AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO EM ESTAÇÕES DE TRABALHO LOCALIZADAS PRÓXIMO A FACHADAS ENVIDRAÇADAS: MODELOS DE AJUSTE SOLAR

Mônica Martins Pinto (1); Fernando Simon Westphal (2)
(1) Me. Arq., Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, monicamartinspinto@outlook.com, LabCon - Universidade Federal de Santa Catarina
(2) Dr., Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, fernando.sw@ufsc.br, LabCon - Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
Quando o foco é a transferência de calor através da envoltória do edifício, enfatiza-se a preocupação com as áreas transparentes devido sua transparência à radiação solar e alta transmitância térmica. Frequentemente estações de trabalho são posicionadas próximo a fachadas envidraçadas, entretanto, a exposição à radiação solar afeta significantemente a percepção térmica do indivíduo. Os modelos de conforto térmico mais utilizados, como PMV-PPD e Adaptativo, não abordam o efeito da exposição do indivíduo à radiação solar no voto de conforto térmico, principalmente quando avaliado de forma predita. Para suprir esta lacuna modelos de ajuste solar têm sido desenvolvidos com o objetivo de acrescentar o efeito da radiação solar direta e difusa no conforto térmico de pessoas. Entretanto, os mesmos apresentam diferenças importantes entre seus procedimentos de cálculo. O presente estudo compara os resultados de índices de conforto térmico corrigidos por quatro destes modelos de ajuste solar com o objetivo de verificar as divergências nos resultados aplicados a um mesmo ambiente. O enfoque foi em ocupantes de estação de trabalho próximas a janelas em ambientes de escritório com alto percentual de transparência na fachada. Também se variou o tipo de vidro utilizado na fachada. As limitações e vantagens de cada modelo de ajuste solar são comparadas e analisadas de forma numérica. Observou-se divergências significativas entre os resultados obtidos para um mesmo espaço. Por exemplo, a diferença horária entre os modelos de ajuste solar chegou a 11,4ºC na temperatura radiante média e 1,7 no PMV. Além disso, alguns modelos de ajuste solar apresentam incoerências importantes.

Palavras-chave: radiação solar, percepção térmica, escritório, modelo de conforto, PMV.

ABSTRACT
The concern about windows is emphasized when focusing on heat transfer through building envelope due to the glass transparency to solar radiation and its high thermal transmittance. Workstations are often located nearby fully glazed façades. However, the subject thermal perception is significantly affected by solar radiation exposure. The thermal comfort models widely used, as PMV and Adaptive models, do not approach the effect of occupant exposure to solar radiation in his/her thermal comfort vote, mainly about predictive assessment. For this reason, solar-adjust models have been developed to increase the effect of the beam and diffuse solar radiation in people's thermal comfort. However, these models present relevant differences in their calculation procedures. The present study compares thermal comfort indices results that were corrected by applying four solar-adjust models. The aim is to verify divergences between results obtained for the same room. The focus is on occupants of workstations located nearby the windows area in office spaces. The façade glass type was also changed. The limitations and advantages of each solar-adjust model were numerically compared and analyzed. Significant divergences were observed in the results for the same room. For example, the hourly difference between the solar-adjustment models results reached 11.4ºC in the MRT and 1.7 in PMV. Additionally, some of the models have critical inconsistencies presented.

Keywords: solar radiation, thermal perception, office, comfort model, PMV.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com as áreas transparentes é enfatizada quando se analisa a transferência de calor através da envoltória do edifício. As trocas são mais diretas e intensas nestes elementos devido à sua transparência à radiação solar e alta transmitância térmica. Além das questões relacionadas a carga interna e demanda de condicionamento térmico, fachadas envidraçadas também afetam a percepção térmica de ocupantes de espaços internos (CAPPELLETTI *et al.*, 2014).

Além disso, Cappelletti *et al.* (2014) destacam que a contribuição da radiação solar direta e difusa não pode ser negligenciada visto que frequentemente é a causa de desconforto de ocupantes. As trocas de calor por radiação são uma parcela relevante no balanço térmico do corpo humano (THORSSON *et al.*, 2007) e representam até 30% das suas trocas térmicas totais (LA GENNUSA *et al.*, 2005). Além disso, a exposição à radiação solar afeta significantemente a sensação térmica do indivíduo (MARINO *et al.*, 2017). Este campo radiante é normalmente representado pela temperatura radiante média (*mean radiante temperature* - MRT), parâmetro ambiental vinculado de forma mais direta às características do envelope do que outros parâmetros, principalmente na presença de elementos transparentes (CAPPELLETTI *et al.*, 2014).

Zomorodian e Tahsildoost (2017) enfatizam que a MRT varia dependendo da posição no ambiente, em especial à proximidade com as superfícies externas. Marino *et al.* (2018) destacam que é essencial avaliar o conforto térmico no local exato - real ou previsto - em que a estação de trabalho ou local de permanência está localizado. Ainda assim, estações de trabalho ou mesas de estudo são frequentemente posicionadas muito próximas às janelas, onde a ocorrência de desconforto térmico é mais provável.

Dentre as principais normas de conforto térmico em edificações, a única que contempla a contribuição da radiação solar nos ocupantes é a ANSI/ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017). As demais, como ISO 7730 (ISO, 2005), ISO 17772-1 e 2 (ISO, 2017, 2018) e EN 16798-1 (EN, 2019), tratam apenas da parcela infravermelha nas trocas térmicas por radiação, isto é, superfícies aquecidas. Estas normas não incluem um componente de radiação de ondas curtas e, portanto, negligenciam a radiação solar que incide no indivíduo.

Dentre os estudos sobre os efeitos das características das janelas no conforto térmico de indivíduos, a maioria ainda aplica um método simplificado de avaliação que considera uma temperatura operativa homogênea ou um ponto central no ambiente. Ademais, poucos aplicam alguma forma de ajuste do efeito da radiação solar que incide no ocupante. Ambas situações negligenciam, portanto, a possibilidade de desconforto térmico localizado nas áreas próximas às paredes externas.

1.1. Modelos de Ajuste Solar de Índices de Conforto Térmico

Modelos de ajuste do efeito da radiação solar direta e difusa no conforto térmico de pessoas têm sido desenvolvidos e constantemente aperfeiçoados. Entretanto, estes podem apresentar discrepâncias significativas entre seus métodos de cálculo. A seguir, quatro destes modelos são apresentados.

O modelo SA-MRT (*solar adjust of mean radiante temperature*) (LA GENNUSA *et al.*, 2005, 2007) ajusta a MRT considerando a radiação incidente no sujeito por meio da adição de módulos de radiação solar direta e difusa no fluxo de calor por radiação. Indica-se este ajuste para ambientes internos termicamente moderados. A temperatura radiante média no sujeito irradiado ($T_{r,irr}$) é definida conforme Equação 1.

$$\bar{T}_{r,irr}{}^4 = \sum_{N=1}^{N} F_{p\to N} T_N^4 + \frac{C_{dn}}{\varepsilon\sigma}\left(\alpha_{irr,d} \sum_{J=1}^{M} F_{p\to J} I_{d,J}^{in} + C_S^{in} \alpha_{irr,b} f_p I_{bn}^{in}\right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\bar{T}_{r,irr}$ é a temperatura radiante média do sujeito irradiado [K];
T_N é a temperatura superficial da superfície N [K];
$I_{d,J}^{in}$ é a intensidade de radiação solar difusa que entra pela superfície transparente J [W/m^{2}K];
I_{bn}^{in} é a intensidade de radiação solar direta interna [W/m^{2}K];
$F_{p\to N}$ é o fator de forma entre a pessoa e a superfície N;
$F_{p\to J}$ é o fator de forma entre a pessoa e a superfície transparente J;
C_{dn} é o coeficiente dia-noite (1 = dia; 0 = noite);
C_S^{in} é o coeficiente de sombreamento interno;
f_p é o fator de área projetada;
ε é a emissividade do corpo humano;
σ é a constante de Stefan-Boltzmann (5,67.10^{-8} W/m^{2}K^4);
$\alpha_{irr,d}$ e $\alpha_{irr,b}$ são os coeficientes de absorção relativos à radiação solar difusa e direta, respectivamente.

O modelo de trocas radiantes de calor no corpo humano MSA-MRT (*modified solar adjust of mean radiante temperature*) (MARINO *et al.*, 2017, 2018b; MARINO; NUCARA; PIETRAFESA, 2017), se assemelha ao modelo SA-MRT. Entretanto, considera também o fluxo de radiação solar oriundo de reflexões internas no piso. Este modelo é indicado para ambientes internos e pode ser descrito conforme Equação 2.

$$\bar{T}_r^4 = \sum_{N=1}^{N} F_{p\to N} T_N^4 + \frac{\alpha_{sw}}{\varepsilon\sigma}\left[\sum_{J=1}^{N} F_{p\to J} I_{d,J}^{in} + f_p I_{dir,J} + 0{,}5\rho_{floor} I_{dir,h} + \sum_{N=1}^{N} \rho_N \left(\sum_{J=N}^{N} F_{N-J} I_{d,J}^{in}\right) F_{p\to N}\right] \quad \text{Equação 2}$$

Onde:
$\bar{T}_r$ é a temperatura radiante média [K];
$I_{dir,J}$ é a intensidade de radiação solar direta que atravessa a superfície transparente J e atinge a pessoa [W/m^2];
$I_{dir,h}$ a intensidade de radiação solar direta no plano horizontal interno [W/m^2];
F_{N-J} é o fator de forma entre a superfície transparente J e a superfície N;
ρ_{floor} é o coeficiente de reflexão do piso;
ρ_N é o coeficiente de reflexão da superfície N;
α_{sw} é o coeficiente de absorção do corpo humano à radiação de onda-curta;

O SolarCal (ARENS *et al.*, 2015), também corrige a MRT. Este é um modelo simplificado com a intensão de rápida estimativa da radiação solar e é o método recomendado na ASHRAE 55:2017 (ASHRAE, 2017). A MRT corrigida é definida como a soma da MRT por ondas longas e curtas (Equação 3). O componente de radiação de ondas curtas na MRT é definido com base no campo radiante efetivo solar (*effective radiant field* - ERF_{solar}), conforme Equação 4. Assume-se que o calor solar absorvido é igual à radiação de onda longa adicional emitida pelo corpo. A parcela de ondas curtas é descrita conforme Equação 5.

$$\bar{t}_r = \bar{t}_{rlw} + \bar{t}_{rsw} \quad \text{Equação 3}$$

$$ERF_{solar} = \left[0{,}5 \cdot f_{eff} \cdot f_{svv}\left(I_{dif} + I_{TH} R_{floor}\right) + \frac{A_p f_{bes} I_{dir}}{A_D}\right] \cdot T_{sol}\left(\frac{\alpha_{SW}}{\alpha_{LW}}\right) \quad \text{Equação 4}$$

$$\bar{t}_{rsw} = \frac{ERF_{solar}}{f_{eff} \cdot h_r} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:
I_{dif} é a irradiância difusa do céu recebida em uma superfície horizontal voltada para cima (externa) [W/m^2];
I_{dir} é a intensidade de radiação solar direta na direção normal ao feixe (externa) [W/m^2];
I_{TH} é a intensidade de radiação solar horizontal total (externa) [W/m^2];
f_{svv} é a fração visível da abóboda celeste;
f_{bes} é a fração da superfície do corpo exposta ao sol;
f_{eff} é a fração da superfície do corpo exposta à radiação (0,696 para pessoas sentadas e 0,725 em pé);
A_p é a área projetada de uma pessoa exposta à luz solar direta;
T_{sol} é a transmitância solar combinada do sistema de janela e elemento de sombreamento;
α_{LW} é a absortância do corpo a radiação de ondas longas (indica-se: 0,95).

O modelo *Corrected Predicted Mean Vote* (CPMV) (ZHANG *et al.*, 2018) inclui a influência da radiação solar no conforto térmico como um novo componente na equação do PMV. A correção do PMV e PPD são definidas na Equação 6 e na Equação 7, respectivamente. Sendo R_l as trocas radiantes por ondas longas entre pessoa e superfícies (Equação 8) e R_{dir} a carga térmica por radiação solar (Equação 9).

$$CPMV = [0{,}303 \cdot \exp(-0{,}036 \cdot M) + 0{,}0275] \cdot \{(M - W) - 3{,}05 \cdot [5{,}733 - 0{,}007 \cdot (M - W) - P_a] - 0{,}42 \cdot [(M - W) - 58{,}15] - 1{,}73 \cdot 10^{-2} \cdot M \cdot (5{,}867 - P_a) - 0{,}0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - R_l + R_{dir} - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad \text{Equação 6}$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{[-(0{,}03353 \cdot CPMV^4 + 0{,}2179 \cdot CPMV^2)]} \quad \text{Equação 7}$$

$$R_l = \left[\varepsilon f_{cl} f_{eff} \sigma \frac{(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4}{(t_{cl}-t_a)}\right](t_{cl} - t_a) \quad \text{Equação 8}$$

$$R_{dir} = \alpha_{sw} f_{cl} f_{eff} f_p I_{bn}^{in} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:
M é a taxa metabólica [W/m^2];
W é a potência mecânica efetiva [W/m^2];
t_a é a temperatura do ar [ºC];
$\bar{t}_r$ é a temperatura média radiante [ºC];
t_{cl} é a temperatura superficial vestimenta [ºC];

P_a é a pressão parcial de vapor d'água [Pa];
h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m².K];
f_{cl} é o fator de área de superfície coberta pela vestimenta.

Posteriormente, em experimento de campo (ZHANG *et al.*, 2020), os autores concluíram que o CPMV apresenta desvio significativo dos votos de sensação térmica coletados em condições de alta radiação solar difusa. Propuseram, então, o índice CPMV*, incluindo um componente de radiação solar difusa (Equação 10). O índice PPD também foi ajustado conforme resultados do experimento. Concluiu-se que, devido à variabilidade na aceitação da radiação solar, não seria consistente apenas substituir o PMV pelo CPMV* no cálculo do PPD. Os autores sugerem o percentual inaceitável (PPUA), descrito na Equação 11.

$$R_{dif} = \alpha_{SW} f_{cl} f_{eff} \sum_{j=1}^{N_d} \left(F_{p \to j} I_{dif,j}\right) \quad \text{Equação 10}$$

$$PPUA = 100 - 88exp[-0{,}00015(CPMV^* + 0{,}34)^4 - 0{,}08768(CPMV^* + 0{,}34)^2] \quad \text{Equação 11}$$

2. OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo verificar as divergências nos resultados de conforto térmico ao aplicar diferentes modelos de ajuste do efeito da radiação solar em índices de conforto térmico em ambientes de escritório com alto percentual de transparência da fachada.

3. MÉTODO

3.2. Caracterização do clima

O estudo foi realizado para Florianópolis, cidade litorânea de clima temperado, com estações do ano bem definidas; sempre úmido e de verão quente - classificação de Köppen-Geiger Cfa (AMAZONAS, 2012).

A Figura 1 mostra os dados estatísticos mensais sobre a temperatura do ar e a incidência média diária de radiação solar nos planos horizontal e vertical oeste. Para esta análise, selecionou-se um dia de verão que apresentasse alto índice de radiação solar e que fosse um dia de trabalho (seg-sex). Observando-se os valores diários, optou-se por utilizar o dia 06 de dezembro, dia do ano com maior incidência de radiação solar na fachada oeste. Nesse dia, a incidência nesta fachada ocorre das 13h às 19h.

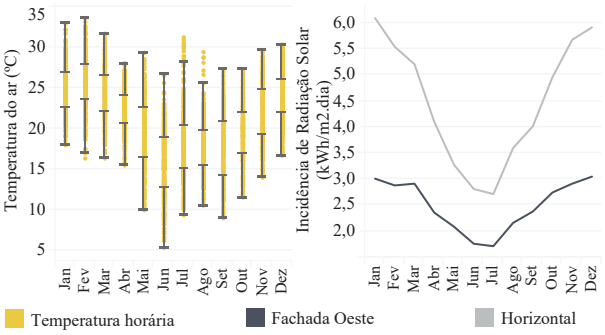

Figura 1 - Temperatura do ar e incidência de radiação solar em Florianópolis. Fonte de dados: arquivo climático Florianópolis SWERA (DOE, 2019).

3.1. Definição do modelo de escritório

Modelou-se uma sala de escritórios com 5m de fachada, 10m de profundidade e 3m de pé-direito e apenas uma parede externa - orientada a oeste e com 60% de área transferente. Paredes internas, cobertura e piso foram configurados como fechamentos adiabáticos, presumindo que os pavimentos e salas adjacentes possuem as mesmas condições térmicas. Considerou-se um pavimento intermediário, à 30m da altura do solo. O estudo analisa o conforto térmico de um ocupante à 1,5m da janela e centralizado em relação às paredes (Figura 2).

Considerou-se o indivíduo sentado de frente para a janela, situação crítica para desconforto. O edifício é completamente revestido por vidro, sendo as paredes externas do modelo revestidas com o mesmo vidro externo utilizado na janela. Incluiu-se esta configuração no *EnergyPlus* como um material de isolamento transparente por meio do objeto *"SurfaceControl: MovableInsulation"*, que gera isolamento à perda de calor sem reduzir drasticamente a transmitância de energia solar.

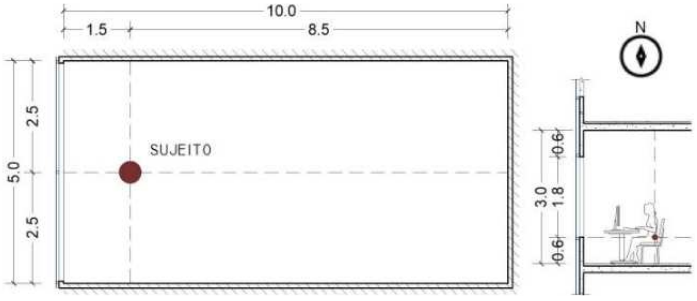

Figura 2 – Planta e corte do escritório

As densidades de ocupação foram definidas conforme recomendado na norma brasileira ABNT NBR 16.401-1 (ABNT, 2008a) para escritórios com alta carga interna. Configurou-se a densidade de carga de equipamentos em 21,5 W/m^2, a densidade de potência de iluminação em 16,0 W/m^2 e a ocupação em 7,7 m^2 por pessoa. Definiu-se a taxa metabólica por pessoa conforme ISO 7730 (ISO, 2005) para atividade sedentária de escritório (126W/pessoa). Considerou-se todos os ocupantes com igual isolamento de roupas: 0,94 clo.

As rotinas de uso dos sistemas da edificação foram configuradas conforme Figura 3. Durante o fim de semana não há ocupação. Determinou-se 5% da iluminação e equipamentos em constante funcionamento em períodos sem ocupação. Configurou-se o acionamento da iluminação artificial de forma estática, sem considerar a disponibilidade de iluminação natural.

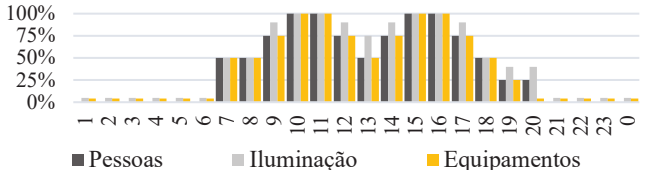

Figura 3 – Cronograma de ocupação durante os dias de semana

O ambiente é condicionado artificialmente por sistema de expansão direta do tipo PTHP (*Packaged Terminal Heat Pump*), equivalente ao uso de aparelho *Split*, e configurado conforme Tabela 1. O sistema opera das 7h às 21h. Durante os fins de semana, o sistema permanece desativado. A Tabela 2 apresenta os valores de transmitância térmica e absortância solar dos fechamentos opacos. Não foi utilizado nenhum tipo de sombreamento a fim de maximizar a influência da radiação e a variação entre os modelos de ajuste solar.

Tabela 1 – Sistema de condicionamento de ar

Sistema	PTHP
COP	3,0 W/W
Termostato	Aquecimento: 20°C Resfriamento: 24°C
Capacidade	Auto dimensionamento do EnergyPlus
Renovação de ar	0,0075 m³/s por pessoa
Taxa de Infiltração	0,3 trocas de ar por hora

Tabela 2 – Propriedade térmica dos elementos construtivos

	Composição	**Transm. [W/m²K]**	**Absort.**
Paredes Externas	Placa Cimentícia (10mm); Lã de Vidro (50mm); Gesso (12,5mm)	0,77	0,30
Paredes Internas	Placa de Gesso (15mm); Lã de Vidro (50mm); Gesso (15mm)	0,69	0,30
Laje/ Teto	Piso Cerâmico (7,5mm); Reboco (25mm); Laje Concreto (200mm); Reboco (25mm)	2,74	Piso: 0,42 Teto: 0,30

Afim de também avaliar como os modelos de ajuste solar se comportam ao uso de vidros com diferentes propriedades térmicas, seis modelos com diferentes vidros foram testados: três vidros base com transmitância de energia solar (TE) alta, média e baixa, e três modelos insulados duplos, compostos por um vidro base, câmara de ar de 12,7mm e um vidro transparente monolítico. Desta forma é possível observar a sensibilidade dos modelos em relação à parcela de radiação que atravessa diretamente o vidro e quanto à transmitância térmica. A Tabela 3 apresenta as propriedades térmicas das composições de forma resumida. As propriedades dos vidros base foram obtidas em catálogos de marcas de vidro presentes no mercado brasileiro. A transmitância térmica e o fator solar foram calculados no software *WINDOW* 7.7 (LBNL, 2020), além das propriedades térmicas dos sistemas insulados. Entretanto, frisa-se que estes valores são apresentados apenas como referência e consideram a radiação solar na direção normal à superfície do vidro. Os vidros são inseridos individualmente no *EnergyPlus* e o *software* realiza estes cálculos, variando também quando à inclinação solar. A fim de facilitar a leitura dos resultados, adotou-se como nomenclatura a abreviatura do processo (laminado – LAM, monolítico – MON, insulado – IGU) e o valor arredondado do fator solar do vidro base utilizado.

Tabela 3 - Propriedades ópticas e térmicas dos vidros

Denominação	**LAM30**	**LAM50**	**MON80**	**IGU30**	**IGU50**	**IGU80**
Espessura (mm)	8,00	8,00	6,00	26,7	26,7	24,7
TE	0,11	0,41	0,78	0,09	0,32	0,60
Processo	Laminado	Laminado	Monolítico	Insulado	Insulado	Insulado
U [W/m²K]	5,56	5,56	5,60	2,71	2,71	2,68
Fator Solar	0,28	0,51	0,82	0,22	0,43	0,71

3.3. Simulação térmica e avaliação de conforto térmico

Os modelos de ajuste solar apresentados na introdução foram comparados considerando o comportamento térmico do ambiente descrito, alterando-se o vidro. Para também observar o impacto da radiação solar difusa no ajuste solar, optou-se por analisar os resultados tanto com CPMV quanto com CPMV*.

Estes modelos necessitam alguns dados de entrada relacionados ao ambiente externo e também às condições do ambiente interno. Realizaram-se, então, simulações térmicas no *EnergyPlus* v.8.9 para obtenção

de dados ambientais. Estes foram utilizados para calcular a MRT, os índices de conforto térmico PMV e PPD e a assimetria na temperatura radiante corrigidos. Os modelos foram inseridos em planilhas eletrônicas para cálculo dos índices ajustados. Com exceção do PMV e PPD, que foram obtidos por meio da ferramenta *CBE Thermal Comfort Tool*. Após, os valores calculados foram reinseridos nas planilhas eletrônicas.

4. RESULTADOS

Os índices MRT, PVM e PPD corrigidos pelos diferentes modelos de ajuste solar foram analisados. Correções na assimetria na temperatura radiante também são abordadas. Nos gráficos também são apresentados os resultados calculados pelo *EnergyPlus*, o qual considera um ponto central no ambiente. Optou-se por também os incluir visto que esse ainda é o método de avaliação predita de conforto térmico mais utilizado.

4.1. Temperatura Radiante Média

A Figura 4 apresenta a variação da temperatura radiante média ao longo do dia. As linhas verticais pontilhadas delimitam o período de ocupação da sala e a área em cinza o período de incidência de radiação solar na fachada externa. Os modelos CPMV e CPMV* não são apresentados, pois a correção é aplicada diretamente ao PMV.

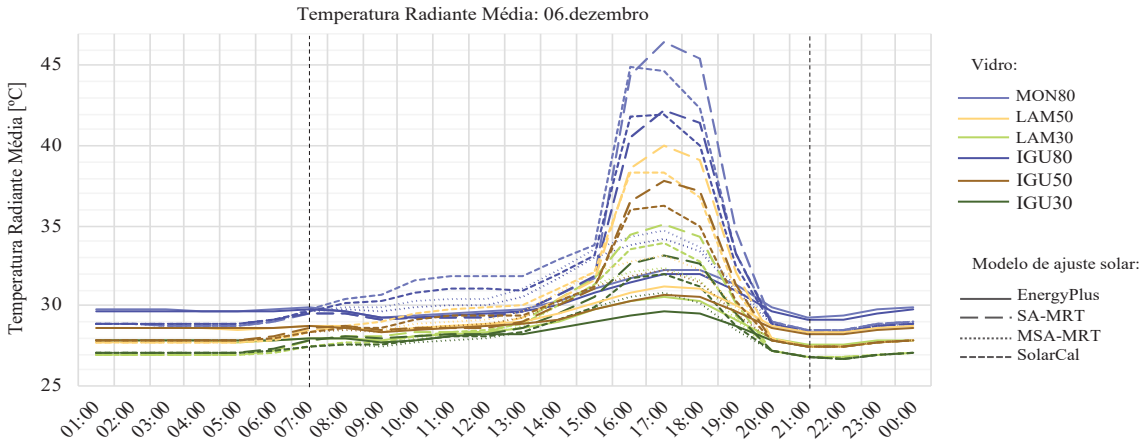

Figura 4 – Temperatura radiante média utilizando os diferentes métodos para Florianópolis, no dia 6 de dezembro.

Como esperado, os resultados para o vidro MON80 são mais sensíveis às variações entre os modelos de conforto térmico, devido a sua elevada TE, mais de oito vezes maior do que a da composição insulada com o vidro de menor TE (IGU30). O modelo SA-MRT apresentou a maior sensibilidade à variação na intensidade de radiação solar direta. A TRM com este modelo foi até 14,2ºC (44%) maior do que os valores calculados pelo *EnergyPlus,* quando exposto a radiação solar (MON80, às 17h). O modelo SolarCal também apresentou sensibilidade significativa, sendo a diferença em relação ao *EnergyPlus* de 13,2ºC (38%) no mesmo horário. Com o modelo MSA-MRT a diferença foi de no máximo 2,6ºC (8%). Dentre os ambientes com vidro insulado, a maior diferença foi de 10,3ºC (33%) com SolarCal e 10,2ºC (32%) com SA-MRT (IGU80).

Observa-se também que, no período entre 15h e 18h, a MRT calculada com os modelos SA-MRT e SolarCal está acima do valor limite máximo para a aplicabilidade do modelo de conforto térmico PMV-PPD - de 40 ºC - nos escritórios com vidro MON80 e IGU80.

Nota-se que o modelo SolarCal apresenta maior sensibilidade à radiação solar difusa do que os demais, tendendo a apresentar MRT mais elevada quando não há incidência de radiação solar direta – até 2,6ºC maior do que no modelo SA-MRT. Por outro lado, o modelo MSA-MRT, que apresentou menor sensibilidade à radiação solar direta do que os demais modelos, apresentou MRT superior o modelo SA-MRT quando na presença apenas de radiação solar difusa (até 1,3ºC).

4.2. Voto Médio Predito (PMV) e Percentual previsto de insatisfeitos (PPD)

A Figura 5 apresenta os resultados de PMV. A linha horizontal preta representa o limite de conforto térmico aceitável definido pelas normas NBR 16401-2, ASHRAE 55, categoria B da ISO 7730 e categoria II da ISO 17772-1 e EN 16798-1 (ABNT, 2008b; ASHRAE, 2017; EN, 2019; ISO, 2005, 2017).

Nota-se que os modelos CPMV e CPMV* foram os mais sensíveis à incidência de radiação direta na fachada, apresentado PMV significativamente superior do que os demais modelos (até 1,6 maior). O PMV corrigido com o CPMV* foi até 1,7 vezes maior do valor calculado pelo *EnergyPlus*, indo de 1,3 (ligeiramente quente) para 3,0 (muito quente) após ajuste (15h, MON80). Isto ocorre, pois o ajuste é feito por meio da adição

de componentes de fluxo de calor por radiação de ondas curtas no cálculo do PMV e não apenas na MRT. O modelo CPMV apresentou menor sensibilidade à radiação solar do que sua versão corrigida, por considerar apenas o efeito da radiação direta enquanto o CPMV* inclui a parcela difusa. Entretanto, a diferença horária entre ambos não foi superior a 2ºC. Com estes modelos de ajuste solar, atingiu-se o limite de PMV 3,0, o que indica uma situação de estresse térmico, em que tanto o sistema fisiológico quanto a capacidade cognitiva do ocupante podem ser afetadas devido ao calor excessivo.

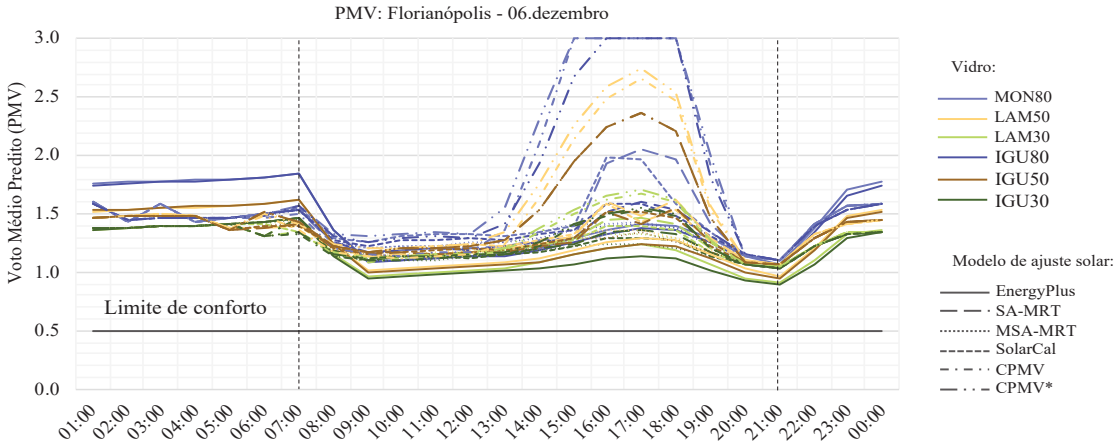

Figura 5 - PMV utilizando os diferentes métodos para Florianópolis, no dia 6 de dezembro

Apesar de a TRM ultrapassar o limite de aplicabilidade do PMV-PPD, o PMV com os modelos SA-MRT e SolarCal foi de no máximo 2,0 (quente). Os modelos SA-MRT e SolarCal apresentaram aumento máximo de 0,6 (46%) em relação ao *EnergyPlus* (às 17h, vidro MON80). Já o modelo MSA-MRT foi no máximo 0,2 maior.

Tal como observado na MRT, quanto menor é a TE do vidro, menor é a influência do modelo de ajuste solar escolhido para a correção do PMV. No período ocupado, a diferença horária máxima de PMV entre os modelos SA-MRT, MSA-MRT e SolarCal foi de 0,6 com o MON80 e 0,2 com o IGU80. Utilizando os vidros de menor TE, esta diferença foi de 0,1 (LAM30 e IGU30). Por outro lado, ao se incluir os modelos CMPV e CPMV*, a diferença máxima entre modelos ficou entre 1,7 (MON80) e 0,3 (IGU30).

A redução da transmitância térmica (vidros insulados) também demonstra diminuir a sensibilidade ao modelo de ajuste solar, entretanto não é tão acentuada quanto a TE. Ao se utilizar o vidro insulado, a diferença entre os modelos é bastante reduzida. Com exceção dos modelos CPMV e CPMV*, essa diferença foi de no máximo 0,3. Quando se compara o uso do vidro insulado duplo com o uso do vidro não insulado, aplicando-se o mesmo modelo de ajuste solar, a diferença máxima foi de 0,5 (MON80 e IGU80, modelo CPMV, às 15h).

A Figura 6 apresenta os resultados do PPD. A linha preta representa o limite aceitável de insatisfeitos definido pelas normas ASHRAE 55, categoria B da ISO 7730 e categoria II da ISO 17772-1 e EN 16798-1.

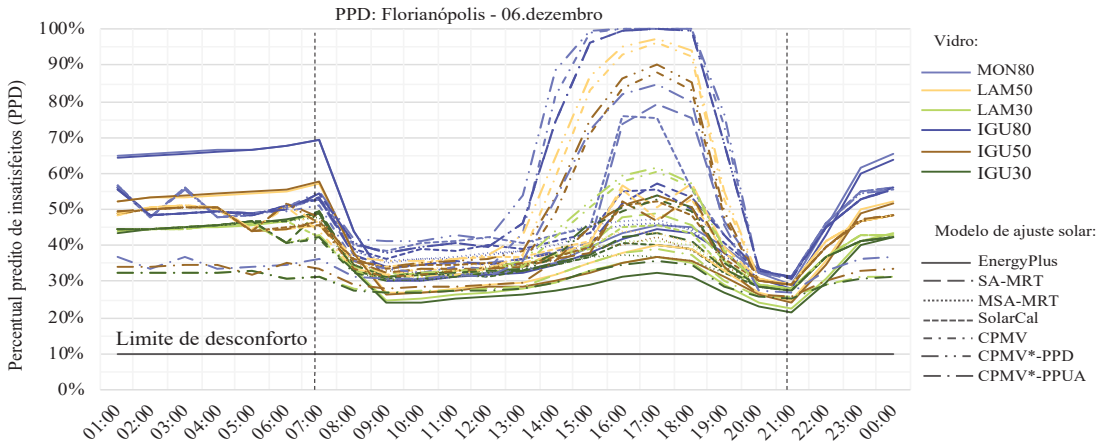

Figura 6 - PPD utilizando os diferentes métodos para Florianópolis, no dia 6 de dezembro

No geral, os resultados do PPD seguem o padrão do PMV, visto que o PPD é calculado em função do mesmo. A única exceção foi modelo CPMV*. Dois percentuais de insatisfeitos foram apresentados para este modelo de ajuste solar. O CPMV* - PPD foi calculando apenas substituindo o PMV pelo CPMV* na fórmula

original do PPD. O CPMV* - PPUA é o percentual inaceitável, definido por meio de correlação com os resultados em Zhang *et al.* (2020). Observa-se que, mesmo apresentando os maiores indicadores PMV, o percentual de insatisfação é drasticamente reduzido com o PPUA. A diferença horária entre CPMV*-PPD e CPMV*-PPUA chega a 36 p.p. no escritório com vidro MON80 (14h) e 18 p.p. com o vidro IGU30 (17h).

Os autores justificam que os resultados do experimento de campo indicaram grande variabilidade na aceitação da radiação solar e que as pessoas tendem a ser mais tolerantes a presença de radiação solar do que a temperatura do ar elevada. Entretanto, o PPUA foi desenvolvido usando os votos térmicos obtidos em experimentos que foram executados todos na mesma cidade, Tianjin, na China (ZHANG *et al.*, 2020). Entende-se que o fator cultural e adaptação a este clima específico são determinantes para estes resultados e que o PPUA precisaria ser estudado em outros climas para poder ser utilizado na previsão de desconforto térmico.

4.3. Assimetria na Temperatura Radiante

A Figura 7 apresenta os resultados de (a) assimetria radiante e (b) percentual de desconforto localizado (PD) devido à assimetria na temperatura radiante por paredes quentes. Os limites indicados nos gráficos seguem as normas ASHRAE 55, NBR 16401-2, categoria B da ISO 7730 e categoria II da ISO 17772-1. Os métodos CPMV e CPMV* não estão presentes nesta análise, pois não é sugerida nenhuma correção da contribuição da exposição à radiação solar na temperatura radiante no plano.

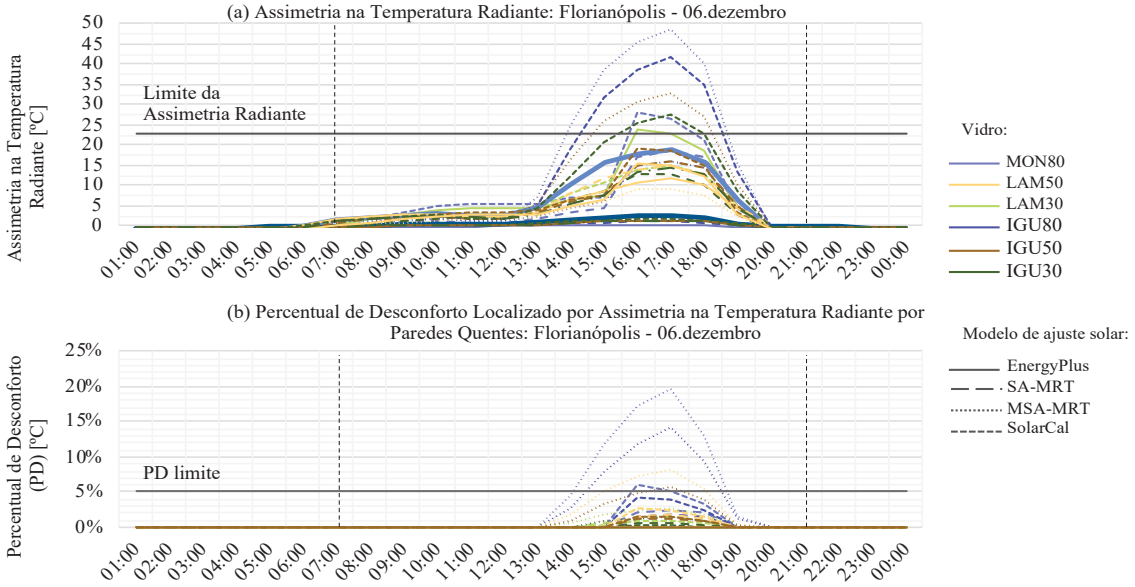

Figura 7 – Florianópolis, no dia 6 de dezembro: (a) Assimetria na Temperatura Radiante e (b) Percentual de desconforto localizado por assimetria na temperatura radiante devido a paredes quentes

Em contraponto aos resultados de PMV, PPD e MRT corrigidos, o modelo MSA-MRT apresentou a maior sensibilidade à exposição a radiação solar e ao tipo de vidro na assimetria na temperatura radiante. O modelo SolarCal apresentou a segunda maior sensibilidade. Ainda assim, a assimetria radiante até 31,5ºC menor e a PD de 15 p.p. menor do que com MSA-MRT (MON80, às 15h).

Em um primeiro momento causa estranhamento que um ambiente que, apesar de condicionado, se mantém fora da zona de conforto térmico durante todo o período ocupado não apresente desconforto por assimetria na temperatura radiante. Além disso, há momentos no fim da tarde em que o sol está posicionado quase exatamente em frente ao ocupante. Entretanto, notou-se que a temperatura superficial dos fechamentos internos se mantém elevada durante todo o período. Por exemplo, o modelo de escritório com vidro IGU80 apresentou temperatura superficial não inferior a 28,3ºC nas paredes internas e 29,5ºC no piso e teto. No escritório com vidro MON80, estes valores foram 25,5ºC e 29,0ºC, respectivamente. Mesmo nos modelos com vidros de controle solar a temperatura superficial não foi inferior à 27,1ºC. Ou seja, as temperaturas superficiais dos fechamentos internos se mantiveram sempre acima de 25,5ºC, não entrando em equilíbrio térmico com a temperatura interna do ar (24ºC) em nenhum momento durante período ocupado.

5. DISCUSSÃO

Os modelos de ajuste solar apresentam importantes diferenças entre eles. O modelo SA-MRT, de La Gennusa et al. (2007), foi o pioneiro em modelos de ajuste da MRT para acrescentar efeito da incidência de radiação

solar ocupante no conforto térmico do ocupante. O modelo MSA-MRT, de Marino et al. (2017), avança ao incluir o fluxo de radiação solar devido a radiação de ondas curtas refletidas pelas superfícies do ambiente. O SolarCal, de Arens et al. (2015), utiliza dados de radiação solar do meio externo, facilmente obtidos em estações climáticas ou arquivos climáticos, o que facilita a obtenção destes dados. A vantagem do CPMV, de Zhang et al. (2018), é exigir menos dados de entrada, o que facilita o processo, entretanto, limita-se ao ajuste do PMV. Além disso, este modelo não inclui o efeito da radiação solar difusa, o que pode levar a discrepâncias significativas na percepção térmica do indivíduo. Conscientes deste problema, os autores publicaram uma correção, o CPMV*, o qual inclui também um componente de radiação difusa ao cálculo do PMV.

Um fator importante a ser analisado são os dados de entrada necessários para os modelos de ajuste solar que, no caso de avaliação predita de conforto térmico, seriam extraídos de resultados das simulações térmicas. Estas simulações são necessárias para todos os modelos para se obter ao menos as temperaturas superficiais internas. O modelo SolarCal foi o menos dependente de dados calculados pelos *EnergyPlus*.

Pelo fato de o modelo MSA-MRT incluir o fluxo de radiação solar por reflexão de ondas curtas no piso, esperava-se que este modelo apresentaria MRT elevado, ao menos em relação ao modelo SA-MRT. Entretanto, os valores são significativamente inferiores. Em um horário com intensa incidência de radiação solar e direção frontal ao indivíduo, o acréscimo máximo foi de 0,2 pontos no PMV e 2,6ºC na MRT. Esta discrepância pode ter relação com os métodos de cálculo definidos por SA-MRT (LA GENNUSA *et al.*, 2007). Este modelo apresenta procedimentos de cálculos da radiação solar próprios, os quais podem apresenta muitas incertezas, principalmente em relação aos coeficientes necessários. Enquanto os demais modelos utilizam os dados do arquivo climático ou cálculos da simulação térmica. Como resultado, a radiação direta e difusa calculadas com o modelo SA-MRT tendem a ser superiores à calculada pelos demais modelos.

Uma vantagem significativa do modelo SA-MRT é o procedimento de cálculo para definir se o indivíduo está dentro da área de incidência da radiação solar direta no ambiente por meio de trigonometria considerando os ângulos solares. Este cálculo define o C_S^{in}, coeficiente de proteção do ambiente interno (um: sujeito irradiado; zero: sujeito não irradiado). O modelo SolarCal também possui um coeficiente para definir se a radiação solar direta está ou não incidindo no ocupante: a fração do corpo exposta a luz solar (f_{bes}). Este coeficiente é definido como a fração do fator de área projetada (f_p) do corpo que não é sombreada pela esquadria ou por qualquer tipo de sombreamento, entre 0 a 1. Entretanto, este valor pode ser definido de forma simplificada e não possui um procedimento de cálculo para tal. O fato de o f_{bes} não ser um fator binário é uma vantagem em relação ao C_S^{in}.

A Figura 8 apresenta, de forma resumida, as vantagens em contraponto às incertezas e desafios de cada um dos modelos de ajuste solar.

	VANTAGENS	INCERTEZAS
SA-MRT	• procedimento de cálculo para definir se há incidência de radiação solar direta no indivíduo (C_s^{in}) • detalhamento da geometria solar e do espaço	• incertezas relacionadas ao cálculo da radiação solar direta e difusa que entra no ambiente • C_s^{in} é um coeficiente binário
MSA-MRT	• inclui o fluxo de radiação solar devido a radiação de ondas curtas refletidas pelas superfícies internas.	• resultados de MRT e PMV muito inferiores ao demais, apesar de incluir as reflexões internas, ao mesmo tempo apresenta os maiores valores de assimetria radiante.
Solar Cal	• utiliza dados de radiação solar externa • menos dependente de dados calculados por simulação • coef. fração do corpo exposta a luz solar (f_{bes}) não binário	• f_{bes} não apresenta procedimento de cálculo
CPMV e CPMV*	• exigem menos dados de entrada • CPMV* inclui impacto da radiação solar difusa	• CPMV não inclui impacto da radiação solar difusa • limitam-se ao ajuste do PMV • resultados destoam drasticamente dos demais modelos

Figura 8 – Infográfico com as vantagens e incertezas de cada modelo de ajuste solar

6. CONCLUSÕES

O presente estudo comparou os resultados de índices de conforto térmico corrigido por quatro modelos de ajuste do efeito da radiação solar na percepção térmica de pessoa. O enfoque foi em ocupantes de estação de trabalho próximas a janelas em ambientes de escritório com alto percentual de transparência na fachada.

O modelo CPMV/CPMV* destoa drástica dos demais modelos no ajuste do PMV ao mesmo tempo em que indica os menores índices de desconforto térmico. O modelo MSA-MRT apesar de incluir as reflexões no piso da radiação de onda curta, apresentou índices de PMV e MRT muito inferiores aos demais. De forma

oposta, foi o modelo que apresentou os maiores valores de assimetria na temperatura radiante, também destoando dos demais modelos. Estes fatos indicam incoerências significativas em ambos modelos.

Os modelos SA-MRT e SolarCal apresentam resultados semelhantes e aparentemente mais coerentes, sendo os valores ajustados pelo SolarCal ligeiramente inferiores. O SA-MRT é mais detalhado em relação a geometria solar e do espaço, entretanto o procedimento de cálculo da radiação solar que entra no ambiente pode incluir muitas imprecisões. Por outro lado, o modelo SolarCal é mais simples de ser implementado, apresentando resultados semelhantes.

Este estudo não relaciona os índices de conforto térmico com valores medidos ou com a percepção térmica de pessoas em um ambiente real, não podendo concluir qual o modelo possui maior correlação com a realidade. Entretanto, indica limitações e vantagens de cada modelo de ajuste solar de forma numérica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, **ABNT NBR 16401-1 Instalações de ar-condicionado — Sistemas centrais e unitários Parte 1: Projetos das instalações**. Brasil: 2008a. p. 1–66.

ABNT. **ABNT NBR 16401-2 Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico.** Brasil: 2008b.

AMAZONAS, **Secretaria de Infraestrutura do Estado do Amazonas: Diagnóstico Ambiental.** Manaus: 2012. Disponível em: http://www.ipaam.am.gov.br/arquivos/download/arqeditor/2 Diagnostico Ambiental - Meio Físico - Cap 6 Atualizado 2.pdf.

ARENS, E. et al. Modeling the comfort effects of short-wave solar radiation indoors. **Building and Environment**, v. 88, p. 3–9, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.004

ASHRAE. ANSI/ASHRAE **Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. ASHRAE: 2017. Disponível em: https://doi.org/ISSN 1041-2336.

CAPPELLETTI, F. et al. Passive performance of glazed components in heating and cooling of an open-space office under controlled indoor thermal comfort. **Building and Environment**, v. 72, p. 131–144, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.022

DOE, U. S. Departament of Energy. **Weather Data**. 2019. Disponível em: https://energyplus.net/weather.

EN. **EN 16798-1 Energy performance of buildings — Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics -** Module M1-6. 2019.

ISO. **ISO/TR 17772-2 Energy performance of buildings - Overall energy performance assessment procedures - Part 2: Guideline for using indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings**. ISO, 2018.

ISO. **ISO 17772-1 Energy Performance of Buildings – Indoor Environmental Quality – Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for the Design and Assessment of Energy Performance of Buildings.** ISO, 2017.

ISO. **ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** ISO, 2005.

LA GENNUSA, M. et al. A model for managing and evaluating solar radiation for indoor thermal comfort. **Solar Energy**, v. 81, n. 5, p. 594–606, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.09.005

LA GENNUSA, M. et al. The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation - A generalised algorithm. **Building and Environment**, v.40, p.367–375, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.06.019

LBNL, L. B. N. L. **WINDOW**. Versão 7.7.10. LBNL, 2020. Disponível em: https://windows.lbl.gov/software/window

MARINO, C. et al. A generalized model of human body radiative heat exchanges for optimal design of indoor thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 176, n. October, p. 556–571, 2018a. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.052

MARINO, C. et al. The effect of the short wave radiation and its reflected components on the mean radiant temperature: modelling and preliminary experimental results. **Journal of Building Engineering**, v. 9, n. August 2016, p. 42–51, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.11.008

MARINO, C. et al. The spatial evaluation of the radiative human body heat exchanges: An effective contribution for limiting energy consumption and achieving better indoor conditions in buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 16, n. December 2017, p. 118–128, 2018b. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.015

MARINO, C.; NUCARA, A.; PIETRAFESA, M. Thermal comfort in indoor environment: Effect of the solar radiation on the radiant temperature asymmetry. **Solar Energy**, v.144, p. 295–309, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.014

THORSSON, S. et al. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 1983–1993, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1002/joc.1537

ZHANG, H. et al. The CPMV* for assessing indoor thermal comfort and thermal acceptability under global solar radiation in transparent envelope buildings. **Energy and Buildings**, v.25, p.110306, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110306

ZHANG, H. et al. The CPMV index for evaluating indoor thermal comfort in buildings with solar radiation. **Building and Environment**, v. 134, n. February, p. 1–9, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.037

ZOMORODIAN, Z. S.; TAHSILDOOST, M. Assessment of window performance in classrooms by long term spatial comfort metrics. **Energy and Buildings**, v. 134, p. 80–93, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.018

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001.