



QUADRO PARA SUPORTE AO PROJETO DE JANELAS COM INDICADORES MÚLTIPLOS DE DESEMPENHO LUMINOSO E ENERGÉTICO

Kamila Mendonça de Lima (1); Rosana Maria Caram (2)

(1) Dra. pelo IAU-USP, kamila.arq.urb@gmail.com

(2) Prof^a Dra. IAU-USP, rcaram@sc.usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Arquitetura e Urbanismo

Av. Trabalhador São-Carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP, Brasil

RESUMO

Prever o desempenho do sistema de abertura desde a fase de projeto permite promover conforto no ambiente interno das edificações e minimizar o uso de energia elétrica para condicionamento desses ambientes. A simulação computacional e a avaliação considerando critérios quantitativos possibilita escolhas conscientes, bem como desempenho otimizado. Para isso, é fundamental a tradução dos resultados obtidos das simulações em informações diretas, que reúnam diferentes aspectos da análise, para identificação de soluções que favoreçam o maior número de requisitos de desempenho possível. Nesse contexto, objetivo deste artigo é classificar alternativas de sistemas de janela estáticos e dinâmicos quanto a indicadores de desempenho de iluminação natural e uso de energia elétrica, para suporte a decisões de projeto arquitetônico para o clima quente e úmido. A classificação tem como base simulações computacionais realizadas nos programas *Daysim* e *EnergyPlus*, para um módulo de ambientes de escritório no contexto climático de Maceió-AL. A janela considerada é composta por uma superfície de vidro e um dispositivo de sombreamento externo. Para a definição dos cenários, foi variada a área da abertura, o tipo de vidro, o ângulo de sombreamento, o tipo de acionamento do *brise* (estático ou dinâmico) e a orientação. O quadro resultante apresenta a classificação de todos os cenários, em uma escala de cores, com relação a dois indicadores, aqui chamados de múltiplos, por englobarem diferentes subcritérios de desempenho quanto à iluminação natural e uso de energia elétrica. O trabalho mostra que é possível prever sistemas de janela maximizando os desempenhos luminoso e energético ao mesmo tempo. Além disso, fornece base para diretrizes específicas para o desenho de janelas na cidade estudada.

Palavras-chave: Simulação integrada; *Brisas*; Iluminação natural.

ABSTRACT

Predicting the performance of window systems from the early design phase contributes to environmental comfort and minimizing energy use for conditioning the indoor environment. Computer simulations and multicriteria evaluation contributes to a informed decision, as well to an optimized performance. For this, it is fundamental to translate the results obtained from the simulations into direct information, bringing together different aspects of the analysis, to identify solutions that meet the greatest number of performance requirements possible. In this context, the objective of this paper is to rank alternatives of static and dynamic window systems regarding daylight performance and electric energy use, to support architectural design decisions for hot and humid climate. The ranking is based on computer simulations carried out in the *Daysim* and *EnergyPlus* programs, for a module of offices in the climatic context of Maceió-AL. The window in question consists of a glass surface and an external shading device. For the definition of the scenarios, the window to wall ratio, the glazing type, the cut-off shading angle, the type of shading control (static or dynamic) and the orientation were varied. The resulting table presents the ranking of all scenarios, in a color scale, in relation to two indicators, here called multiples, as they encompass different subcriteria of performance in terms of daylighting and electric energy use. The work shows that it is possible to design window systems maximizing the luminous and energetic performances at the same time. In addition, it provides a basis for specific guidelines for the design of windows in the studied city.

Keywords: Integrated simulation, Shading devices, Daylighting.

1. INTRODUÇÃO

Ao projetar sistemas de janela considerando a promoção de conforto ambiental e o uso eficiente de energia para condicionamento, 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.

Em regiões de clima quente esta relação é 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.

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.

Isso pode ser feito elencando as características da janela para avaliação quantitativa de desempenho, desde a fase inicial de projeto, processo que pode ser acompanhado da definição de indicadores para comparação e suporte a 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 1. A classificação e ordenação podem ou não ser feitos em conjunto.

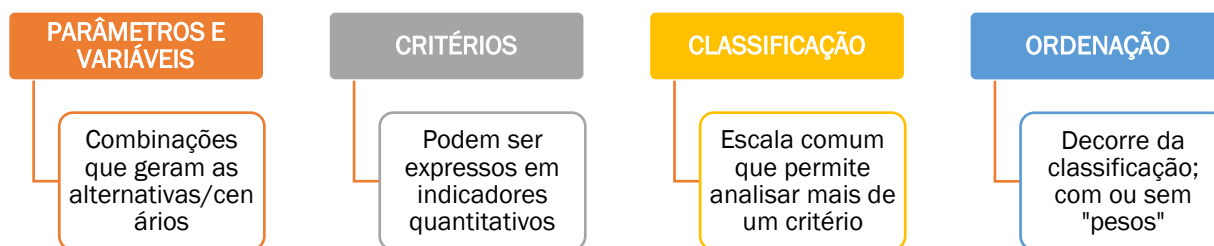


Figura 1– Principais aspectos a serem considerados num procedimento decisório sistematizado.

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 metas e identificação de soluções projetuais que as atingem, tal como fizeram Ünver et al. (2004), definindo metas de conforto (térmico, acústico e visual) e nomeando “ótimo” o conjunto de cenários de envoltória que atingem ou ultrapassam essa meta, permitindo visualizar os resultados em dois grupos (“atende” ou “não atende”);
- Aplicação de metodologias específicas de avaliação multicritério, tal como feito por Fontenelle e Bastos (2014);
- Ordenação das alternativas com base em um ou mais critérios, tal como feito por Lima e Caram (2015).

Diante desses aspectos, as características da janela (área, tipo de vidro, tipo de sombreamento etc.) podem ser tratadas como variáveis de projeto, que caracterizam alternativas de soluções projetuais. Além disso, as metas de desempenho podem reunir diferentes critérios (relacionadas à quantidade e distribuição de luz, uso de energia).

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 na atualidade.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é classificar alternativas de sistemas de janela estáticos e dinâmicos quanto a indicadores de desempenho de iluminação natural e uso de energia elétrica, para suporte a decisões de projeto arquitetônico para o clima quente e úmido.

3. MÉTODO

O trabalho avalia diferentes sistemas de janela, considerando um ambiente de escritório típico, localizado em Maceió-AL. O procedimento utilizado para a realização desta avaliação será descrito a seguir.

3.1. Contexto climático e cenários analisados

O sistema de janela analisado é composto por um envidraçamento e um *brise*. O *brise* analisado é composto por 10 aletas e tem dimensão horizontal igual à da abertura. São analisados quatro tipos de acionamento das aletas. O módulo de ambientes simulado é ilustrado na Figura 2.

A cidade selecionada para este estudo foi Maceió - AL, localizada no nordeste do Brasil (latitude 9° e longitude -35°). Esta localidade apresenta clima quente e úmido (NIMER, 1979), caracterizando-se por alta umidade, pequenas variações de temperatura (diárias, sazonais e anuais) e radiação solar intensa (Figura 3). A janela sombreada é uma estratégia fundamental neste tipo de clima, para controle da radiação solar que influenciará a iluminação e os ganhos térmicos.

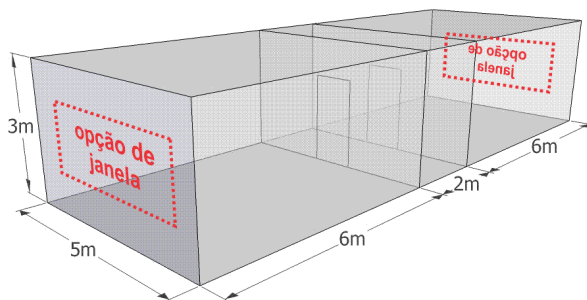


Figura 2 – Esquema do módulo de ambientes simulado.

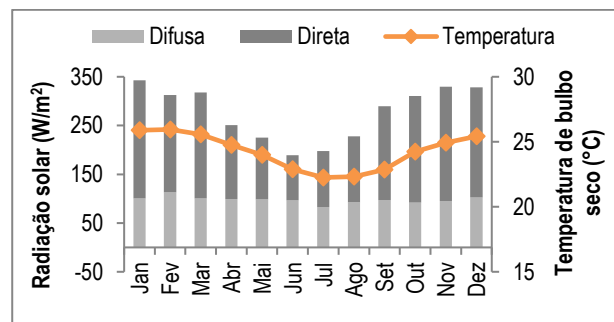


Figura 3 – Dados climáticos de Maceió-AL. Fonte: Arquivo climático (LABEEE, 2013).

Foram consideradas as variáveis apresentadas nas Figuras 4 e 5. A Figura 6 ilustra parte das máscaras de sombra correspondentes aos ângulos de sombreamento dos *brises* analisados.

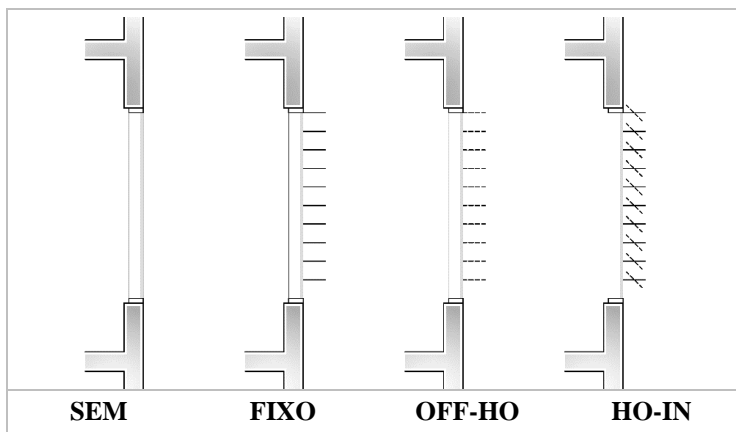
Tipo de vidro*		PAF (%)		AVS**		Orient.		Acionamento	
Refletivo (a vácuo) prata médio T _v : 14%; T _{sol} : 12%	v1	25%	a25	30°	s30	Norte	Sem <i>brise</i>	SEM	
Comum cinza T _v : 51%; T _{sol} : 49%	v2	50%	a50	60°	s60	Oeste	<i>Brise</i> fixo	FIXO	
Comum incolor T _v : 86%; T _{sol} : 81%	v3	75%	a75				<i>Brise</i> dinâmico c/ controle liga/desliga	ON-OFF	
							<i>Brise</i> Dinâmico c/ controle das aletas	HO-IN	

Figura 4 – Dados e nomenclatura das variáveis de projeto para definição dos cenários analisados.

*Transmissão visível (T_v) e solar (T_{sol}) para ângulo de incidência normal. Fonte: Caram (2002).

**Ângulo vertical de sombreamento (ângulo externo)

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 na fachada igual a 50% e ângulo de sombreamento igual a 60°.



SEM: Situação estática, sem *brise*;

FIXO: *Brise* estático (fixo e acionado o tempo todo);

OFF-HO: *Brise* dinâmico com controle liga-desliga - acionado apenas se radiação acima de 50W/m^2 atinge o plano de trabalho;

HO-IN: *Brise* 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.

Figura 5 – Seções esquemáticas e descrição dos tipos de acionamento analisados.

■ Sombreamento total (100%) ■ Sombreamento parcial (50%) Intervalo de valores de ângulo lateral do sombreamento parcial em função dos três tamanhos de abertura			
Ângulos	Máscara - Norte	Máscara - Oeste	Corte esquemático
30°			
60°			
90°			

Figura 6 - Máscaras de sombra dos *brises* estáticos analisados.

3.1. Simulações

As simulações foram realizadas em duas etapas. Primeiro, foi realizada a simulação de iluminação natural, no *software* DAYSIM (REINHART, 2014), que emprega a ferramenta *Radiance* para simular a iluminação natural e agrega um modelo comportamental (chamado *LightSwitch*), aqui utilizado para simular o acionamento do sistema de luz artificial apenas quando a luz natural não é suficiente para se obter a iluminância de tarefa no ambiente, gerando um arquivo de saída com os horários de acionamento das lâmpadas. Em seguida, foi realizada a simulação energética, utilizando-se o *software* EnergyPlus (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2013), no qual os dados do modelo foram inseridos incluindo-se as *schedules* de funcionamento das lâmpadas, obtidas na primeira simulação. O Quadro 1 destaca os principais dados inseridos nos programas. As simulações consideraram os períodos ocupados.

Quadro 1 - Principais parâmetros das simulações inseridos nos dois programas utilizados.

DAYSIM 3.1	ENERGYPLUS 7.2
<p>Plano de trabalho: 0,75m a partir do piso;</p> <p>Pontos/sensors: Malha ortogonal de 30 pontos;</p> <p>Refletâncias: Piso=0.30, teto=0.75, paredes=0.60, <i>brises</i>=0.50;</p> <p>Parâmetros do Radiance: 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;</p> <p>Ocupação: 8 às 18h – Rotina gerada pelo <i>software</i>;</p> <p>Iluminância mínima: 500lx;</p> <p>Tipo de usuário: Ativo;</p> <p>Controle das lâmpadas: Manual <i>on/off</i> próximo à porta.</p>	<p>Construção: Paredes com janela - Bloco cerâmico com seis furos de seção quadrada + argamassa branca ($U=2,48\text{W/m}^2\text{K}$); Demais paredes, piso e teto – adiabáticos; <i>Brises</i> - Aluzinc (Condutividade = $176,9\text{W/mK}$) no objeto <i>WindowMaterial:Blind</i></p> <p>Ocupação: 8h às 12h e 14h às 18h, de segunda à sexta; 8h às 12h, aos sábados</p> <p>Pessoas: 4 ocupantes; 0,8clo (inverno) e 0,5clo (verão).</p> <p>Ganhos internos: 120W/pessoa + Equipamentos (16W/m^2) + Lâmpadas (10W/m^2)</p> <p>Ar condicionado: Módulo <i>IdealLoadsAirSystem</i>; ativo durante todo o período de ocupação, termostato a 25°C; COP=3,5</p> <p>Taxa de infiltração: 1 ren/h</p>

Os dados foram classificados quanto por meio dos seguintes indicadores, com nomenclatura específica desta pesquisa:

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.

E_{cl} (kWh/m²/ano) - Somatório anual da demanda de energia elétrica para condicionamento do ar e iluminação.

Eles são brevemente descritos a seguir (Quadro 2).

Quadro 2 – Descrição dos indicadores de desempenho utilizados na classificação.

Indicador	Base	Operação/Extraído de	Principal característica
A₅₀₀₋₂₀₀₀ (%)	Parte do conceito de iluminância útil (NABIL; MARDALJEVIC, 2006), considerando a luz natural como única fonte para permitir a realização de tarefas de escritório e iluminâncias acima de 2000lx como desnecessárias e potencialmente causadoras de ofuscamento. Acrescenta a esse aspecto a quantificação da porção do plano de trabalho e intervalo de tempo onde isso ocorre.	Foram somadas as áreas correspondentes a cada um dos 30 pontos do plano de trabalho onde a ocorrência de iluminância útil na faixa analisada foi maior que 50%. Finalmente, essa área foi dividida pela área total do ambiente, originando um percentual final, aqui chamado de A ₅₀₀₋₂₀₀₀ .	Engloba quatro aspectos diferentes: a distribuição da luz nos diferentes pontos do plano de trabalho, a variação horária ao longo de um ano, a prevenção ao ofuscamento e a independência do sistema artificial.
E_{cl} (kWh/m².ano)	Considera a simulação integrada, de forma que as lâmpadas somente são acionadas quando um ou mais dentre os 30 pontos analisados é inferior a 500lx.	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, de forma que se deseja maximizar a iluminação natural e minimizar o uso de energia.

A 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 (ver Tabelas 1 e 2). 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 final foi feita por meio de médias das classificações dos dois indicadores.

Tabela 1 – Memória de cálculo dos intervalos de classificação.

	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5
Iluminação: A ₅₀₀₋₂₀₀₀ (%)	A ₅₀₀₋₂₀₀₀ < Mín.+1*(Máx.-Mín)/5	Mín.+1*(Máx.-Mín)/5 <= A ₅₀₀₋₂₀₀₀ < Mín.+2*(Máx.-Mín)/5	Mín.+2*(Máx.-Mín)/5 <= A ₅₀₀₋₂₀₀₀ < Mín.+3*(Máx.-Mín)/5	Mín.+3*(Máx.-Mín)/5 <= A ₅₀₀₋₂₀₀₀ < Mín.+4*(Máx.-Mín)/5	A ₅₀₀₋₂₀₀₀ >= Mín.+4*(Máx.-Mín)/5
Energia: E _{cl} (kWh/m ² .ano)	E _{cl} >= Mín.+4*(Máx.-Mín)/5	Mín.+3*(Máx.-Mín)/5 <= E _{cl} < Mín.+4*(Máx.-Mín)/5	Mín.+2*(Máx.-Mín)/5 <= E _{cl} < Mín.+3*(Máx.-Mín)/5	Mín.+1*(Máx.-Mín)/5 <= E _{cl} < Mín.+2*(Máx.-Mín)/5	E _{cl} < Mín.+1*(Máx.-Mín)/5

Tabela 2 – Correspondência entre os intervalos de valores obtidos e a classificação por cores.

	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5
Iluminação: A ₅₀₀₋₂₀₀₀ (%)	A ₅₀₀₋₂₀₀₀ < 20	20 <= A ₅₀₀₋₂₀₀₀ < 40	40 <= A ₅₀₀₋₂₀₀₀ < 60	60 <= A ₅₀₀₋₂₀₀₀ < 80	A ₅₀₀₋₂₀₀₀ >= 80
Energia: E _{cl} (kWh/m ² .ano)	E _{cl} >= 70,4	61,6 <= E _{cl} < 70,4	52,7 <= E _{cl} < 61,6	43,8 <= E _{cl} < 52,7	E _{cl} < 43,8

Para a operação das classificações obtidas, foram considerados valores de 01 a 05, sendo 01 para a classificação na cor vermelha e 05 para a cor verde.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir das simulações estão agrupados na Tabela 3. A classificação em si encontra-se na Tabela 4, que apresenta o resultado das classificações como “média” das classificações dos dois indicadores, de três formas diferentes: ambos os 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.

4.1. Critérios com o mesmo peso na classificação

A primeira coluna de resultados da Tabela 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 os indicadores estudados.

Outro aspecto observado nos resultados ilustrados na coluna A refere-se ao desempenho inferior do vidro refletivo de baixa transmissão (v1) em relação aos outros dois tipos (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. 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 compensar a perda de luz natural.

4.2. Critérios com peso diferenciado na classificação

A classificação dos cenários obtida considerando o maior peso da iluminação (coluna B) é semelhante à encontrada quando foi atribuído o mesmo peso aos dois critérios (A), cujas tendências identificadas já foram discutidas na subseção anterior.

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 C (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.

Tabela 3 – Resultados de todos os cenários para os indicadores de desempenho definidos.

Acionamento	Vidro	PAF	Ângulo	Norte		Oeste	
				A ₅₀₀₋₂₀₀₀ (%)	E _{cl} (kWh/m ² .ano)	A ₅₀₀₋₂₀₀₀ (%)	E _{cl} (kWh/m ² .ano)
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

Tabela 4 - Classificação dos cenários por faixas, considerando os dois indicadores ao mesmo tempo.

Cenário de sistema de janela				A – Pesos iguais (1/1)		B – Peso maior p/ iluminação (2/1)		C – Peso maior p/ energia (2/1)	
Acionamento	Vidro	PAF	Ângulo	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							

Legenda:

Pior desempenho



Melhor desempenho

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 C em relação às outras duas formas de operação dos critérios (colunas A e B) 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 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 ser significativa mesmo quando são atribuídos pesos diferentes aos mesmos.

4.3. Avaliação para suporte a decisões do projeto de sistemas de janela

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, sendo essa uma classificação comum às duas orientações.

Como indicações de projeto com base na classificação das alternativas obtida, 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.

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 indicadores (colunas A, B e C), 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.

5. CONCLUSÕES

O trabalho teve como principal produto o quadro de auxílio direto a decisões de projeto arquitetônico, em formato de tabela, contendo uma classificação por cores, de todas as alternativas analisadas. A classificação considera diferentes critérios relacionados a iluminação natural e uso de energia elétrica, permitindo uma comparação imediata entre os desempenhos esperados para diferentes sistemas de janela.

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. Os indicadores de desempenho utilizados fornecem uma análise abrangente.

Quanto ao desempenho dos sistemas de janela, observou-se que 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:

- 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.

Observou-se, então, que a classificação realizada tem potencial para auxílio direto a decisões de projeto com base em diferentes critérios de desempenho da abertura, reunidos em um só quadro.

REFERÊNCIAS

- BITTENCOURT, L.S. **Ventilation as a Cooling Resource for Warm-Humid Climates: An 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- LIMA, K.M. de; CARAM, R.M. Avaliação de sistemas de janela para suporte a decisões de projeto quanto ao equilíbrio de ganhos de luz e calor. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 117-133, jul./set. 2015.
- 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.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. v.4. Rio de Janeiro: IBGE, 1979.
- REINHART, C. F. **DAYSIM 3.1**. 2013. Disponível em: <<http://daysim.ning.com/page/download>>. Acesso em 31 mar. 2014.
- ROULET, C.-A.; FLOURENTZOU, F.; LABBEN, H. H.; SANTAMOURIS, M.; KORONAKI, I.; DASCALAKI, E.; RICHALET, V. ORME: A multicriteria rating methodology for buildings. **Building and Environment**, [S.l.], v. 37, [S.n.], p. 579-586, 2002.
- 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.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelos recursos financeiros que possibilitaram a realização da pesquisa.