ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Influência das condições ambientais na determinação do fator solar de vidros

Influence of environmental conditions on the determination of the solar heat gain coefficient of glazing

Bruna Just Meller
Universidade Federal de Santa Catarina| Florianópolis | Brasil | brunajmeller@outlook.com
Enedir Ghisi
Universidade Federal de Santa Catarina| Florianópolis | Brasil | enedir.ghisi@ufsc.br
Deivis Luis Marinoski
Universidade Federal de Santa Catarina| Florianópolis | Brasil | deivis.marinoski@ufsc.br

Resumo

O fator solar (FS) de vidros pode ser determinado por modelos de cálculos, simulações computacionais ou medições em campo ou laboratório. Os procedimentos normatizados estabelecem condições ambientais específicas, como valores de temperatura interna e externa, intensidade da radiação solar, e coeficientes de convecção, uma vez que esses parâmetros influenciam o FS. Contudo, quando as variáveis não correspondem exatamente às especificações das normas podem surgir dúvidas quanto à precisão dos resultados de FS. O objetivo deste artigo é analisar a influência da temperatura externa, temperatura interna e intensidade da radiação solar na determinação do FS. Os valores de FS foram obtidos por meio do *software* WINDOW, mantendo uma configuração padrão (fixa) de simulação constante em cada simulação, exceto pela condição ambiental analisada, que variou em uma faixa pré-determinada. Três vidros de 4 mm de espessura foram avaliados, um incolor e dois de controle solar. Como resultados, o vidro incolor apresentou maior estabilidade diante das variações das condições ambientais, com mudanças mínimas no FS. Os vidros de controle solar mostraram-se mais sensíveis às alterações, com variação máxima do FS de até 9,84%. Os três vidros apresentaram redução do FS com o aumento da temperatura interna. Além disso, a intensidade da radiação solar teve impacto limitado no FS, com variações máximas de até 2,5% nos vidros de controle solar e pouca alteração no vidro incolor.

Palavras-chave: Fator solar. Vidros. Condições ambientais.

Abstract

The solar heat gain coefficient (SHGC) of glasses can be determined using mathematical models, computer simulations, or field and laboratory measurements. Standardized procedures establish specific environmental conditions, such as internal and external temperature, solar radiation intensity, and convection coefficients, since these parameters influence the SHGC. However, when environmental variables do not comply with standards, doubts may arise

Como citar:
MELLER, B. J., GHISI, E., MARINOSKI, D. L. Influência das condições ambientais na determinação do fator solar de vidros. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

regarding the accuracy of the results. The objective of this article is to analyze the influence of outdoor temperature, indoor temperature, and solar radiation intensity on the determination of the SHGC. The evaluation of the SHGC was performed using the WINDOW software, maintaining a constant standard simulation configuration in each simulation, except for the environmental condition analyzed, which varied within a predetermined range. Three 4 mm thick glasses were evaluated: one clear and two solar control glasses. The clear glass showed greater stability in response to environmental variations, with minimal changes in the SHGC. The solar control glasses were more sensitive to changes, exhibiting a maximum SHGC variation of up to 9.84%. All three glasses showed a decrease in SHGC as internal temperature increased. Furthermore, solar radiation intensity had a limited impact on the SHGC, with maximum variations of up to 2.5% in the solar control glasses and little change in the clear glass.

Keywords: Solar heat gain coefficient. Glasses. Environmental conditions.

INTRODUÇÃO

O consumo de energia em edifícios destina-se em grande parte a garantir o conforto térmico por meio do resfriamento ou aquecimento dos ambientes. Visando melhorar a eficiência térmica e energética das construções, busca-se identificar os componentes do edifício que mais impactam no desempenho térmico [1]. Nesse contexto, as janelas se destacam por exercerem influência tanto no ganho de calor solar quanto na ventilação.

Para aprimorar o desempenho térmico de janelas, o primeiro passo é obter de maneira precisa os parâmetros térmicos e ópticos dos vidros, bem como as suas propriedades [2]. Uma das propriedades dos vidros que influencia no ganho de calor solar é o fator solar (FS), também conhecido como *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC) ou *g-value* [3]. O FS é definido como a razão entre a quantidade de energia solar que atravessa o vidro pela quantidade de energia solar que nele incide. Conhecer o FS é fundamental para a minimização do consumo de energia de um edifício e para o correto dimensionamento dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado [4]. Considera-se que o FS deve ser avaliado com precisão antes de implementar medidas voltadas à eficiência energética [3]. A sua determinação pode ser realizada por meio de modelos de cálculo, simulações computacionais ou medições em campo ou laboratório.

Uma vez que o FS não é um valor constante, e pode ser influenciado pelas várias condições de contorno [4], os procedimentos normatizados estabelecem condições ambientais específicas para sua determinação. Essas condições têm como objetivo permitir que testes possam ser replicados em diferentes laboratórios e em momentos distintos, promovendo a consistência nos resultados. Isso, por sua vez, contribui para a confiabilidade nos valores de FS.

A ISO 15099 [5] trata do cálculo detalhado de propriedades de desempenho térmico de esquadrias completas, incluindo seus dispositivos de sombreamento. Para determinação do FS, a norma especifica a temperatura interna de 25°C, temperatura externa de 30°C e radiação solar direta de 500W/m^2. Além disso, a norma prevê a possibilidade de ajuste dessas condições ambientais para satisfazer exigências específicas de condições climáticas locais. A *National Fenestration Rating Council* descreve na NFRC 200 [6] o procedimento para a determinação do FS e da transmitância visível em incidência normal, estabelece como condições ambientais de

referência para simulação a temperatura interna de 24°C, temperatura externa de 32°C e radiação solar direta de 783 W/m^2.

Nesse contexto, quando as condições ambientais não correspondem exatamente às especificações das normas, podem surgir dúvidas quanto à precisão do FS. O objetivo deste artigo é analisar a influência das condições ambientais nos valores de FS determinados por meio de simulação computacional no *software* WINDOW. As condições ambientais abordadas na análise são: temperatura externa, temperatura interna e intensidade da radiação solar. Como referência, foram utilizadas as condições ambientais da NFRC 200.

MÉTODO

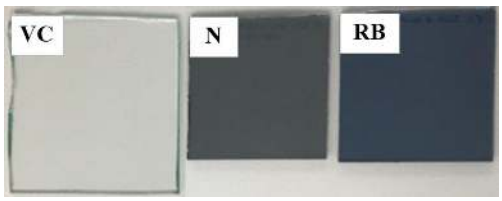
O método deste trabalho está dividido em duas etapas:

1. Seleção dos vidros;
2. Determinação do FS por meio de simulação no *software* WINDOW.

SELEÇÃO DOS VIDROS

Foram selecionadas amostras de vidros monolíticos do tipo *float* com 4 mm de espessura, sendo: um vidro incolor (VC) e dois vidros de controle solar da fabricante Guardian Brasil, ou seja, Neutral (N) e Royal Blue (RB), mostrados na Figura 1. O vidro incolor foi adotado como referência, pois seu FS já é conhecido e amplamente difundido na literatura (cerca de 0,85). A Tabela 1 mostra as propriedades térmicas e ópticas das amostras, obtidas por Meller, Marinoski e Güths [7] por meio de análises espectrofotométricas em laboratório.

Figura 1: Amostras de vidros utilizadas no estudo



Fonte: o autor.

Tabela 1: Propriedades térmicas e ópticas das amostras de vidros

Propriedade	Vidro		
	Incolor 4mm	Neutral (prata) 4mm	Royal Blue (azul) 4 mm
Transmitância solar	0,829	0,140	0,194
Transmitância visível	0,896	0,156	0,222
Refletância solar (frente)	0,082	0,310	0,212
Refletância solar (atrás)	0,082	0,408	0,365
Refletância visível (frente)	0,088	0,329	0,212
Refletância visível (atrás)	0,088	0,369	0,303
Absortância solar (frente)	0,088	0,550	0,595
Absortância solar (atrás)	0,088	0,452	0,441
Emitância térmica (frente)	0,842	0,842	0,842
Emitância térmica (atrás)	0,843	0,342	0,530

Fonte: o autor.

Comparados ao vidro incolor, os vidros Neutral e Royal Blue possuem menores transmitâncias solar e visível. Além disso, demonstram comportamento semelhante em relação à absorção, absorvendo cerca de 60% da radiação, e podem ser identificados como vidros de alta absorção.

DETERMINAÇÃO DO FATOR SOLAR POR MEIO DE SIMULAÇÃO

Para avaliar a influência das condições ambientais na determinação do FS, foram realizadas simulações por meio do *software* WINDOW (versão 7.8). O WINDOW foi desenvolvido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) e permite analisar aberturas a partir de diferentes combinações de camadas de vidro, camadas de gás, esquadrias, espaçadores e divisores sob diferentes condições ambientais.

Os procedimentos de modelagem dos vidros seguiram o descrito por Marinoski *et al.* [8,9] e Marinoski [10]. O modelo óptico selecionado foi o da ISO 9050 [11] enquanto o modelo térmico foi o da ISO 15099 [5].

As amostras foram adicionadas à biblioteca de vidros do WINDOW por meio da inserção de suas propriedades, descritas na Tabela 1. Os vidros foram modelados como placas planas verticais quadradas, de lado igual a 1 m, e com radiação solar incidente normal à superfície.

As definições das condições de contorno foram estabelecidas de acordo com as diretrizes da NFRC 200 [6] para o cálculo do FS. Inicialmente, o FS foi calculado empregando as condições ambientais de referência da NFRC 200 [6], aqui chamado de FS de referência. Em seguida, foram realizadas simulações em que, em cada simulação, uma única condição ambiental variou dentro de uma faixa pré-definida, enquanto as demais foram mantidas constantes. O Quadro 1 mostra as condições ambientais, os valores de referência e o intervalo de variação. A faixa de variação da temperatura externa foi estabelecida de 10 a 40°C, a fim de refletir uma ampla gama de condições climáticas externas possíveis. A faixa da temperatura interna foi limitada de 20 a 30°C, uma vez que nos ambientes internos muitas vezes é possível utilizar sistemas de climatização para garantir temperaturas próximas às indicadas pelas normas.

Quadro 1: Condições ambientais de referência para determinação do FS e intervalos de variação adotados

Condição ambiental	**Condição ambiental de referência da NFRC 200 [6]**	**Intervalo de Variação**
Temperatura interna	24°C	20 a 30°C, variando a cada 1°C
Temperatura externa	32°C	10 a 40°C, variando a cada 1°C
Radiação solar direta	783 W/m^2	500 a 1000 W/m^2, variando a cada 20W/m^2

Fonte: o autor.

O Quadro 2 mostra outros parâmetros da simulação, que permaneceram inalterados em todas as simulações.

Quadro 2: Parâmetros de simulação empregados na determinação do FS

Face do vidro	Parâmetro de simulação	Descrição
Externa	Modelo de convecção	ASHRAE/NFRC *Outside*
	Modelo de radiação	ASHRAE/NFRC
	Coeficiente de convecção	15 W/m^{2}K
Interna	Modelo de convecção	Modelo da ASHRAE/NFRC *Inside*
	Modelo de radiação	ASHRAE/NFRC

Fonte: o autor.

Para cada simulação, foi introduzida uma nova condição de cálculo na janela "*Environmental Conditions Library*", nas abas referentes ao FS. Como dados de saída, o WINDOW disponibiliza o valor do FS para o centro do vidro, que, no contexto da placa de vidro plana, pode ser tratado como o FS total.

Para avaliar a influência das condições ambientais na determinação do FS dos vidros, cada condição ambiental foi analisada separadamente. Foram analisadas as variações absolutas e relativas dos valores de FS determinados por meio das simulações.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de FS de referência, determinados com base nas condições ambientais padronizadas pela NFRC 200 [6], foram de 0,855 para o vidro incolor, 0,263 para o vidro Neutral e 0,349 para o vidro Royal Blue. Esses resultados iniciais servem como base para avaliar como diferentes condições ambientais − como temperatura externa, temperatura interna e intensidade da radiação solar − influenciam o FS de cada tipo de vidro.

TEMPERATURA EXTERNA

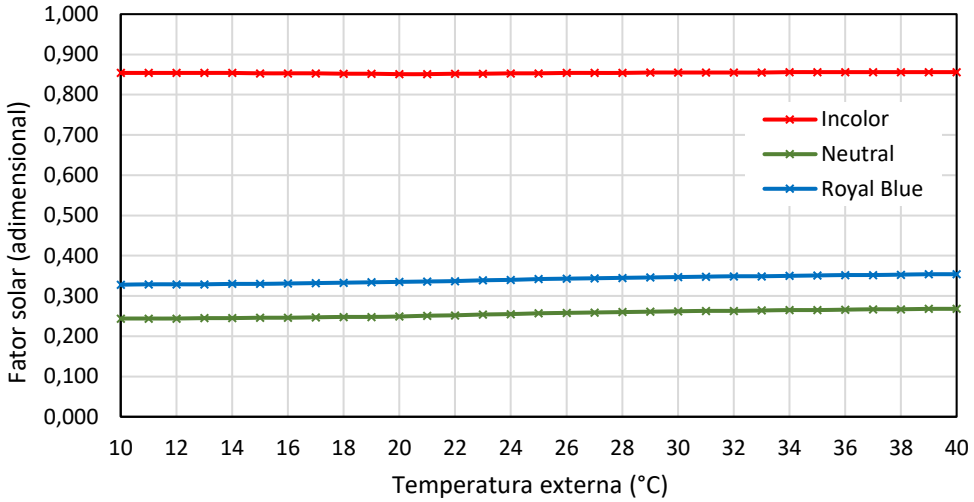
A Figura 2 mostra os valores de FS, determinados por meio das simulações, em função temperatura do lado externo ao vidro, a qual variou de 10 a 40°C. O FS do vidro incolor variou de 0,854 a 0,856, o que representa uma diferença relativa inferior a 1%. Considera-se, nesse caso, que não houve diferenças expressivas no FS.

Para os dois vidros de controle solar, o FS aumentou à medida que temperatura externa aumentou. Nos vidros Neutral e Royal Blue, as diferenças relativas entre o menor e maior FS foram de 9,84% e 7,93%, respectivamente, e a variação absoluta foi cerca de 0,025 para as duas amostras. As variações foram maiores nos vidros Neutral e Royal Blue por serem vidros de maior absortância solar, o que causou aumento das temperaturas superficiais da placa de vidro e intensificou as trocas de calor com os ambientes.

No caso específico da comparação entre os vidros propostos, foi possível observar que para um vidro com transmitância solar elevada (incolor) o valor do FS sobre menor influência da temperatura externa. Uma redução absoluta da transmitância solar de aproximadamente 0,63 fez com que a variação absoluta no FS se elevasse de 0,001 para 0,025, para as mesmas condições ambientais. No entanto não é possível

generalizar este resultado, uma vez que o FS é influenciado também pelas outras componentes da radiação incidente (refletida e absorvida), que podem mudar para cada material.

Figura 2: Fator solar do vidro incolor (4 mm), Neutral (4 mm) e Royal Blue (4 mm) em função da temperatura externa



Fonte: o autor.

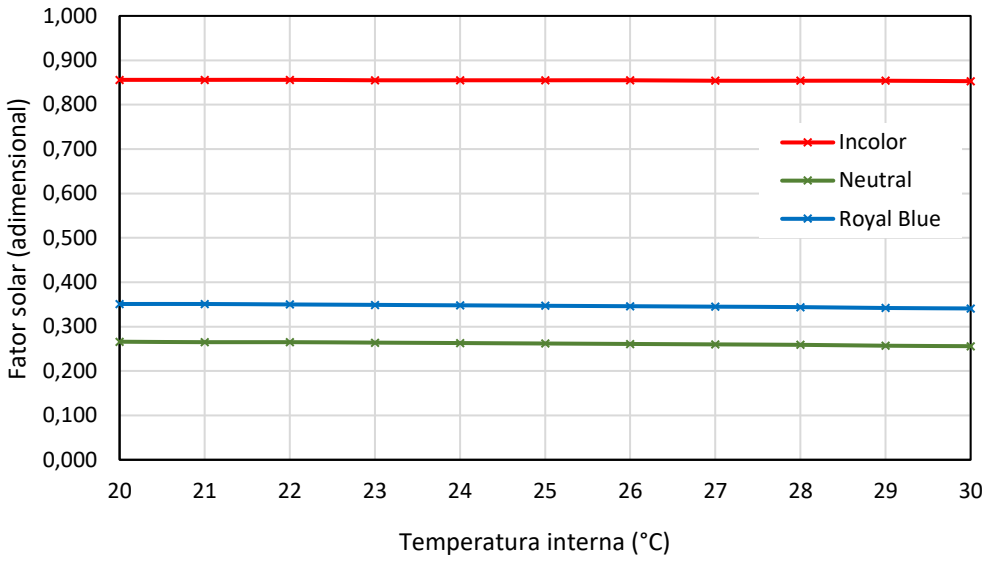
Chen *et al*. [12] realizaram uma análise de sensibilidade para quantificar o efeito dos principais fatores que podem contribuir para incertezas da medição do FS. Ao longo de uma faixa de temperatura externa de 10 a 40°C, o FS variou cerca de 0,30%, tanto para um vidro monolítico quanto para um vidro duplo. Portanto, concluíram que, para ensaios de campo com esses vidros, não seria fundamental manter uma temperatura externa especificamente em 32°C. Esse resultado indica que pode haver certa flexibilidade da temperatura externa em medições, a depender do tipo de vidro e das demais condições ambientais.

TEMPERATURA INTERNA

A Figura 3 mostra a variação do FS em função da mudança da temperatura interna. De modo inverso ao que ocorreu com o incremento da temperatura externa, o aumento da temperatura interna resultou na redução do FS para os três vidros avaliados. Nesta análise, à medida que a temperatura interna aumentou, reduziu-se a diferença entre temperaturas internas e externas (fixa em 32°C).

No vidro incolor, a diferença relativa entre o menor e o maior valor de FS foi inferior a 1%, enquanto nos vidros Neutral e Royal Blue as diferenças foram de 4% e 3%, respectivamente. A variação absoluta do FS foi de 0,03 no vidro incolor e igual a 0,01 nos vidros de controle solar. Dessa forma, considera-se que não houve diferenças expressivas no FS devido à modificação da temperatura interna na faixa especificada.

Figura 3: Fator solar do vidro incolor (4 mm), Neutral (4 mm) e Royal Blue (4 mm) em função da temperatura interna

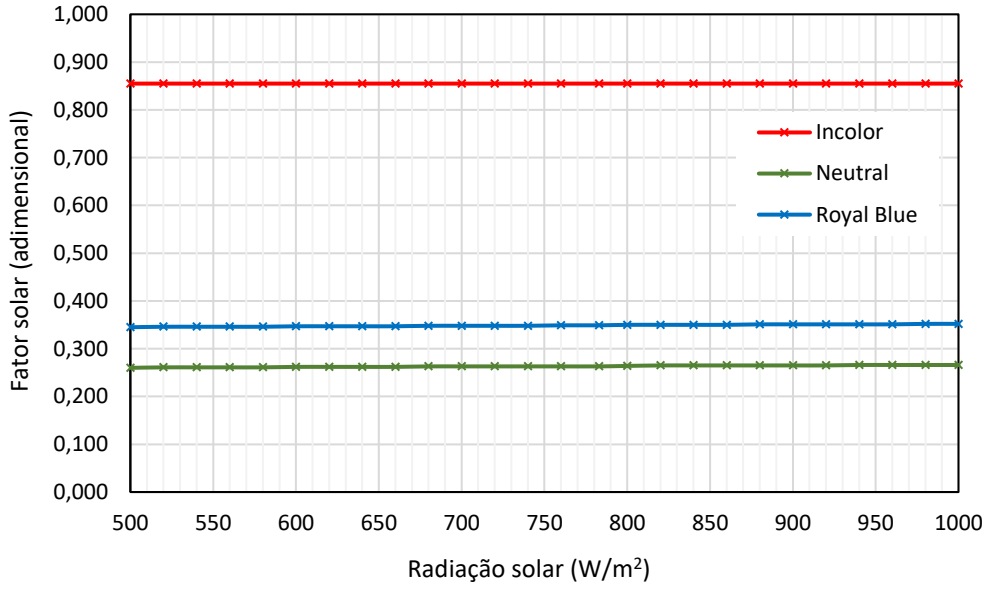


Fonte: o autor.

RADIAÇÃO SOLAR

A Figura 4 mostra os valores de FS em função da intensidade da radiação solar, que variou de 500 a 1000 W/m^2. No vidro incolor, o FS permaneceu igual a 0,855 para todos os níveis de radiação. Nos vidros Neutral e Royal Blue, a variação relativa do FS foi inferior a 2,5%. Em termos absolutos, a variação foi de 0,006 no vidro Neutral e 0,007 no vidro Royal Blue.

Figura 4: Fator solar do vidro incolor (4 mm), Neutral (4 mm) e Royal Blue (4 mm) em função da intensidade da radiação solar



Fonte: o autor.

O estudo de Chen *et al*. [12] também analisou alterações no FS dos vidros monolítico e duplo para níveis de radiação solar variando de 200 a 1000 W/m^2. Nos casos estudados, não houve diferenças significativas no FS.
Dessa forma, os resultados obtidos são consistentes com estudos anteriores, destacando que a intensidade da radiação solar não mostrou efeito significativo no FS dos vidros analisados.

SÍNTESE DOS RESULTADOS

A Tabela 2 mostra um resumo dos resultados, incluindo o FS mínimo, médio e máximo de cada tipo de vidro, em resposta às variações de temperatura externa, temperatura interna e radiação solar direta.

Para o vidro incolor, os resultados mostram estabilidade no FS, com variações mínimas em todas as condições ambientais testadas. Isso sugere que esse tipo de vidro é menos sensível às mudanças ambientais em comparação com os outros tipos analisados.

Por outro lado, os vidros Neutral e Royal Blue demonstraram ser mais sensíveis às alterações ambientais, principalmente em relação à temperatura externa. Esses vidros apresentaram variações mais significativas no FS, indicando maior sensibilidade à temperatura ambiente externa. Nos vidros Neutral e Royal Blue, o FS médio é 2,66% e 2,29% menor, respectivamente, quando comparados com seus valores de referência.

Tabela 2: Influência das alterações nas condições ambientais no fator solar do vidro incolor (4 mm), Neutral (4 mm) e Royal Blue (4 mm)

Vidro	Condição ambiental alterada	Fator solar (adimensional)		
		Mínimo	Médio	Máximo
Incolor (FS referência = 0,855)	Temperatura externa	0,854	0,854	0,856
	Temperatura interna	0,853	0,855	0,856
	Radiação solar direta	0,855	0,855	0,855
Neutral (FS referência = 0,263)	Temperatura externa	0,244	0,256	0,268
	Temperatura interna	0,256	0,262	0,266
	Radiação solar direta	0,260	0,263	0,266
Royal Blue (FS referência = 0,349)	Temperatura externa	0,328	0,341	0,354
	Temperatura interna	0,341	0,347	0,351
	Radiação solar direta	0,345	0,349	0,352

Fonte: o autor.

CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma análise da influência das condições ambientais, incluindo temperatura externa, temperatura interna e intensidade da radiação solar, no FS de diferentes tipos de vidros. Os resultados obtidos mostraram que as variações nas

condições ambientais podem afetar o FS, com variações distintas observadas entre os diferentes tipos de vidros.

Observou-se que, nos vidros de controle solar, o FS aumentou com o aumento da temperatura externa, enquanto no vidro incolor não houve diferenças expressivas no FS. Para os três vidros, o FS diminuiu com o aumento da temperatura interna. Além disso, constatou-se que a intensidade da radiação solar teve um impacto limitado no FS dos vidros analisados, no máximo 2,5% nos vidros de controle solar, e praticamente nenhuma alteração no vidro incolor.

O vidro incolor demonstrou maior estabilidade nos valores de FS diante das mudanças nas condições ambientais. Isso se deve à sua alta transmitância solar, que representa a maior parcela de calor transmitida para o interior no cálculo do FS. Sua baixa absortância solar também contribui para menores variações nas temperaturas superficiais do vidro, reduzindo as trocas de calor com os ambientes.

As disparidades identificadas podem ser empregadas para desenvolver fatores de correção, os quais podem ser empregados para ajustar as medições em situações que não correspondem às condições ideais estipuladas pelas normas. Por meio desses fatores de correção, torna-se possível comparar os valores de FS obtidos por medição e simulação, por exemplo, garantindo uma avaliação mais precisa do FS.

As conclusões deste estudo são específicas para os vidros analisados nas simulações, os quais não possuem propriedades que variam significativamente com as condições do ambiente. Este cenário resultou em valores constantes de FS para os vidros estudados, diferenciando-se dos comportamentos que poderiam ser observados em vidros com características dinâmicas, como os vidros termocrômicos e eletrocrômicos.

Além disso, a análise combinada das variáveis ambientais pode fornecer uma compreensão mais abrangente da influência das condições ambientais no FS de diferentes tipos de vidros, pois permite observar como múltiplos fatores interagem para modificar o FS. Por exemplo, diferentes gradientes de temperatura podem resultar em diferentes trocas de calor. Além disso, considerar outras variáveis, como a velocidade do ar, poderia mostrar influências adicionais que não foram analisadas, proporcionando uma visão mais completa do comportamento dos vidros sob diversas condições.

REFERÊNCIAS

[1] OKONTA, Donatus Ebere. Investigating the impact of building materials on energy efficiency and indoor cooling in Nigerian homes. Heliyon, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 20316-20331, set. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20316.LEWIN, R. **Complexity: life at the edge of chaos**. 2. ed. Chicago: University of Chicago Press, 2000.

[2] BASAK, Chayan Kumar; SARKAR, Gautam; NEOGI, Subhasis. Performance evaluation of material and comparison of different temperature control strategies of a Guarded Hot Box U-value Test Facility**. Energy and Buildings**, v. 105, p. 258-262, out. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.050.

[3] MOGHADDAM, Saman Abolghasemi; SIMÕES, Nuno; SILVA, Manuel Gameiro da. Review of the experimental methods for evaluation of windows' solar heat gain coefficient: from standardized tests to new possibilities. **Building and Environment**, v. 242, p. 110527, ago. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110527.

[4] KUHN, Tilmann E. Calorimetric determination of the solar heat gain coefficient g with steady-state laboratory measurements. **Energy and Buildings**, v. 84, p. 388-402, dez. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.021.

[5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 15099**: thermal performance of windows, doors and shading devices: detailed calculations. Geneva: International Organization for Standardization; 2003.

[6] NATIONAL FENESTRATION RATING COUNCIL (NFRC). **NFRC 200**: procedure for Determining Fenestration Product Solar Heat Gain Coefficient and Visible Transmittance at Normal Incidence. Greenbelt: National Fenestration Rating Council, 2023.

[7] MELLER, Bruna Just; MARINOSKI, Deivis Luis; GÜTHS, Saulo. Influência da velocidade do vento no Fator Solar de vidros de controle solar monolíticos e laminados. In: XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2019, João Pessoa. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2019. p. 1892-1899.

[8] MARINOSKI, Deivis Luis; LAMBERTS, Roberto. Aplicação dos programas Window e Wis para modelagem de janelas com proteções solares. In: IX Encontro Nacional V Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. **Anais** [...]. Ouro Preto: ANTAC, 2007. p. 1123-1132.

[9] MARINOSKI, Deivis Luis; MILBRATZ, Juliana Helena; LAMBERTS, Roberto. Verificação de propriedades térmicas e ópticas de janelas através de simulação computacional. In: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2008, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: ANTAC, 2008. p. 1-10.

[10] MARINOSKI, Deivis Luis. **Desenvolvimento de um calorímetro para determinação do fator solar de vidros e janelas**. 2010. 298p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

[11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 9050**: determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors. Geneva: International Organization for Standardization; 2003.

[12] CHEN, Fangzhi; WITTKOPF, Stephen K.; NG, Poh Khai; DU, Hui. Solar heat gain coefficient measurement of semi–transparent photovoltaic modules with indoor calorimetric hot box and solar simulator. **Energy and Buildings**, v. 53, p.74–84, out. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.005.