

Ferramenta gráfica para análise térmica e lumínica de fachadas e definição de tipo de vidro e sombreamento horizontal em escritórios climatizados de três climas brasileiros

Graphic tool for thermal and daylight performance analysis of façades and definition of glazing type and horizontal shading devices in air-conditioned offices across three Brazilian climates

Natália de Queiroz Nome 
Fernando Simon Westphal 

Resumo

Este artigo apresenta uma ferramenta gráfica para definição de parâmetros de janelas com foco no desempenho térmico e luminoso em três climas brasileiros: São Paulo, Belo Horizonte e Manaus. A abordagem considera carga térmica de resfriamento, Autonomia Espacial da Luz do Dia (sDA) e Exposição Anual à Luz Solar (ASE), variando relação janela-parede (WWR), fator solar do vidro (FS), ângulo vertical de sombreamento (AVS) e oito orientações solares, sem entorno urbano. As simulações, realizadas via EnergyPlus e Radiance com o plugin Honeybee no Grasshopper para Rhinoceros 3D, mostram como esses parâmetros afetam simultaneamente os desempenhos térmico e luminoso. Os resultados indicam que fachadas com alto WWR são viáveis quando associadas a estratégias de controle solar, permitindo também o uso de vidros com maior transmissão luminosa. Verificou-se que é possível obter cargas térmicas similares às de WWRs reduzidos (~30%), mantendo elevados níveis de iluminação natural, o que nem sempre ocorre com WWRs baixos. Propõe-se, por fim, um ábaco que cruza parâmetros de projeto e indicadores de desempenho, oferecendo uma ferramenta prática e didática para auxiliar o projeto de aberturas em fachadas.

Palavras-chave: Janelas. Desempenho térmico. Iluminação natural. Controle solar.

Abstract

This article presents a graphical tool for defining window parameters with a focus on thermal and daylight performance in three Brazilian climates: São Paulo, Belo Horizonte, and Manaus. The approach considers cooling load, Spatial Daylight Autonomy (sDA), and Annual Sunlight Exposure (ASE), while varying the window-to-wall ratio (WWR), solar heat gain coefficient (SHGC), vertical shading angle (VSA), and eight solar orientations, in a context without surrounding urban obstructions. Simulations were carried out using EnergyPlus and Radiance, through the Honeybee plugin for Grasshopper in Rhinoceros 3D. Results show how these parameters simultaneously influence thermal and daylight performance. It was found that façades with high WWRs can be viable when combined with solar control strategies, allowing the use of glazing with higher visible transmittance. Similar cooling loads to those of reduced WWRs (~30%) can be achieved while maintaining high levels of natural daylight—an outcome not always observed with small window areas. Finally, a design chart is proposed, correlating design parameters and performance indicators, providing a practical and didactic tool to support the design of façade openings.

Keywords: Windows. Thermal performance. Daylighting. Solar control

¹Natália de Queiroz Nome
¹Universidade Federal da Paraíba
João Pessoa - PB - Brasil

²Fernando Simon Westphal
²Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Recebido em 12/03/25
Aceito em 15/06/25

Introdução

A crescente preocupação com os impactos ambientais na arquitetura, tem levado a projetos mais criteriosos, que integram estratégias de eficiência ambiental voltadas ao desenvolvimento sustentável. A consciência sobre os impactos das construções reforça a importância de uma abordagem mais integrada e complexa nas decisões de projeto (Wetter, 2019). Reconhece-se que as decisões iniciais de projeto são as mais influentes na eficiência energética de uma edificação. Por isso, é fundamental concentrar esforços nas fases preliminares, incluindo avaliações analíticas, construtivas e de desempenho ambiental (Macleamy, 2004).

A fachada é um dos elementos construtivos mais relevantes, por mediar as trocas entre o ambiente interno e externo. Seu projeto deve considerar o clima local, o entorno e as características geográficas, visando potencializar benefícios e mitigar impactos adversos (Olgyay, 2015). Dado o predomínio de climas quentes no Brasil (ABNT, 2024), o projeto de fachadas eficientes deve priorizar o controle solar. A proteção das aberturas é essencial, mas é necessário conciliar aspectos conflitantes, como o desempenho térmico, a iluminação natural e a qualidade das vistas (Huang; Niu; Chung, 2014).

A radiação solar exerce efeitos no ambiente interno, principalmente o aquecimento e a iluminação, os quais contribuem para o bem-estar e a saúde aos ocupantes. A iluminação natural e o contato visual com o exterior são amplamente reconhecidos como as principais vantagens das janelas (Al Horr *et al.*, 2016; Dogrusoy; Tureyen, 2007). Contudo, existe um dilema entre aproveitar a luz natural e mitigar impactos do superaquecimento e do ofuscamento causado pelo brilho excessivo (Boubekri; Boyer, 1992; Ruck; Aschehoug; Aydinli, 2000).

Uma revisão de 118 estudos (Kirimtat *et al.*, 2016) mostrou que pesquisas sobre sombreamento externo fixo geralmente não consideraram outras estratégias de controle solar variáveis, como o tipo de vidro ou WWR. Feng *et al.* (2021) ressaltaram a importância de integrar melhor os parâmetros no projeto de controle solar. Estudos sobre diferentes tipos de vidro geralmente se concentraram no sombreamento interno ou nas áreas de abertura, concluindo que há necessidade de investigar ainda estratégias de sombreamento externo. Queiroz, Westphal e Pereira (2019) destacaram que o desempenho térmico e luminoso das janelas deve ser analisado de forma integrada, considerando sombreamento externo e a escolha do vidro, pois a alteração de um pode impactar o desempenho do outro. O sombreamento externo tem efeito prioritário na radiação direta, enquanto o vidro também na radiação indireta (Queiroz, 2023). Dessa forma, a revisão deste artigo se propõe a apresentar estudos que consideram múltiplas variáveis de projeto associadas, como sombreamento, área de janela e tipos de vidro, além de considerar indicadores de desempenho multicritério, por estarem relacionados a fenômenos de projeto conflitantes.

As simulações computacionais multicritério são fundamentais no projeto de janelas considerando os múltiplos requisitos de desempenho conflitantes. Porém, podem ser de difícil execução durante o processo projetual. Os métodos de otimização e análise multicritério, como os discutidos por Guerrero, Lera e Juiz (2018) e Feng *et al.* (2021), destacam-se como tendência em estudos acadêmicos, oferecendo maior controle sobre múltiplas variáveis de desempenho. Embora possibilitem uma abordagem integradora, há desafios relacionados à capacidade computacional, tempo e eficiência na análise de indicadores. A complexidade dos processos de otimização requer avanços tecnológicos, como computação em nuvem, melhorias no processamento de dados e visualização. Autores que investigaram esses modelos destacaram a necessidade de abordagens interoperáveis entre técnicas e softwares de simulação para apoiar o projeto (Queiroz, 2023; Parekh, 2024).

Huang, Niu e Chung (2014) compararam o desempenho lumínico e térmico de dois tipos de vidro (*Low-e* e vidro duplo) combinados com elementos de sombreamento interno e externo e quatro orientações solares. Concluíram que o vidro *Low-e* obteve melhor desempenho, seguido do beiral horizontal de 1 metro. No entanto, o estudo não alterou o WWR nem considerou elementos de sombreamento maiores. Goia (2016) buscou o WWR ideal para climas europeus, cruzando consumo energético com iluminação natural, mas sem considerar variações de vidros ou de dispositivos de sombreamento. Alwetaishi e Benjeddou (2021) exploraram o WWR ideal para climas quentes, testando três tipos de vidro, mas sem incluir elementos de sombreamento.

Ko *et al.* (2018) testaram o uso de sombreamento interno e o tipo de vidro, e fixaram o WWR (*window-to-wall ratio*, que representa o percentual de abertura na fachada). O uso de sombreamento duplicou as horas em conforto em um escritório simulado em clima quente nos Estados Unidos. Krarti (2023) avaliou o uso de vidros dinâmicos em edificações e destacou que o principal motivo que leva os consumidores a optarem por essas soluções é o desejo de reduzir obstruções, permitindo acesso visual ao exterior.

Echenagucia *et al.* (2015) otimizaram o desempenho de fachadas considerando a demanda de aquecimento, resfriamento e consumo de iluminação artificial em escritório em quatro climas Europeus. Os resultados

indicaram que as fachadas norte, leste e oeste obtiveram pequenas áreas de janela, enquanto a fachada sul permitiu maiores áreas. Os autores destacaram a importância de incluir aspectos subjetivos, como estética e contato visual, e sugeriram que projetistas considerem WWRs mínimos em processos de otimização. Zhai *et al.* (2019), em um exercício de otimização multiobjetivo, definiram WWRs para cada orientação solar em um modelo de escritório condicionado artificialmente com dimensão de 4m de largura e 5m de profundidade, avaliando a redução da carga térmica e a qualidade da iluminação natural. Os resultados mostraram que é possível variar o WWR mantendo o desempenho térmico, mas com grandes variações no desempenho luminoso.

Pilechiha *et al.* (2020) propuseram um método de otimização para o projeto de janelas, considerando consumo de energia, qualidade de vistas e luz natural. O estudo indicou um WWR ótimo de 43% para Teerã, mas ressaltou a importância da forma do ambiente e a necessidade de mais pesquisas sobre elementos de proteção solar. Os autores criticaram os métodos existentes para avaliar qualidade de vistas, que tendem a favorecer grandes WWR. Lee *et al.* (2022) discutiram próximos passos para promover o aproveitamento da luz natural e contato com o exterior. Destacaram que as vistas externas e a luz natural contribuem de forma relevante para o bem-estar dos ocupantes, mas os efeitos de intervenções como sombreamentos e vidros colorizados ainda são pouco compreendidos. Ao mesmo tempo, há um desafio constante em equilibrar conforto visual e acesso à vista com a meta de reduzir o consumo energético e as emissões de carbono dos edifícios.

Ko *et al.* (2018) propuseram um método gráfico de visualização de dados de desempenho térmico e visual, utilizando escalas de cores para auxiliar os projetistas na configuração de janelas. Eles consideraram indicadores como insolação direta e iluminância excessiva, associando-os à probabilidade de ofuscamento. Ko *et al.* (2023) avaliaram a satisfação dos usuários com a qualidade das vistas em escritórios, concluindo que WWR abaixo de 25% não é satisfatório, enquanto áreas superiores a 65% não oferecem maiores benefícios do contato visual.

Estudos recentes adotam uma abordagem multivariável, mas apresentam lacunas. Kamel *et al.* (2024) analisaram a relação entre WWR e proporções do espaço interno, classificando soluções com base em eficiência energética, obstrução e controle de iluminação natural (sDA e ASE), mas desconsiderando estratégias de controle solar ou a influência da orientação. Xue *et al.* (2019) aplicaram otimização multicritério na China, combinando WWR e sombreamento em diferentes orientações, alcançando bom desempenho com até 78% de WWR, porém, utilizaram o *Daylight Factor* (DF), que considera a condição de céu genérica, encoberto. Kangazian e Ravazi (2023) focaram em edifícios de escritórios, cruzando indicadores como iluminância útil (UDI), ofuscamento (sGA) e consumo de energia (EUI), simulando 1240 alternativas de projeto. No entanto, a área de janelas foi fixada em 40%, limitando a análise.

No Brasil, dois estudos multicritério se destacam. Venâncio (2020) propôs uma otimização baseada na radiação incidente e iluminância, mas sem considerar variações de WWR e tipo de vidro. Queiroz, Westphal e Pereira (2019) executaram análise paramétrica envolvendo tipo de vidro e elementos de sombreamento, usando indicadores de carga térmica de resfriamento (CT Resf) e de iluminação útil (UDI), mas sem variar o WWR.

Simulações multicritério aplicadas ao projeto de janelas em edifícios de alto desempenho evidenciam o potencial de equilibrar variáveis como sombreamento, envidraçamento, orientação solar e WWR. Contudo, faltam estudos abrangentes que integrem as principais variáveis envolvidas, tais como orientação, WWR, sombreamento externo e tipo de vidro, com indicadores de iluminação e desempenho térmico. Diante da complexidade, é comum que um ou mais elementos não sejam explorados, sugerindo a necessidade de formas de visualização de dados que auxiliem a compreensão de compensações críticas entre soluções de projeto e o desempenho térmico e luminoso.

O objetivo deste artigo é propor uma ferramenta gráfica para a definição de parâmetros de projeto de janelas, com foco no desempenho térmico e luminoso, a partir de uma análise combinatória multicritério, considerando um ambiente de escritório condicionado artificialmente e três diferentes climas brasileiros.

Método

A pesquisa é prioritariamente quantitativa e apoiada em simulação computacional. Utilizou-se o *software EnergyPlus* 24.2 para estimar a carga térmica de resfriamento anual (CT Resf), em kWh/m². Paralelamente, o *Radiance* foi empregado para calcular os indicadores de iluminação natural sDA (*Spatial Daylight Autonomy*)¹

¹Porcentagem de uma área de análise (onde os cálculos são realizados) que atende a um nível mínimo de iluminância natural para uma fração especificada das horas de operação por ano.

e ASE (*Annual Sunlight Exposure*)². Ambos os processos foram integrados usando *plugin Honeybee* para *Grasshopper*, no *Rhinoceros 3D*. O sDA indica se a luz natural é suficiente para dispensar o uso de iluminação artificial; o ASE indica excesso de exposição solar, com risco de ganho térmico indesejado e ofuscamento. O método foi dividido em cinco etapas:

- (a) definição do caso base;
- (b) definição das variações paramétricas;
- (c) modelagem e simulação no EnergyPlus;
- (d) modelagem e simulação no Radiance; e
- (e) compilação dos dados.

Definição do caso base

O estudo tem início com a modelagem de uma sala de escritório de pequeno porte, no formato *shoebox* (caixa de sapato), condicionada artificialmente e localizada em pavimentos intermediários de um edifício hipotético. A sala foi modelada com dimensões de 6m x 8m x 3m (largura, profundidade e pé-direito). No *EnergyPlus*, a simulação considerou uma única zona térmica. No *Radiance*, a modelagem levou em conta a espessura das paredes (0,15 m) e do piso (0,10 m) e da laje de cobertura (0,10 m), uma vez que o *Radiance* admite maior precisão geométrica.

Variações paramétricas

O modelo foi submetido a variações de parâmetros, combinando climas brasileiros, WWR, tipos de vidro, um beiral como sombreamento horizontal e a orientação em relação ao norte geográfico. O beiral foi escolhido por reduzir a obstrução da vista externa, aspecto relevante para a tipologia simulada, como apontado por Krarti (2023).

As janelas foram avaliadas conforme cinco configurações de WWR, entre 10% e 80%. Consideraram-se cinco tipos de vidro do mercado nacional, com relação equilibrada entre Fator Solar (FS) e Transmissão Visível (Tvis), excluindo vidros especiais de alto desempenho. Os valores de FS variaram de 0,27 a 0,79 e os de Tvis, de 0,18 a 0,82 (Figura 1).

Para os elementos de sombreamento, utilizou-se um beiral horizontal externo. Os comprimentos adotados seguiram uma curva exponencial, priorizando dimensões menores (mais usuais), mas incluindo maiores, resultando em ângulos verticais de sombreamento³ de 10° a 70°, além dos modelos sem proteção. A variação até 70° visa a interpolação dos resultados na ferramenta gráfica para grandes projeções de sombreamento, como marquises sobre pequenas aberturas. O beiral foi instalado a 3 metros de altura na parede externa.

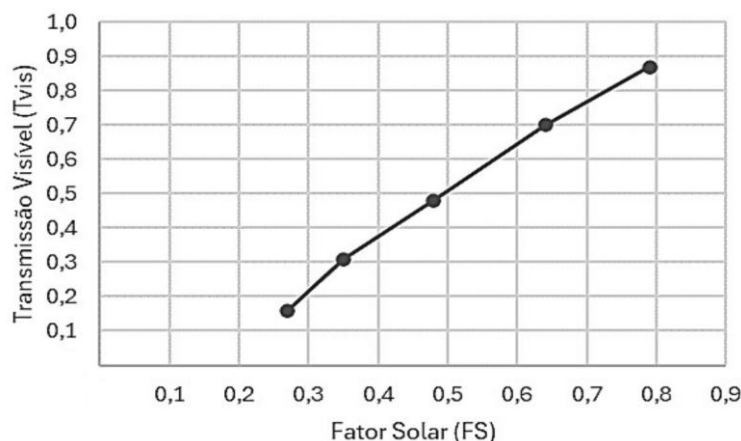
O modelo foi simulado em oito orientações solares, representadas pelo azimuth medido no sentido horário a partir do Norte. As variações paramétricas seguiram a Tabela 1, totalizando 6000 simulações. Foram considerados os climas de São Paulo, Belo Horizonte e Manaus, escolhidos pela representatividade climática no Brasil segundo *Köppen*. Foram considerados arquivos climáticos mais recentes, em formato TMYx 2017-2023.

São Paulo (Cfb, latitude: 23°33' S, longitude: 46°38' W), tem temperaturas médias das máximas entre 25 e 31 °C e médias mínimas entre 11 e 19 °C. A umidade relativa do ar média mensal varia de 22% a 95%, sendo agosto o mês menos úmido, enquanto a radiação solar média diária medida no plano horizontal é de 4,5 kWh/m². Belo Horizonte (Cwb, latitude: 19°55'S, longitude: 43°57'W) possui médias máximas de temperatura entre 25 e 30 °C e médias mínimas entre 12 e 18 °C. A umidade relativa do ar varia entre 30% e 90%; já a radiação solar média é de 5,3 kWh/m². Por fim, Manaus (Af, latitude: 3° 6' S, longitude: 60° 0' W) apresenta médias máximas de temperatura entre 31 e 36 °C e mínimas entre 22 e 23 °C. A umidade relativa do ar é alta, com médias entre 40% e 100% com temporada menos úmida entre os meses de julho a novembro. A radiação solar média diária é de 4,7 kWh/m².

²Porcentagem de uma área de análise que excede um nível especificado de iluminância de luz solar direta por mais de um número especificado de horas por ano.

³Ângulo medido entre o plano da janela e o plano que liga a extremidade do beiral e o peitoril da janela.

Figura 1 - Relação entre Tvis e FS dos vidros selecionados



Nota: produzido pelos autores.

Tabela 1 - Variações paramétricas das simulações

Elemento variado	Variações	Número de variações
Área de janela (WWR)	10%; 30%; 45%, 60% e 80%	5
Sombreamento horizontal (AVS)	0, 10°, 25°, 45° e 70°	5
Azimute da fachada	0°; 45°; 90°; 135°; 180°; 225°; 270°; 315°	8
Fator solar do vidro	0,27; 0,35; 0,48; 0,64; 0,79	5
Climas	São Paulo, Belo Horizonte, Manaus	3
Software	<i>EnergyPlus</i> e <i>Radiance</i>	2
Quantidade total de simulações		6000

Modelagem no *EnergyPlus*

As rotinas operacionais do escritório consideram ocupação das 8h às 18h, totalizando 10 horas diárias homogêneas de ocupação, uso dos equipamentos, iluminação e ar-condicionado excluindo domingo e feriados. Adotou-se uma estratégia metodológica conservadora para posterior estimativa da carga térmica via ferramenta simplificada (ábaco), garantindo margem de segurança para as primeiras fases de projeto e isolando o impacto de variações na envoltória (vidros, WWR, sombreamento e orientação). As cargas internas, detalhadas na Tabela 2, consideram ganhos de calor por equipamentos, ocupantes e iluminação. Adotou-se o objeto *Ideal Loads* do *EnergyPlus*, que calcula a carga térmica de resfriamento e aquecimento necessários para manter a temperatura interna, sem modelar um sistema específico de climatização. As janelas foram mantidas fechadas, com infiltração de ar estimada em 0,00063 m³/s/m². Os sistemas construtivos foram modelados conforme Tabela 3, com propriedades térmicas dos materiais para paredes, piso e cobertura. Adotou-se construção leve, com isolamento térmico, correspondente a *light steel frame*. Apenas a parede com janela foi considerada tendo troca térmica com o exterior. As demais superfícies (cobertura, paredes internas e piso) foram consideradas adiabáticas.

Detalhamento *Radiance*

A simulação no *Radiance* foi realizada para o modelo 3D do ambiente, com representação explícita da espessura de paredes, teto e piso, conforme descrito no item 2.1. Utilizou-se o “método de duas fases melhorado”, descrito por Subramaniam (2018), via *plugin Honeybee* para *Grasshopper*. Este método refina a discretização do céu e aumenta a confiabilidade da simulação. Os dados gerados incluíram sDA, considerando a área do ambiente que recebe 300 lux ou mais para 50% do tempo de ocupação e ASE, considerando a área do ambiente que recebe mais de 1000 lux de insolação direta por mais de 250 horas do ano. Ambos para ocupação entre 8h e 18h. A malha de sensores foi definida pela Equação 1 (Iversen *et al.*, 2013), com adição de dois sensores por direção, totalizando 110 sensores (Figura 2). A Tabela 4 apresenta os parâmetros de simulação e as refletâncias das superfícies internas.

$$T = 0,2x5^{\log(d)}$$

Eq. 1

Sendo:

“T” é a distância entre sensores numa determinada direção em metros;

“d” é a dimensão interna da parede numa determinada direção em metros.

Tabela 2 - Cargas internas consideradas

Sistema	Valor	Unidade
Pessoas	0,10	Pessoas/m ²
Iluminação	12,25	W/m ²
Equipamentos	15	W/m ²
Termostato para resfriamento	23	°C
Termostato para aquecimento	21	°C

Tabela 3 - Sistemas construtivos considerados

Elemento construtivo	Camada e espessura	Resistência (m ² K/W)	Condutividade de (W/mK)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)	Absortância
Parede*	camada externa 0,034 m	-	1,75	2200	1000	0,50
	material sem massa	0,209	-	-	-	-
	camada interna 0,034 m	-	1,75	2200	1000	0,50
Piso*	camada externa 0,03 m	-	1,75	2200	1000	0,80
	material sem massa	0,45	-	-	-	-
	camada interna 0,03 m	-	1,75	2200	1000	0,80
Cobertura*	camada externa 0,033 m	-	1,75	2200	1000	0,30
	material sem massa	0,67	-	-	-	-
	camada interna 0,033 m	-	1,75	2200	1000	0,30

Nota: *apenas a parede externa possui trocas térmicas com o exterior, as demais superfícies foram consideradas adiabáticas.

Figura 2 - Localização dos sensores

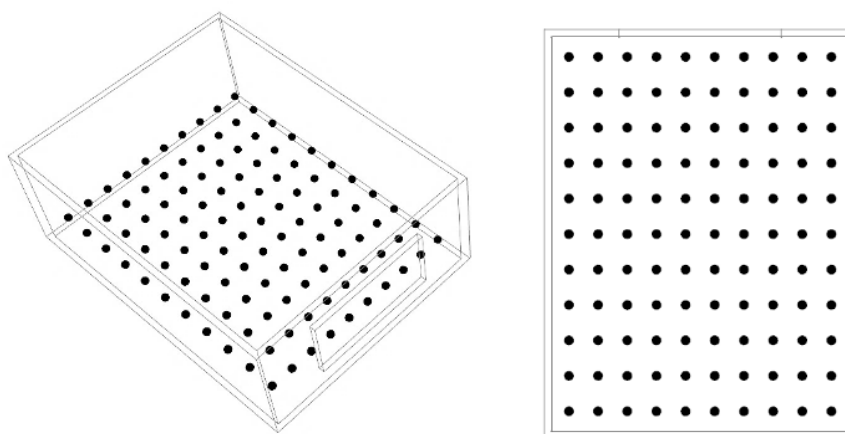


Tabela 4 - Parâmetros do Radiance utilizados

Superfície	Refletância	Parâmetros da simulação
Paredes externas	0,5	-ab 6 -ad 5000 -ar 64 -as 1024 -lw 2e-06
Paredes internas	0,5	
Piso	0,2	
Teto	0,7	

Compilação dos dados

Os dados foram compilados em arquivo CSV (valores separados por vírgulas) e importados para o *software Tableau*, que permitiu cruzamentos e geração de gráficos de dispersão multicritério.

Elaboração dos ábacos

Os ábacos foram produzidos a partir do arquivo CSV, com programação visual e textual em *Python* no plugin *Grasshopper* para o *Rhinoceros 3D*. Cada ábaco representa uma combinação específica de WWR e orientação solar, totalizando 40 por clima (5 WWRs x 8 orientações).

A construção iniciou-se com gráficos de superfície baseados em 25 pontos: o eixo x representa os cinco tipos de vidro e o eixo y, os cinco ângulos verticais de sombreamento. Três superfícies foram geradas por ábaco, referentes aos indicadores: CT Resf., sDA e ASE.

Planos de corte geraram curvas de nível que interpolam os dados, convertidos em mapas de nível com legendas para cada indicador, esses foram sobrepostos para facilitar a leitura comparativa multicritério. O processo foi automatizado para gerar os 40 ábacos diretamente a partir do CSV. Os critérios adotados foram:

- (a) os dados de carga térmica foram normalizados pela área do ambiente e apresentados em kWh/m². Definiu-se um valor de carga térmica de referência como sendo o caso base (WWR 30%, FS 0,79, sem sombreamento) na orientação solar que resultou em maior carga térmica (CT Resf). As curvas foram definidas a cada 10 kWh/m²;
- (b) os resultados de iluminação natural foram considerados os parâmetros estabelecidos pela IES LM-83 (IES, 2012). O indicador sDA foi classificado em faixas de desempenho: atendendo menos de 50% da área; atendendo entre 50% e menos de 75%; atendendo entre 75% e menos de 100% e atendendo 100%; e
- (c) os resultados de ASE foram classificados em intervalos: menor que 3% da área; entre 3% e 7%; entre 7% e 10%; e maior que 10%.

Resultados

Os resultados para São Paulo, Belo Horizonte e Manaus demonstraram como diferentes WWRs, sombreamento externo e tipo de vidro (FS) influenciam o desempenho térmico e de iluminação de escritórios condicionados artificialmente. O desempenho térmico considerou a comparação com o caso base selecionado para cada cidade, conforme item da seção “Elaboração dos ábacos”. As interações entre esses elementos variaram conforme o contexto climático e serão abordadas a seguir.

São Paulo

A Figura 3 apresenta os resultados de ASE, sDA e CT Resf para São Paulo. A carga térmica de referência foi definida para o caso base (WWR 30%, FS 0,79, AVS 0°) com azimuth de 315° (fachada noroeste), atingindo 180 kWh/m². Quando voltado com a fachada para orientação sul (azimute 180°), sudoeste (azimute 225°) e sudeste (azimute 135°), o modelo apresentou carga térmica inferior à referência para todas as opções de WWR. Isso indica que, tomando as características do caso base como referência em carga térmica máxima, é possível ampliar a área de janela nas fachadas sul, sudeste e sudoeste, sem aumento expressivo de carga térmica. Essa equivalência de desempenho é alcançada mesmo com o uso de vidro incolor sem proteção solar externa. Para demais orientações solares, o uso de vidros de controle solar ou elementos de proteção solar externa permite a ampliação da área de janela sem acréscimo na carga térmica (Figuras 3 e 4).

A avaliação da autonomia da luz natural (sDA) indica que a solução adotada pode ter grande impacto na qualidade da iluminação do ambiente. Os resultados de sDA mostram que o modelo é mais sensível à transmissão luminosa do vidro do que à proteção solar externa horizontal proposta neste estudo de caso, para os intervalos de variação adotados neste trabalho. Embora o tipo de vidro tenha grande impacto no sDA, a influência no ASE não é tão expressiva. Nesse caso, para controlar o ASE é necessário o uso de elementos de sombreamento, como o beiral simulado (Figura 4).

O vidro de menor Tvis (FS 0,27) limita a autonomia espacial da luz natural a 45% da área do ambiente, mesmo com grandes áreas envidraçadas. Para o clima de São Paulo, a mudança na orientação solar não traz grandes variações no percentual de autonomia da luz natural (sDA), embora na incidência direta de sol, avaliada pelo indicador ASE, as orientações norte, nordeste, noroeste e oeste deverão requerer elementos de proteção solar

em função do aumento na área de janela (WWR). Nessas situações, mesmo o uso do vidro com fator solar mais baixo não é suficiente para reduzir a ASE abaixo de 7% para os modelos com grande área de janela (WWR de 60% e 80%) (Figuras 3 e 4).

Belo Horizonte

A Figura 5 apresenta os resultados das simulações para Belo Horizonte. A carga térmica de referência foi definida para o caso base (WWR 30%, FS 0,79 e AVS 0°) com azimute de 315° (fachada noroeste), atingindo 205 kWh/m². Esse valor é 14% superior à carga térmica de referência para São Paulo, confirmando a maior necessidade de resfriamento no clima de Belo Horizonte.

A variação de carga térmica na amostra simulada segue a mesma tendência da observada para São Paulo. As orientações sul, sudeste e sudoeste apresentam todas as cargas térmicas inferior à referência em qualquer condição de WWR, exceto a orientação sudoeste com WWR 80% e vidro de fator solar 0,79, que supera a carga térmica de referência, o que é resolvido ao se considerar AVS de 10°.

As simulações para Belo Horizonte confirmam a forte influência do tipo de vidro na autonomia da luz natural (sDA) e da proteção solar horizontal na incidência direta do sol (ASE). Em Belo Horizonte, assim como em São Paulo, para os modelos com WWR de 45%, é possível alcançar baixos valores de carga térmica e bom desempenho lumínico (alto sDA e baixo ASE) com o uso de vidros de controle solar e elementos de proteção solar conjugados em qualquer orientação (Figura 6).

Figura 3 - Resultado das simulações para São Paulo para os indicadores de ASE, CT resf e sDA para cada WWR e orientação simuladas

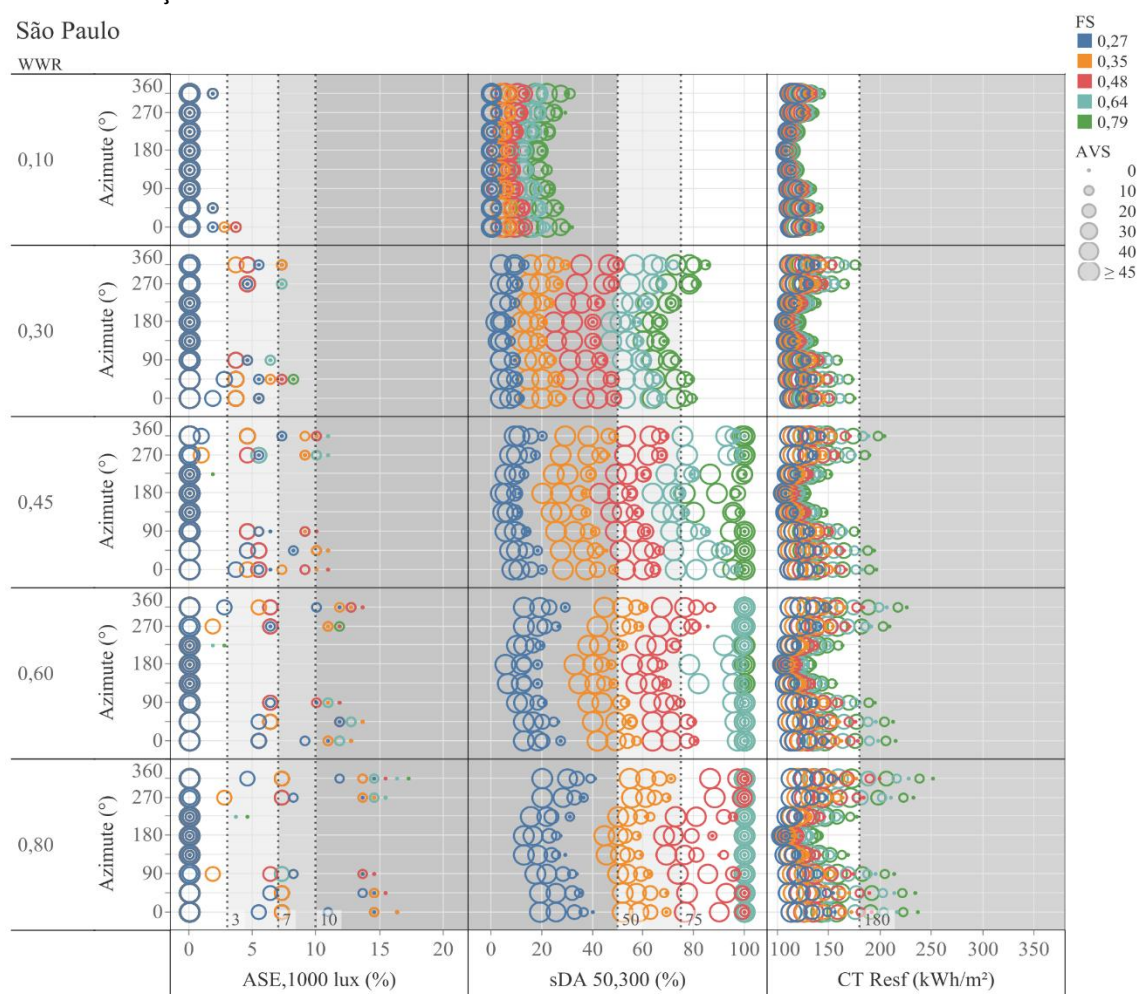


Figura 4 - Resultado para São Paulo para ASE, CT Resf e sDA para WWRs superiores a 30%, destacando FS e AVS

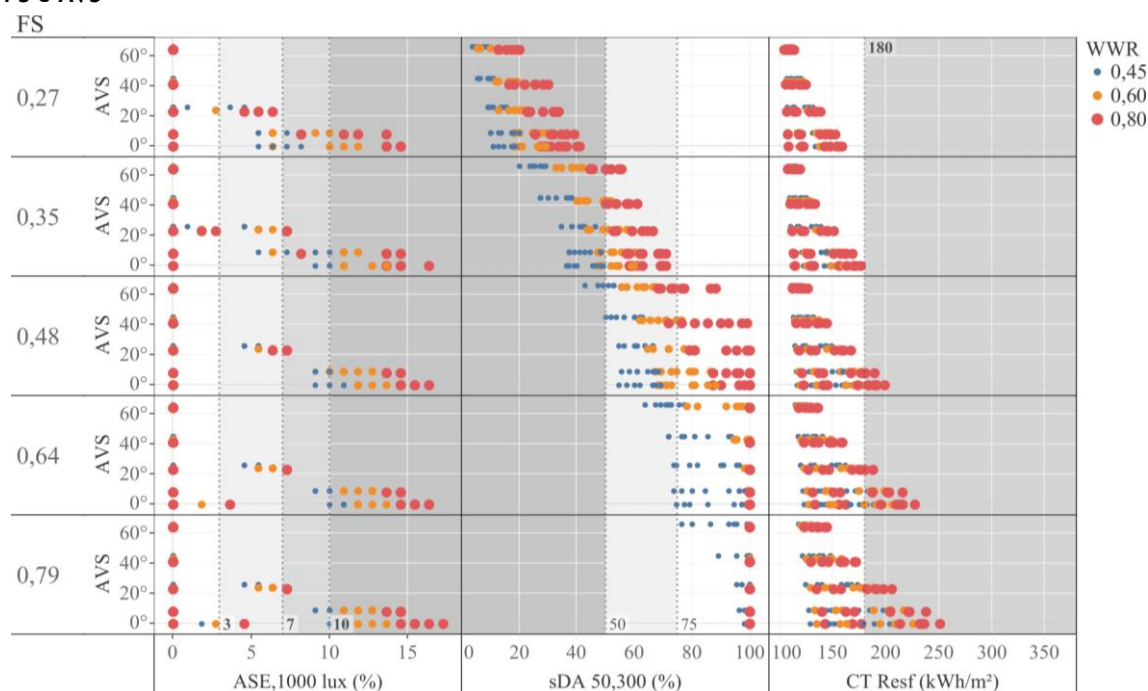


Figura 5 - Resultado das simulações para Belo Horizonte para os indicadores de ASE, CT Resf e sDA para cada WWR e orientação simuladas

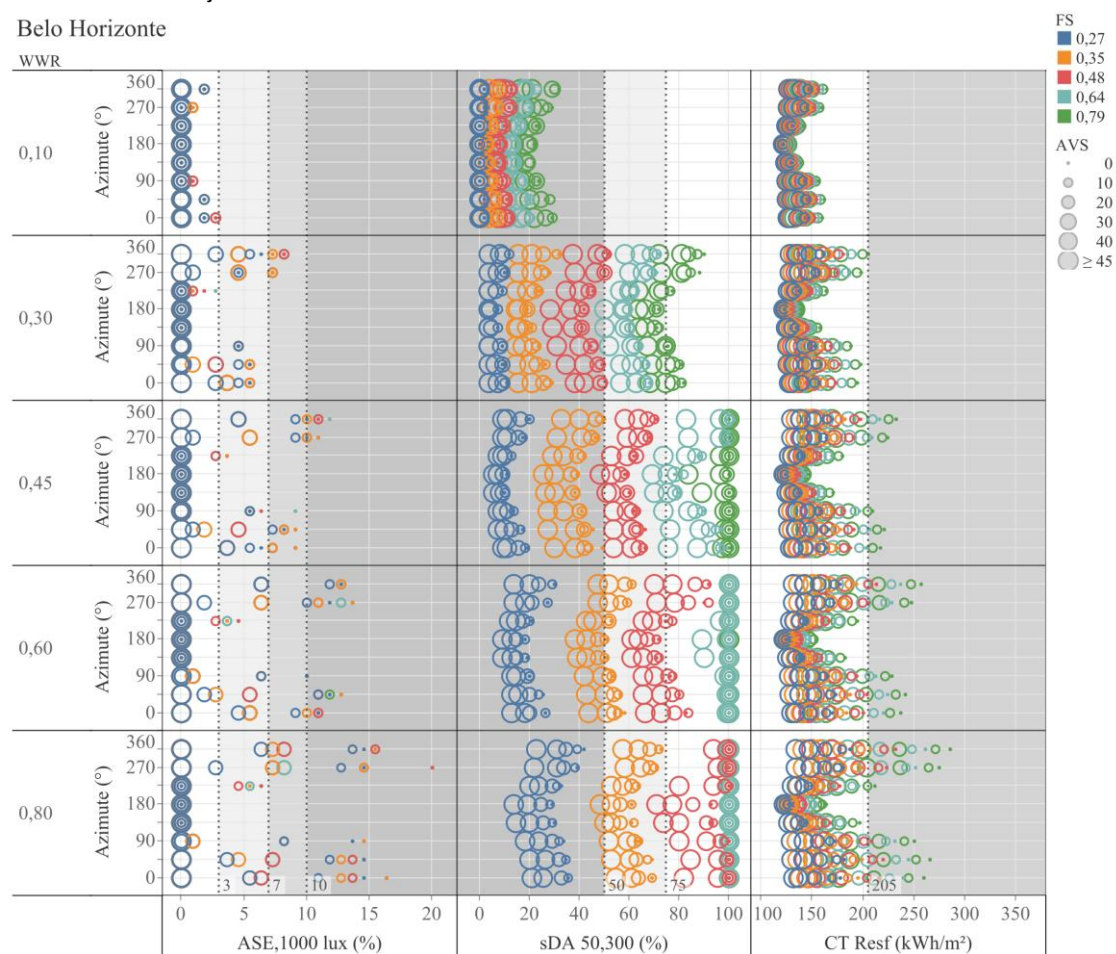
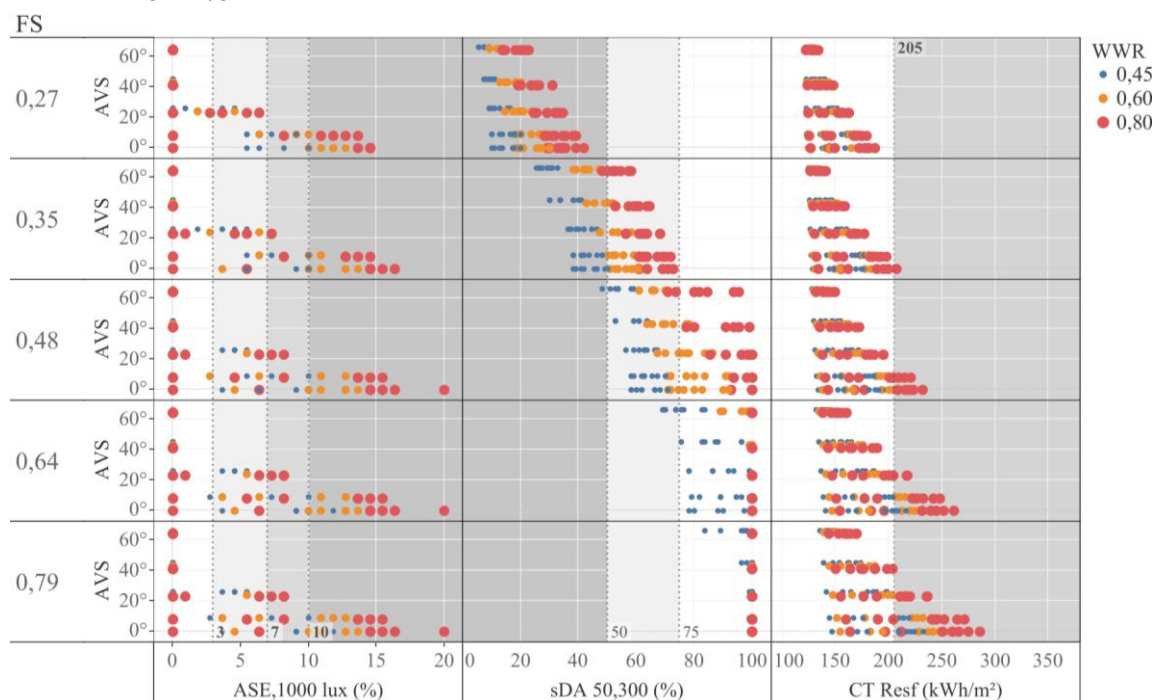


Figura 6 - Resultado para Belo Horizonte para ASE, CT Resf e sDA para WWRs superiores a 30%, destacando FS e AVS



Manaus

A carga térmica de referência para Manaus foi 284 kWh/m², identificada para o caso base na orientação oeste (azimute 270°). Esse valor é 58% superior à referência adotada para São Paulo e 38% superior à de Belo Horizonte. Os resultados das simulações para Manaus são apresentados na Figura 7.

Todas as orientações solares apresentaram combinações de carga térmica acima do caso-base, diferente das duas outras cidades analisadas. Isso indica a necessidade de um controle mais rigoroso da insolação em fachadas com maiores WWRs, independente da orientação solar. Ainda assim, a orientação sul, que apresentou os menores valores de carga térmica, registrou, em média, 3% a mais de carga que a fachada oeste para o WWR de 30% (referência).

Por estar localizada em uma latitude mais baixa (mais próxima do equador), Manaus apresenta valores menores de ASE em todas as orientações solares em comparação às demais cidades simuladas, apesar das maiores cargas térmicas envolvidas. As razões de WWR de 30% e 45% permitem um aproveitamento da luz natural, com sDA superior a 50%, ou seja, pelo menos metade do ambiente é suprida por luz natural em mais de 50% do tempo de ocupação, para os dois vidros com maior transmissão luminosa simulados. Novamente, observa-se o papel determinante do tipo de vidro nos resultados de sDA. O vidro com menor fator solar simulado, por sua vez, não permite atingir sDA de 50%, nem mesmo com a fachada inteiramente envidraçada (Figuras 7 e 8).

Proposta de ferramenta gráfica de apoio ao projeto

Entender como a variação dos parâmetros afeta os indicadores de desempenho e como devem ser combinados para atender simultaneamente aos requisitos desejados é uma tarefa intrincada devido à complexidade dos dados envolvidos. Para facilitar essa compreensão, foi idealizada uma ferramenta gráfica, consistindo em ábacos específicos para cada cidade. O objetivo é possibilitar a análise visual da relação entre parâmetros bem como obter respostas imediatas. Visa simplificar e auxiliar a compreensão e a tomada de decisões nas fases iniciais do projeto de aberturas nas fachadas para escritórios condicionados artificialmente.

Figura 7 - Resultado das simulações para Manaus para os indicadores de ASE, CT Resf e sDA para cada WWR e orientação simuladas

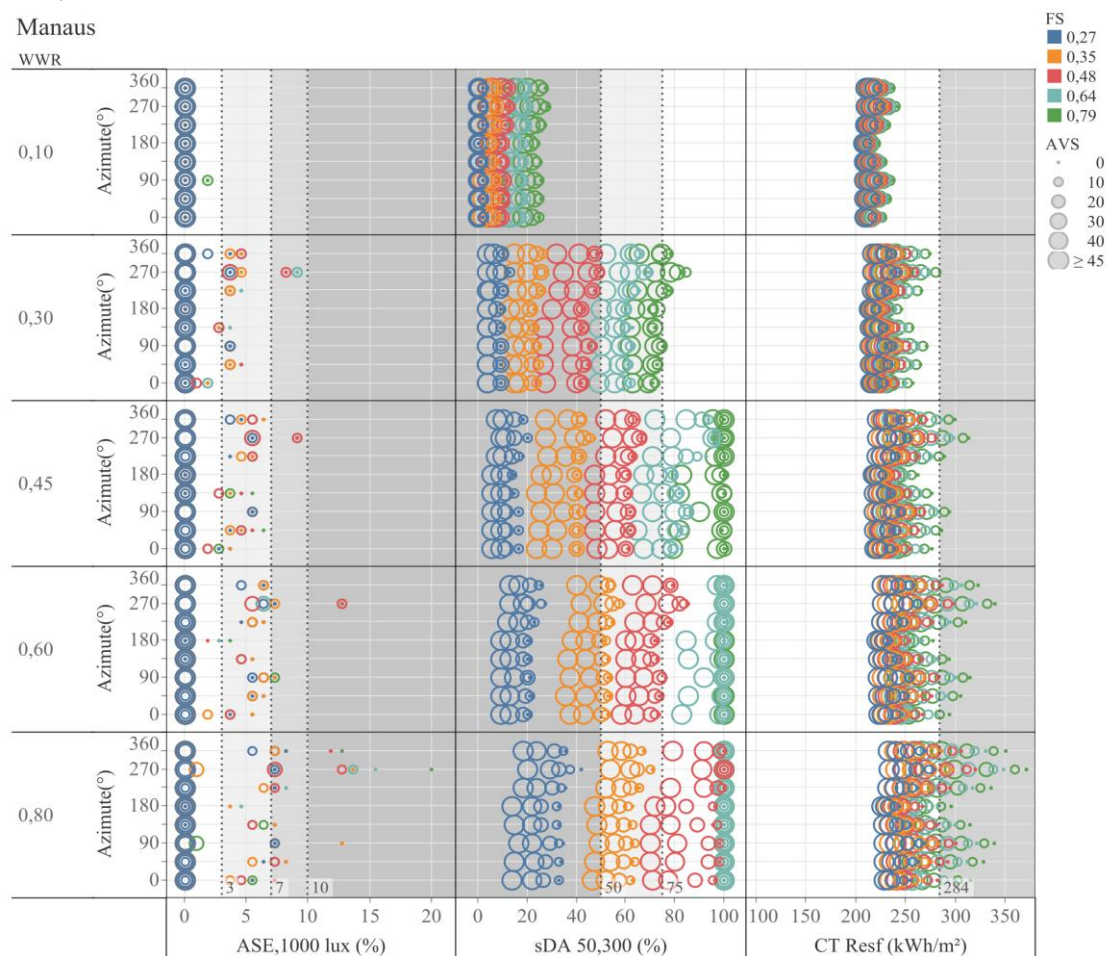
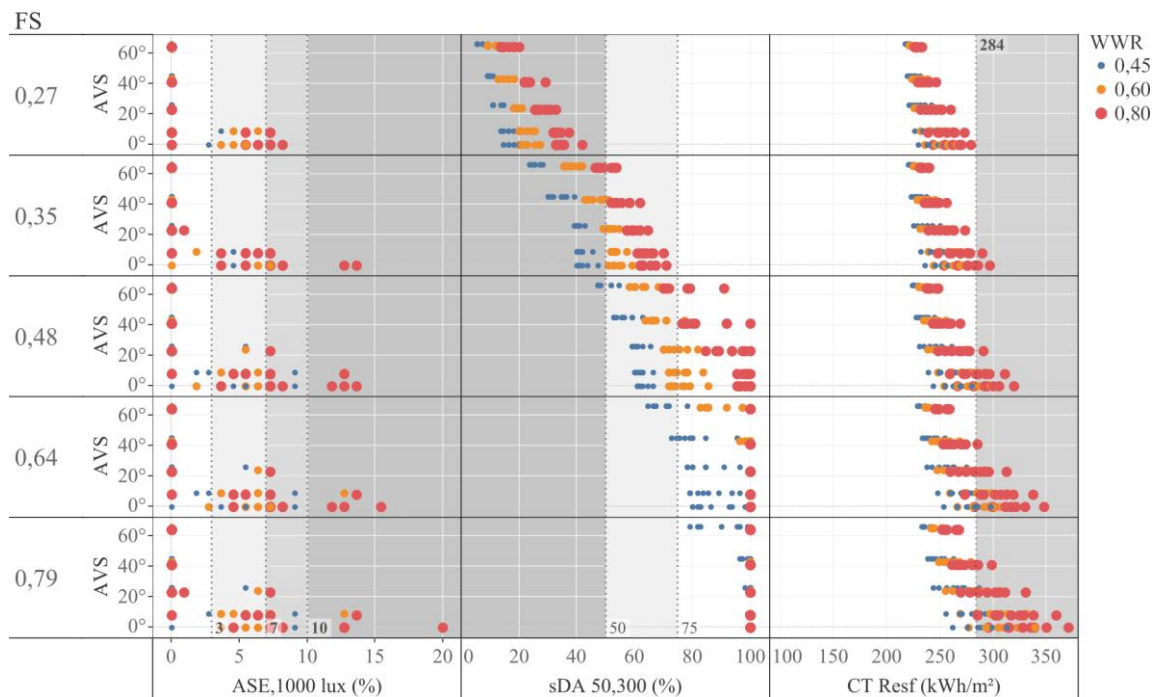


Figura 8 - Resultado para Manaus para ASE, CT Resf e sDA para WWRs superiores a 30%, destacando FS e AVS



Os ábacos foram concebidos a partir da sobreposição dos gráficos de superfície para cada indicador simulado, agrupados por combinação de WWR e orientação solar. Levou-se em conta as variações de FS e AVS do vidro e do sombreamento (eixo x e y). Os gráficos de superfície permitem compreender resultados, possibilitando a previsão de valores para situações não simuladas a partir da interpolação entre curvas de mesmo nível de desempenho. As Figuras 9 e 11 ilustram a organização dos ábacos. A Figura 9 mostra construção para o ábaco de WWR 80% para orientação oeste em Manaus e a Figura 11 ilustra ábacos para São Paulo. Todos os gráficos para as três cidades podem ser acessados por meio da Figura 10, que também dá acesso ao conteúdo em alta resolução.

Figura 9 - Ábaco para fachada oeste em Manaus e WWR de 80% enfatizando os indicadores: (a) CT Resf: curvas concêntricas; (b) sDA: linhas verticais; e (c) ASE: linhas horizontais

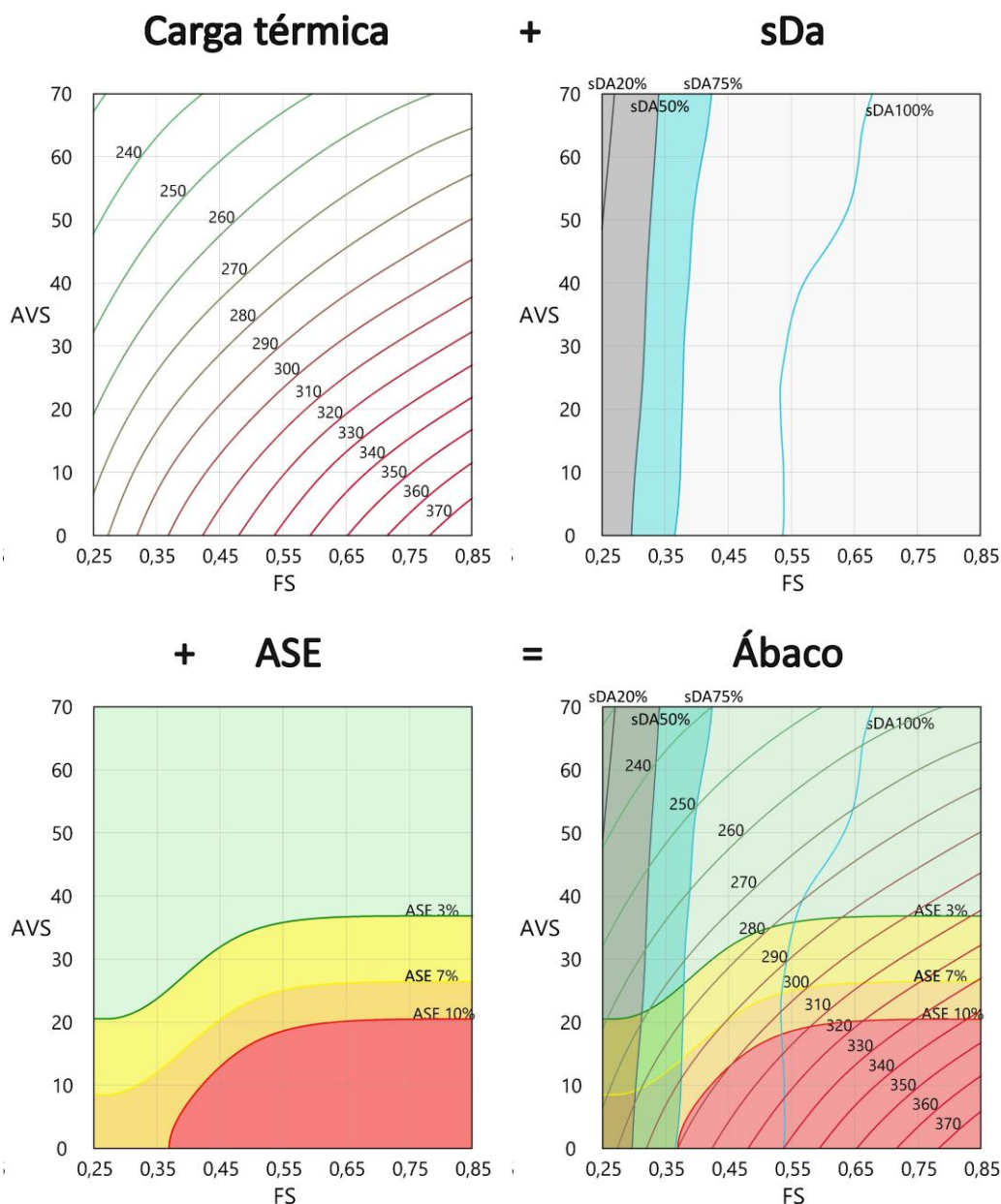
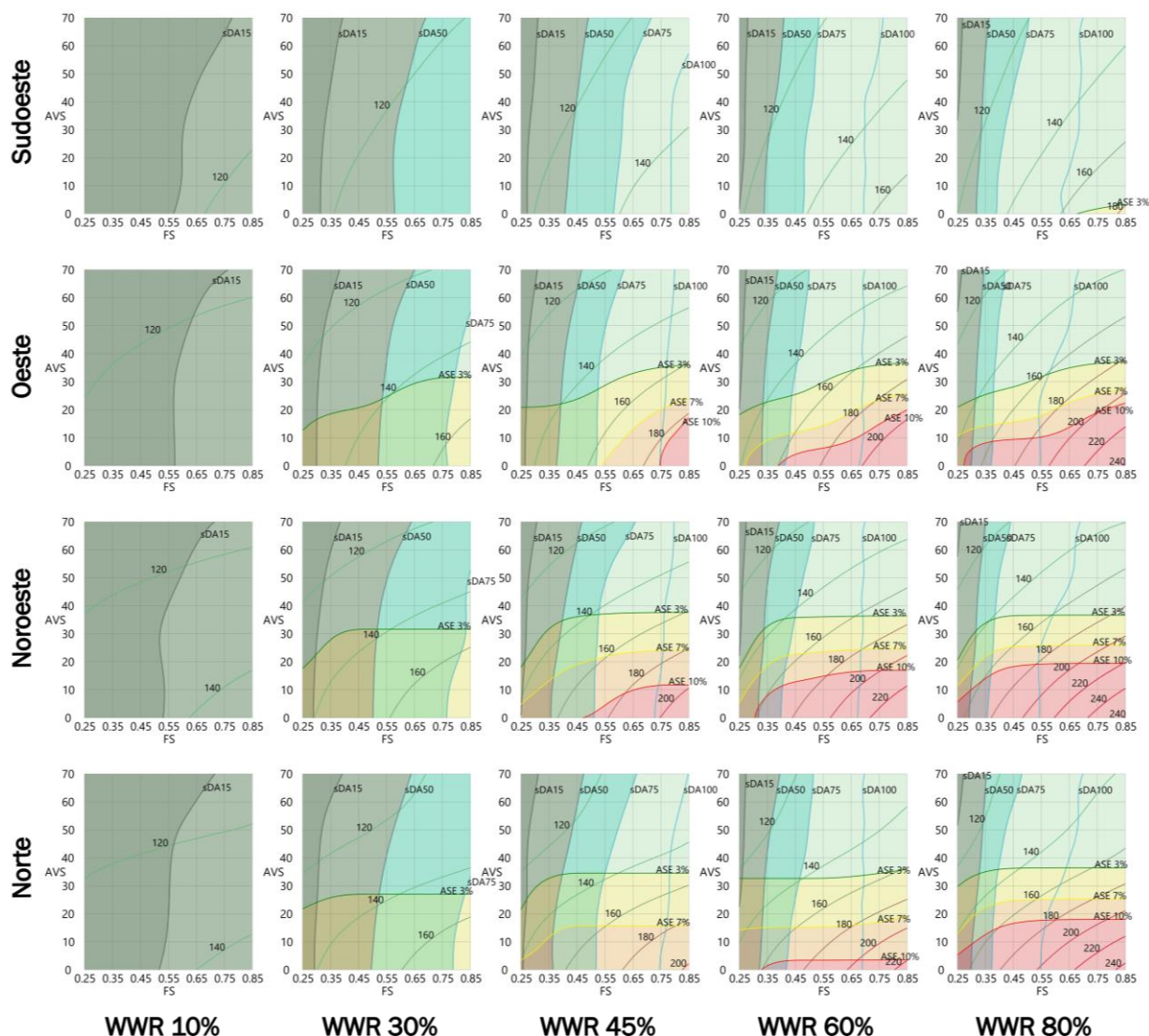


Figura 10 - Acesso aos ábacos em alta resolução



Figura 11 - Ábacos para São Paulo considerando orientações norte, noroeste, oeste e sudoeste.



As Figuras 9 e 12a mostram, como exemplo, o ábaco que descreve o desempenho do ambiente voltado para a orientação oeste, com sua fachada completamente envidraçada (WWR de 80%) na cidade de Manaus (situação mais crítica termicamente). No conjunto de ábacos, a carga térmica anual (kWh/m^2) é representada por curvas concêntricas, que indicam valores a cada 10 kWh/m^2 (Figura 9a). O sDA é representado por curvas verticais que indicam valores de 20%, 50%, 75% e 100%, mostradas em destaque na Figura 9b. O ASE é representado por curvas quase horizontais, que indicam valores de 0%, 3%, 7% e 10% (Figura 9c).

A Figura 12 exemplifica duas aplicações dos ábacos. No gráfico da esquerda, para uma fachada oeste com WWR 80% em Manaus, foi selecionada uma solução que atende à carga térmica de 284 kWh/m² (referência adotada neste artigo), com sDA de 100%, o que significa que todo ambiente é suprido por luz natural em mais de 50% do tempo de ocupação e ASE inferior a 3%. Esse desempenho foi alcançado com um elemento de proteção solar com AVS de aproximadamente 36° e vidro com FS de 0,55, mesmo em uma fachada completamente envidraçada. Vale destacar que esse resultado considera a tipologia de sombreamento simulada nesta pesquisa.

No exemplo à direita na Figura 12, apresenta-se o ábaco para a orientação sudeste, também considerando o clima de Manaus e uma fachada com WWR 80%. Nesse caso, para atingir simultaneamente a carga térmica do caso de referência (exemplo definido nesta pesquisa como *referência de carga térmica*) e os critérios descritos no parágrafo anterior, seria necessária a adoção de um elemento de sombreamento com AVS de aproximadamente 14° e vidro com FS de 0,64. Observa-se, para a cidade de Manaus, a necessidade de elementos de proteção solar para qualquer tipo de vidro adotado quando se deseja manter o ASE abaixo de 3% em fachadas envidraçadas. Isso evidencia que, neste clima, a combinação entre latitude, orientação solar e elevada área de envidraçamento torna imprescindível o uso de proteção solar externa para garantir baixos níveis de exposição direta a luz solar no ambiente.

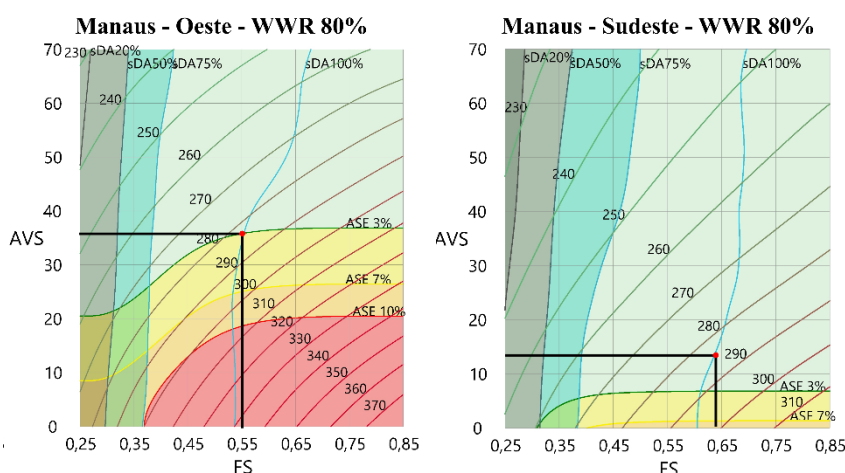
Discussão

As simulações paramétricas sugerem que o sombreamento externo exerce influência significativa sobre os resultados de ASE, conforme os cenários analisados. As simulações indicaram que o sombreamento externo, combinados a vidros com algum controle solar e maiores razões de WWR, permite resultados favoráveis para os três indicadores analisados. Em termos práticos, isso sugere que ao aumentar a área de janelas (WWR), a introdução de elementos de sombreamento externo pode mitigar o aumento de carga térmica, mantendo o desempenho térmico mais equilibrado, sem comprometer a qualidade do ambiente interno.

As melhores combinações de projeto de abertura integraram vidros com maiores Tvis, maiores WWRs e sombreamento externo, permitindo maior entrada de luz natural, correção da insolação e redução do sobreaquecimento. Essa solução favorece a iluminação adequada, a conexão visual com o exterior e a reprodução fiel da vista, minimizando também a interferência da coloração do vidro. Esses achados corroboram as conclusões de Xue *et al.* (2019), que apontam aberturas ampliadas como soluções mais eficazes no equilíbrio entre os indicadores térmicos e luminosos.

Por outro lado, os vidros com menor Tvis foram ineficazes na obtenção de bons resultados de sDA e manutenção do ASE dentro dos limites desejados. Apesar de contribuírem para redução de carga térmica anual ao limitar o ganho de calor, esses vidros prejudicaram a iluminação natural, mesmo em fachadas com maiores WWRs, e não evitaram valores de ASE superiores a 3%. Isso reforça a importância de uma estratégia integrada de controle solar, que combine transmissão luminosa adequada do vidro com sombreamento externo, para otimizar o desempenho térmico dos edifícios.

Figura 12 - Ábacos para fachada Oeste e sudeste em Manaus e 80% de envidraçamento evidenciando solução exemplificada



A latitude e a orientação das janelas influenciam diretamente a necessidade de estratégias de controle solar. As simulações mostram que, em cidades de latitudes maiores como São Paulo e Belo Horizonte, orientações sul, sudeste e sudoeste permitem maior flexibilidade no uso de grandes aberturas, tipos de vidro e sombreamento externo. Já em Manaus, todas as orientações exigem atenção especial, indicando a importância de ajustes no projeto para controlar a carga térmica e a insolação direta, especialmente em fachadas com altos WWRs. Conforme Ko *et al.* (2023), não há ganhos qualitativos significativos em WWRs superiores a 65%. Dessa forma, um WWR de 60% pode ser mais flexível em soluções de projeto, especialmente em comparação com o WWR de 80%, quando há interesse em grandes aberturas.

Os resultados indicam que o equilíbrio entre a transmissão luminosa do vidro, sombreamento externo e o WWR é essencial para otimizar o desempenho térmico e a iluminação natural. Definir um WWR máximo ou ideal sem considerar a orientação e as estratégias de controle solar podem gerar a falsa ideia de que janelas maiores são sempre prejudiciais em climas quentes. A combinação de vidros com maior T_{vis} e sombreamento externo adequado reduz a carga térmica e garante eficiência na iluminação natural, atendendo aos indicadores de ASE e sDA.

Conclusão

A pesquisa mostrou que o desempenho térmico e de iluminação natural pode ser otimizado com estratégias combinadas de controle solar, como a escolha do vidro e o sombreamento externo apropriado. Os resultados para São Paulo, Belo Horizonte e Manaus destacam a necessidade de adaptar as soluções de projeto às características climáticas locais, permitindo o uso de grandes aberturas mesmo em climas quentes, como o de Manaus.

As combinações com vidros de baixo fator solar e sombreamento externo foram eficazes na redução da carga térmica, especialmente em cidades com climas mais quentes, como Manaus. Já o desempenho de iluminação natural foi otimizado com vidros de maiores T_{vis} , maior WWR e sombreamento adequado, oferecendo soluções que equilibram iluminação natural e irradiação sem comprometer o desempenho térmico.

Os ábacos desenvolvidos a partir dos dados simulados constituem uma ferramenta útil para facilitar a interpretação dos resultados e apoiar decisões conservadoras de projeto de salas de escritórios condicionados artificialmente, especialmente para as fases iniciais, onde a escolha das aberturas e do tipo de vidro podem influenciar significativamente o desempenho do edifício.

A análise também reforçou que a orientação das janelas exerce um papel fundamental no desempenho térmico, permitindo maior flexibilidade no uso de áreas envidraçadas e vidros com maior transmissão luminosa. De acordo com os critérios considerados no artigo, em algumas situações, é possível dispensar o sombreamento externo sem grandes prejuízos ao desempenho térmico e lumínico. As orientações sul, sudeste em Belo Horizonte e São Paulo revelaram essa característica. Manaus requer estratégias de controle solar para atender critérios mais exigentes, seja por sombreamento, vidro de controle solar, ou ambos, em todas as orientações para WWRs aumentados.

É importante salientar que os resultados obtidos consideram a análise de um ambiente de escritório completamente condicionado artificialmente, com as características de localização de janela, largura, profundidade e altura de pé-direito do caso base. Ambientes com outras relações espaciais requerem estudos adicionais. A pesquisa também considera apenas uma tipologia de sombreamento simulada, escolhida por seu impacto reduzido na obstrução da janela, o que é considerado desejável por usuários, conforme pesquisas anteriores. Os resultados poderiam ser ampliados ao considerar outras combinações de sombreamento.

Em síntese, o estudo contribui para a compreensão da interação entre os diferentes parâmetros e fornece diretrizes práticas para o desenvolvimento de estratégias de controle solar, com foco no desempenho térmico e de iluminação natural. Além disso, oferece uma abordagem acessível e prática por meio dos ábacos desenvolvidos. Essas estratégias podem ser aplicadas para melhorar o desempenho de ambientes comerciais e de escritórios em diferentes contextos climáticos do Brasil em pesquisas futuras. Ferramentas gráficas, como as apresentadas aqui, podem servir como recursos didáticos para o projeto de fachadas com foco em desempenho térmico e lumínico, permitindo a compensação entre parâmetros visando níveis específicos de eficiência energética. Pesquisas futuras terão como objetivo aplicar o estudo proposto a outras tipologias de sombreamento.

Referências

- AL HERR, Y. *et al.* Occupant productivity and office indoor environment quality: a review of the literature. **Building and Environment**, v. 105, p. 369-389, 2016.
- ALWETAISHI, M.; BENJEDDOU, O. Impact of window to wall ratio on energy loads in hot regions: a study of building energy performance. **Energies**, v. 14, n. 4, p. 1080, 2021.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**. desempenho térmico de edificações: parte 3: zoneamento bioclimático por desempenho. Rio de Janeiro, 2024.
- BOUBEKRI, M.; BOYER, L. L. Effect of window size and sunlight presence on glare. **Lighting Research & Technology**, v. 24, n. 2, p. 69-74, 1992.
- DOGRUSOY, I. T.; TUREYEN, M. A field study on determination of preferences for windows in office environments. **Building and Environment**, v. 42, n. 10, p. 3660-3668, 2007.
- ECHENAGUCIA, T. M *et al.* The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. **Applied Energy**, v. 154, p. 577-591, 2015.
- FENG, F. *et al.* A critical review of fenestration/window system design methods for high performance buildings. **Energy and Buildings**, v. 248, p. 111184, 2021.
- GOIA, F. Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential. **Solar Energy**, v. 132, p. 467-492, 2016.
- GUERRERO, C.; LERA, I.; JUIZ, C. Genetic algorithm for multi-objective optimization of container allocation in cloud architecture. **Journal of Grid Computing**, v. 16, p. 113-135, 2018.
- HUANG, Y.; NIU, J.; CHUNG, T. Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates. **Applied Energy**, v. 134, p. 215-228, 2014.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **Approved method: IES LM-83-12 – IES spatial daylight autonomy (sDA) and annual sunlight exposure (ASE)**. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2012.
- IVERSEN, A. *et al.* **Daylight calculations in practice**: an investigation of the ability of nine daylight simulation programs to calculate the daylight factor in five typical rooms. Hørsholm: SBI Forlag, 2013. Série SBI, n. 26.
- KAMEL, T. M. *et al.* Optimizing the view percentage, daylight autonomy, sunlight exposure, and energy use: data-driven-based approach for maximum space utilization in residential building stock in hot climates. **Energies**, v. 17, n. 3, p. 684, 2024.
- KANGAZIAN, A.; RAZAVI, S. Z. E. Multi-criteria evaluation of daylight control systems of office buildings considering daylighting, glare and energy consumption. **Solar Energy**, v. 263, p. 111928, 2023.
- KIRIMTAT, A. *et al.* Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23-49, 2016.
- KO, W. H. *et al.* Ventilation, thermal and luminous autonomy metrics for an integrated design process. **Building and Environment**, v. 145, p. 153-165, 2018.
- KO, W. H. *et al.* View access index: the effects of geometric variables of window views on occupants' satisfaction. **Building and Environment**, v. 234, 2023.
- KRARTI, M. Optimal optical properties for smart glazed windows applied to residential buildings. **Energy**, v. 278, Part B, p. 128017, 2023.
- LEE, E. S. *et al.* Advocating for view and daylight in buildings: next steps. **Energy and Buildings**, v. 265, p. 112079, 2022.
- MACLEAMY, P. **Collaboration, integrated information and the project lifecycle in building design, construction and operation**. Cincinnati: The Construction Users Roundtable, 2004. Technical Report WP-1202.
- OLGYAY, V. **Design with climate**: bioclimatic approach to architectural regionalism. Princeton: Princeton University Press, 2015.
- PAREKH, R. Automating the design process for smart building technologies. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 23, n. 2, 2024.
- PILECHIHA, P. *et al.* Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency. **Applied Energy**, v. 261, p. 114356, 2020.

QUEIROZ, N. **Projeto da envoltória guiado por desempenho**: método paramétrico interoperável com enfoque no desempenho térmico, visual e luminoso. Florianópolis, 2023. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

QUEIROZ, N.; WESTPHAL, F. S.; PEREIRA, F. O. R. A influência dos elementos de sombreamento e vidros no consumo de energia em climatização e iluminação em edifícios de escritórios. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., João Pessoa, 2019. **Anais [...]** João Pessoa: ANTAC, 2019.

RUCK, N.; ASCHEHOUG, Ø.; AYDINLI, S. **Daylight in buildings**: a source book on daylighting systems and components. Washington, D.C.: International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme; Energy Conservation in Buildings & Community Systems Programme, 2000. Report IEA SHC Task 21 / ECBCS Annex 29; LBNL-47493.

SUBRAMANIAM, S. **Parametric modeling strategies for efficient annual analysis of daylight in buildings**. 2018. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia Arquitetônica) - Pennsylvania State University, University Park, 2018.

VENÂNCIO, R. Sombreamento com iluminação: desenvolvimento e teste de modelo paramétrico para facilitar o projeto de proteções solares. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 59-77, out./dez. 2020.

WETTER, M. A view on future building system modeling and simulation. In: BUILDING performance simulation for design and operation. Oxon: Routledge, 2019. p. 631-656.

XUE, P. *et al.* Optimization of window-to-wall ratio with sunshades in China low latitude region considering daylighting and energy saving requirements. **Applied Energy**, v. 233, p. 62-70, 2019.

ZHAI, Y. *et al.* A multi-objective optimization methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1190-1199, 2019.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Os dados de pesquisa só estão disponíveis mediante solicitação

Natália de Queiroz Nome

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Desenvolvimento, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal da Paraíba | Via Expressa Padre Zé, Conj. Pres. Castelo Branco III | João Pessoa - PB - Brasil | CEP 58050-585 | Tel.: (83) 3216-7115 | E-mail: natalia.queiroz@academico.ufpb.br

Fernando Simon Westphal

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Desenvolvimento, Supervisão, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal de Santa Catarina | Campus Reitor João David Ferreira Lima | Florianópolis - SC - Brasil | CEP 88040-900 | Tel.: (48) 99102-0901 | E-mail: fernando.sw@ufsc.br

Editor: EneDir Ghisi

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.