

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

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO DE VIDRO TERMOTRÓPICO  
APLICADO A UM JARDIM DE INVERNO

por

Arthur Adriano Delecolle

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, abril de 2023.

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Delecolle, Arthur Adriano  
Análise do Comportamento Energético de Vidro  
Termotrópico Aplicado a um Jardim de Inverno / Arthur  
Adriano Delecolle. -- 2023.  
26 f.  
Orientadora: Letícia 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, 2023.

1. Janela termotrópica. 2. Janela inteligente. 3.  
Eficiência energética. 4. Hidroxipropilcelulose. 5.  
EnergyPlus. I. Rodrigues, Letícia Jenisch, orient.  
II. Título.

Arthur Adriano Delecolle

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO DE VIDRO TERMOTRÓPICO  
APLICADO A UM JARDIM DE INVERNO

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

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Darci Barnech Campani

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Letícia Jenisch Rodrigues (Presidente)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Simone Ramires

Porto Alegre, abril de 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Por me acompanhar ao longo de toda a trajetória da minha formação, agradeço aos meus pais, Vera e Didier, às minhas irmãs, Nina e Ana, e ao meu irmão, Arnaud. À minha namorada Priscila, minha gratidão pelo apoio sincero e parceria verdadeira ao longo de todos os desafios dessa conquista. Agradeço também à UFRGS por ter me proporcionado um ambiente onde, além de conhecimento científico, colecionei memórias, amizades, e enriqueci meus valores como ser humano.

Delecolle, Arthur Adriano. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO DE VIDRO TERMOTRÓPICO APLICADO A UM JARDIM DE INVERNO**. 2023. XXp. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## RESUMO

A constante busca pelos benefícios proporcionados por grandes áreas envidraçadas, seja com o intuito de integração e interação da edificação com o ambiente externo, ou para maximizar a quantidade de iluminação natural do ambiente da edificação residencial ou comercial, é um desafio no que diz respeito à eficiência energética de uma edificação. É necessária a realização de um projeto adequado para mitigar o impacto que grandes áreas de vidro exercem sobre a demanda energética necessária para estabelecer-se o conforto térmico no interior da edificação. Uma das alternativas é a utilização de camadas de materiais termotrópicos em conjunto com os vidros para compor uma janela, as chamadas *smart windows*. Materiais termotrópicos exploram a propriedade de termocromismo, que é a variação dinâmica da refletância e transmitância da luz solar, para atingir-se algum objetivo. No caso de edificações o objetivo é reduzir o ganho de calor solar em benefício da eficiência energética do sistema. Nesta monografia, explora-se os efeitos da aplicação de grandes áreas de janelas termotrópicas em um jardim de inverno residencial, na cidade de Porto Alegre, RS, de clima subtropical úmido. As janelas são simuladas com camada de hidroxipropilcelulose com temperatura de transição de 35 °C entre o estado transparente e o estado translúcido, dispostas em planos com inclinação de 0° e de 90° em relação à superfície. A maior variação de temperatura interna aferida dá-se no extremo de verão, com uma diminuição de até 9,5 °C obtida pela janela termotrópica em relação à janela de vidro duplo. Registra-se uma grande predominância do estado translúcido frente ao estado transparente durante os períodos mais quentes do ano, chegando-se na média de 10h por dia, enquanto nos períodos mais frios a média é de 4h diárias. O valor mais expressivo de ganho de calor deu-se na janela de 0° de inclinação, na qual o vidro termotrópico apresentou uma redução anual de 55% em relação ao vidro duplo comum e de 45% em relação ao vidro *Cool Lite*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Janela termotrópica; janela inteligente; eficiência energética; hidroxipropilcelulose; *EnergyPlus*.

Delecolle, Arthur Adriano. **ENERGY BEHAVIOR ANALYSIS OF THERMOTROPIC GLASS APPLIED TO A WINTER GARDEN**. 2023. XXp. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## **ABSTRACT**

The seeking for the benefits provided by large glazed areas, either to integrate and interact the building with the external environment or to maximize the amount of natural lighting in the residential or commercial building environment, is an excellent challenge regarding the energy efficiency of a building. A good building design is a primary necessity if one intends to mitigate the impact of large glazing areas on the necessary energy demand to establish thermal comfort inside a building. One of the alternatives to reach this goal is using layers of thermotropic materials combined with glass layers to compose a window, the so-called intelligent windows. Thermotropic materials exploit the property of thermochromism. It is the ability to dynamically variate the reflectance and transmittance of sunlight, to achieve some specific goal. Building design aims to reduce solar heat gain, benefiting the system's energy efficiency. This monograph intends to explore the effects of applying large thermotropic windows in a residential winter garden with large glazed areas in Porto Alegre, RS, with a humid subtropical climate. They are made with a 6% concentration hydroxypropylcellulose layer. The transition temperature from transparent to translucent state is established at 35 °C. Building performance predictions are performed for 0° and 90° inclination windows. The most significant variation in internal temperature measured occurred in the summer extreme, with a decrease of up to 9.5 °C obtained by the thermotropic window concerning the double-glazed window. There was a significant predominance of the translucent state compared to the transparent state during the hottest periods of the year, reaching an average of 10 hours daily. In the coldest periods, the average was 4 hours a day. The most expressive heat gain value occurred at the 0° inclination window, where thermotropic glass showed an annual reduction of 55% compared to standard double-glazing windows and a 45% reduction compared to Cool Lite glass windows.

**KEYWORDS:** Thermotropic windows; smart windows; energy efficiency; hydroxypropylcellulose; *EnergyPlus*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Janela abaixo da $T_s$ ; (b) Janela acima da $T_s$ . (Fonte: ALLEN, 2017).....	3
Figura 2. Diagrama esquemático do ganho de calor solar em uma janela. (Fonte: Adaptado de MENON, 2021).....	4
Figura 3. Fluxograma de execução da metodologia.....	6
Figura 4. Representação da residência com jardim de inverno (a) e representação da face leste da residência (b). .....	7
Figura 5. Temperatura operativa média do dia 1 a 3 de janeiro.....	9
Figura 6. Temperatura operativa média do dia 14 a 16 de junho.....	9
Figura 7. Comparação entre temperaturas médias internas e externas entre os dias 1 a 3 de janeiro. ....	10
Figura 8. Comparação entre temperaturas médias internas e externas entre os dias 14 a 16 de junho. ....	10
Figura 9. Comparação entre temperaturas internas e externas ao longo de cada um dos dias selecionados de inverno e verão.....	10
Figura 10. Comparação entre temperaturas médias interna, externa e da camada de HPC dos dias 1 a 3 de janeiro. ....	11
Figura 11. Comparação entre temperaturas médias interna, externa e da camada de HPC dos dias 14 a 16 de junho. ....	11
Figura 12. Comparação entre temperaturas médias interna, externa e da camada de HPC ao longo de cada um dos dias selecionados de inverno e verão.....	11
Figura 13. (a) Comparação dos ganhos de calor anuais; (b) Comparação das perdas de calor anuais. ....	12
Figura 14. Comparação dos ganhos de calor anuais para as diferentes orientações das janelas... ..	12
Figura 15. Comparação das perdas de calor anuais para as diferentes orientações das janelas... ..	13
Figura 16. (a) Radiação solar incidente x Ganho de calor da janela $T < T_s$ (b) Radiação solar incidente x Ganho de calor da janela $T \geq T_s$ .....	13
Figura 17. Radiação solar incidente x Temperatura da camada HPC ao longo de um ano.. ..	14
Figura 18. (a) Radiação solar incidente x Temperatura da camada HPC do dia 1 a 3 de janeiro (b) Radiação solar incidente x Temperatura da camada HPC do dia 14 a 16 de junho.....	14

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$T_s$	Temperatura de transição	[°C]
$T_{sol}$	Transmitância Solar	Adimensional
$\alpha$	Absortância Solar	Adimensional
L	Número de camadas de vidro	Adimensional
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> K]
k	Coefficiente de condutividade térmica	[W/mK]
N	Fração de fluxo para o ambiente	Adimensional
E	Radiação de ondas longas incidente na janela	[W/m <sup>2</sup> ]
$\theta$	Temperatura da face	[°C]
S	Radiação absorvida pela face do vidro proveniente de fontes internas	[W/m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	Emissividade da face	Adimensional

### Abreviaturas e acrônimos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
HPC	Hidroxipropilcelulose
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LCST	Temperatura de saturação crítica inferior
NFRC	<i>National Fenestration Rating Council</i>
SHGC	Coefficiente de ganho de calor solar

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>2</b>
2.1	MATERIAIS TERMOTRÓPICOS	2
2.1.1	Materiais termotrópicos aplicados à janelas	3
2.1.2	Hidroxipropilcelulose (HPC)	3
2.2	COEFICIENTE DE GANHO DE CALOR SOLAR (SHGC)	4
2.3	ENERGYPLUS	4
2.3.1	<i>Software EnergyPlus</i>	4
2.3.2	Balço de energia nas janelas	5
2.4	ARQUIVO CLIMÁTICO	6
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>6</b>
3.1	EDIFICAÇÃO PARA SIMULAÇÃO	6
3.2	PROPRIEDADE DOS MATERIAIS	7
3.3	INFILTRAÇÃO, ILUMINAÇÃO, TEMPO DE EXECUÇÃO E OCUPAÇÃO	8
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>8</b>
4.1	ANÁLISE DE TEMPERATURAS DA ZONA TÉRMICA	8
4.1.1	Análise comparativa de temperaturas operativas para as diferentes composições de janelas	9
4.1.2	Análise das temperaturas internas e externas	9
4.1.3	Análise das temperaturas internas, externas e da camada de HPC	11
4.2	COMPARAÇÃO DE GANHOS DE CALOR ANUAIS	12
4.3	ANÁLISE DO COEFICIENTE DE GANHO DE CALOR SOLAR (SHGC)	13
4.4	ANÁLISE DA CAMADA TERMOTRÓPICA DE HPC	14
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>16</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de energia e seu consequente consumo têm se mostrado um dos pontos críticos para o desenvolvimento da sociedade, seja em escala global, nacional ou regional. Tratando-se de uma indústria de grande peso para o desenvolvimento social, a construção civil é responsável pelo consumo de uma parcela considerável da energia que temos disponível. Segundo Allen (2017), as edificações são responsáveis pelo consumo de 40% da energia na União Europeia, e consequentemente contribuem com cerca de 36% das emissões de carbono. Chou (2014), estima que 30% da energia global é consumida pelo setor de construção civil. O desenvolvimento de edificações mais eficientes é uma alternativa chave para gerar economias substanciais de energia e consequentes benefícios ao longo do desenvolvimento de nossa civilização. Edificações que sejam adequadamente projetadas e operadas podem levar à uma diminuição na energia que deve ser adicionada ou removida de um espaço pelo sistema para fornecer o desejado nível de conforto térmico dentro do espaço.

Segundo Allen (2017), o vidro termotrópico é uma promissora área de pesquisa e uma tecnologia que também se enquadra nesse âmbito, pois tem o potencial de melhorar a eficiência energética das edificações regulando dinamicamente a quantidade de luz e calor do ambiente interno. Ele pode variar suas propriedades ópticas em resposta a mudanças de temperatura, ajudando a reduzir o consumo de energia para iluminação, aquecimento e resfriamento. Além do potencial de aumentar o conforto térmico do ambiente, possui a capacidade de melhorar a ergonomia para os ocupantes do ambiente em outros âmbitos, tais quais redução do brilho e aumento da privacidade. De maneira geral, o vidro termotrópico tem o potencial de contribuir substancialmente para um projeto de construção eficiente.

O vidro termotrópico ganhou grande atenção nos últimos anos devido justamente à sua capacidade de alterar suas propriedades ópticas em resposta a mudanças de temperatura, alternando do estado transparente para translúcido. Esta propriedade única levou a uma ampla gama de aplicações potenciais, incluindo o foco deste trabalho, janelas mais eficientes energeticamente. O termo “vidro inteligente” originou-se na década de 1980, do inglês *smart windows*, utilizado por Granqvist (1986) para descrever uma janela capaz de alterar dinamicamente suas propriedades ópticas.

Apesar do alto custo envolvido inicialmente na confecção de materiais termotrópicos, esta solução mostra-se promissora à medida que surgem novas soluções para conferir tal propriedade aos materiais. Allen (2017) pesquisou o uso de hidroxipropilcelulose (HPC) para janelas termotrópicas, obtendo 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. Atualmente, a solução mais promissora para janelas termotrópicas apresenta-se constituída pela matriz polimérica de HPC alocada entre lâminas de vidro.

Neste trabalho de conclusão de curso, houve o intuito de se explorar os efeitos da aplicação de grandes áreas de janelas termotrópicas confeccionadas com camada de HPC e com temperatura de transição ( $T_s$ ), do estado transparente para o estado translúcido, de 35 °C, em um jardim de inverno residencial, na cidade de Porto Alegre, RS, de clima subtropical úmido. Através da análise térmica realizada no software *EnergyPlus*, esperava-se que as janelas termotrópicas empregadas impactassem positivamente na eficiência energética da residência, possibilitando assim redução nas cargas de resfriamento, além de conferir outros benefícios como próprio aumento da privacidade do ambiente.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MATERIAIS TERMOTRÓPICOS

Segundo Resch (2008), são chamados de termotrópicos os materiais que possuem a capacidade de reduzir a visibilidade e a transmissão solar ao atingirem temperaturas superiores à temperatura de saturação crítica inferior (LCST) ou, como definido neste trabalho, temperatura de transição ( $T_s$ ). Tais comportamentos podem ser induzidos pela formação de diferenças locais no índice de refração por separação de fases ou mudança no índice de refração de um ou mais componentes. Este é o caso de misturas poliméricas termotrópicas, hidrogéis termotrópicos e sistemas termotrópicos compostos por polímeros termotrópicos incorporados em domínios fixos (RESCH, 2008).

No caso das misturas poliméricas termotrópicas, uma matriz polimérica reticulada compreende um polímero termoplástico. Abaixo da  $T_s$ , ambos polímeros possuem índice de refração semelhante, conferindo transparência à mistura. Na medida em que a temperatura se eleva, eventualmente ultrapassando a  $T_s$ , há alteração nos índices de refração dos componentes e consequente disparidade entre os mesmos, resultando na dispersão da luz.

Os hidrogéis termotrópicos por sua vez são compostos por redes de polímeros reticulados, absorventes de água, e dentro de suas estruturas encontram-se variados graus de grupos hidrofílicos e hidrofóbicos. São redes poliméricas entrecruzadas química ou fisicamente, preenchidas com um conteúdo adequado de água (ou algum determinado solvente). Basicamente, em baixas temperaturas a solução aquosa é dissolvida de forma homogênea no nível molecular, de modo que um estado transparente é alcançado. Acima da  $T_s$ , domínios de dispersão são formados por uma agregação dos polímeros e/ou pela separação da água livre (ou solvente) da rede polimérica, tornando a camada difusa à luz.

Em geral, os polímeros são incompatíveis uns com os outros como resultado da baixa entropia da mistura e da energia positiva entre eles. Como exceções a esta regra, pode-se citar sistemas metaestáveis, parcialmente miscíveis, que exibem um baixo valor de LCST (RESCH, 2008). Grupos hidrofílicos são atraídos por moléculas de água e tendem a ser dissolvidos por ela; enquanto o contrário ocorre com os grupos hidrofóbicos, sendo estes repelidos por moléculas de água. Em baixas temperaturas (abaixo da  $T_s$ ), o polímero é hidrofílico, observando-se a ocorrência de ligações de hidrogênio entre polímero e moléculas de água, resultando em uma dissolução homogênea à nível molecular e consequentemente um estado transparente, isotrópico e transmissor de luz. Ao elevar-se a temperatura (acima da  $T_s$ ), as ligações de hidrogênio entre polímero e moléculas de água é enfraquecida, gerando interações hidrofóbicas que resultam na separação de fases entre água e a rede polimérica. Assim, atingido um nível significativo de disparidade entre os índices de refração das duas fases do sistema, tem-se uma transição do estado transparente para o estado translúcido, com um efeito “nublado” (RESCH, 2008). Ressalta-se que o grau de translucidez atingido em temperaturas acima da  $T_s$  pode ser manipulado, através de ajustes na composição do sistema, tais quais a proporção de copolímeros, sais e tensoativos (SEEBOTH *et al.*, 2010)

Os polímeros termotrópicos incorporados em domínio fixo por sua vez se tratam de um sistema com domínio de dispersão, homogeneamente disperso, incorporado em uma matriz polimérica transparente, como, por exemplo, resina. A matriz possui índice de refração constante tanto acima quanto abaixo da  $T_s$ , e mantendo-se em estado sólido. Em temperaturas inferiores à  $T_s$ , ambos os domínios, de dispersão e da matriz, possuem índices de refração semelhantes, conferindo transparência ao sistema. Em temperaturas superiores à  $T_s$ , ocorre alteração no índice

de refração das partículas do domínio de dispersão, resultando na disparidade entre este e o da matriz polimérica, e a consequente dispersão da luz (GLADEN, 2013).

### 2.1.1 Materiais termotrópicos aplicados à janelas

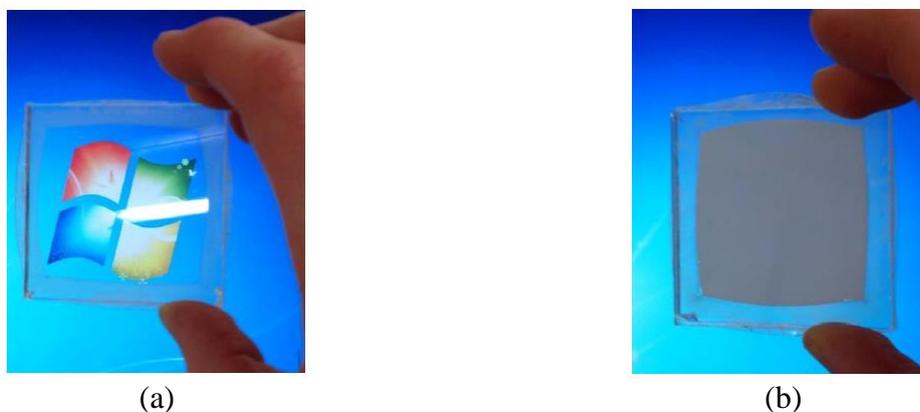
Além das premissas básicas inerentes a quaisquer materiais para aplicação em janelas, tais como custo relativamente baixo e potencial de utilização em grandes áreas, Allen (2017) estipula requisitos necessários para materiais termotrópicos serem selecionados para confecção de janelas, sendo os principais pontos de atenção mencionados na lista abaixo:

- Transmitância > 85% no estado transparente e transmitância < 15% no estado translúcido;
- Reversibilidade de fase com baixa histerese, que é durável e reproduzível 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;

### 2.1.2 Hidroxipropilcelulose (HPC)

Tendo em vista as características desejadas e o estado atual das pesquisas, selecionou-se, com base em Connely (2016), a hidroxipropilcelulose (HPC) como material para a camada termotrópica das janelas simuladas, com o processo de sintetização da membrana de HPC descrito por Allen (2017). A hidroxipropilcelulose, inicialmente na forma de pó esbranquiçado (SIGMA-ALDRICH, 2022), foi dissolvida em água aquecida e então adicionadas à solução gelificante aquecida com agitação. A solução resultante foi moldada entre duas chapas 5 x 5 cm de vidro branco com baixo teor de ferro, com 4 mm de espessura e a membrana de 0,5 mm como espaçador. Foram sintetizadas três concentrações de HPC para as membranas, dentre elas a de maior concentração de HPC, com 6%, que é o caso de interesse deste trabalho. O protótipo para ensaio da janela termotrópica com camada de HPC é mostrado abaixo em ambos estados: transparente (Figura 1a) e translúcido (Figura 1b).

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



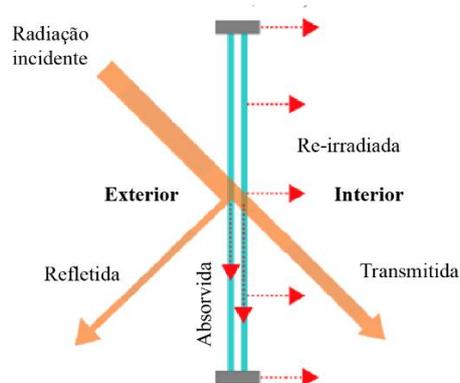
## 2.2 COEFICIENTE DE GANHO DE CALOR SOLAR (SHGC)

O Coeficiente de Ganho de Calor Solar (SHGC – *Solar Heat Gain Coefficient*) é uma medida da quantidade de radiação solar que passa através de uma janela ou outro sistema de envidraçamento. Ele representa a fração da radiação solar que entra em um edifício através da janela e é expressa como um número entre 0 e 1. Um SHGC mais alto significa que mais calor solar é transmitido através da janela para o interior do edifício.

O SHGC é de grande importância a análise de janelas pois ele afeta a eficiência energética do sistema. Janelas com alto SHGC permitem que mais radiação solar entre no edifício, o que pode aumentar a carga de resfriamento nos meses de verão e diminuir a carga de aquecimento nos meses de inverno. Por outro lado, janelas com baixo SHGC bloqueiam mais radiação solar, o que pode reduzir os custos de resfriamento no verão, mas aumentar os custos de aquecimento no inverno. Ao analisar o SHGC das janelas, arquitetos, engenheiros e construtores podem tomar decisões informadas sobre as janelas a serem instaladas.

Esta fração de radiação que entra no ambiente através da janela é composta pela porção de radiação solar absorvida ( $A_k$ ) que é então re-irradiada, transmitida por condução ou convecção para o ambiente e pela transmitância solar ( $T_{sol}$ ), que corresponde à fração da irradiação solar incidente que é diretamente transmitida para o interior do edifício como radiação. O ganho solar em uma janela, assim como as respectivas porções que compõem a fração dessa radiação, são ilustrados no diagrama da Figura 2

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



O SHGC, portanto, é expresso da seguinte maneira (ANSI/NFRC 100, 2014)

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

na qual  $N_i$  é a fração de fluxo para o interior,  $\alpha_i$  é a absorvância solar de cada camada, sendo  $L$  o número de camadas, e  $\theta$  é o ângulo de incidência da radiação ( $^\circ$ ).

## 2.3 ENERGYPLUS

### 2.3.1 Software EnergyPlus

O programa utilizado para as simulações é o *software EnergyPlus* (2017) desenvolvido e distribuído pelo Departamento de Energia do Estados Unidos (*U.S. Department of Energy*, 2021), e utiliza o balanço de energia para as cargas térmicas e a condução de calor se dá através dos elementos da edificação, de forma transiente, assim como funções de transferência por condução, convecção e radiação como forma de cálculo. São declarados intervalos de tempo (*timesteps*), posição geográfica da edificação com respectivos arquivos climáticos extraídos do BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e demais condições de contorno.

### 2.3.2 Balanço de energia nas janelas

Para calcular o equilíbrio energético das janelas, o *EnergyPlus* usa um conjunto complexo de algoritmos e equações de transferência de calor que levam em conta vários fatores, como radiação solar, convecção, radiação e condução. No *EnergyPlus*, o equilíbrio energético de uma janela é calculado com base no ganho de calor solar através da janela, nas perdas térmicas devido à condução e convecção e na transferência de calor radiante entre a janela e o ambiente ao redor. O *software EnergyPlus* também considera o efeito da orientação da janela e do ângulo de incidência do sol no equilíbrio energético das mesmas.

Propriedades como transmitância solar, refletância e absortância das camadas determinam a radiação solar transmitida pelos vidros assim como a radiação solar absorvida em cada camada. A transmitância visível, por sua vez, impacta na iluminância da luz do dia e é utilizada para cálculo da mesma. Aspectos como radiação solar absorvida entram no cálculo do balanço térmico da janela, que determina a temperatura da superfície interna e consequentemente o ganho de calor para a zona térmica à qual a janela pertence. Toda a radiação solar transmitida é absorvida pelas superfícies da zona interior afetando o balanço energético e corroborando para o equilíbrio térmico da zona.

Para determinar-se as temperaturas de ambas as faces do vidro que compõe a janela é necessário que o software realize a resolução das equações de balanço de calor, a cada intervalo de tempo pré-determinado. A resolução das equações de balanço de calor também envolve algumas predeterminações, tais quais: camadas de vidro suficientemente finas para que o armazenamento de calor no vidro possa ser desprezado, fluxo de calor perpendicular ao vidro e unidimensional, radiação de onda curta pode sofrer distribuição igual em ambas camadas das faces e as faces consideradas isotérmicas, camadas de vidro opacas à radiação infravermelha para maior parte das categorias de vidros.

As equações para os vidros são apresentadas abaixo, nas quais  $N$  é o número de camadas de vidro, sendo que para vidro simples,  $N = 1$ .

$$E_0 \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \sigma \theta_1^4 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_0(T_0 - \theta_1) + S_1 = 0 \quad (2)$$

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

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

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

nas quais,  $E$  representa a radiação de ondas longas incidente na janela ( $\text{W/m}^2$ ),  $\varepsilon$  representa a emissividade da face,  $\theta$  representa a temperatura da face ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $k$  representa o coeficiente de condutividade térmica ( $\text{W/mK}$ ),  $h$  representa o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ),  $S$  representa a radiação proveniente de fontes internas absorvida pela face do vidro ( $\text{W/m}^2$ ),  $T_i$  representa a temperatura do ar interno e  $T_o$  a temperatura do ar externo (ambas em K).

O cálculo do equilíbrio energético das janelas no *EnergyPlus* é um processo iterativo que envolve a divisão da superfície da janela em pequenas seções e o cálculo da transferência de calor em cada seção. O equilíbrio energético resultante é então usado para determinar a distribuição de temperatura no ambiente e o desempenho energético geral do edifício, essas informações podem ser usadas para otimizar o projeto do edifício, melhorar a eficiência energética e reduzir os custos operacionais.

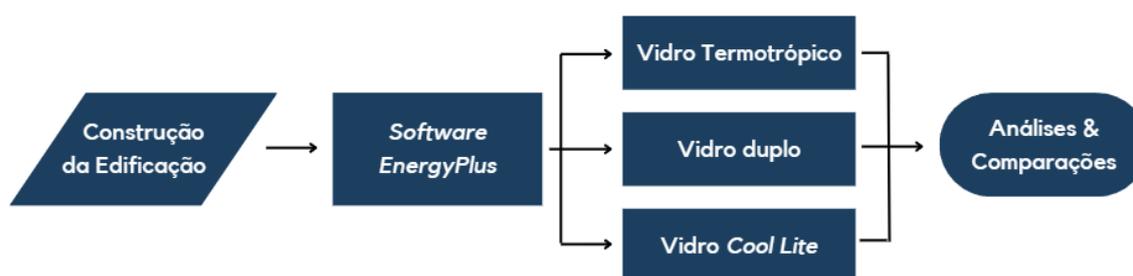
## 2.4 ARQUIVO CLIMÁTICO

Para este trabalho e suas respectivas simulações utilizou-se dados climáticos coletados pela estação climática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre. O clima de Porto Alegre é subtropical úmido, caracterizado por verões quentes e úmidos, com uma temperatura média anual de  $19,7^{\circ}\text{C}$ , atingindo a temperatura máxima de  $33,5^{\circ}\text{C}$  no verão e a temperatura mínima de  $0,5^{\circ}\text{C}$  de acordo com o arquivo climático.

## 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritas as etapas definidas para o desenvolvimento do estudo. A fim de realizar as análises propostas e ilustrar os passos desenvolvidos, a Figura 3 ilustra a metodologia adotada neste trabalho.

Figura 3. Fluxograma de execução da metodologia.



### 3.1 EDIFICAÇÃO PARA SIMULAÇÃO

A edificação utilizada para simulação foi uma residência e possui dimensões de  $10\text{ m} \times 12\text{ m} \times 3\text{ m}$  (Figura 4). Nela está anexado o jardim de inverno que compõe a zona térmica de estudo deste trabalho, de dimensões  $3\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$ , totalizando assim  $132\text{ m}^2$  de área construída. As informações respectivas às áreas e inclinações das superfícies de janelas que compõe a construção do jardim de inverno encontram-se especificadas na Tabela 1. O jardim de inverno está conectado à residência através de sua face leste, sendo esta área da face a única que não está exposta às

condições externas, considerada adiabática. O desempenho térmico das janelas termotrópicas foi comparado ao desempenho de janelas de vidro duplo e também de janelas compostas por vidro em uma única camada, com vidro *Cool Lite*, que apresenta melhor desempenho quando comparado à vidros comuns.

Figura 4. Representação da residência com jardim de inverno (a) e representação da face leste da residência (b).

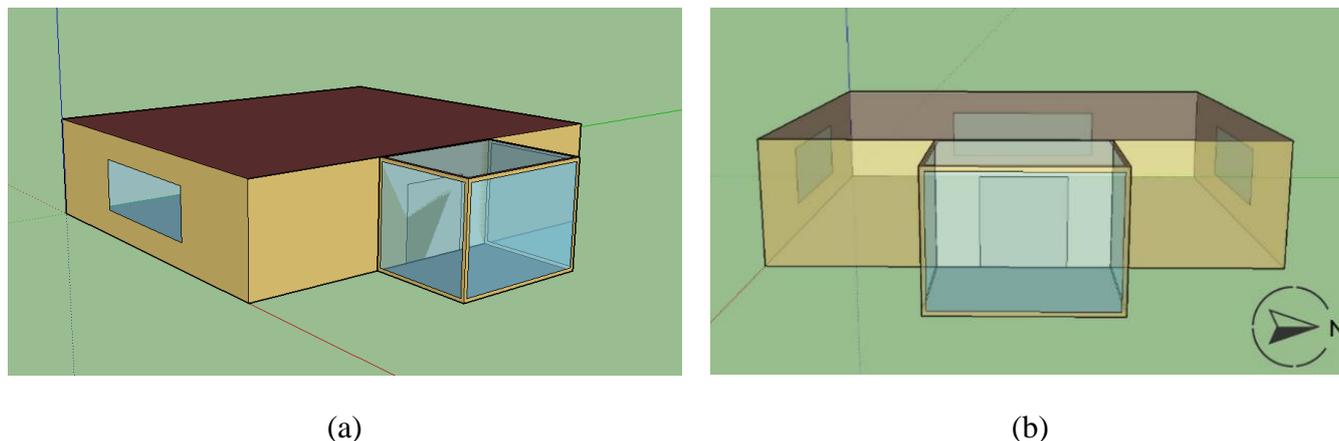


Tabela 1. Área e inclinação das superfícies de janelas.

Elementos Construtivos	Área [m <sup>2</sup> ]	Inclinação em graus
Janela Superior (telhado)	10,64	0
Janela Norte	7,84	90
Janela Leste	10,64	90
Janela Sul	7,84	90
Área Total de Janelas	36,96	-

### 3.2 PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

Para determinação das propriedades das janelas termotrópicas, escolheu-se a composição da matriz polimérica com concentração de 6% de HPC. O desempenho das janelas termotrópicas foi comparado com o desempenho de janelas de vidro duplo assim como vidro janela de camada única. Porém, com vidro de melhor desempenho, disponibilizado no mercado pela fabricante Cebrace, modelo *Cool Lite* 150, com suas propriedades extraídas do catálogo de propriedades térmicas e óticas de vidros comercializados no Brasil. Esse catálogo foi elaborado pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações juntamente com a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. Os dois cenários de simulação apresentam a mesma área de janelas, assim como a mesma área de estrutura metálica e mesmas orientações das janelas.

Neste trabalho foi considerada a temperatura de transição  $T_s$ , dos vidros termotrópicas em 35 °C, e as propriedades para os estados transparente (temperaturas abaixo de  $T_s$ ) e translúcido (temperaturas acima de  $T_s$ ) são expostas na Tabela 2, de acordo com Allen (2017).

Para os demais componentes da edificação foram utilizadas as propriedades constantes na Tabela 3, considerando-se a estrutura do jardim de inverno confeccionada em alumínio. Também foram estabelecidos os valores do fator U (*U-factor*), definido como uma representação numérica

da capacidade do elemento construtivo em transmitir calor através de si quando submetido à condução térmica.

Tabela 2. Propriedades ópticas do vidro termotrópico (Adaptado de Allen, 2017).

<b>Propriedades do vidro termotrópico</b>	<b>T &lt; T<sub>s</sub></b>	<b>T &gt; T<sub>s</sub></b>
Transmitância Visível	0,90	0,21
Refletância visível	0,08	0,28
Transmitância solar	0,74	0,15
Refletância solar	0,06	0,24

Para os demais componentes da edificação foram utilizadas as propriedades constantes na Tabela 3, considerando-se a estrutura do jardim de inverno confeccionada em alumínio.

Tabela 3. Propriedades dos elementos construtivos (Adaptado de Allen, 2017).

<b>Componentes Construtivos</b>	<b>U-factor [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>Transmitância Solar</b>	<b>Refletância Solar</b>
Parede externa	0,25	N/A	N/A
Telhado	0,25	N/A	N/A
Vidro Termotrópico	2,7	Dinâmico	Dinâmico
Vidro Duplo	2,7	0,79	0,16
Vidro <i>Cool Lite</i> 150	5,7	0,45	0,13

### 3.3 INFILTRAÇÃO, ILUMINAÇÃO, TEMPO DE EXECUÇÃO E OCUPAÇÃO

A infiltração de ar foi assumida como constante com valor de 0,0085 m<sup>3</sup>/s, adequada para uma pequena residência. A carga de iluminação adotada foi de 6 W/ m<sup>2</sup>, respeitando o mínimo de 100 W para cômodos com área igual ou inferior a 6 m<sup>2</sup> estabelecido pela NBR 5410. Foi considerada uma ocupação máxima de duas pessoas, com taxa metabólica de 70 W/m<sup>2</sup> correspondente às atividades em repouso a serem realizadas no ambiente, como assistir televisão, utilizar um computador ou ler um livro. O padrão de ocupação é apresentado na Tabela 4. Todos os casos simulados tiveram seus parâmetros padronizados, e para a simulação anual o intervalo de tempo foi definido em 10 minutos.

Tabela 4. Período de ocupação (número de pessoas por faixa de horário).

<b>Horário</b>	<b>0-8</b>	<b>8-11</b>	<b>11-17</b>	<b>17-18</b>	<b>18-19</b>	<b>19-20</b>	<b>20-21</b>	<b>21-22</b>	<b>22-23</b>	<b>23-24</b>
Dias de Semana	0	0	0	0	1	2	2	2	0	0
Sábado	0	2	0	0	2	2	2	2	2	2
Domingo	0	0	0	2	2	2	2	2	0	0

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DE TEMPERATURAS DA ZONA TÉRMICA

Realizou-se uma análise comparativa das temperaturas operativas (que relacionam a temperatura do ar, temperatura média radiante e velocidade do ar do ambiente) da zona térmica ao longo do intervalo de 24 horas nos extremos do verão e do inverno. Para tal, foi considerado o

período compreendido entre os dias 1 a 3 de janeiro, para o verão, e entre os dias 14 a 16 de junho para o inverno. No período selecionado atinge-se a temperatura externa máxima de 33,5 °C no verão e a mínima de 0,5 °C no inverno, também foi realizada uma média das temperaturas registradas em cada hora ao longo deste intervalo de dias, tanto para o verão quanto para o inverno, para análise de variação de temperaturas ao longo de 24 horas nas duas estações.

#### 4.1.1 Análise comparativa de temperaturas operativas para as diferentes composições de janelas

Como pode ser visto nas Figura 5 e Figura 6, realizou-se a comparação das temperaturas médias considerando-se os três diferentes tipos de vidros.

Figura 5. Temperatura operativa média do dia 1 a 3 de janeiro.

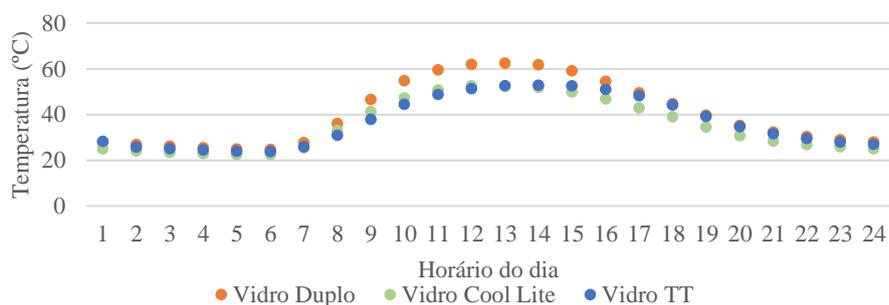
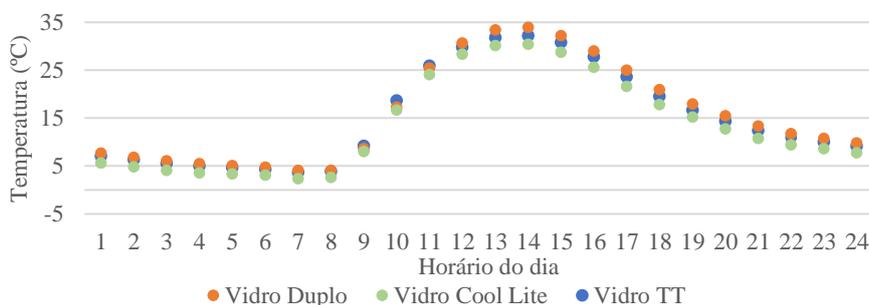


Figura 6. Temperatura operativa média do dia 14 a 16 de junho.



Através da Figura 5 pode-se perceber que o maior impacto da escolha entre os três tipos de janelas se dará no verão, onde registra-se uma variação de até 9,5 °C entre o vidro termotrópico e o vidro duplo nas horas mais quentes do dia, atingindo o maior valor da diferença térmica em torno das 13h da tarde, onde a temperatura operativa da zona térmica atinge 52,9 °C com vidro termotrópico e 62,4 °C com vidro duplo.

Nota-se também que, quando comparado ao vidro Cool Lite, o vidro termotrópico apresentou um pequeno retardamento tanto na elevação da temperatura da zona térmica ao final da manhã, quanto na queda da mesma ao final da tarde. Para a situação do extremo de inverno, têm-se um comportamento mais homogêneo entre as janelas, com o vidro duplo apresentando melhor comportamento em situações que exigem isolamento térmico a fim de evitar perda de calor, tal qual o período da madrugada, que apresenta baixas temperaturas sem incidência solar.

#### 4.1.2 Análise das temperaturas internas e externas

As Figura 7 e Figura 8 apresentam a comparação entre as temperaturas operativas da zona térmica (temperatura interna) e a temperatura do ambiente externo (temperatura externa), representadas pela média das temperaturas dos três dias de verão e inverno selecionados. Já na Figura 9 é ilustrada a variação dessas temperaturas ao longo de cada um desses dias.

Figura 7. Comparação entre temperaturas médias internas e externas entre os dias 1 a 3 de janeiro.

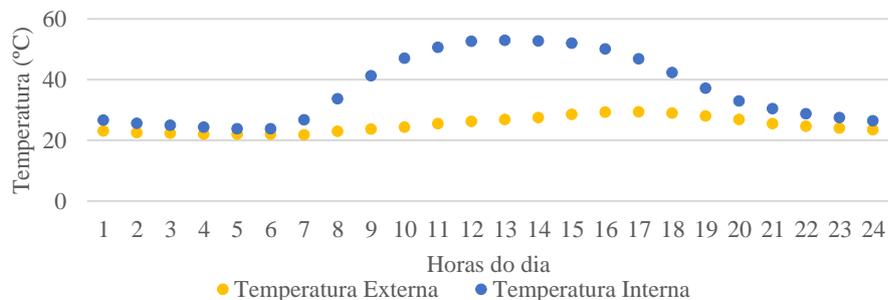


Figura 8. Comparação entre temperaturas médias internas e externas entre os dias 14 a 16 de junho.

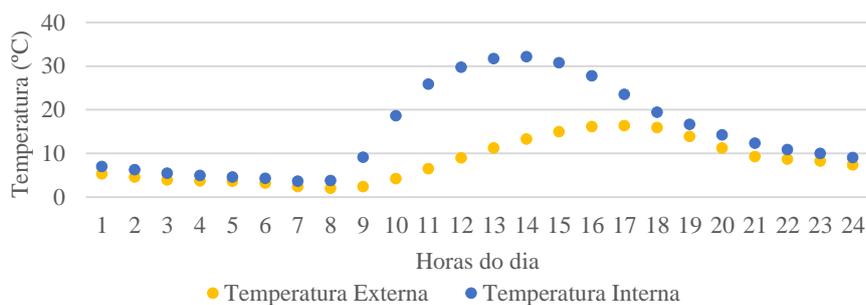
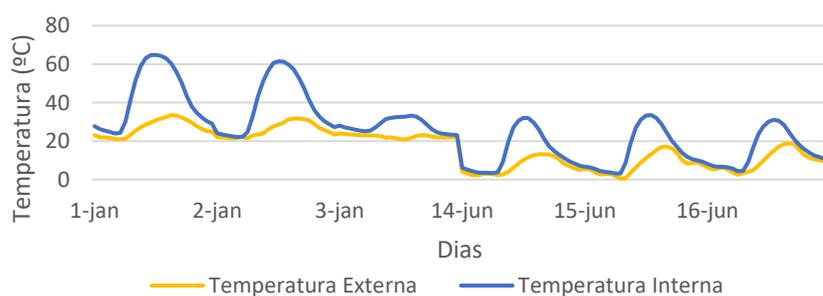


Figura 9. Comparação entre temperaturas internas e externas ao longo de cada um dos dias selecionados de inverno e verão.



Como esperado, devido à grande área envidraçada, mesmo com a propriedade termotrópica da janela, a temperatura operativa da zona térmica simulada atinge níveis muito elevados no extremo do verão, atingindo pico de 52,9 °C, ao passo que a temperatura externa registrada no mesmo instante é de 30,9 °C. O pico da temperatura interna é registrado em torno das 13h, mesmo com o aumento da temperatura externa registrado nas horas imediatamente depois. Para o dia mais extremo, 1 de janeiro, a zona térmica simulada atinge a temperatura operativa máxima de 64,7 °C às 13h, enquanto a temperatura externa atinge seu valor máximo de 33,5 °C às 16h.

### 4.1.3 Análise das temperaturas internas, externas e da camada de HPC

Através da análise da temperatura da camada de HPC ao longo do dia tem-se a previsão do comportamento óptico do vidro termotrópico, em outras palavras, quais faixas de horário do dia é esperado que ele apresente o estado transparente ou o estado translúcido. As Figura 10, Figura 11 e Figura 12 apresentam a correlação prevista entre a temperatura interna, a temperatura externa e a temperatura da camada de hidroxypopilcelulose.

Figura 10. Comparação entre temperaturas médias interna, externa e da camada de HPC dos dias 1 a 3 de janeiro.

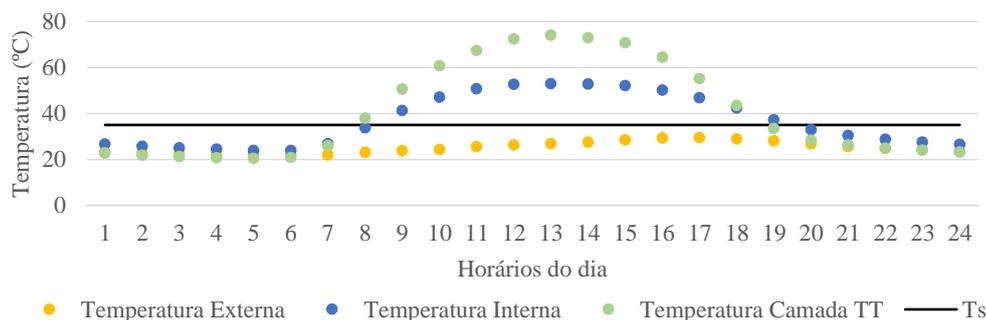


Figura 11. Comparação entre temperaturas médias interna, externa e da camada de HPC dos dias 14 a 16 de junho.

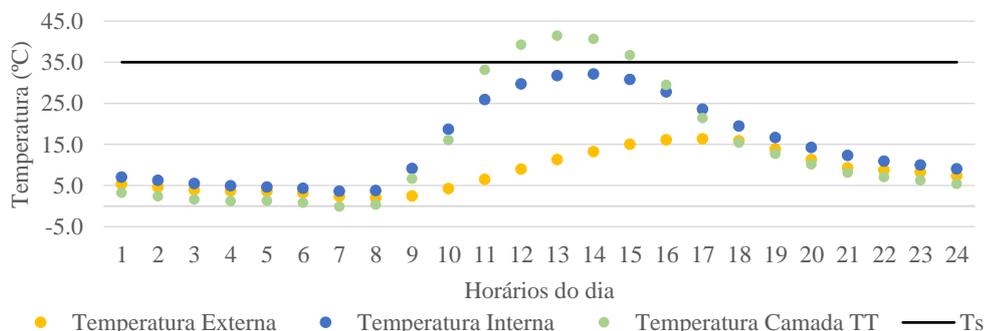
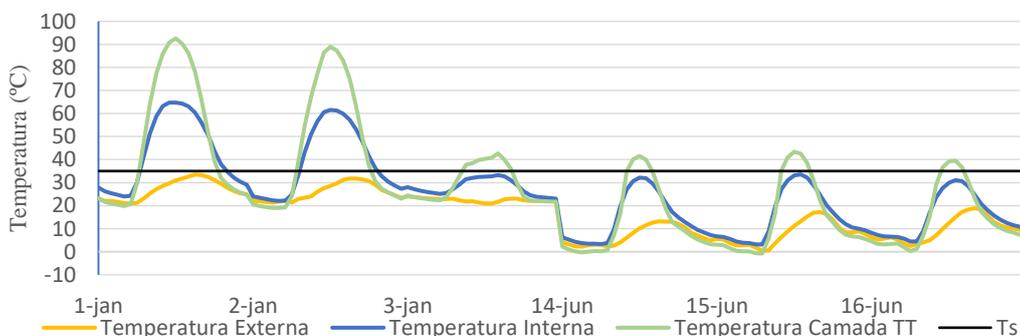


Figura 12. Comparação entre temperaturas médias interna, externa e da camada de HPC ao longo de cada um dos dias selecionados de inverno e verão.

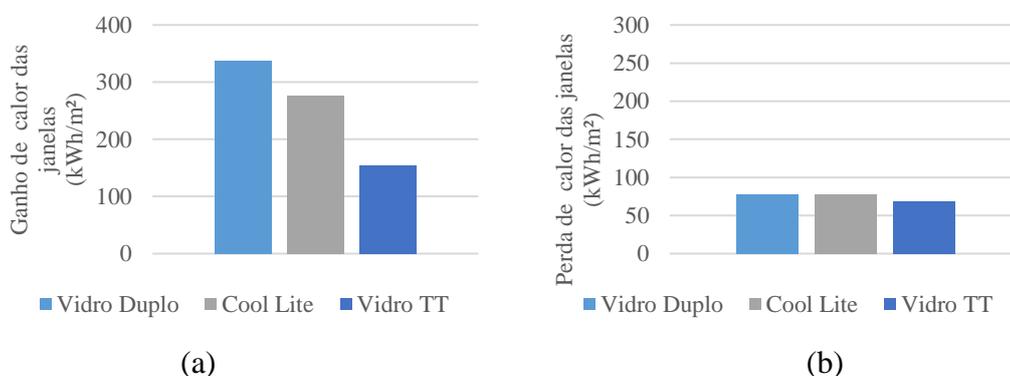


Nota-se que, no período do verão, para  $T_s = 35\text{ }^\circ\text{C}$ , é estimado que o vidro mantenha-se em seu estado translúcido na maior parte do período do dia que apresenta luz solar, uma vez que a transição de transparente para translúcido ocorre em torno das 8h e a transição reversa ocorre em torno das 18h. Para o período do inverno, a manutenção do estado translúcido se dá apenas durante as horas de maior incidência solar e maior temperatura interna, com a transição do estado transparente para translúcido estimada por volta das 11h e a transição reversa estimada em torno das 15h.

#### 4.2 COMPARAÇÃO DE GANHOS DE CALOR ANUAIS

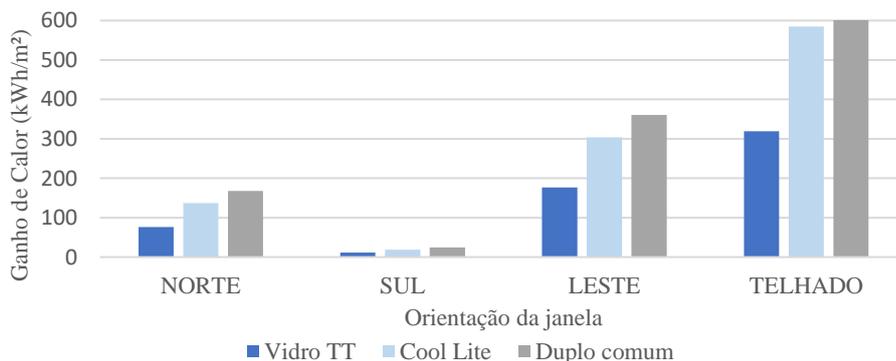
Na Figura 13 encontram-se os valores estimados para os ganhos e perdas de calor, em kWh/m<sup>2</sup>, considerando-se toda a área de janelas do jardim de inverno, que compreende as orientações norte, leste, sul e superior (telhado).

Figura 13. (a) Comparação dos ganhos de calor anuais; (b) Comparação das perdas de calor anuais.



Na Figura 14 tem-se os valores correspondentes à orientação de cada janela, também em kWh/m<sup>2</sup>. Como esperado, as orientações com maior incidência de radiação solar apresentam valores significativamente maiores de ganho de calor.

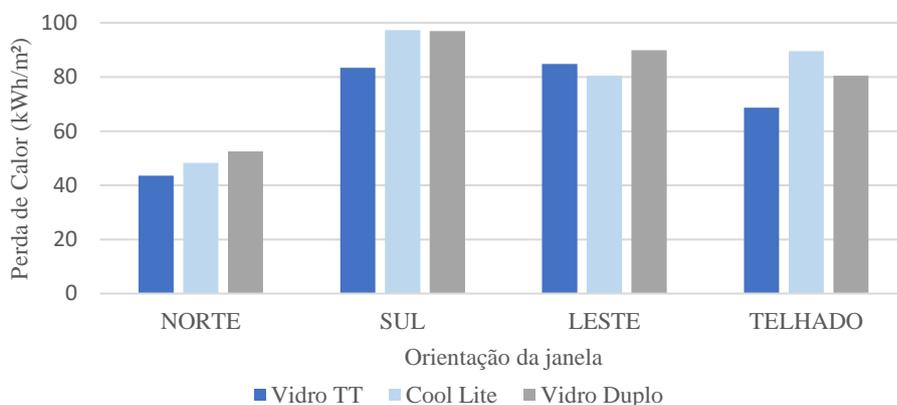
Figura 14. Comparação dos ganhos de calor anuais para as diferentes orientações das janelas.



Observa-se que o menor valor de ganho de calor ao longo do ano para o jardim de inverno, em kWh/m<sup>2</sup>, foi obtido com a utilização de vidro termotrópico, com um valor estimado em 153 kWh/m<sup>2</sup>, seguido pelo vidro *Cool Lite*, com 276 kWh/m<sup>2</sup>, e por último o vidro duplo comum, com 338 kWh/m<sup>2</sup>. Ao analisar-se a perda de calor, na Figura 15, percebe-se que a diferença entre

os tipos de vidro é mais tênue, com o vidro termotrópico apresentando menor valor de perda de calor dentre os três tipos, apresentando 9,9 kWh/m<sup>2</sup> a menos de perda de calor do que o vidro duplo. Já entre o vidro duplo e o vidro *Cool Lite*, obteve-se um comportamento muito semelhante, com uma diferença total de 0,52 kWh/m<sup>2</sup> entre eles no resultado da simulação.

Figura 15. Comparação das perdas de calor anuais para as diferentes orientações das janelas.

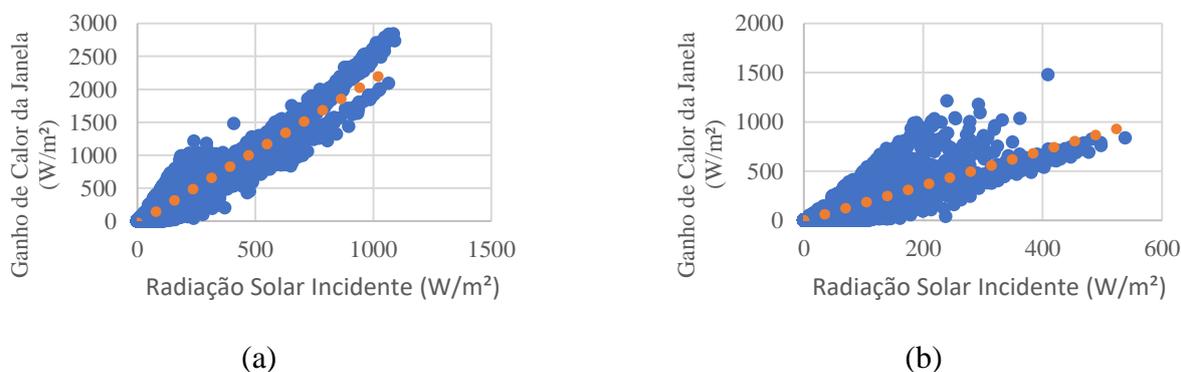


As maiores taxas de perda de calor para o vidro *Cool Lite* e para o vidro duplo são registradas na janela de orientação sul, com valor de 97,2 kWh/m<sup>2</sup> e 96,9 kWh/m<sup>2</sup>, respectivamente. Já para o vidro termotrópico, a janela de orientação leste apresentou uma perda de calor ligeiramente superior à orientação sul, a maior taxa de perda de calor registrada no valor de 84 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 4.3 ANÁLISE DO COEFICIENTE DE GANHO DE CALOR SOLAR (SHGC)

Para análise do comportamento do SHGC foi utilizado o plano com maior incidência solar, que é a área envidraçada que compõem o telhado do jardim de inverno. Através da relação entre o ganho de calor solar e a radiação solar incidente, obtém-se a linha de tendência que representa o comportamento do SHGC. Para visualizar o impacto da temperatura da janela, e conseqüentemente o estado físico da camada de HPC do vidro termotrópico, a Figura 16 apresenta os resultados obtidos para o SHGC separados de acordo com a temperatura da camada de HPC, pré e pós transição.

Figura 16. (a) Radiação solar incidente x Ganho de calor da janela  $T < T_s$  (b) Radiação solar incidente x Ganho de calor da janela  $T \geq T_s$ .

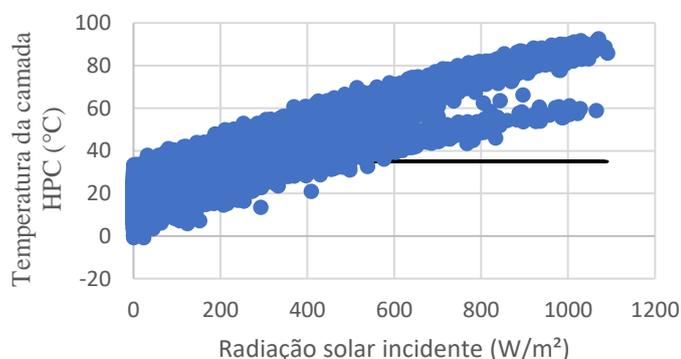


Para a janela simulada com vidro duplo, obteve-se o valor de SHGC igual a 0,46, para a janela de vidro *Cool Lite*, o valor obtido foi de 0,37. Observa-se um menor ângulo de inclinação na linha que representa o SHGC do vidro termotrópico para temperaturas da camada de HPC acima de  $T_s$ , o que indica a redução do valor do SHGC para temperatura acima da temperatura de transição, determinando-se o valor de SHGC do vidro termotrópico em 0,34 para  $T < T_s$  e em 0,42 para  $T > T_s$ .

#### 4.4 ANÁLISE DA CAMADA TERMOTRÓPICA DE HPC

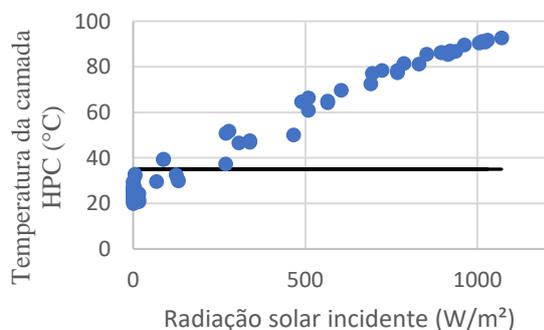
A relação entre a radiação solar incidente e a temperatura da camada de HPC apresenta uma distinção em seu comportamento a depender das condições climáticas de inverno e verão, conforme ilustrado na Figura 17. Foi realizada uma simulação no plano de  $0^\circ$ , correspondente à área envidraçada do telhado do jardim de inverno, com intuito de visualizar-se a relação entre ambas ao longo do ano.

Figura 17. Radiação solar incidente x Temperatura da camada HPC ao longo de um ano..

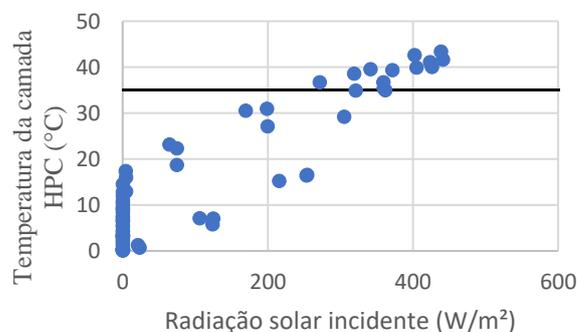


Na Figura 18 encontra-se plotada a relação entre a temperatura da camada de HPC e a radiação solar incidente para o extremo do verão e do inverno. Para o intervalo de verão, acima de  $250 \text{ W/m}^2$  de radiação solar incidente a temperatura da camada de HPC já se encontra acima de  $T_s$ , ao passo que no inverno é exigida uma radiação solar incidente ligeiramente superior, o que demonstra o impacto das condições climáticas, tal qual temperatura externa, na intensidade de radiação solar necessária para haver transição do estado transparente para o estado translúcido.

Figura 18. (a) Radiação solar incidente x Temperatura da camada HPC do dia 1 a 3 de janeiro (b) Radiação solar incidente x Temperatura da camada HPC do dia 14 a 16 de junho.



(a)



(b)

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, simulou-se a hidroxipolilcelulose com 6% de concentração, inserida entre lâminas de vidro de 4 milímetros de espessura, como elemento construtivo das superfícies externas de um jardim de inverno. Para sua propriedade termotrópica foi estabelecida uma temperatura de transição  $T_s = 35$  °C. Com intuito de mitigar a influência da radiação solar e das condições climáticas do meio externo na eficiência energética da edificação, foram realizadas comparações diretas com materiais disponíveis no mercado para a utilização em janelas de vidro, como vidro duplo e o vidro da linha *Cool Lite* da fabricante Cebrace, através de simulações no *software EnergyPlus*.

A edificação analisada possui quatro superfícies expostas ao ambiente externo, as quais 90% da área é composta por janelas, com orientação norte, sul e leste, estas a 90° de inclinação em relação ao solo, e na face superior da construção, com 0° de inclinação. A edificação possui o intuito de ser um jardim de inverno, integrando a residência à uma área externa, tal qual um jardim. O arquivo climático utilizado corresponde à cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, de clima subtropical úmido.

Através da análise comparativa da temperatura operativa da zona térmica, observou-se uma redução significativa na temperatura interna utilizando-se a janela termotrópica frente às demais janelas simuladas, de vidro duplo e de vidro simples *Cool Lite*. Os valores mais expressivos encontrados dizem respeito ao período da estação de verão, quando houveram reduções de até 9,5 °C, e um comportamento que indica um leve retardamento tanto na aquisição de temperatura interna de jardim de inverno no início do dia quanto na diminuição da mesma ao final do dia.

Constatou-se que o maior ganho de calor ocorre na janela posicionada a 0°, no telhado do jardim de inverno, seguido pela janela de orientação leste, com 90° de inclinação. Também foi constatado que com o emprego do vidro termotrópico obtiveram-se resultados expressivos na redução de ganho de calor total anual do jardim de inverno, com o vidro termotrópico atingindo uma redução de 55% em relação ao vidro duplo comum e de 45% em relação ao vidro *Cool Lite*.

O impacto no conforto visual gerado pelo vidro termotrópico também pode ser estimado, para a  $T_s$  determinada estima-se um período médio de 10h por dia para a camada HPC permanecer em seu estado translúcido em dias quentes de verão, entre às 8h e às 18h, e de cerca de 4h nos dias mais frios de inverno, entre às 11h e às 15h. Percebeu-se uma influência significativa da condição climática do ambiente externo para determinar a quantidade de radiação solar incidente necessária para que a camada de HPC atinja e ultrapasse  $T_s$ .

Sugere-se, para futuras análises, a inclusão de soluções alternativas para mitigar os efeitos das grandes áreas envidraçadas do jardim de inverno, tais quais a combinação de vidros termotrópicos com *brises* ajustáveis e jardins verticais. Também o estudo da inserção de condicionadores de ar em um ambiente com vidros termotrópicos, com o intuito de analisar-se comparativamente as variações nas demandas por carga de resfriamento e de aquecimento para obtenção de conforto térmico frente aos outros tipos de vidros, levantando-se o impacto no consumo de recursos energéticos e financeiros para cada caso. O custo de implementação dessa tecnologia em uma edificação permanece como um ponto a ser explorado futuramente, tendo em vista a escassez dessa solução no mercado atual, e a consequente inviabilidade analisar-se o custo benefício da implementação do vidro termotrópico no projeto de uma edificação.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10821-1:2017 - Esquadrias externas e internas**. Rio de Janeiro 2. ed. 2017.

**NBR 15220-2:2005 - Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro. 2005.

**NBR 5410:2004 - Instalações elétricas de baixa tensão – Terminologia: Rio de Janeiro 2. ed. 2004**. Rio de Janeiro. 2005.

BDMEP – BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS DO INMET. **Dados Históricos**. 2022. Disponível Em: <[Htpps://Bdmep.Inmet.Gov.Br](https://Bdmep.Inmet.Gov.Br)>. Acesso em 18 nov. 2022.

CB3E – CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES ABIVIDRO – ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO - **Catálogo De Propriedades Térmicas E Óticas De Vidros Comercializados No Brasil**. Florianópolis, 2015. Disponível em [https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/catalogo-propriedades-vidros-comercializados-brasil-13032015\\_v2.pdf](https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/catalogo-propriedades-vidros-comercializados-brasil-13032015_v2.pdf)

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. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.125>>.

CHOU, J.-S., & BUI, D.-K. **Modeling heating and cooling loads by artificial intelligence for energy-efficient building design**. Energy and Buildings, 82, 437–446. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.036, 2014

ENERGYPLUS, U.S.D. Of E. **EnergyPlus™ Version 8.7.3 Documentation: InputOutputReference**. 2022. Disponível em: <<https://energyplus.net/documentation>>. Acesso em 12 nov. 2022.

GIL, ANTÔNIO CARLOS, **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008

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>>.

GRANQVIST, HAMBERG, I.; C. G. "Evaporated Sn-doped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>films: Basic optical properties and applications to energy-efficient windows". Journal of Applied Physics. AIP Publishing. 1986 - 60 (11): R123–R160. doi:10.1063/1.337534. ISSN 0021-8979

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

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>>.

RESCH, K., WALLNER, G. **Thermotropic layers for flat-plate collectors - A review of various concepts for overheating protection with polymeric materials**, Solar Energy 17 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 março de 2023.