

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE TÉRMICA DE JANELA TERMOTRÓPICA EM EDIFÍCIO NA CIDADE  
DE PORTO ALEGRE

por

Gabriel Alves Resende

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2022.

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Alves Resende, Gabriel  
ANÁLISE TÉRMICA DE JANELA TERMOTRÓPICA EM EDIFÍCIO  
NA CIDADE DE PORTO ALEGRE / Gabriel Alves Resende. --  
2022.  
21 f.  
Orientadora: Leticia Jenisch Rodrigues.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Janela Termotrópica. 2. Hidroxipropilcelulose  
(HPC). 3. EnergyPlus. 4. Coeficiente de Ganho de Calor  
Solar (SHGC). I. Jenisch Rodrigues, Leticia, orient.  
II. Título.

Gabriel Alves Resende

ANÁLISE TÉRMICA DE JANELA TERMOTRÓPICA EM EDIFÍCIO NA CIDADE  
DE PORTO ALEGRE

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Leticia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, maio de 2022.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o apoio e ajuda durante a minha formação. Aos meus amigos por todos os momentos compartilhados. Aos colegas de curso pela oportunidade de convívio e cooperação mútua durante estes anos. À minha orientadora, prof<sup>a</sup>. Dra. Leticia Jenisch Rodrigues, pelos conhecimentos transmitidos e auxílio neste trabalho. À UFRGS, instituição que proporcionou essa trajetória.

*Be water, my friend.*

*Bruce Lee*

Resende, Gabriel Alves. **ANÁLISE TÉRMICA DE JANELA TERMOTRÓPICA EM EDIFÍCIO NA CIDADE DE PORTO ALEGRE**. 2022. 20p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

## RESUMO

Buscando-se maximizar os benefícios da disponibilidade de luz natural, edifícios comerciais e residências utilizam alto nível de envidraçamento. Isto pode significar considerável aumento da demanda energética do edifício, caso o projeto esteja inadequado. As janelas termotrópicas exploram a propriedade de termocromismo de alguns materiais, para alterar dinamicamente a transmitância e a refletância da luz solar, e deste modo, se obter uma redução dos ganhos de calor solar. O presente trabalho visa verificar os efeitos da aplicação de janelas termotrópicas feitas com camada de hidroxipropilcelulose (HPC) em um escritório pequeno na cidade de Porto Alegre, RS. São analisadas diferentes concentrações de HPC: 2%, 4% e 6%; em variados ângulos de inclinação da janela: 90°, 60°, 30° e 0°. A análise térmica é realizada através do software *EnergyPlus*. A redução mais significativa de ganho de calor solar ocorre para a concentração de 6% de HPC, com a janela sendo utilizada como claraboia (0°), na qual se obtém uma carga solar 49% menor quando comparada com uma janela de vidro duplo comum. Entretanto, esse comportamento acarreta em um aumento de 16% no consumo com iluminação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Janela Termotrópica, Hidroxipropilcelulose (HPC), EnergyPlus, Coeficiente de Ganho de Calor Solar (SHGC)

Resende, Gabriel Alves. **THERMAL ANALYSIS OF THERMOTROPIC WINDOW IN A BUILDING IN THE CITY OF PORTO ALEGRE.** 2022. 20p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

## ABSTRACT

Commercial buildings and residences utilize a high level of glazing, seeking to maximize the benefits of the availability of natural light. If the project is inadequate, so much glass can increase the building energy demand. Thermotropic windows exploit the thermochromism property of some materials. This property dynamically changes the transmittance and reflectance of sunlight. Thus, obtaining a reduction in solar heat gains (SHG). The present work aims to verify the effects of applying thermotropic windows made with a layer of hydroxypropyl cellulose (HPC) in a small office in the city of Porto Alegre, RS. Different concentrations of HPC were analyzed: 2%, 4%, and 6%; at different angles of window inclination: 90°, 60°, 30°, and 0°. The EnergyPlus is used to perform the thermal analysis. The most significant reduction in solar heat gain occurs for the concentration of 6% HPC, with the window as a skylight (0°). A 49% lower solar load is obtained compared to an ordinary double-glazed window. However, electricity consumption with lighting increased by 16%.

**KEYWORDS:** Thermotropic Window, Hydroxypropyl Cellulose (HPC), EnergyPlus, Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: (A) ESTADO DA JANELA ABAIXO DA $T_s$ ; (B) ESTADO DA JANELA ACIMA DA $T_s$ . AUTOR: ALLEN, 2017.	3
FIGURA 2: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO GANHO DE CALOR SOLAR EM UMA JANELA. AUTOR: MENON, 2021.	4
FIGURA 3: ESCRITÓRIO COM DIFERENTES ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO DA JANELA: (A) $90^\circ$ , (B) $60^\circ$ , (C) $30^\circ$ E (D) $0^\circ$ . AUTOR: ALLEN, 2017.	6
FIGURA 4: GANHO DE CALOR ANUAL DA JANELA.	7
FIGURA 5: CONSUMO ANUAL DE ENERGIA ELÉTRICA.	8
FIGURA 6: COEFICIENTE DE GANHO DE CALOR SOLAR (SHGC) PARA A JANELA TERMOTRÓPICA.	9
FIGURA 7: (A) TEMPERATURA AMBIENTE, INTERNA E DA JANELA; (B) RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE E GANHO DE CALOR TOTAL NA JANELA.	10
FIGURA 8: O ESTADO DA CAMADA HPC SOB EFEITOS DA RADIAÇÃO SOLAR E DA TEMPERATURA AMBIENTE.	11
FIGURA 9: O EFEITO DA RADIAÇÃO SOLAR NA TEMPERATURA DA CAMADA HPC.	12
FIGURA 10: GANHOS E PERDAS DE CALOR MENSAL ATRAVÉS DA JANELA.	12
FIGURA 11: GANHOS E PERDAS DE CALOR ANUAL ATRAVÉS DA JANELA.	13
FIGURA 12: GANHO DE CALOR ANUAL DA JANELA PARA DIFERENTES FAIXAS DE TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO.	14
FIGURA 13: CONSUMO ANUAL DE ENERGIA ELÉTRICA PARA DIFERENTES FAIXAS DE TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO.	14

## NOMENCLATURA

<i>Símbolos</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>
$T_s$	Temperatura de transição	[°C]
LCST	Temperatura de saturação crítica inferior	[°C]
$T_{sol}$	Transmitância solar	Adimensional
L	Número de camadas de vidro	Adimensional
N	Fração de fluxo para o ambiente	Adimensional
$\alpha$	Absortância solar	Adimensional
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> K]
k	Coefficiente de condutividade térmica	[W/mK]
E	Radiação de ondas longas incidente na janela	[W/m <sup>2</sup> ]
$\epsilon$	Emissividade da face	Adimensional
$\theta$	Temperatura da face	[°C]
S	Radiação (de fontes internas da zona) absorvida pela face	[W/m <sup>2</sup> ]

### *Abreviaturas*

SHGC	Coefficiente de Ganho de Calor Solar
NFRC	<i>National Fenestration Rating Council</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
TRY	<i>Test Reference Year</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	1
2.1. Materiais termotrópicos .....	1
2.1.1. Hidroxipropilcelulose (HPC) .....	2
2.2. Coeficiente de Ganho de Calor Solar (SHGC).....	3
2.3. EnergyPlus .....	4
2.3.1. Balanço de energia nas janelas .....	4
2.4. Arquivo climático .....	5
3. METODOLOGIA .....	5
3.1. Edifício da simulação.....	5
3.2. Propriedades dos materiais.....	6
3.3. Tempo de execução, infiltração, iluminação e ocupação .....	7
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	7
4.1. Ganho de calor da janela .....	7
4.2. Carga de iluminação .....	8
4.3. Análise do coeficiente de ganho de calor solar (SHGC) .....	8
4.4. Análise detalhada da TT 6% HPC.....	10
4.4.1. Verão e inverno .....	10
4.4.2. Temperatura e radiação solar incidente .....	11
4.4.3. Ganhos e perdas de calor através da janela .....	12
4.4.3.1. Simulações mensais .....	12
4.4.3.2. Simulações anuais .....	13
4.5. Efeito da temperatura de transição .....	13
4.5.1. Ganho de calor da janela .....	13
4.5.2. Carga de iluminação .....	14
5. CONCLUSÃO .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
APÊNDICE .....	18
ANEXO.....	21

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos edifícios comerciais e residenciais empregam um alto nível de envidraçamento, sendo comum o uso de vidros de baixa emissividade (*Low-e*), que são soluções estáticas e inflexíveis. A implementação de uma tecnologia que possibilite uma resposta dinâmica para a janela, representará um aumento da eficiência energética.

O desenvolvimento de uma janela “inteligente”, explorando a propriedade de termocromismo, que é o atributo que alguns materiais possuem de mudar de cor devido à temperatura, tem sido estudado por alguns pesquisadores, como Gao et al. (2012), que analisaram o uso de vidro termocrômico com nanocerâmica VO<sub>2</sub> em janelas. Descoberto há mais de 50 anos, o VO<sub>2</sub> é o material termocrômico mais promissor. Entretanto, este material ainda não é comercializado, devido ao baixo custo-benefício relacionado à preparação, estabilidade e desempenho. Allen (2017) pesquisou o uso de hidroxipropilcelulose (HPC) para janelas termotrópicas, e obteve resultados promissores em simulações realizadas pelo software *EnergyPlus* para o clima mediterrâneo da cidade de Palermo, Itália. A janela termotrópica com concentração de 6% HPC proporcionou uma economia de energia anual de 22% quando comparada com uma janela de vidro duplo comum.

Este trabalho pretende verificar os efeitos da aplicação de janelas termotrópicas feitas com camada de hidroxipropilcelulose (HPC) em um escritório pequeno na cidade de Porto Alegre, RS, de clima subtropical úmido. A análise térmica será realizada através do software *EnergyPlus*. Espera-se que a janela termotrópica viabilize a redução de cargas de resfriamento, possibilitando maior eficiência energética do edifício, sem abdicar de usufruir da disponibilidade de luz natural.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Materiais termotrópicos

Materiais termotrópicos são capazes de reduzir a visibilidade e a transmissão solar quando atingem temperaturas superiores à temperatura de saturação crítica inferior (LCST), definida como temperatura de transição ( $T_s$ ) neste trabalho. São divididos em três grupos: hidrogéis termotrópicos, misturas de poliméricos termotrópicos e polímeros termotrópicos incorporados em domínios fixos (RESCH, 2008).

Os hidrogéis termotrópicos são redes de polímeros reticulados absorventes de água com graus variados de grupos hidrofílicos e hidrofóbicos dentro de suas estruturas. Grupos hidrofílicos são atraídos por moléculas de água e tendem a ser dissolvidos por ela; enquanto que grupos hidrofóbicos são repelidos por moléculas de água. Abaixo da temperatura de transição ( $T_s$ ), o polímero é hidrofílico com ligações de hidrogênio entre o polímero e as moléculas de água, e portanto, há a dissolução homogênea no nível molecular, resultando em um estado transparente, isotrópico e transmissor de luz. Acima da  $T_s$ , a ligação de hidrogênio entre o polímero e a água é enfraquecida, resultando em interações hidrofóbicas, e deste modo, ocorre a separação de fases com a água extinta da rede polimérica. Como há disparidade suficiente entre os índices de refração dessas duas fases, a luz será espalhada em vez de transmitida, resultando em uma “nublação” do sistema (RESCH, 2008).

O mecanismo pelo qual as misturas de poliméricos termotrópicos atingem um estado de baixa visibilidade é similar aos hidrogéis termotrópicos. Neste caso, os dois componentes compreendem um polímero termoplástico incorporado dentro de uma matriz de polímero reticulado. Abaixo da  $T_s$  os dois polímeros têm índice de refração semelhante, e conseqüentemente, a mistura de polímeros é transparente. Conforme a temperatura é aumentada para acima da  $T_s$ , os índices de refração dos componentes são alterados, havendo uma

disparidade entre os mesmos, e, portanto, ocorre a dispersão da luz. O grau de translucidez acima da  $T_s$ , tanto das misturas de poliméricos termotrópicos quanto dos hidrogéis termotrópicos, pode ser alterada através da adição e ajuste de proporção de copolímeros, sais e tensoativos (SEEBOTH, 2010).

Os polímeros termotrópicos incorporados em domínio fixo consistem de um domínio de dispersão homogeneamente disperso incorporado estaticamente dentro de um domínio de matriz transparente, como uma resina. O domínio da matriz tem um índice de refração constante acima e abaixo da  $T_s$ , e mantém-se em estado sólido. Abaixo da  $T_s$ , ambos os domínios da matriz e de dispersão possuem um índice de refração semelhante, enquanto que acima da  $T_s$ , o índice de refração das partículas do domínio de dispersão é alterado, e deste modo, devido a disparidade entre os índices de refração, ocorre a dispersão da luz (GLADEN, 2013).

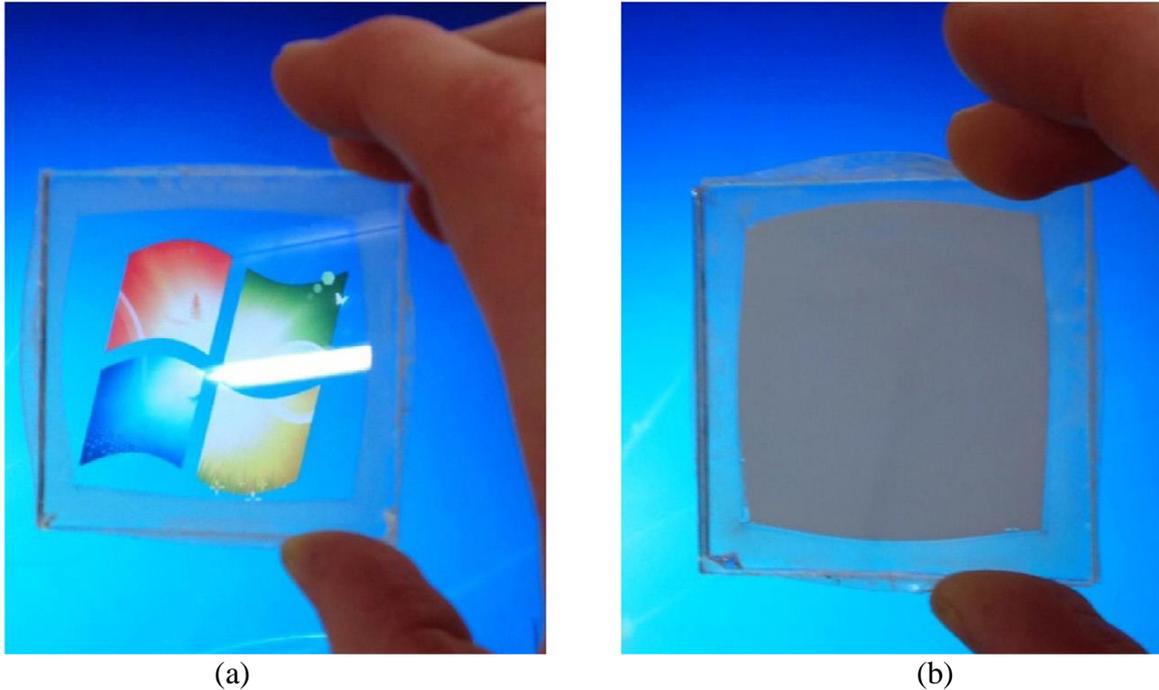
Allen, 2017, delimitou os requisitos necessários para a seleção de materiais termotrópicos para uso em envidraçamento:

- Transmitância >85% no estado transparente e transmitância <15% no estado translúcido;
- Faixa de 10°C para gradiente de comutação íngreme;
- Reversibilidade de fase com baixa histerese, que é durável e reprodutível por longos períodos de tempo;
- Materiais homogeneamente estáveis acima e abaixo da  $T_s$ ;
- $T_s$  ajustável dentro de uma ampla faixa de temperatura, para adaptabilidade às necessidades climáticas e arquitetônicas;
- Estabilidade a longo prazo contra a radiação UV e biodegradação;
- Materiais não congelante, não tóxico, não inflamáveis e preferencialmente inertes;
- Materiais de baixo custo e que possam ser fabricados para cobrir uma grande área.

### **2.1.1. Hidroxipropilcelulose (HPC)**

A hidroxipropilcelulose (HPC) foi selecionada como material para a camada termotrópica da janela, a partir da análise das vantagens e desvantagens descritas no estudo de Connely, 2016. O processo de sintetização da membrana de HPC é relatado por Allen, 2017. A hidroxipropilcelulose é adquirida na forma de pó esbranquiçado (SIGMA-ALDRICH, 2022). A quantidade necessária para fazer 1,5% em peso na composição final da membrana foi dissolvida em água aquecida. Várias concentrações de HPC aquosa foram então adicionadas à solução gelificante aquecida com agitação. A solução HPC/agente gelificante foi moldada entre duas chapas 5 x 5 cm de vidro branco com baixo teor de ferro, com 4 mm de espessura e usando a membrana de 0,5 mm como espaçador. Foram sintetizadas três concentrações de HPC para as membranas: 2%, 4% e 6%. O protótipo da janela termotrópica com camada de HPC é apresentado abaixo no estado transparente (Figura 1a) e no estado translúcido (Figura 1b).

Figura 1- (a) Estado da janela abaixo da  $T_s$ ; (b) Estado da janela acima da  $T_s$ . (Fonte: ALLEN, 2017)



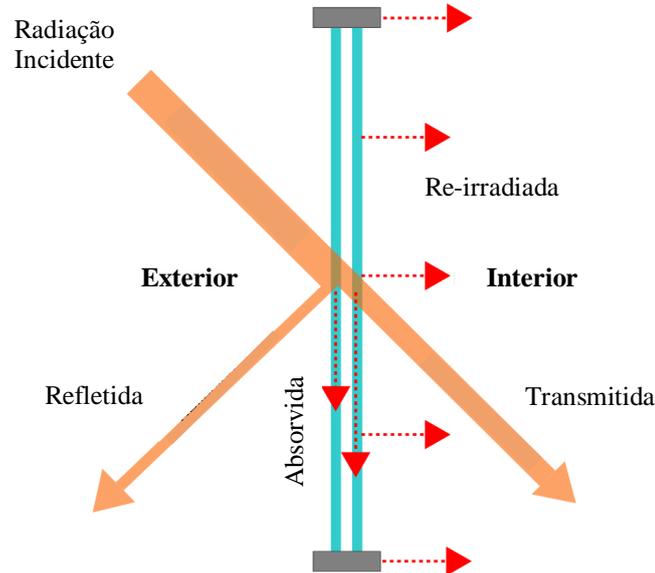
## 2.2. Coeficiente de Ganho de Calor Solar (SHGC)

O Coeficiente de Ganho de Calor Solar (SHGC) é um importante parâmetro de janelas. É definido como a fração de radiação solar que entra no ambiente após atravessar a janela. Esta fração de radiação é composta pela transmitância solar ( $T_{sol}$ ), que corresponde à fração da irradiação solar incidente que é diretamente transmitida para o interior do edifício como radiação; e pela porção de radiação solar absorvida ( $A_k$ ) que é então re-irradiada, transmitida por condução ou convecção para o ambiente. O SHGC expressa, portanto, a razão entre o ganho de calor total da janela pela radiação solar incidente (ANSI/NFRC 100, 2014):

$$SHGC(\theta) = T_{sol}(\theta) + \sum_{i=1}^L N_i \alpha_i(\theta) = \frac{\text{ganho de calor total da janela}}{\text{radiação solar incidente}} \quad (1)$$

O diagrama esquemático apresentado na Figura 2 ilustra o ganho de calor solar em uma janela.

Figura 2- Diagrama esquemático do ganho de calor solar em uma janela. (Fonte: Adaptado de MENON, 2021)



### 2.3. EnergyPlus

A análise térmica da janela termotrópica será realizada através do software *EnergyPlus*, que é um programa de simulação energética de código *open-source* distribuído gratuitamente pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, DOE-US. O programa atua como simulador integrado, onde cada *step* da simulação é iniciado com o balanço de energia da zona térmica, e a partir destas informações, é atualizado as condições da zona térmica e determinado as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento. Por fim, é definido o comportamento do sistema de ar (ventilação e infiltração).

#### 2.3.1. Balanço de energia nas janelas

O software *EnergyPlus* realiza os cálculos referentes a janela através do modelo camada por camada. A radiação solar transmitida por um sistema de camadas de vidro e a radiação solar absorvida em cada camada dependem das propriedades de transmitância solar, refletância e absortância das camadas individuais. A radiação solar absorvida entra no cálculo do balanço térmico da vidraça que determina a temperatura da superfície interna e, portanto, o ganho de calor para a zona da vidraça. A radiação solar transmitida é absorvida pelas superfícies da zona interior e, portanto, contribui para o equilíbrio térmico da zona. Além disso, a transmitância visível da vidraça é um fator importante no cálculo da iluminância da luz do dia.

As temperaturas da face do vidro da janela são determinadas resolvendo as equações de balanço de calor em cada face a cada passo de tempo. Para uma janela com  $N$  camadas de vidro existem  $2N$  faces e, portanto,  $2N$  equações para resolver. As seguintes suposições são feitas ao derivar as equações de balanço de calor.

- 1) As camadas de vidro são suficientemente finas (alguns milímetros) para que o armazenamento de calor no vidro possa ser desprezado; portanto, não há termos de capacidade calorífica nas equações;
- 2) O fluxo de calor é perpendicular às faces do vidro e é unidimensional;
- 3) As camadas de vidro são opacas a radiação infravermelha. Isso é verdade para a maioria dos tipos de vidro;

- 4) As faces do vidro são isotérmicas, visto que a condutividade do vidro é muito alta;
- 5) A radiação de onda curta absorvida em uma camada de vidro pode ser distribuída igualmente nas duas faces da camada.

As quatro equações para vidros duplos são as seguintes. As equações para vidro simples ( $N = 1$ ) e para  $N = 3$  e  $N = 4$  são análogas e não são mostradas.

$$E_o \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \sigma \theta_1^4 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_o(T_o - \theta_1) + S_1 = 0 \quad (2)$$

$$k_1(\theta_1 - \theta_2) + h_1(\theta_3 - \theta_2) + \frac{\sigma \varepsilon_2 \varepsilon_3 (\theta_3^4 - \theta_2^4)}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} + S_2 = 0 \quad (3)$$

$$h_1(\theta_2 - \theta_3) + k_2(\theta_4 - \theta_3) + \frac{\sigma \varepsilon_2 \varepsilon_3 (\theta_2^4 - \theta_3^4)}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} + S_3 = 0 \quad (4)$$

$$E_i \varepsilon_4 - \varepsilon_4 \sigma \theta_4^4 + k_2(\theta_3 - \theta_4) + h_i(T_i - \theta_4) + S_4 = 0 \quad (5)$$

## 2.4. Arquivo climático

Os dados climáticos utilizados para a simulação energética foram coletados pela estação climática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre, identificada pelo número WMO: 839710, e organizados em formato padronizado para o arquivo Ano Climático de Referência ou TRY (Test Reference Year). Este arquivo climático (BDMEP, 2022) contém informações de 8760 horas do ano. O clima de Porto Alegre é subtropical úmido, caracterizado por verões quentes e úmidos, com uma temperatura média anual de 19,7 °C, atingindo a temperatura máxima de 34 °C no verão e a temperatura mínima de 1 °C no inverno (ABNT, 2005).

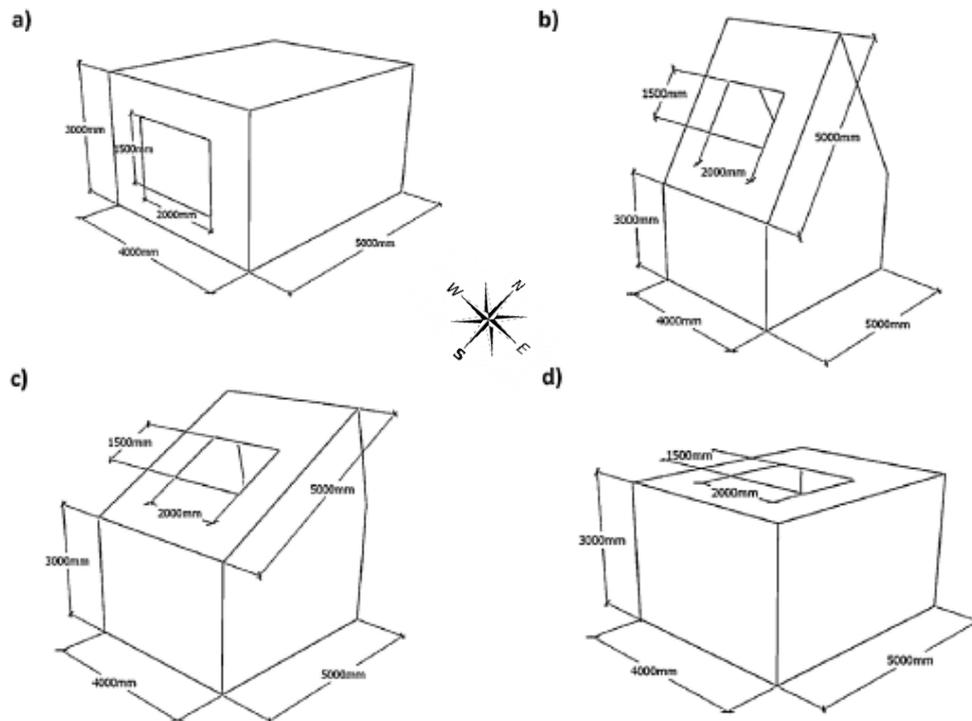
## 3. METODOLOGIA

### 3.1. Edifício de simulação

O edifício escolhido para a simulação é um pequeno escritório com dimensões 5 m x 4 m x 3 m. O escritório faz parte de uma fachada de um edifício maior, de modo que apenas a parede sul e o telhado estão expostos às condições externas. Todas as outras superfícies do escritório foram consideradas adiabáticas, e, portanto, não estão sujeitas a qualquer transferência de calor.

Foram analisadas diferentes concentrações de HPC para a camada termotrópica: 2%, 4% e 6%; em vários ângulos de inclinação da janela: a) 90°, b) 60°, c) 30° e d) 0°, como é apresentado pela Figura 3.

Figura 3 – Escritório com diferentes ângulos de inclinação da janela: (a) 90°, (b) 60°, (c) 30° e (d) 0°. (Fonte: Adaptado de ALLEN, 2017)



O desempenho térmico da janela termotrópica com camada de HPC será comparada com uma janela de vidro duplo comum, e com uma janela dupla de baixa emissividade (*Low-e*). Todos os casos simulados possuem a mesma área para o telhado (20 m<sup>2</sup>) e para a janela (3 m<sup>2</sup>). Para o caso em que a janela está na vertical (90°), a área ocupada pela janela representa 25% da área total do plano, enquanto que para todos os demais casos a área da janela corresponde a 15% da área total do plano. Todas as superfícies adicionais (que tenham sido necessárias) também foram consideradas adiabáticas.

### 3.2. Propriedades dos materiais

Para manter o valor do *U-factor* constante independentemente da posição da janela, definiu-se o mesmo valor de 0,25 W/m<sup>2</sup>K para o *U-factor* da parede externa e do telhado. As demais propriedades relevantes são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos componentes

Componente do edifício	U-factor [W/m <sup>2</sup> K]	Transmitância Solar	Refletância Solar
Parede externa	0,25	N/A	N/A
Telhado	0,25	N/A	N/A
Janela de vidro duplo comum (ODG)	2,7	0,79	0,16
Janela dupla de baixa emissividade (LE)	1,7	0,23	0,22
Janela termotrópica (TT)	2,7	Dinâmico	Dinâmico

A janela termotrópica no estado transparente apresenta as mesmas propriedades ópticas para as três concentrações de HPC. Os valores das transmitâncias e refletâncias para os estados transparentes (i) e translúcidos (ii) da janela termotrópica é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades ópticas da janela termotrópica

Propriedade da janela	2% HPC		4% HPC		6% HPC	
	(i)	(ii)	(i)	(ii)	(i)	(ii)
Transmitância visível	0,90	0,27	0,90	0,21	0,90	0,21
Refletância visível	0,08	0,22	0,08	0,28	0,08	0,28
Transmitância solar	0,74	0,20	0,74	0,15	0,74	0,15
Refletância solar	0,06	0,18	0,06	0,24	0,06	0,24

### 3.3. Tempo de execução, infiltração, iluminação e ocupação

Os parâmetros desta seção foram padronizados para todos os casos analisados. O intervalo de tempo definido foi de 10 min para uma simulação anual. A infiltração de ar foi assumida constante, 0,0085 m<sup>3</sup>/s, sendo adequada para uma habitação pequena. A carga de iluminação adotada é 12,5 W/m<sup>2</sup>, com uma iluminação padrão de 500 lx. Foi implementado controle de luminosidade no escritório, de modo que as luzes artificiais foram ligadas quando a iluminação, durante o horário de trabalho, caísse para valores abaixo de 500 lx. O escritório possui limite de ocupação de duas pessoas. Foi considerada uma taxa metabólica de 70 W/m<sup>2</sup>, correspondente à atividade de digitação. O padrão de ocupação do escritório é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Período de ocupação (número de pessoas)

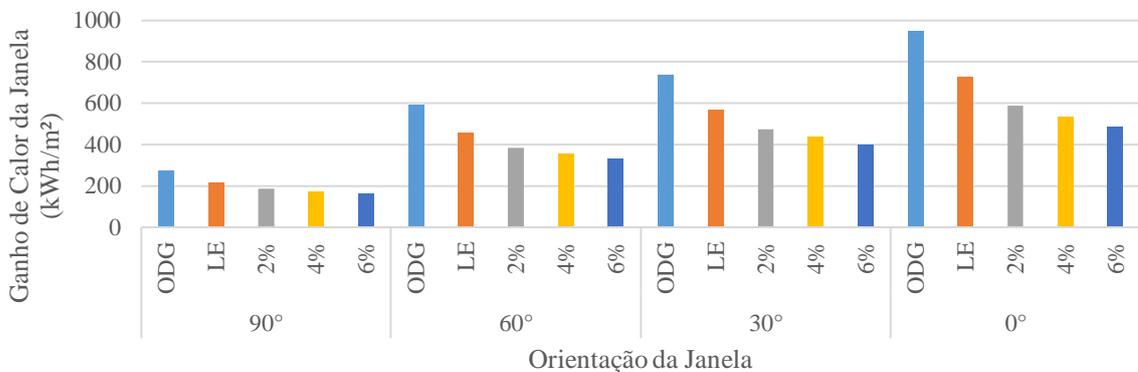
Horário	0-7	7-8	8-12	12-13	13-17	17-18	18-24
Dias de Semana	0	1	2	1	2	1	0
Sábado	0	0	2	0	0	0	0
Domingo	0	0	0	0	0	0	0

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Ganho de calor da janela

A Figura 4 apresenta o ganho de calor total da janela (em kWh/m<sup>2</sup>) de acordo com o ângulo de inclinação.

Figura 4 – Ganho de calor anual da janela.

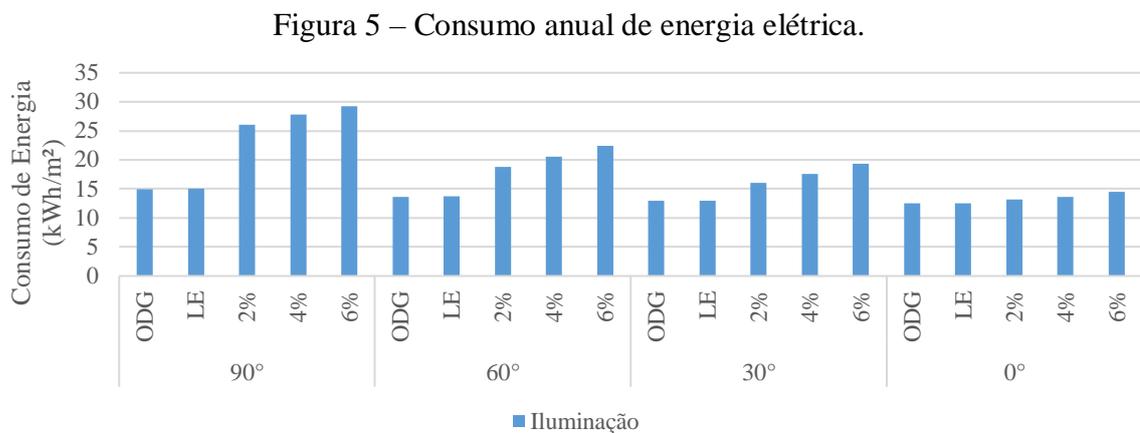


Como era esperado, ODG tem o maior ganho de calor independente do ângulo de inclinação da janela. Em todas as orientações da janela foi mantido o ordenamento de ganho de calor, com LE apresentando os maiores ganhos depois da ODG, seguido das TT com

concentrações HPC de 2%, 4% e 6%. A orientação da janela que acarretou em maior ganho de calor foi a posição de 0° (claraboia), seguido das posições de 30°, 60° e 90°. Quando se compara a TT 6% HPC com a ODG, obtém-se aproximadamente 49% de redução nos ganhos de calor anual, na posição de 0°, o que evidencia a eficácia da camada termotrópica de HPC. Quando comparado com LE, a TT 6% HPC fornece uma redução de 33% das cargas térmicas anuais, demonstrando a superioridade no uso de uma tecnologia dinâmica.

#### 4.2. Carga de iluminação

A Figura 5 apresenta o consumo anual de energia elétrica (em kWh/m<sup>2</sup>) para todas as orientações analisadas.

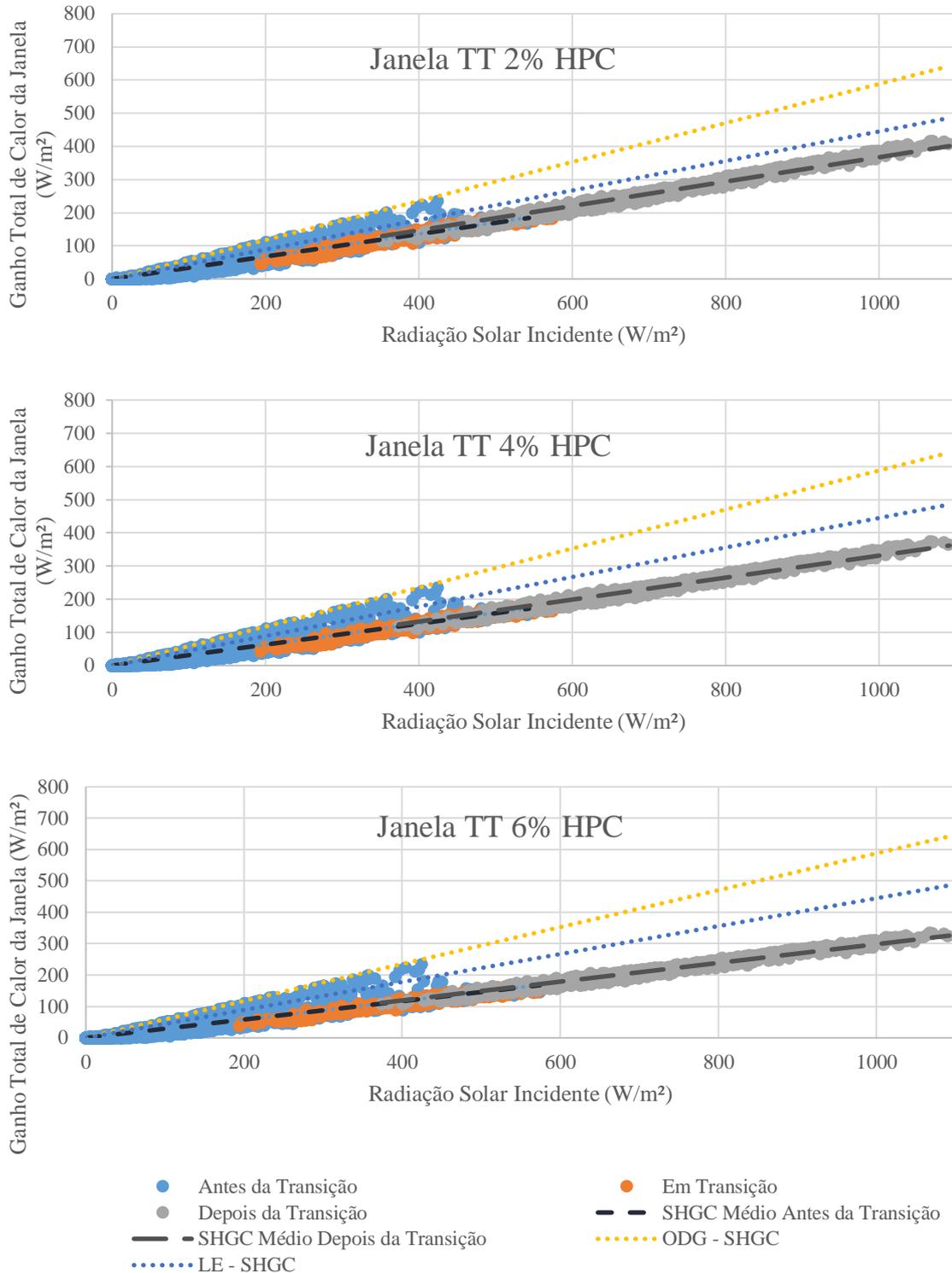


Estes resultados sintetizam o principal aspecto negativo das TT, que é o aumento da demanda de energia com iluminação. Para o pior caso (90°), a carga de iluminação da TT 6% HPC é 29,2 kWh/m<sup>2</sup>, sendo cerca de 49% maior do que a da ODG. Também se deve destacar que o consumo de energia no caso da LE é similar ao da ODG, com cargas de 15,1 kWh/m<sup>2</sup> e 14,9 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente, apresentando uma diferença de apenas 0,51% na situação de 90°. Na situação de claraboia (0°), a TT 6% HPC gera uma demanda de iluminação de 14,5 kWh/m<sup>2</sup>, sendo 16% maior quando comparado com a ODG e com a LE. Comparando as Fig. 4 e 5, observa-se que elas têm o comportamento oposto em relação ao ganho de calor.

#### 4.3. Análise do coeficiente de ganho de calor solar (SHGC)

A Figura 6 plota os coeficientes de ganho de calor solar (SHGC) da janela termotrópica para cada concentração de HPC analisada, comparando com os SHGC da ODG e da LE. O SHGC é determinado pela inclinação da reta entre os eixos do Ganho Total de Calor da Janela pelo eixo da Radiação Solar Incidente. As janelas são analisadas apenas para a situação de claraboia (0°C). Os pontos horários simulados são divididos em três grupos: antes da transição, na faixa de transição, e depois da transição. A faixa de temperatura de transição analisado é entre 40-50 °C.

Figura 6 – Coeficiente de ganho de calor solar (SHGC) para a janela termotrópica.



O SHGC obtido para a ODG é 0,59, enquanto que o SHGC da LE é 0,45. É possível notar que com o aumento da concentração de HPC, o SHGC da janela é reduzido, havendo maior disparidade entre o SHGC correspondente à antes da transição com o SHGC referente à depois da transição.

#### 4.4. Análise detalhada da TT 6% HPC

##### 4.4.1. Verão e inverno

Realizou-se uma análise detalhada da TT 6% HPC com inclinação de  $0^\circ$  para as estações de verão e de inverno. Para o período de verão foram selecionados os três dias mais quentes do ano, que correspondem aos dias 1, 2 e 3 de janeiro, no qual se atinge a máxima temperatura de  $34^\circ\text{C}$ . Para o período de inverno selecionou-se os três dias mais frios do ano, que correspondem aos dias 14, 15 e 16 de junho, quando ocorre a temperatura mínima de  $1^\circ\text{C}$ . Abaixo é apresentado o gráfico das temperaturas ambiente, interna e da janela (Figura 7a); a radiação solar incidente e o ganho de calor total da janela (Figura 7b) durante os períodos analisados. As linhas verdes horizontais no gráfico delimitam a faixa de temperatura de transição, entre  $40^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ .

Figura 7a – Temperatura ambiente, interna e da janela.

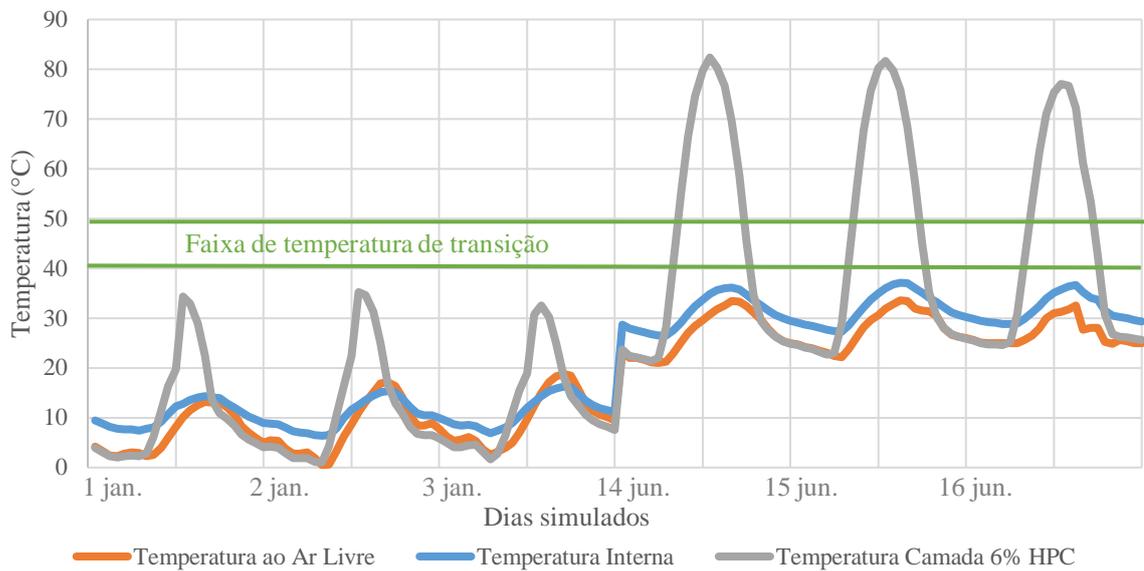
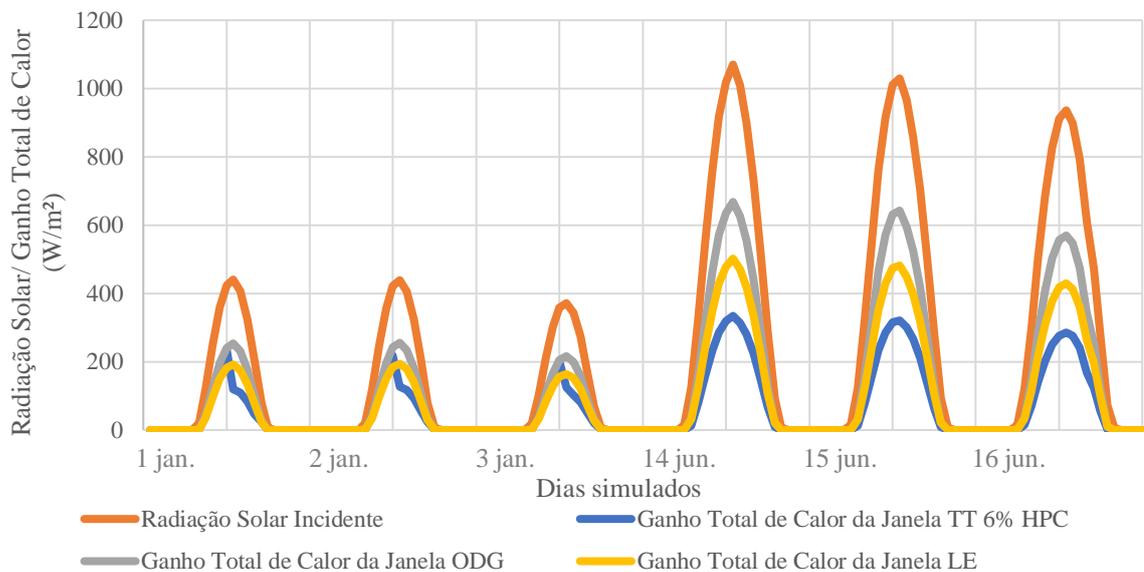


Figura 7b – Radiação solar incidente e ganho de calor total da janela.

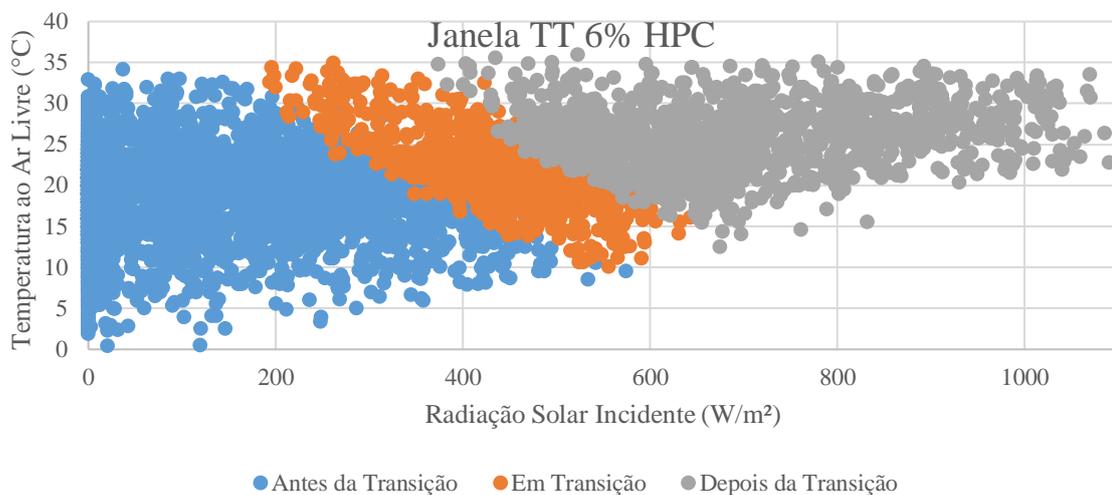


Durantes os dias mais frios, o uso da TT 6% HPC representou uma redução de 9% nos ganhos de calor na janela quando comparado com a LE, e redução de 30% quando comparado com a ODG. Para os dias mais quentes, a TT 6% HPC viabilizou uma redução nos ganhos de calor ainda mais significativa, com redução de 34% comparado com a LE, e de 50% em comparação com a ODG. A TT 6% HPC atinge o estado translúcido em 33 das 72 horas do período de verão analisado.

#### 4.4.2. Temperatura e radiação solar incidente

A Figura 8 exibe o conjunto dos pontos horários de dados para a temperatura do ar ambiente plotados em relação à radiação solar incidente na janela ( $0^\circ$ ).

Figura 8 – O estado da camada HPC sob efeitos da radiação solar e da temperatura ambiente.



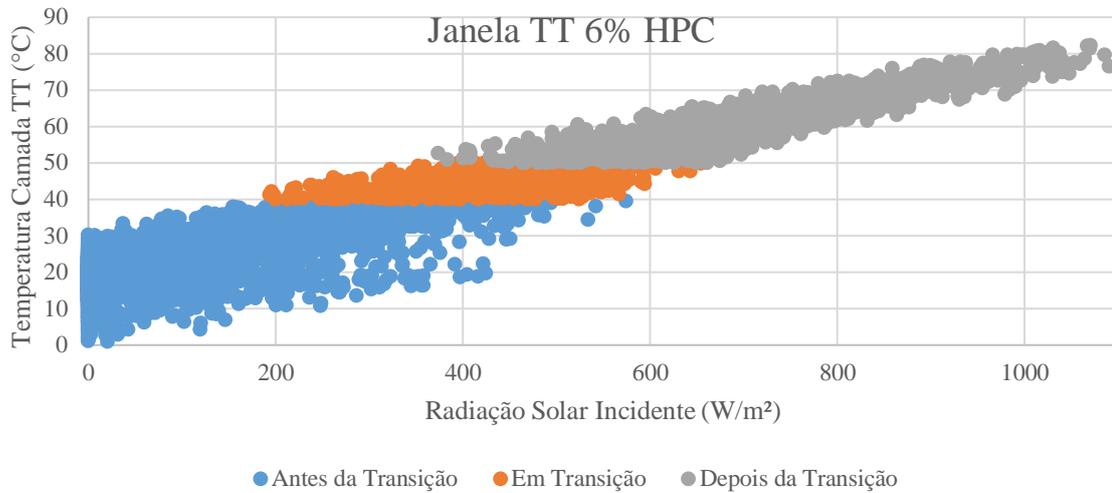
A TT 6% HPC em aproximadamente 1354 h se encontra em estado depois da transição, em 835 h está em transição, e nas 6571 h restantes da simulação anual, a janela se encontra em estado antes da transição.

Os resultados obtidos mostraram que a janela é transparente quando a radiação solar incidente é inferior a aproximadamente  $200 \text{ W/m}^2$  e para temperaturas ao ar livre inferiores a  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . A fase de transição ocorre para intensidades de radiação solar superiores a  $200 \text{ W/m}^2$  e para temperaturas ao ar livre superiores a  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . É possível notar que à medida que a intensidade de radiação solar aumenta, ocorre a diminuição da temperatura do ar ambiente necessária para que a janela se torne translúcida.

A Figura 9 apresenta o impacto da radiação solar incidente na temperatura da camada de HPC da janela.

Observa-se que a temperatura da camada de HPC aumenta em proporção direta à radiação solar incidente. A camada de HPC atinge a temperatura máxima de  $82 \text{ }^\circ\text{C}$  com radiação solar incidente de  $1070 \text{ W/m}^2$ .

Figura 9 – O efeito da radiação solar na temperatura da camada HPC.

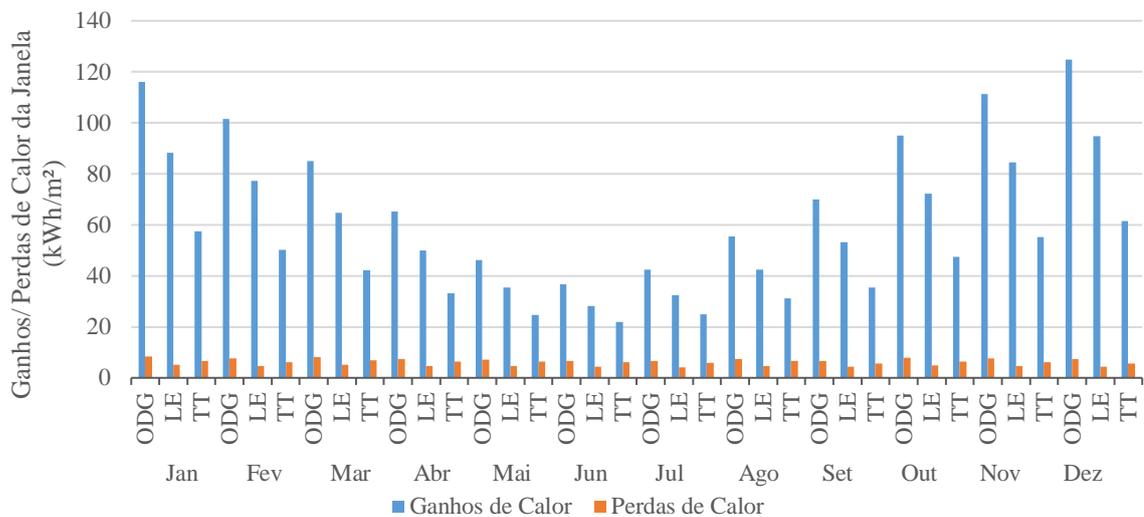


#### 4.4.3. Ganhos e perdas de calor através da janela

##### 4.4.3.1. Simulações mensais

A Figura 10 mostra os ganhos e as perdas de calor mensal para ODG, LE e TT 6% HPC.

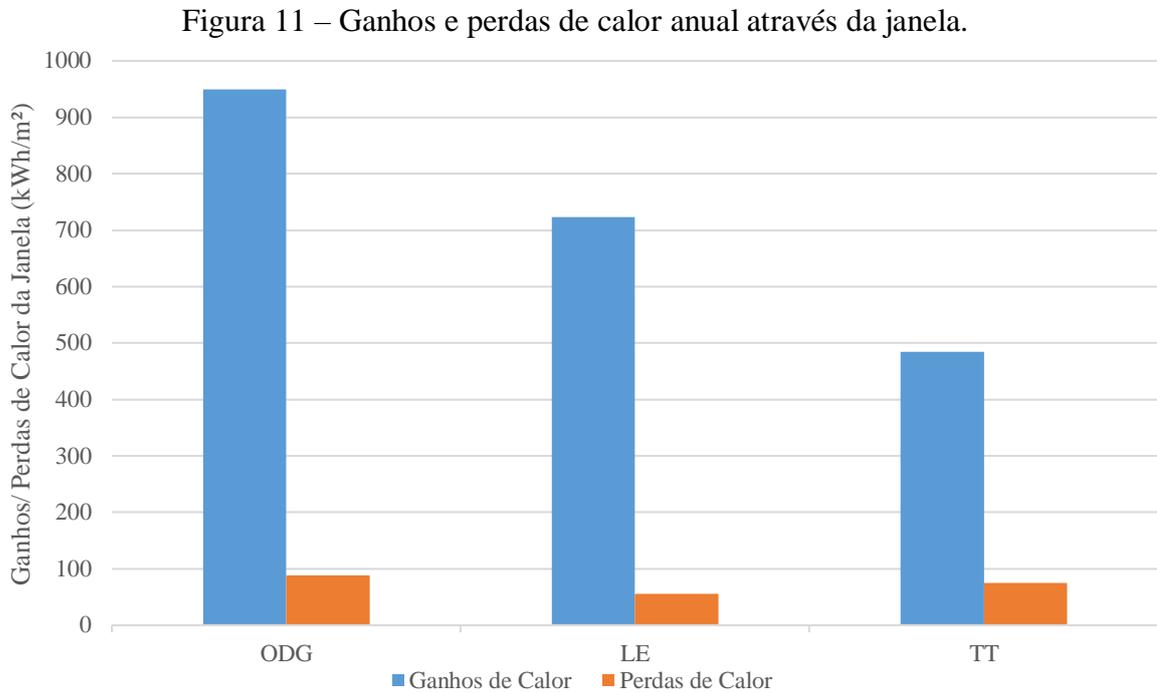
Figura 10 – Ganhos e perdas de calor mensal através da janela.



Ao contrário da dos ganhos de calor, as perdas de calor são causadas principalmente pelos processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação entre o ambiente interno e externo, sendo estes dominados transmitância térmica (*U-factor*). O maior ganho de calor para todas as janelas ocorreu no mês de dezembro. Para a ODG o ganho foi equivalente a 125 kWh/m<sup>2</sup>, para a LE se obteve 95 kWh/m<sup>2</sup>, e para a TT 6% HPC o ganho de calor foi igual a 61 kWh/m<sup>2</sup>. A maior perda de calor para a ODG ocorre no mês de janeiro com 8 kWh/m<sup>2</sup>. Para a LE e a TT 6% HPC, a maior perda de calor ocorre no mês de março, com 5 kWh/m<sup>2</sup> e 7 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente.

#### 4.5.1. Simulações anuais

A Figura 11 apresenta os ganhos e as perdas de calor anual através da janela.



A TT 6% HPC obteve a maior redução nos ganhos de calor anual. Em comparação com a LE, a redução nos ganhos foi de 33%, enquanto que para as perdas de calor houve aumento de 26%. Quando comparado com a ODG, a TT 6% HPC alcançou uma redução de 49% para os ganhos de calor, e redução de 15% para as perdas.

#### 4.5 Efeito da temperatura de transição

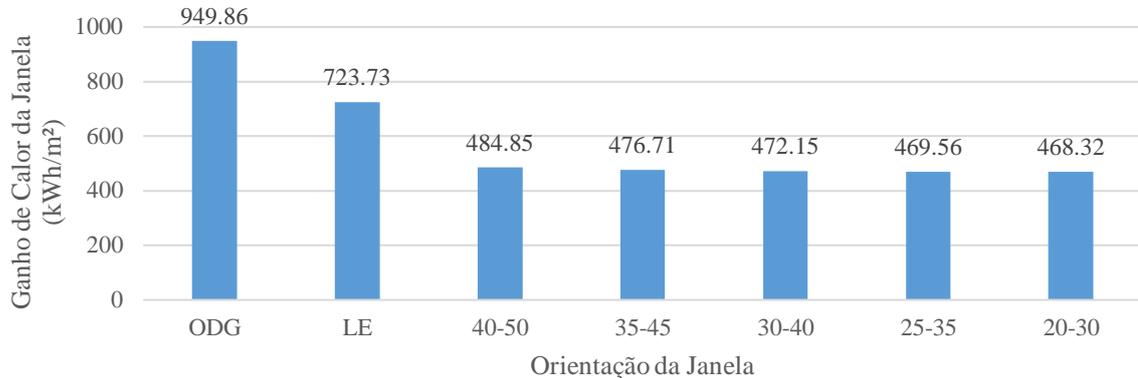
Analisou-se o impacto da temperatura de transição (TS) na TT 6% HPC na situação de claraboia (0°). Estudos mostraram que a adição de cloreto de sódio à mistura de HPC reduz a temperatura de transição (SEEBOTH, 2001). Foram realizadas simulações para as seguintes faixas de temperatura de transição: 40-50 °C, 35-45 °C, 30-40 °C, 25-35 °C e 20-30 °C.

##### 4.5.1. Ganho de calor através da janela

A Figura 12 apresenta os ganhos de calor anual através da TT 6% HPC para diferentes faixas de temperatura de transição (TS).

A maior redução de ganho de calor ocorre para a faixa de temperatura de 20-30 °C, no qual é obtido uma redução de 3% quando comparado com as temperaturas de transição entre 40-50 °C. Quando comparado com a LE, a redução dos ganhos de calor é de 35%, e em comparação com a ODG, a redução é de 51%. À medida que a faixa de temperatura de transição diminui, a TT permanece em estado translúcido por períodos maiores de tempo, diminuindo a transmissão de luz solar. Isto é benéfico para a redução de cargas de resfriamento, porém, ocorrerá um aumento com as cargas de aquecimento e de iluminação.

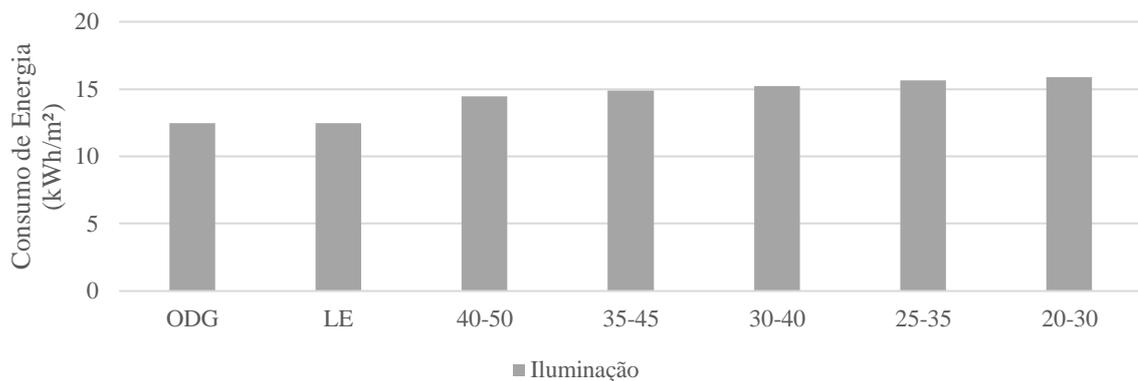
Figura 12 – Ganho de calor anual da janela para diferentes faixas de temperatura de transição.



#### 4.5.2. Carga de iluminação

A Figura 13 apresenta o consumo anual de energia elétrica (em kWh/m²) para todas as faixas de temperatura de transição analisadas.

Figura 13 – Consumo anual de energia elétrica para diferentes faixas de temperatura de transição.



Conforme a temperatura de transição é reduzida, ocorre um aumento da demanda de energia com iluminação, como previsto. A faixa de temperatura de transição 20-30 °C apresenta uma demanda com iluminação 10% maior quando comparado com a faixa de temperatura 40-50 °C. Em comparação com a LE e a ODG, o consumo de energia com iluminação é 27% maior. Em um projeto que seja utilizado janelas termotrópicas, é importante considerar diversos fatores, sendo os principais, a temperatura de transição e a sua relação com o clima predominante, a orientação do plano e a inclinação da janela.

## 5. CONCLUSÃO

A hidroxipropilcelulose (HPC) foi estudada como material para camada termotrópica de uma janela. Foram testadas as seguintes concentrações de HPC: 2%, 4% e 6%. As simulações foram realizadas através do software *EnergyPlus*, onde as janelas foram configuradas para diferentes posições: na vertical (90°), com inclinação de 60°, com inclinação de 30°, e na horizontal (0°). Também foram experimentadas diferentes faixas de temperatura de transição: 40-50 °C, 35-45 °C, 30-40 °C, 25-35 °C e 20-30 °C. A análise térmica foi executada para um pequeno escritório localizado na cidade de Porto Alegre, RS, de clima subtropical úmido.

Observou-se uma redução expressiva nos ganhos de calor da janela termotrópica com concentração de 6% de HPC para a posição de 0°, quando comparado com a ODG (49%) e com a LE (33%).

Analisando as concentrações de HPC, notou-se que quanto maior a concentração de HPC, maior é a redução de ganho de calor obtido através da janela. A TT 6% HPC apresenta ganhos de calor 21% menores quando comparado com a TT 2% HPC, e 10% menores em comparação com a TT 4% HPC.

Quanto as posições testadas para a janela, constatou-se que os maiores ganhos de calor ocorreram para a posição de claraboia (0°), enquanto que os menores ganhos foram para a posição vertical (90°). Para a TT 6% HPC na posição vertical, os ganhos de calor foram 67% menores quando comparado com a mesma janela na posição de claraboia.

Testando as diferentes faixas de temperatura de transição, percebeu-se que quanto menor é a temperatura de transição ( $T_s$ ), menores são os ganhos de calor da janela. Portanto, a maior redução dos ganhos de calor ocorreu para a faixa de temperatura 20-30 °C, no qual observou-se uma redução de 35% quando comparado com a LE, e de 51% em comparação com a ODG. Diminuindo a  $T_s$ , a janela termotrópica permanece em estado translúcido por períodos maiores de tempo, reduzindo a transmissão de luz solar, o que é benéfico para a redução das cargas de resfriamento, contudo, será gerado um aumento nas cargas de aquecimento e de iluminação. A carga de iluminação para a faixa de temperatura de transição 20-30 °C foi 10% maior quando comparado com a faixa de 40-50 °C.

Para análises futuras, sugere-se estudar os efeitos da janela termotrópica em um ambiente com condicionadores de ar, de modo a observar os impactos na demanda energética com as cargas de aquecimento e resfriamento, e melhor compreender a resposta térmica da janela em diferentes estações do ano, especialmente, no verão e inverno. Também é indicado realizar as simulações em localidades com climas diferentes, para verificar a resposta térmica da janela termotrópica em distintos padrões de iluminação solar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2. Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações.** Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3. Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social.** Rio de Janeiro. 2005.
- ALLEN, K., CONNELLY, K., RUTHERFORD, P., WU, Y. **Smart Windows - Dynamic control of building energy performance**, Energy and Buildings, v. 139, p. 535-546, mar. 17. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.093>>.
- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook of Fundamentals.** S-I ed. [s.l.]: W. Stephen Comstock, 2005.
- BDMEP – BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS DO INMET. **Dados Históricos.** 2022. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br>>. Acesso em 30 mar. 2022.
- CONNELLY, K., WU, Y., CHEN, J., LEI Y. **Design and development of a reflective membrane for a novel Building Integrated Concentrating Photovoltaic (BICPV) ‘Smart Window’ system**, Applied Energy, v. 182, p. 331-339, jul. 16. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.125>>.
- ENERGYPLUS, U.S.D. of E. **EnergyPlus™ Version 9.3.0 Documentation: InputOutputReference.** 2022. Disponível em: <<https://energyplus.net/documentation>>. Acesso em 27 mar. 2022.
- GAO, Y., LUO, H., ZHANG, Z., KANG, L., CHEN, Z., DU, J., KANEHIRA, C., CAO, C. **Nanoceramic VO<sub>2</sub> thermocromic smart glass: A review on progress in solution processing**, Nano Energy, v. 1, p. 221-246, mar. 12. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2011.12.002>>.
- GLADEN, A., DAVIDSON, J., MANTELL, S. **Selection of thermotropic materials for overheat protection of polymer absorbers**, Solar Energy, v. 104, p. 42-51, out. 13. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.026>>.
- MENON, A., KOLHATKAR, S., JADHAV, U. **Energy efficient glass buildings in hot & dry climate**, Indian Journal of STEAM, v. 1, ago. 21. Disponível em: <<https://dyatiluniversitypune.edu.in/archives/Paper8.pdf>>.
- NFRC, National Fenestration Rating Council. **ANSI/NFRC 100: Procedure for Determining Fenestration Product Solar Heat Gain Coefficient and Visible Transmittance at Normal Incidence.** Greenbelt, 2014.
- RESCH, K., WALLNER, G. **Thermotropic layers for flat-plate collectors - A review of various concepts for overheating protection with polymeric materials**, Solar Energy

Materials and Solar Cells, v. 93, p. 119-128, set. 08. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.09.004>>.

SEEBOTH, A., RUHMANN, R., MÜHLING, O. **Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control**, Materials, v. 3, p. 5143-5168, dez. 10. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma3125143>>.

SEEBOTH, A., SCHNEIDER, J. **Natural Thermotropic Materials For Solar Switching Glazing**, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, v. 32, p. 231-237, mar. 01. Disponível em: <[https://doi.org/10.1002/1521-4052\(200103\)32:3<231::AID-MAWE231>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1521-4052(200103)32:3<231::AID-MAWE231>3.0.CO;2-N)>.

SIGMA-ALDRICH. **Hidroxypropyl cellulose**. 2022. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/>>. Acesso em 10 abr. 2022.

**APÊNDICE**

**Apêndice A1 – Consumo de energia elétrica para TT 6% HPC na posição de clarabóia.**

Figura A1a – Consumo mensal.

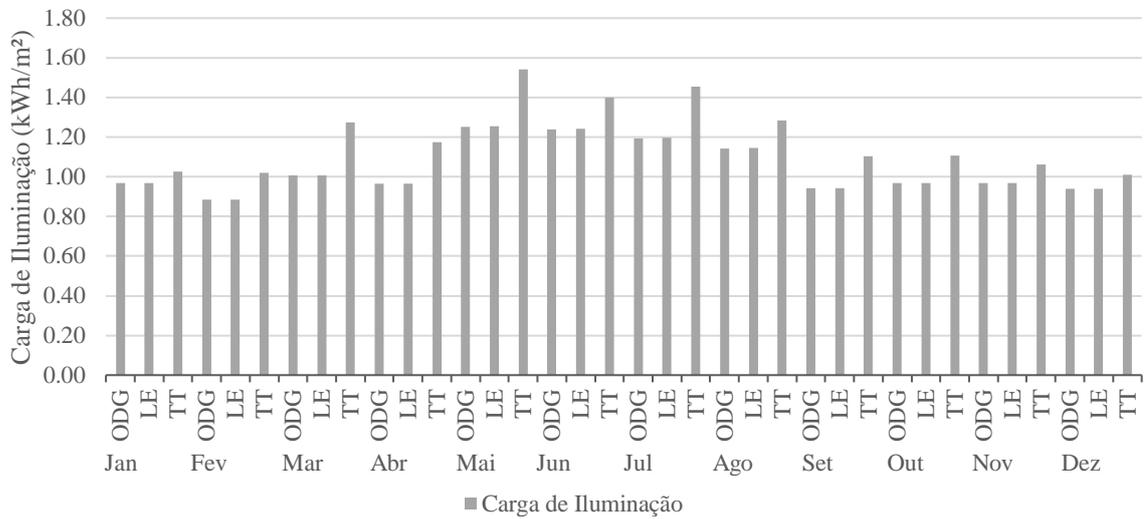
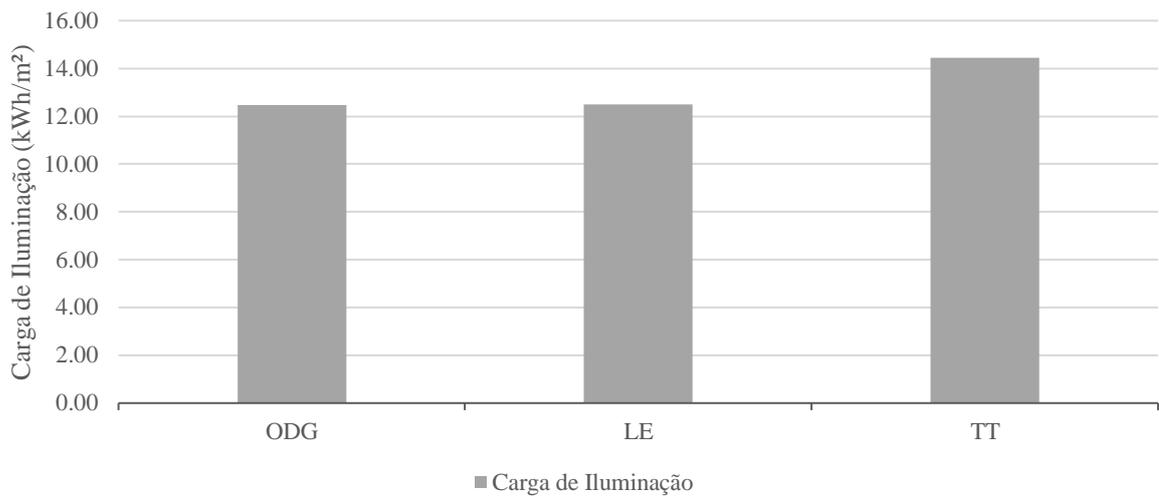
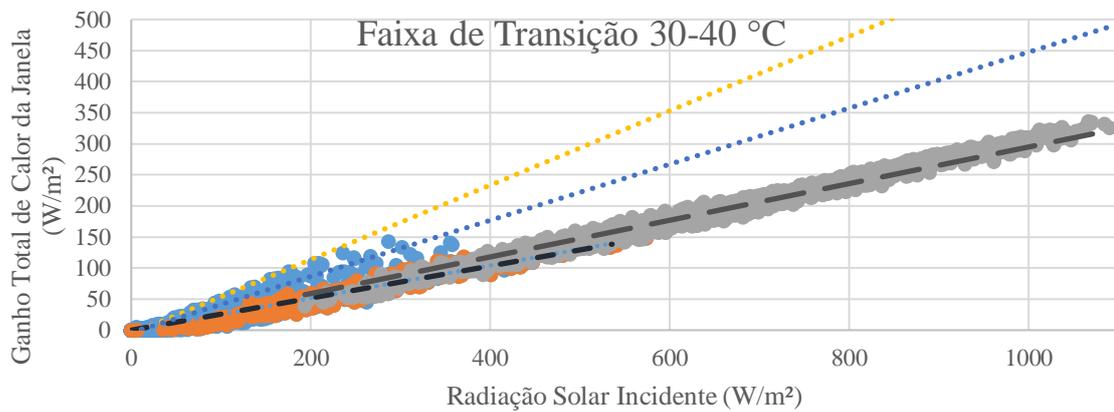
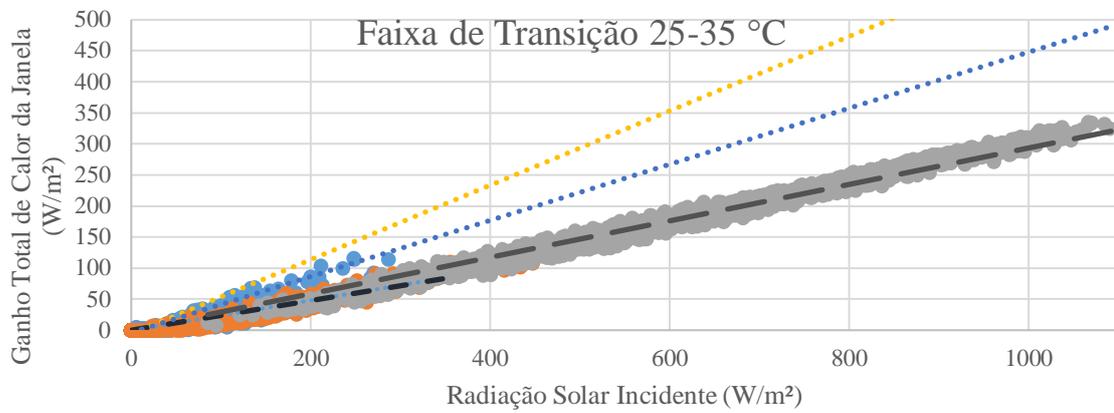
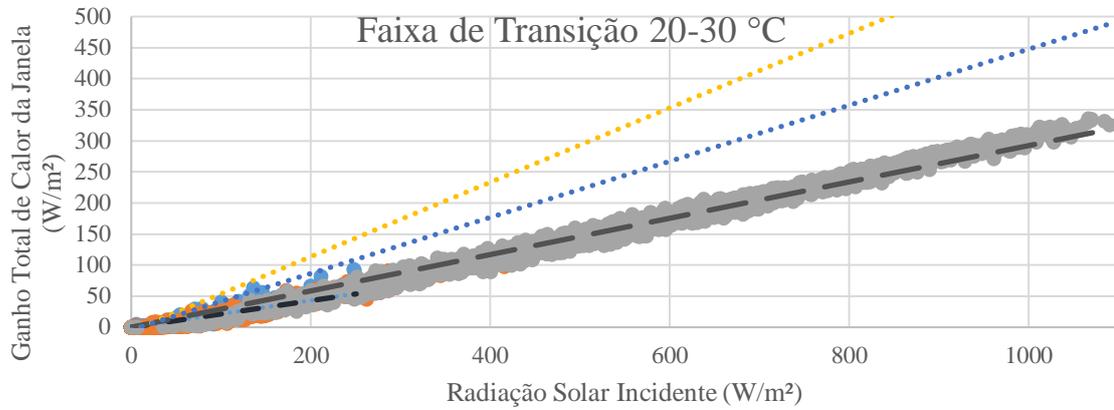
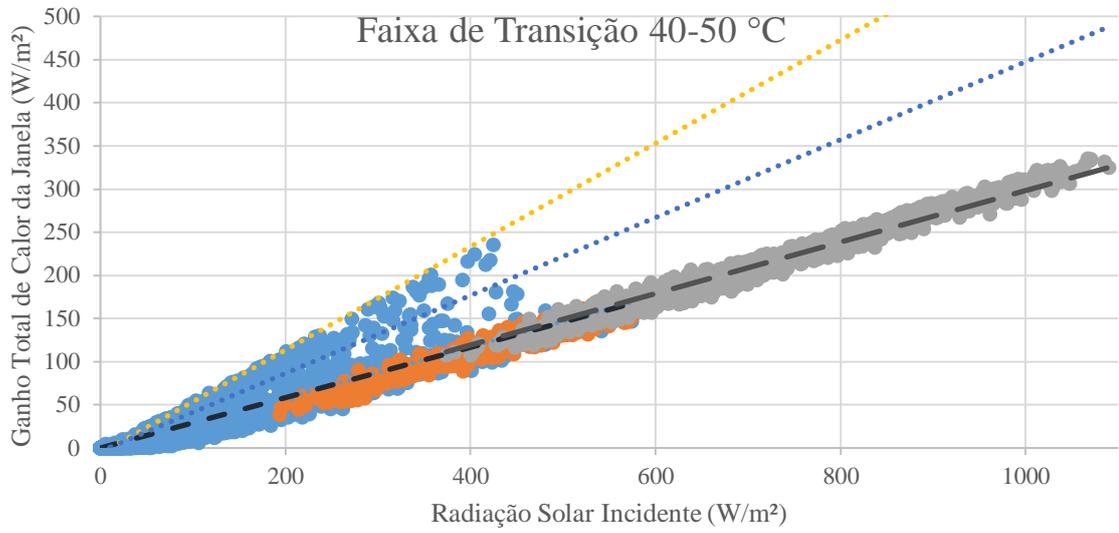
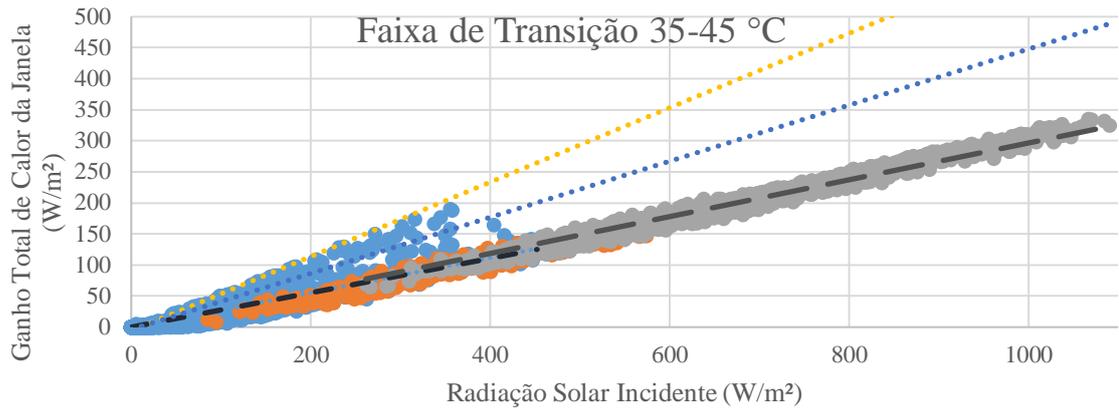


Figura A1b – Consumo anual.



**Apêndice A2 – Coeficiente de ganho de calor solar (SHGC) da TT 6% HPC na posição de clarabóia para diferentes faixas de temperatura de transição.**





- |                                  |                                 |
|----------------------------------|---------------------------------|
| ● Antes da Transição             | ● Em Transição                  |
| ● Depois da Transição            | — SHGC Médio Antes da Transição |
| — SHGC Médio Depois da Transição | ●●●● ODG - SHGC                 |
| ●●●● LE - SHGC                   |                                 |

**ANEXOS**

**Anexo 1: Propriedade térmica dos materiais utilizados na edificação. Fonte: ASHRAE, 2005.**

<b>Material</b>	<b>Condutividade [W/mK]</b>	<b>Densidade [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Calor específico [J/kgK]</b>
Espuma de concreto	0,12	320	900