ, J.; MARTÍNEZ, G. Energy efficient design of building: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 16, [S.n.], pp. 3559–3573, 2012.

PASSOS, I. C. S. **Cima e arquitetura habitacional em Alagoas: estratégias bioclimáticas para Maceió, Palmeira dos Índios e Pão de Açúcar**. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, 2009.

PEDRINI, A.; SZOKOLAY, S. The architects approach to the project of energy efficient office buildings in warm climate and the importance of design. In: BUILDING SIMULATION 2005. **Proceedings...** Montréal - Canada: [S.ed.], 2005.

PEREIRA, I.; ALVES, T.; PINHEIRO, R.; ASSIS, E. Metodologia de tratamento de dados climáticos para inserção em softwares de simulação energética de edifícios. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL; ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2004. CD-ROM.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 31-51, jan./mar. 2010.

PEREIRA, F. O. R. **Luminous and thermal performance of window shading and sunlighting reflecting devices**. Tese (Doutorado em Architectural Studies). School of Architecture, University of Sheffield, 1992.

PEREIRA, I.; SOUZA, R. V. G. Proteção solar em edificações residenciais e comerciais: desenvolvimento de metodologia. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2008. CD-ROM.

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-Weather Model for Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation. **Solar Energy**, v. 50, n.3, p. 235-245, 1993.

RADSITE. **Detailed Description**. Disponível em <<http://www.radiance-online.org/about/detailed-description.html#section-1>>. Acesso em 30 out. 2015)

RAMOS, G.; GHISI, E. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 157-169, abr./jun. 2010.

RAMOS, G.; GHISI, E. Comparação de Iluminâncias Internas e externas obtidas por meio de Simulação Computacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2008. CD-ROM.

REINHART, C. F. **Daysim Subprograms**. Disponível em: <http://web.mit.edu/SustainableDesignLab/projects/Daysim/Daysim_flowchart.html>. Acesso em 06 nov. 2015.

_____. **DAYSIM 3.1**. 2013. Disponível em: <<http://daysim.ning.com/page/download>>. Acesso em 31 mar. 2014.

_____. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Cambridge: [S.ed.], 2010.

_____. Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. **Solar Energy**, [S.l.], v.77, n.1, p. 15-28, 2004.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. **Leukos**, [S.l.], v.3, n.1, p. 7-31, 2006.

REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylight spaces. **Building and Environment**, [S.l.], v. 46, n. 2, pp. 386–396, fev. 2011.

ROCHA, A. P. A.; PEREIRA, F. O. R. Avaliação do consumo de energia de edificações considerando a luz natural e sistemas de controle através de simulação computacional integrada. In: XI ENCONTRO NACIONAL E VII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2011, Búzios - RJ. **Anais do XII ENCAC e VII ELACAC**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2011. v. 1. p. 1-10.

RORIZ, M. Flutuações horárias dos limites de conforto térmico: uma hipótese de modelo adaptativo. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7, CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 3, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003. p. 338-345. CD-ROM.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>>. Acesso em: 01 nov. 2013.

ROSSO, S. M. Vazio central favorece luz e ventilação naturais no edifício do Sebrae, em Brasília, projetado pelo Grupo SP e Luciano Margotto. **Revista aU**. Ed. 204. Março/2011. Disponível em: <<http://au.pini.com.br/arquitetura-urbanismo/204/vazio-central-favorece-luz-e-ventilacao-naturais-no-edificio-do-211099-1.aspx>> Acesso em 29 fev. 2016.

ROULET, C.-A.; FLOURENTZOU, F.; LABBEN, H. H.; SANTAMOURIS, M.; KORONAKI, I.; DASCALAKI, E.; RICHLET, V. ORME: A multicriteria rating methodology for buildings. **Building and Environment**, [S.l.], v. 37, [S.n.], p. 579-586, 2002.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n.4, 75-86, 2013.

SACHT, H. M. Módulos de fachada para reabilitação eco-eficiente de edifícios. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2012.

SAELEN, D.; ROELS, S.; HENS, H. Strategies to improve energy performance of multiple-skin facades. **Building and Environment**, [S.l.], v. 43, [S.n.], p. 638-650, 2008.

SALTELLI, A.; CHAN, K.; SCOTT, M. (Ed.) **Sensitivity analysis**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2000.

SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. (Ed.). **Passive cooling of buildings**. London: James & James (Science Publishers) Ltd, 1996.

SANTOS, C. M. L.; BASTOS, L. E. G. Influência dos elementos de fachada no desempenho da iluminação natural em edifícios de planta livre. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2008. Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2008. CD-ROM.

SERRA, G. G. **Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**: Guia prático para o trabalho de pesquisadores em pós-graduação. São Paulo: Edusp: Mandarim, 2006.

SHEN, H.; TZEMPELIKOS, A. Daylighting and energy analysis of private offices with automated interior roller shades. **Solar Energy**, [S.l.], v. 86, n. 2, pp. 681-704, 2012.

SHEN, H.; TZEMPELIKOS, A. Sensitivity analysis on daylighting and energy performance of perimeter offices with automated shading. **Building and environment**, [S.l.], v. 59, [S.n.], pp. 303-314, 2013.

SILVA, P. C. da.; LEAL, V.; ANDERSEN, M. Influence of shading control patterns on the energy assessment of office spaces. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 50, [S.n.], p. 35-48, 2012.

STRUCK, C. **Performance based design evaluation**. In: _____. Uncertainty propagation and sensitivity analysis techniques in building performance simulation to support conceptual building and system design. Eindhoven: [S.ed.], 2012. Disponível em <purl.tue.nl/220546028097> Acesso em: 15 ago. 2013.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v.20, [S.n.], p. 411-419, 2013.

van TREECK, C. **Indoor thermal quality performance prediction**. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (Ed.) *Building Simulation for design and operation*. Oxon: Spon Press, 2011.

TREGENZA, P.; LOE, D. **The design of lighting**. Londres: E & FN Spon, 1998.

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

TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 37-58, out./dez. 2010.

TSIKALOUDAKI, K.; LASKOS, K.; THEODOSIOU, Th.; BIKAS, D. Assessing cooling energy performance of windows for office buildings in the Mediterranean zone. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 49, [S.n.], p. 192-199, 2012.

TZEMPELIKOS, A. **A methodology for integrated daylighting and thermal analysis of buildings**. Tese (Doutorado em Building Studies). Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, 2005.

TZEMPELIKOS, A.; ATHIENTIS, A. K. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. **Solar Energy**, [S.l.], v. 81, n.3, p. 369-382, 2007.

TZEMPELIKOS, A.; BESSOUDO, M.; ATHIENTIS, A. K.; ZMEUREANU, R. Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices - Part II: Thermal comfort simulation and impact of glazing and shading properties. **Building and Environment**, [S.l.], v. 45, [S.n.], p. 2517-2525, 2010.

ÜNVER, R.; AKDAG, N. Y.; GEDIK, G. Z.; ÖZTÜRK, L. D.; KARABIBER, Z. Prediction of building envelope performance in the design stage: an application for office buildings. **Building and Environment**, [S.l.], v.39, n.2, pp.143-152, 2004.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus**. Versão 7.2.0.006. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 02 maio 2013.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY 1996-2012. **Getting started with EnergyPlus**. EnergyPlusV7-2-0. Arquivo que acompanha o pacote de instalação. 2012-1.

_____. **EnergyPlus Engineering Reference**. EnergyPlusV7-2-0. Arquivo que acompanha o pacote de instalação. 2012-2.

_____. **Auxiliary EnergyPlus Programs**. EnergyPlusV7-2-0. Arquivo que acompanha o pacote de instalação. 2012-3.

_____. **Input Output Reference**. EnergyPlusV7-2-0. Arquivo que acompanha o pacote de instalação. 2012-4.

_____. **Guide for Interface Developers**. EnergyPlusV7-2-0. Arquivo que acompanha o pacote de instalação. 2012-5.

VINNITSKAYA, I. "Kiefer Technic Showroom / Ernst Giselsbrecht + Partner" 17 Nov 2010. **ArchDaily**. Disponível em < <http://www.archdaily.com/89270/> > Acesso em: 04 out. 2013

WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

WIENOLD, J. Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis. In: BUILDING SIMULATION, 10., 2007, Delft. **Proceedings...** Delft: [S. ed.], 2007.

WIKIMEDIA COMMONS. Jean-François NEU (Jef132): **Window.JPG**. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Window.JPG?uselang=pt-br>>. Acesso em: 29 fev. 2016

WIT, S. de. Influence of modeling uncertainties on the simulation of building thermal comfort performance. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 5., 1997, Prague - Czech Republic. **Proceedings...** Prague: [S. ed.], 1997.

WIT, S. de; AUGENBROE, G. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 34, n. 9, pp. 951–958, 2002.

WONG, P. C.; PRASAD, D.; BEHNIA, M. A new type of double-skin façade configuration for the hot and humid climate. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 40, [S.n.], pp. 1941-1945, 2008.

YILDIZ, Y.; ARSAN, Z. D. Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates. **Energy**, [S.l.], v. 36, [S.n.], p. 4287-4296, 2011.

YUN, G.; YOON, K. C.; KIM, K. S. The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 84, [S.n.]p. 70–85, dez. 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Transcrição de um *header file* simulado no *Daysim* (cenário Bv1a25s30)

```

project_name           DaysimProjectN1
project_directory      C:/DAYSIM/projects/
bin_directory          C:/DAYSIM/bin_windows/
tmp_directory          C:/DAYSIM/projects/tmp/
material_directory     C:/DAYSIM/materials/
ies_directory          C:/DAYSIM/ies/

#####
# site information
#####
place Maceio -TRY_
latitude -9.52
longitude 35.78
time_zone 45
site_elevation 115,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
ground_reflectance 0.2
wea_data_file
C:\Users\Kamila\Documents\DOCSimulacoes\ArquivosClimaticos\LABEEE\maceio_epw_stat\MaceioTRY196
2_05CSV_60min.wea
wea_data_file_units 1
first_weekday 1
time_step 10
wea_data_short_file wea/MaceioTRY1962_05CSV_10min.wea
wea_data_short_file_units 1
lower_direct_threshold 2
lower_diffuse_threshold 2
output_units 2

#####
# building information
#####
material_file rad/DaysimProjectN1_material.rad
geometry_file rad/DaysimProjectN1_geometry.rad
sensor_file C:/DAYSIM/projects/pts/PontosN.pts
radiance_source_files 2,C:/DAYSIM/projects/tmp/ImportFrom3ds.mat.rad,
C:/DAYSIM/projects/tmp/ImportFrom3ds.geo.rad
shading 1
static_system res/DaysimProjectN1.dc res/DaysimProjectN1.ill
viewpoint_file no_DGP_view_file_provided
DC_file_format Daysim_original

#####
# Luminaire Information
#####

NumberOfLuminaireSchedules 0
LuminaireScheduleList
CorrespondingBuildingModelFile
FloorMaterialList
LuminaireLayoutRadFileList

#####
# Graphic Analysis information
#####

GAMonth 0
GADay 0
GAHour 0.0
GAInterval 1
GAIntervalScale 0.0
GAFontSize 12
GASkySelectIndex 2
GATaskStatus 0 0 0 0 0
GASignificantDigit 4
GASignificantDigitDimmingLevel 4
GAMinMaxIllForDA 500.0 1000.0

```

```
#####
# RADIANCE parameters
#####
ab 7
ad 1500
as 100
ar 300
aa 0.1
lr 6
st 0.1500
sj 1.0000
lw 0.004000
dj 0.0000
ds 0.200
dr 2
dp 512

#####
# Analysis information
#####

#####
# daylighting results
#####
daylight_factor res/DaysimProjectN1.df
daylight_autonomy res/DaysimProjectN1.da
electric_lighting res/DaysimProjectN1.el.htm
direct_sunlight_file res/DaysimProjectN1.dir
thermal_simulation_active res/DaysimProjectN1_active.intgain.csv
thermal_simulation_passive res/DaysimProjectN1_passive.intgain.csv
DDS_sensor_file res/DaysimProjectN1.dds
DDS_file res/DaysimProjectN1.sen
percentage_of_visible_sky_file res/DaysimProjectN1.sky_view.dat
daylight_factor_RGB res/DaysimProjectN1.daylight_factor.DA
daylight_autonomy_active_RGB res/DaysimProjectN1.daylight_autonomy.DA
continuous_daylight_autonomy_active_RGB
res/DaysimProjectN1.continuous_daylight_autonomy.DA
DA_max_active_RGB res/DaysimProjectN1.DA_max.DA
UDI_100_active_RGB res/DaysimProjectN1.UDI_100.DA
UDI_100_2000_active_RGB res/DaysimProjectN1.UDI_100_2000.DA
UDI_2000_active_RGB res/DaysimProjectN1.UDI_2000.DA
DSP_active_RGB res/DaysimProjectN1.DaylightSaturationPercentage.DA

zone_description "zone"
zone_area 30

=====
= user description
=====
occupancy 0 08.00 18.00
minimum_illuminance_level 500
daylight_savings_time 0
buildIndexFile true
buildTimeFile true
user_profile 2
    active 50 1 1
    passive 50 2 2 0

=====
= electric lighting system
=====
electric_lighting_system 1
    1 #manual 10 30
    installed_ligting_power_density 10
    standby_power 0.0
    delay_time 5
    ballast_loss_factor 20

=====
= blind control system
=====
blind_control 1
    0 #static_shading_device
```


APÊNDICE B – Imagens de telas do *EnergyPlus* com dados de entrada das simulações.

Class List		Comments from IDF					
[0001] Timestep [0001] Site:Location [0002] SizingPeriod:DesignDay [0001] RunPeriod [0001] ScheduleTypeLimits [0014] Schedule:Day:Interval [0006] Schedule:Week:Daily [0005] Schedule:Year [0003] Schedule:Compact [0001] Schedule:File [0007] Material [0001] Material:NoMass [0003] WindowMaterial:Glazing [0027] WindowMaterial:Blind [0006] Construction [0001] GlobalGeometryRules [0003] Zone [0018] BuildingSurface:Detailed		Explanation of Keyword Start with outside layer and work your way to the inside layer Up to 10 layers total, 8 for windows Enter the material name for each layer ID: A1 Enter a alphanumeric value This field is required.					
Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Parede_Tijolo	Laje_Mista	Vidro_Zona01	Vidro_Zona02	Porta_Zona01	Porta_Zona02
Outside Layer		Argamassa de rebor	Piso cerâmico (10m	=\$TipoDeVidro	=\$TipoDeVidro	Madeira	Madeira
Layer 2		Ceram Tij 6 fur quac	Argamassa de embc				
Layer 3		Câmara de ar (2 - 5	Laje mista (12cm)				
Layer 4		Ceram Tij 6 fur quac	Argamassa de rebor				
Layer 5		Argamassa de rebor					
Layer 6							

Class List		Comments from IDF						
[0001] Timestep [0001] Site:Location [0002] SizingPeriod:DesignDay [0001] RunPeriod [0001] ScheduleTypeLimits [0014] Schedule:Day:Interval [0006] Schedule:Week:Daily [0005] Schedule:Year [0003] Schedule:Compact [0001] Schedule:File [0007] Material [0001] Material:NoMass [0003] WindowMaterial:Glazing [0027] WindowMaterial:Blind [0006] Construction [0001] GlobalGeometryRules [0003] Zone [0018] BuildingSurface:Detailed		Explanation of Keyword Regular materials described with full set of thermal properties ID: A1 Enter a alphanumeric value This field is required.						
Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Argamassa de embc	Ceram Tij 6 fur quac	Piso cerâmico (10m	Argamassa de rebor	Laje mista (12cm)	Madeira	Argamassa de rebor
Roughness		Rough	MediumRough	MediumSmooth	MediumRough	Rough	MediumRough	MediumRough
Thickness	m	0,025	0,014	0,01	0,025	0,095	0,03	0,025
Conductivity	W/m-K	1,15	0,9	0,9	1,15	1,05	0,135	1,15
Density	kg/m3	2000	2290	1600	2000	1087	450	2000
Specific Heat	J/kg-K	1000	920	920	1000	920	2300	1000
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Solar Absorptance		0,5	0,725	0,7	0,4	0,725	0,5	0,25
Visible Absorptance		0,5	0,725	0,7	0,4	0,725	0,5	0,25

Class List		Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
[0001] Timestep [0001] Site:Location [0002] SizingPeriod:DesignDay [0001] RunPeriod [0001] ScheduleTypeLimits [0014] Schedule:Day:Interval [0006] Schedule:Week:Daily [0005] Schedule:Year [0003] Schedule:Compact [0001] Schedule:File [0007] Material [0001] Material:NoMass [0003] WindowMaterial:Glazing [0027] WindowMaterial:Blind [0006] Construction [0001] GlobalGeometryRules [0003] Zone [0018] BuildingSurface:Detailed [0008] FenestrationSurface:Detailed [0001] WindowProperty:ShadingControl [0002] People [0002] Lights [0002] ElectricEquipment [0003] ZoneInfiltration:DesignFlowRate [0001] HVAC:Template:Thermostat [0002] HVAC:Template:Zone:IdeallLoadsAirSystem [0008] Parametric:SetValueForRun [0001] Parametric:Logic [0001] Parametric:FileNameSuffix [0001] Output:VariableDictionary [0002] Output:Variable [0001] Output:Diagnostics		Name		Brise01	Brise02	Brise03
		Slat Orientation		Horizontal	Horizontal	Horizontal
		Slat Width	m	0,277	0,139	0,069
		Slat Separation	m	0,16	0,08	0,04
		Slat Thickness	m	0,001	0,001	0,001
		Slat Angle	deg	90	90	90
		Slat Conductivity	W/m-K	176,9	176,9	176,9
		Slat Beam Solar Transmittance		0	0	0
		Front Side Slat Beam Solar Reflectance		0,5	0,5	0,5
		Back Side Slat Beam Solar Reflectance		0,5	0,5	0,5
		Slat Diffuse Solar Transmittance		0	0	0
		Front Side Slat Diffuse Solar Reflectance		0,5	0,5	0,5
		Back Side Slat Diffuse Solar Reflectance		0,5	0,5	0,5
		Slat Beam Visible Transmittance		0	0	0
		Front Side Slat Beam Visible Reflectance		0,5	0,5	0,5
		Back Side Slat Beam Visible Reflectance		0,5	0,5	0,5
		Slat Diffuse Visible Transmittance		0	0	0
		Front Side Slat Diffuse Visible Reflectance		0,5	0,5	0,5
		Back Side Slat Diffuse Visible Reflectance		0,5	0,5	0,5
		Slat Infrared Hemispherical Transmittance		0	0	0
		Front Side Slat Infrared Hemispherical Emissivity		0,4	0,4	0,4
		Back Side Slat Infrared Hemispherical Emissivity		0,4	0,4	0,4
		Blind to Glass Distance	m	0,1395	0,0705	0,0355
		Blind Top Opening Multiplier		0	0	0
		Blind Bottom Opening Multiplier		1	1	1
		Blind Left Side Opening Multiplier		0	0	0
		Blind Right Side Opening Multiplier		0	0	0
		Minimum Slat Angle	deg			
		Maximum Slat Angle	deg			

APÊNDICE C – Temperatura neutra de Maceió-AL, pela fórmula de Auliciems (1983)

Fonte: Arquivo climático TRY - 1965-2005 (LABEEE, 2013)

ANEXOS

ANEXO A – Resumo do arquivo climático utilizado nas simulações

Resumo do Arquivo Climático

Cidade: Maceió
Ano: 1962

Média dos dados horários							
	tbs (oC)	tbu (oC)	pressão (kPa)	neb	rad global (Wh/m ²)	rad direta (Wh/m ²)	veloc.do ar (m/s)
Máxima	34.8	26.2	100.8	10	1152	1016	9
Média	24.2	21.8	100.0	5.0	238.6	183.8	2.0
Mínima	15.8	15	99.2	0	0	0	0

TBS>TBU	OK
I noturna*=0	OK
I diurna**>0	OK

*Das 21 h às 4 h

**Das 8 h às 17 h

Tmax	
Mês	Dia
1	13
Imax	
Mês	Dia
12	2

Fonte: LABEEE (2013)

ANEXO B – Refletâncias de tintas

Tipo	Nº	Nome Comercial	UV	VIS	IV	TOT
Metalatex Acrílica Fosca	01	Amarelo Antigo	4,0	45,3	45,4	43,9
	02	Amarelo Terra	3,3	30,4	37,4	34,9
	03	Areia	4,6	54,2	48,3	47,8
	04	Azul	4,9	13,2	39,1	33,2
	05	Azul Imperial	5,6	36,6	24,2	25,8
	06	Branco	5,1	86,0	71,6	71,8
	07	Branco Gelo	5,0	63,5	53,6	53,6
	08	Camurça	5,0	39,9	39,4	38,2
	09	Concreto	4,6	25,9	20,5	20,9
	10	Flamingo	3,9	45,0	49,5	47,0
	11	Jade	5,5	49,3	39,0	39,7
	12	Marfim	5,5	65,4	57,5	57,0
	13	Palha	5,2	63,3	54,6	54,4
	14	Pérola	4,9	66,0	59,1	58,4
	15	Pêssego	4,8	56,3	50,0	49,5
	16	Tabaco	5,0	20,6	22,4	21,4
	17	Terracota	3,9	29,9	37,7	35,0
Metalatex Acrílica Semi-brilho	18	Amarelo Antigo	4,7	46,4	46,3	44,8
	19	Amarelo Terra	4,3	28,3	30,7	29,3
	20	Azul	4,6	12,6	26,2	22,9
	21	Branco Gelo	5,7	67,0	49,6	51,1
	22	Cinza	5,0	15,2	9,4	10,3
	23	Cinza BR	5,6	43,8	26,3	28,8
	24	Crepúsculo	5,8	32,9	29,2	29,0
	25	Flamingo	5,1	47,4	49,3	47,3
	26	Marfim	5,7	65,0	57,0	56,6
	27	Palha	5,9	62,6	47,4	48,7
	28	Pérola	5,7	66,5	53,4	54,1
	29	Preto	4,0	3,3	2,0	2,3
	30	Telha	4,7	21,7	41,4	36,5
	31	Terracota	4,2	27,2	33,1	30,9
	32	Verde Quadra	5,9	11,4	41,5	34,8
	33	Vermelho	6,7	28,9	40,9	37,4
Novacor Látex PVA Fosca	34	Amarelo Canário	5,8	63,9	73,1	68,9
	35	Amarelo Terra	4,2	33,4	41,6	38,7
	36	Areia	5,9	57,1	61,9	58,9
	37	Azul Angra	7,0	65,1	67,5	64,8
	38	Bianco Sereno	7,6	72,2	70,7	68,7
	39	Branco	7,2	89,1	82,9	81,3
Tipo	Nº	Nome Comercial	UV	VIS	IV	TOT
Novacor Látex PVA Fosca	40	Branco Gelo	7,1	66,1	61,1	60,1
	41	Erva Doce	7,4	74,5	76,5	73,6
	42	Flamingo	5,1	46,5	54,2	51,0
	43	Laranja	4,8	50,5	66,5	61,4
	44	Marfim	5,9	67,7	67,6	65,4
	45	Palha	5,9	67,3	72,3	69,0
	46	Pérola	6,4	73,1	69,7	68,0
Novacor Látex PVA Fosca	47	Pêssego	5,3	56,6	58,1	55,9
	48	Alecrim	4,5	35,8	31,9	31,6
	49	Azul Bali	4,3	39,9	54,8	50,3
	50	Branco Neve	7,8	90,0	81,8	80,6
	51	Branco Gelo	8,1	71,5	62,9	62,5
	52	Camurça	5,1	42,7	40,1	39,3
	53	Concreto	5,7	28,4	25,0	24,9
	54	Marfim	8,0	70,7	69,6	67,6
	55	Marrocos	4,4	38,4	47,8	44,5
	56	Mel	4,1	52,2	56,9	54,1
	57	Palha	7,0	71,6	67,2	65,8
Novacor Látex PVA Fosca	58	Pérola	8,2	75,6	73,1	71,2
	59	Pêssego	6,3	61,5	60,8	58,9
	60	Telha	4,1	23,2	32,1	29,4
	61	Vanila	7,5	70,9	75,1	71,9
	62	Amarelo Canário	6,7	67,6	77,8	73,3
	63	Areia	8,4	60,8	64,4	61,7
	64	Azul Profundo	4,0	16,9	30,5	27,1
	65	Branco Neve	7,3	86,0	72,8	72,8
	66	Branco Gelo	7,9	71,5	68,4	66,7
	67	Camurça	6,0	43,1	48,1	45,6
	68	Cerâmica	3,4	26,6	41,7	37,5
Novacor Látex PVA Fosca	69	Concreto	4,4	28,1	24,9	24,7
	70	Flamingo	5,8	48,4	61,0	56,7
	71	Marfim	6,5	72,0	74,6	71,6
	72	Palha	8,7	71,4	70,3	68,2
	73	Pérola	7,5	74,5	74,0	71,7
	74	Pêssego	7,5	64,8	71,9	68,3
	75	Preto	2,9	2,9	1,8	2,0
	76	Vanila	7,0	67,4	72,2	68,9
	77	Verde Musgo	3,5	16,5	23,3	21,3
	78	Vermelho Cardinal	3,6	27,8	43,0	38,8

Tabela 1 - Refletâncias médias por faixa do espectro (%), medidas em espectrofotômetro

Fonte: Dornelles e Roriz (2007, p.120)

ANEXO C – Características do Aluzinc

E40

Steels with Aluzinc® aluminium-zinc coating

Thanks to its excellent corrosion resistance and spangled silver colour, Aluzinc® is very popular for roofing and cladding applications.

Last update: 2015-11-6

Properties

Aluzinc® is a flat carbon steel product coated on both sides with an aluminium-zinc alloy. The coating is composed of 55% aluminium, 43.4% zinc and 1.6% silicon and applied by means of a continuous hot dip galvanising process. Aluzinc® is available in a wide range of steel grades: steels for cold forming and deep drawing applications, and structural steels.

Advantages

The excellent corrosion resistance of Aluzinc® is a result of the properties of its two metallic constituents: the barrier effect of the aluminium present on the surface of the coating and the sacrificial protection of zinc.

The characteristic spangled silver colour of Aluzinc® gives it a very attractive appearance. Thanks to a thin transparent layer of aluminium oxide on the top surface of the coating, this appearance is preserved over time.

Aluzinc® offers additional advantages:

- Good corrosion resistance at high temperatures
- Good abrasion resistance because of its surface hardness
- Excellent thermal and light reflectivity

Applications

Aluzinc® coated steels are used widely in both indoor and outdoor applications:

- Construction: roofing, cladding, structural sections, composite panels, tiles etc
- Domestic appliances: washing machines, tumble dryers, refrigerators, toasters, microwave ovens etc
- Miscellaneous: boiler casings, air ducts, electrical cabinets, lighting, computer casings etc

Aluzinc® can be supplied oiled and/or with a chemical surface treatment, or with an Easyfilm® thin organic coating (please see data sheet E80 for the specific properties of Easyfilm®). DX56D AM FCE +AZHFX +Easyfilm® is suitable for standing seam applications in roofing and cladding.

Aluzinc® Florelis is a product with improved uniformity, with the result that there is no visible difference between the sheets. It is specially designed for facades of buildings with the highest aesthetic requirements.

Fonte: Disponível em <<http://flateurope.arcelormittal.com/catalogue/E40/EN>>. Acesso em 09 abr. 2016.

ANEXO D – Tabela extraída do RTQ-C (BRASIL, 2010, p.42)

Tabela 4.1: Limite máximo aceitável de densidade de potência de iluminação (DPI_L) para o nível de eficiência pretendido – Método da área do edifício

Função do Edifício	Densidade de Potência de Iluminação limite W/m ² (Nível A)	Densidade de Potência de Iluminação limite W/m ² (Nível B)	Densidade de Potência de Iluminação limite W/m ² (Nível C)	Densidade de Potência de Iluminação limite W/m ² (Nível D)
Academia	9,5	10,9	12,4	13,8
Armazém	7,1	8,2	9,2	10,3
Biblioteca	12,7	14,6	16,5	18,4
Bombeiros	7,6	8,7	9,9	11,0
Centro de Convenções	11,6	13,3	15,1	16,8
Cinema	8,9	10,2	11,6	12,9
Comércio	15,1	17,4	19,6	21,9
Correios	9,4	10,8	12,2	13,6
Venda e Locação de Veículos	8,8	10,1	11,4	12,8
Escola/Universidade	10,7	12,3	13,9	15,5
Escritório	9,7	11,2	12,6	14,1
Estádio de esportes	8,4	9,7	10,9	12,2

ANEXO E – Tabela extraída do RTQ-C (BRASIL, 2010, p.53)

Tabela 5.4: Eficiência mínima de condicionadores de ar para classificação nos níveis A e B

Tipo de equipamento	Capacidade	Tipo de aquecimento	Subcategoria ou condição de classificação	Eficiência mínima	Procedimento de teste
Condicionadores de ar resfriados a ar	≥ 19 kW e < 40 kW	Resistência elétrica	Split e unitário	3,28 COP 3,34 ICOP	AHRI 340/360
		Outros	Split e unitário	3,22 COP 3,28 ICOP	
	≥ 40 kW e < 70 kW	Resistência elétrica	Split e unitário	3,22 COP 3,28 ICOP	
		Outros	Split e unitário	3,16 COP 3,22 ICOP	
	≥ 70 kW e < 223 kW	Resistência elétrica	Split e unitário	2,93 COP 2,96 ICOP	
		Outros	Split e unitário	2,87 COP 2,90 ICOP	
	≥ 223 kW	Resistência elétrica	Split e unitário	2,84 COP 2,87 ICOP	
		Outros	Split e unitário	2,78 COP 2,81 ICOP	
	<19 kW	Todos	Split e unitário	3,54 COP 3,60 ICOP	AHRI 210/240
Condicionadores de ar resfriados a água	≥ 19 kW e < 40 kW	Resistência elétrica	Split e unitário	3,37 COP 3,43 ICOP	AHRI 340/360
		Outros	Split e unitário	3,31 COP 3,37 ICOP	
	≥ 40 kW e < 70 kW	Resistência elétrica	Split e unitário	3,22 COP 3,28 ICOP	
		Outros	Split e unitário	3,16 COP 3,22 ICOP	