ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS CONFORME INSTRUÇÃO NORMATIVA DO INMETRO (INI-R)

Letícia Gabriela Eli (1); Marcelo Salles Olinger (2); Amanda Fraga Krelling (3); Ana Paula Melo (4); Roberto Lamberts (5)
(1) Mestra, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), leticia.eli@posgrad.ufsc.br
(2) Mestre, Doutorando do PPGEC, marcelo.salles@posgrad.ufsc.br
(3) Mestra, Doutoranda do PPGEC, amanda.krelling@posgrad.ufsc.br
(4) Doutora, Professora do Departamento de Engenharia Civil, a.p.melo@ufsc.br
(5) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, roberto.lamberts@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Cx Postal 476, Florianópolis–SC, 88040-970

RESUMO
Os edifícios estão sujeitos a fenômenos termofísicos complexos, que impactam no conforto térmico dos ocupantes e no uso de energia para o condicionamento de ar. Procurando reduzir o consumo de energia, nas últimas décadas, políticas públicas têm sido implementadas no Brasil com o objetivo de promover a adoção de medidas de eficiência energética nas edificações. A Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação da Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) está sendo atualizada, buscando adequar seu método de simulação de edificações ao procedimento apresentado na NBR 15575, norma brasileira de desempenho de edificações. O objetivo deste estudo é analisar diferentes estratégias de eficiência energética para um edifício residencial térreo, adotando o método de simulação apresentado na proposta do INI-R. As estratégias analisadas estão relacionadas aos materiais de construção, às cores, às áreas de abertura para ventilação e aos sombreamentos. Os climas de Florianópolis (SC), e Palmas (TO), foram escolhidos para o estudo. Além disso, uma análise de balanço térmico foi conduzida para compreender as trocas de calor em diferentes superfícies da edificação. Os resultados mostram que a adoção das estratégias de eficiência energética propostas melhoram o desempenho da edificação, pois resultam em melhores resultados de desempenho e, consequentemente, nas classificações de eficiência energética. O uso da combinação de diferentes estratégias foi capaz de alcançar a mais alta classificação de eficiência energética. Conclui-se que as estratégias mais eficazes foram as que protegem o edifício da radiação solar, como o uso de sombreamento nas janelas e cores de baixa absortância na cobertura.

Palavras-chave: INI-R, eficiência energética, edificações residenciais, simulação computacional.

ABSTRACT
Buildings are subject to complex thermophysical phenomena, which impact occupants' thermal comfort and energy use for air conditioning. In the last decades, public policies have been implemented in Brazil to promote the adoption of energy efficiency measures in buildings for reduce the energy consumption. Inmetro's Normative Instruction for the Classification of Energy Efficiency in Residential Buildings (INI-R) is being updated to match its building simulation method to the procedure presented in NBR 15575, the Brazilian normative for building performance. This study aims to analyze different energy efficiency strategies for a single-story residential building, adopting the simulation method presented on the proposal of INI-R. The strategies analyzed are related to building materials, colors, openable areas for ventilation, and shadings. The climates of Florianopolis (SC), and Palmas (TO), were chosen for the study. Also, a thermal balance analysis was conducted to understand the heat exchanges on different building surfaces. The results show that the adoption of the proposed energy efficiency strategies improves the building performance, as they result in better performance values and, consequently, energy efficiency classifications. The use of different strategies in combination was able to achieve the highest energy efficiency classification. It is concluded that the most effective strategies are the ones that protect the building from solar radiation, such as the use of shading on windows and low absorptance colors on the roof.

Keywords: INI-R, energy efficiency, residential buildings, computational simulation.

1. INTRODUÇÃO

As edificações são sujeitas a fenômenos termofísicos complexos, com constantes trocas de calor por convecção, radiação e condução com o meio externo e entre os ambientes internos (HENSEN; LAMBERTS; SPITLER, 2019). Essas trocas de calor influenciam no conforto térmico dos ocupantes, portanto, análises que visam o desempenho térmico de edificações podem auxiliar na redução do consumo de energia elétrica voltada à climatização das residências.

A adoção de medidas de eficiência energética em larga escala pode ser influenciada por políticas públicas, como, por exemplo, as que exigem o cumprimento de determinados requisitos para a participação de programas de financiamento habitacional (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). No Brasil, pode-se dizer que a promoção de pesquisas relacionadas à eficiência energética iniciou no ano de 2001, com a publicação da chamada Lei da Eficiência Energética (BRASIL, 2001). Após a publicação da Lei 10.295, foi dado início à estruturação do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica) e, no ano de 2009, foi publicado o primeiro Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) (BRASIL, 2009). No ano seguinte, houve a publicação do RTQ-R, voltado às edificações residenciais (BRASIL, 2010b). Esses Regulamentos trazem os procedimentos para a etiquetagem de eficiência energética de edificações, e, após atualizações, estão vigentes as portarias do ano 2010 para o RTQ-C e de 2012 para o RTQ-R (BRASIL, 2010a; 2012).

Após anos de revisões, os procedimentos encontrados no RTQ-C foram atualizados e o documento passou a se chamar Instrução Normativa do Inmetro para Classificação da Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) (BRASIL, 2021). Porém, a INI-R, voltada às edificações residenciais, continua passando por atualização, principalmente pelo fato da incorporação do procedimento de simulação computacional presente na NBR 15575-1:2021 (ABNT, 2021a). A NBR 15575 é uma normativa brasileira que tem como objetivo definir os índices mínimos de desempenho de edificações residenciais, frente a diversas disciplinas, entre elas a térmica. Nos últimos anos, as partes 1, 4 e 5, que incluem os procedimentos de análise do desempenho térmico, foram revisados e publicados em 2021. O destaque principal foi o procedimento de simulação computacional, que foi alterado substancialmente, e é considerado um avanço para o setor de construção civil. Entre as principais mudanças do método de simulação é possível citar: a análise anual, e não apenas para um dia típico de verão e de inverno; a consideração do efeito da ventilação natural; o cálculo da carga térmica de refrigeração e aquecimento; a unidade habitacional considerada ocupada, com cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos) (ABNT, 2021a). As residências são construídas para serem posteriormente ocupadas, portanto, não considerar essas interações é uma das principais lacunas entre as avaliações e o que ocorre na prática (HONG; LANGEVIN; SUN, 2018). Além disso, a ventilação natural é uma das estratégias mais utilizadas para o resfriamento das residências brasileiras (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016), assim como o condicionamento artificial, visto que, com o aumento do poder aquisitivo, os condicionadores de ar estão cada vez mais presentes nas residências (PROCEL, 2019; RAMOS et al., 2020).

O novo procedimento de simulação computacional da NBR 15575-1:2021 (ABNT, 2021a) permite analisar diferentes estratégias de projeto, ponderando soluções bioclimáticas juntamente com a análise das cargas térmicas nos momentos em que estas soluções forem insuficientes para garantir a habitabilidade da edificação. Considerando esta premissa, o efeito das alternativas construtivas sobre o desempenho térmico pode ser identificado de forma abrangente, servindo como um importante direcionamento para os projetistas (KRELLING et al., 2020).

Dessa forma, com o avanço do procedimento de simulação computacional para a análise do desempenho térmico de edificações residenciais da NBR 15575, a INI-R incorporará esse procedimento como alternativa para a avaliação da eficiência energética da envoltória. Essa união visa promover a etiquetagem de edificações, uma vez que é possível analisar a unidade habitacional pela NBR 15575 e, posteriormente, utilizar a análise realizada para obtenção da etiqueta de eficiência energética. É importante ressaltar que a INI-R ainda está em fase de desenvolvimento e em breve entrará em consulta pública.

2. OBJETIVO

Analisar a eficiência energética de uma edificação unifamiliar térrea frente a diferentes estratégias, aplicando o método de simulação computacional presente na proposta da Instrução Normativa do Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, INI-R.

3. MÉTODO

Foram aplicadas diferentes estratégias construtivas na residência, a partir do modelo de referência do novo procedimento de simulação computacional da INI-R (LABEEE, 2021), a fim de aprimorar a eficiência energética da envoltória da unidade habitacional. Inicialmente será descrita a tipologia e os climas. Posteriormente, o novo procedimento de simulação computacional para análise da eficiência energética da envoltória será descrito, como também as estratégias de eficiência energética adotadas na análise. Por fim, para complementar as análises, será descrito o método de análise do balanço térmico. Para a simulação computacional foi utilizado o programa EnergyPlus, versão 9.0.1.

3.1. A tipologia base

A tipologia base adotada é uma edificação residencial unifamiliar térrea de 43,2 m² com dois dormitórios e uma sala com cozinha conjugada. Esta tipologia é representativa da faixa de renda 1 (até R$ 1.600,00 de renda familiar) do extinto programa Minha Casa Minha Vida, conforme levantamento de Triana, Lamberts e Sassi (2015). A área de piso dos ambientes de permanência prolongada (APP) totaliza 38,58 m². Na Figura 1 é possível visualizar o modelo de simulação da edificação e a planta baixa. A orientação da unidade habitacional (UH) é mantida fixa nas análises, conforme apresentada na Figura 1.

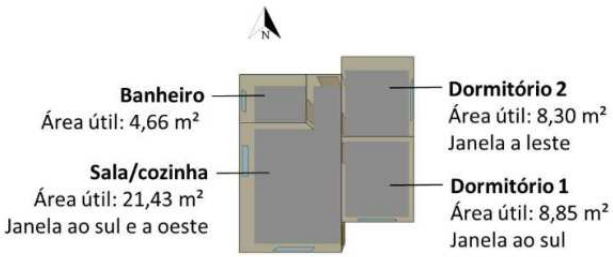


Figura 1 - Tipologia unifamiliar adotada no trabalho, adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

A edificação tem contato com o solo, modelado utilizando a classe de objetos *Ground Domain* do programa *EnergyPlus*, conforme Eli et al. (2019). O pé-direito é de 2,50 m, a janela do banheiro é do tipo maxim-ar, com fator de abertura para ventilação de 90% e altura do peitoril de 1,60 m. As demais aberturas são do tipo de correr, com fator de abertura para ventilação de 45% e peitoril de 1,10 m. As demais características da tipologia base foram adotadas conforme edificação de referência exposta na seção 3.3.

3.2. Os climas adotados

Foram adotados os climas de duas cidades: Florianópolis (SC) e Palmas (TO), nas zonas bioclimáticas (ZB) 3 e 7 (ABNT, 2005), respectivamente. A temperatura de bulbo seco média anual (TBS_m) obtida pelo arquivo climático de Florianópolis foi de 20,9 ºC, e para a cidade de Palmas, 26,8 ºC. Os arquivos climáticos utilizados são do tipo INMET, presentes na base-padrão de arquivos climáticos disponibilizada pelo ABNT TR 15575-1-1:2021 (ABNT, 2021b)

3.3. O procedimento de simulação computacional

O novo procedimento de simulação computacional da NBR 15575 (ABNT, 2021a) analisa a edificação em duas condições de uso: ventilada naturalmente e não ventilada naturalmente. A classificação da eficiência energética da edificação é realizada com base na comparação entre o modelo real, que representa a edificação que se quer analisar, com o modelo de referência. O modelo real adota todas as definições construtivas do projeto avaliado, já o modelo de referência mantém a volumetria da edificação real, porém com características preestabelecidas no procedimento de simulação computacional. Além das características da edificação de referência, o procedimento de simulação computacional pré-determina os valores de cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos) e o período de ocupação e acionamento dos sistemas, que devem ser iguais na edificação real e na de referência.

3.3.1. As cargas internas e os períodos de ocupação

São consideradas as cargas internas de pessoas, iluminação e equipamentos, com base nos períodos de ocupação de cada ambiente de permanência prolongada (APP). Nos dormitórios, a ocupação é entre 22h00 e 07h59, enquanto que a sala é ocupada entre 14h00 e 21h59. Nos dormitórios são consideradas duas pessoas

que geram uma carga de 81 W/pessoa. Na sala, a carga interna considerada é de 108 W/pessoa e a ocupação é de duas pessoas entre 14h e 17h59, e quatro pessoas entre 18h00 e 21h59. Quanto ao sistema de iluminação, a densidade de potência instalada (DPI) é de 5 W/m² para todos os APP. O acionamento da iluminação na sala é considerado entre 16h00 e 21h59, enquanto nos dormitórios são considerados dois períodos, entre 22h00 e 23h59 e entre 06h00 e 07h59. Por fim, as cargas dos equipamentos são consideradas somente na sala, com potência de 120 W durante todo o período de ocupação do APP.

3.3.2. A envoltória

A envoltória do modelo de referência tem como base materiais com elevada inércia térmica. Esses tipos de materiais são comumente empregados no mercado da construção civil brasileira (PROCEL, 2019; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). Na Tabela 1 são apresentados os materiais e as características térmicas consideradas nas paredes, piso e cobertura para as zonas bioclimáticas 1 a 7, que abrangem as cidades adotadas neste estudo. Para a parede interna, piso e laje, a INI-R não determina valores para a absortância à radiação solar e para a emissividade de onda longa, nestes casos o valor a ser utilizado deve ser igual ao adotado na edificação real. Neste estudo, a absortância à radiação solar dessas superfícies será de 0,50 e a emissividade de 0,90.

Tabela 1 - Componentes construtivos da edificação de referência.

Vedação	Elemento	Condutividade térmica [W/(m².K)]	Calor específico [J/(kg.K)]	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade [kg/m³]
Parede	Parede externa 100 mm de espessura	1,75	1000	0,58	0,90	2200
	Parede interna 100 mm de espessura	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200
Piso	Piso 100 mm de espessura	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200
Cobertura	Telha 6 mm de espessura	0,65	840	0,65	0,90	1700
	Laje 100 mm de espessura	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200

Para as aberturas, o elemento transparente a ser considerado na edificação de referência deve ter fator solar (FS) igual a 0,87, transmitância térmica igual a 5,70 W/(m².K) e o percentual de elementos transparentes do APP ($Pt_{,APP}$) deve ser igual a 17% da área de piso do APP ($Ap_{,APP}$) . O percentual de abertura para ventilação do APP ($Pv_{,APP}$) deve ser igual a 7,65% em relação à $Ap_{,APP}$. Para os ambientes de permanência transitória (APT) não há restrição no tamanho das aberturas. Para as aberturas, a INI-R define também as características das esquadrias, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Características das esquadrias.

	Absortância à radiação solar dos perfis	Emissividade de onda longa dos perfis	Condutância térmica [W/(m².K)]	Largura dos perfis das esquadrias [mm]
Perfis das esquadrias	0,58	0,90	56,00	50,00

3.3.3. Condições de uso da edificação: com ventilação natural e sem ventilação natural

Para a classificação da eficiência energética da envoltória da UH, são consideradas duas condições de uso: com ventilação natural e sem ventilação natural. É importante ressaltar que essas condições de uso são modeladas separadamente, ou seja, dois arquivos de simulação distintos.

Para a simulação da edificação naturalmente ventilada, a abertura das janelas nos APP ocorre durante os períodos ocupados em que a temperatura do ar interno é maior do que a temperatura do ar externo e a temperatura do ar externo é superior a 19 ºC. Nos demais horários, em que a ventilação natural não é permitida nos APP, as janelas são consideradas fechadas. Para o banheiro, a janela é considerada sempre aberta, com ventilação constante em todo o período simulado. As portas internas da UH devem ser consideradas sempre abertas, com exceção da porta do banheiro que é considerada sempre fechada. É importante ressaltar que é considerada a infiltração por frestas nas esquadrias (portas e janelas).

Para a condição de uso não ventilada naturalmente, na unidade habitacional é simulado um sistema de condicionamento artificial ideal. Este sistema calcula a carga térmica ideal requerida para resfriar ou aquecer os ambientes. Para que esse sistema seja acionado, o APP deve estar ocupado e a temperatura do ar deve

atingir as temperaturas de *setpoint*, ou seja, menor que 21 ºC para o cálculo da carga térmica de aquecimento (CgTA), ou maior que 23 ºC para o cálculo da carga térmica de refrigeração (CgTR). É importante mencionar que as esquadrias são consideradas sempre fechadas, com infiltração por frestas. Somente a janela do banheiro está sempre aberta.

3.3.4. Os indicadores de eficiência energética da envoltória

O novo procedimento de simulação computacional considera os três indicadores de desempenho térmico presentes na NBR 15575-1:2021 (ABNT, 2021b). O primeiro indicador é o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), obtido a partir da simulação na condição com ventilação natural. O PHFT representa a quantidade de horas em que os APP estão ocupados com a temperatura operativa do APP (To_{APP}) dentro de uma faixa preestabelecida. Esta faixa varia de acordo com a média anual de temperatura externa de bulbo seco (TBS_m) da cidade, conforme Tabela 3. Para a classificação da UH é utilizada a média aritmética dos $PHFT_{APP}$, valor obtido para cada APP.

Tabela 3 - Faixas de temperaturas operativas para a determinação do PHFT.

Intervalo de temperaturas externas	**Faixa de temperatura operativa a ser considerada**	**Média anual de temperatura externa de bulbo seco (TBS_m)**
Intervalo 1	18 ºC < $To_{,APP}$ < 26 ºC	TBS_m < 25,0 ºC
Intervalo 2	$To_{,APP}$ < 28 ºC	25,0 ºC ≤ TBS_m < 27,0 ºC
Intervalo 3	$To_{,APP}$ < 30 ºC	TBS_m ≤ 27 ºC

O segundo indicador também é relacionado com a To_{APP}, sendo a temperatura operativa anual máxima (Tomáx) e a temperatura operativa anual mínima (Tomín). Estes valores são obtidos a partir do levantamento das To_{APP} durante as horas ocupadas de cada APP. A partir das To_{APP} horárias ao longo de todo o ano, o maior e menor valor de To_{APP}, dentre todos os APP da UH, será a Tomáx e a Tomín da UH, respectivamente. É importante ressaltar que a Tomín deve ser levantada somente para as edificações localizadas em cidades das zonas bioclimáticas 1, 2, 3 e 4, enquanto que a Tomáx deve ser levantada para todas as zonas bioclimáticas.

O terceiro indicador, a carga térmica total (CgTT), é calculado a partir da combinação dos resultados das duas condições de uso, com e sem ventilação natural. Sua unidade é expressa em quilowatt-hora por ano [kWh/ano]. Em síntese, é analisada a To_{APP} obtida na simulação na condição ventilada naturalmente, durante cada hora ocupada. Nos horários em que a To_{APP} está fora dos limites apresentados na Tabela 3, é considerada a carga térmica de refrigeração (CgTR) ou de aquecimento (CgTA) obtida na simulação sem ventilação natural. Para a classificação é utilizada a CgTT total da UH, calculada somando os valores de CgTR com os de CgTA obtido durante as horas de ocupação de cada APP. A CgTA é calculada somente para as cidades que se enquadram no intervalo 1 da Tabela 3, enquanto que a CgTR é calculada para todas as cidades.

3.3.5. A classificação de eficiência energética da envoltória

A classificação de eficiência energética da envoltória é definida entre A, B, C, D e E, sendo A a classe mais eficiente. Na Tabela 4 são apresentados as classes e seus critérios.

Tabela 4 - Classes e critérios a serem atendidos.

<table>
<tr><th rowspan="2">Classe</th><th colspan="3">Critérios a serem atendidos</th></tr>
<tr><th>CgTT</th><th>PHFT</th><th>$Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$</th></tr>
<tr><td>A</td><td>$RedCgTT \geq RedCgTT_{mínA}$</td><td rowspan="2">$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{mín}$</td><td rowspan="4">Para todas as zonas bioclimáticas:
$Tomáx_{real} \leq Tomáx_{ref} + \Delta Tomáx$
Para as zonas bioclimáticas 1 a 4:
$Tomín_{real} \geq Tomín_{ref} - \Delta Tomín$</td></tr>
<tr><td>B</td><td>$RedCgTT \geq RedCgTT_{mínB}$</td></tr>
<tr><td>C</td><td>$RedCgTT \geq 0\%$</td><td rowspan="2">$PHFT_{real} > 0{,}9 * PHFT_{ref}$</td></tr>
<tr><td>D</td><td>$RedCgTT \geq RedCgTT_{mínD}$</td></tr>
<tr><td>E</td><td colspan="3">Não atende aos critérios da Classe D</td></tr>
<tr><td colspan="4">Nomenclatura adotada: $PHFT_{real}$ é o PHFT da UH para o modelo real; $PHFT_{ref}$ é o PHFT da UH para o modelo de referência; ΔPHFT é o incremento de PHFT; $Tomáxr_{eal}$ é a Tomáx da UH para o modelo real; $Tomáx_{ref}$ é a Tomáx da UH para o modelo de referência; $Tomín_{real}$ é a Tomín da UH para o modelo real; $Tomín_{ref}$ é a Tomín da UH para o modelo de referência; RedCgTT é a redução da CgTT do modelo real em relação ao modelo de referência.</td></tr>
</table>

Os valores para o incremento de PHFT da UH (ΔPHFT) e para a redução da carga térmica total da UH (RedCgTT), presentes na Tabela 4, podem ser obtidos conforme Equação 1 e Equação 2, respectivamente.

$$\Delta PHFT = PHFT_{real} - PHFT_{ref}$$ Equação 1

Onde:
ΔPHFT é o incremento de $PHFT_{UH}$ [%];
$PHFT_{real}$ é o PHFT da UH para o modelo real [%];
$PHFT_{ref}$ é o PHFT da UH para o modelo de referência [%].

$$RedCgTT = \left(1 - \frac{CgTT_{real}}{CgTT_{ref}}\right) * 100$$ Equação 2

Onde:
RedCgTT é a redução da CgTT da UH para o modelo real com relação ao modelo de referência [%];
$CgTT_{UH,real}$ é a CgTT da UH para o modelo real [kWh/ano];
$CgTT_{UH,ref}$ é a CgTT da UH para o modelo de referência [kWh/ano].

Além desses valores, é preciso determinar o valor de tolerância da Tomáx (ΔTomáx) e da Tomín (ΔTomín) para todas as classes, assim como o incremento mínimo para o PHFT ($\Delta PHFT_{mín}$) para as classes A e B, e as reduções de CgTT mínimas ($RedCgTT_{mín}$) para as classes A, B e D. Esses parâmetros variam de acordo com as características da UH analisada, bem como com os resultados da edificação de referência. Para edificações unifamiliares, o valor de ΔTomáx a ser adotado é igual a 2 ºC e o valor da ΔTomín igual a 1 ºC. Os valores de $\Delta PHFT_{mín}$ e $RedCgTT_{mín}$ a serem considerados para a classificação da eficiência energética da envoltória da edificação unifamiliar adotada neste estudo podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de $\Delta PHFT_{mín}$ e $RedCgTT_{mín}$ a serem adotados para a classificação da envoltória.

Parâmetro	Critério de $PHFT_{UH,ref}$	Valor a ser adotado para o parâmetro
$RedCgTT_{mínD}$	-	-17%
$RedCgTT_{mínB}$	Para $PHFT_{ref} < 70\%$	0%
	Para $PHFT_{ref} \geq 70\%$	17%
$RedCgTT_{mínA}$	Para $PHFT_{ref} < 70\%$	35%
	Para $PHFT_{ref} \geq 70\%$	55%
$\Delta PHFT_{mín}$	Para $PHFT_{ref} < 70\%$	Utilizar a equação: $45 - 0{,}58 * PHFT_{ref}$
	Para $PHFT_{ref} \geq 70\%$	0%

3.4. As estratégias de eficiência energética adotadas

Além da análise da eficiência energética da edificação base deste estudo, com as características do modelo de referência da INI-R, foram consideradas oito estratégias de eficiência energética. Essas estratégias foram analisadas, individualmente, para posteriormente serem combinadas, resultando em um décimo caso para análise. Na Tabela 6 são expostos os casos.

Tabela 6 - Estratégias de eficiência energética adotadas.

Caso	Estratégia adotada
1	Caso base: edificação de referência
2	Alteração no sistema construtivo Paredes: Tijolo furado (9x19x19 cm) com argamassa interna e externa de 2,5 cm, com U[1]: 2,37 W/(m².K) e CT[2]: 151 kJ/(m².K) Cobertura: Idêntica à da edificação de referência
3	Alteração na absortância da cobertura: de 0,65 para 0,39
4	Alteração na absortância das paredes externas: de 0,58 para 0,39
5	Adoção de sombreamento por meio de beirais ao longo de todo o perímetro da edificação, juntamente com o prolongamento da projeção do sombreamento nas fachadas Leste e Oeste. Na fachada Leste é considerado um sombreamento representando o efeito de uma varanda de 1,5 m de largura, enquanto na fachada Oeste é considerado um sombreamento com projeção de 3 m, representando o efeito de uma garagem. Na fachada Norte, que não possui janelas, o beiral tem maior largura igual a 1,17 m e menor largura igual a 0,5 m. Na fachada Sul o beiral possui largura de 0,5 m. A Figura 2a ilustra estas superfícies de sombreamento.

(Continuação)

Caso	Estratégia adotada
6	Aumento da área da janela e ventilação: foram consideradas janelas mais amplas nas fachadas Leste, Oeste e Sul, permitindo maior troca de ar por meio da ventilação natural. O $P_{t,APP}$ da sala é igual a 20,2% e igual a 28,5% no dormitório 1. No dormitório 2 foi considerada uma porta janela, resultando no $P_{t,APP}$ de 51,8%, conforme Figura 2b.
7	Alteração no tipo de vidro: de vidro simples para vidro duplo com FS[3]: 0,32 e U: 3,66 W/(m².K)
8	Alteração no fator solar do vidro: de 0,87 para 0,39, com U: 5,68 W/(m².K)
9	Adoção de veneziana nos APP, sendo consideradas fechadas quando a TBS externa for maior que 26 ºC
10	Combinação das estratégias 2 a 9
[1]U: transmitância térmica; [2]CT: capacidade térmica; [3]FS: fator solar.	

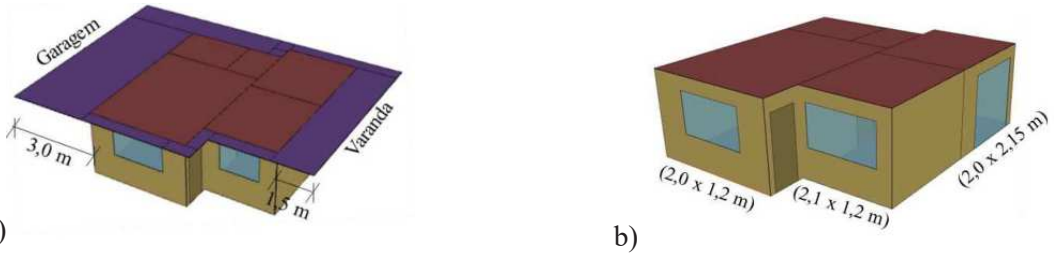


Figura 2 - Representação do modelo de simulação do a) Caso 5 e b) Caso 6.

3.5. Análise do balanço térmico

Analisar o balanço térmico permite o entendimento dos fenômenos termofísicos presentes na edificação, indicando os principais componentes responsáveis pelas trocas de calor. O somatório dos ganhos e perdas de calor deve ser zero, conforme a Equação 3 que representa as trocas de calor que ocorrem nas superfícies internas dos ambientes.

$$q_{condução} + q_{radiação\ solar} + q_{convecção} + q_{radiação\ interna} = 0 \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:
$q_{condução}$ = é a troca de calor que ocorre por condução entre a superfície externa e interna do ambiente; o valor positivo representa que a condução ocorre da face externa para a interna [kWh];
$q_{radiação\ solar}$ = representa o ganho de calor pela incidência de radiação solar na superfície interna; essa radiação é advinda das janelas externas [kWh];
$q_{convecção}$ = é a troca de calor que ocorre por convecção entre a superfície interna e o ar do ambiente; o valor positivo indica que a superfície está transferindo calor para o ar do ambiente [kWh];
$q_{radiação\ interna}$ = representa o ganho de calor pela incidência de radiação na superfície interna; essa radiação é proveniente das demais superfícies internas e iluminação [kWh].

Com a análise do balanço térmico nos ambientes, é possível determinar quais superfícies da envoltória necessitam de modificações para aprimorar a eficiência energética da UH, uma vez que será possível analisar os ganhos e perdas de calor. Neste estudo, o balanço térmico foi aplicado na edificação base para a condição naturalmente ventilada, uma vez que essa condição impacta em todos os indicadores de eficiência energética analisados. O ambiente analisado foi a sala, visto que é o ambiente com maior área e o seu período de ocupação é predominantemente diurno.

4. RESULTADOS

Os indicadores de desempenho utilizados para classificar as edificações são definidos em relação a características climáticas do local considerado para a simulação. Como neste estudo duas cidades foram avaliadas, diferentes indicadores de desempenho foram considerados em cada cidade. A Tabela 7 apresenta os indicadores de desempenho utilizados de acordo com as características climáticas de Florianópolis e Palmas. A faixa de To_{APP} a ser considerada para o PHFT, assim como a consideração da CgTA, são definidas em relação aos intervalos da Tabela 3, enquanto a análise da Tomín é definida em função da ZB. A CgTR e a Tomáx são avaliadas igualmente em qualquer clima.

Tabela 7 - Indicadores de desempenho utilizados de acordo com o clima.

Cidade	ZB	Intervalo	PHFT	CgTA	CgTR	Tomín	Tomáx
Florianópolis (SC)	3	1	18 ºC < To_{APP} < 26 ºC	✓	✓	✓	✓
Palmas (TO)	7	2	To_{APP} < 26 ºC	×	✓	×	✓

Ao simular a edificação em sua condição de referência, obtiveram-se os indicadores de desempenho referentes a cada clima. A partir desses indicadores, foi possível estabelecer os critérios de desempenho exigidos para as temperaturas operativas mínimas e máximas, PHFT e CgTT. Os valores estabelecidos apresentam-se na Tabela 8, na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 8 - Valores de Tomín e Tomáx obtidos na simulação de referência, e seus limites tolerados.

Cidade	Tomín (simulado)	Tomáx (simulado)	Tomín (tolerado)	Tomáx (tolerado)
Florianópolis (SC)	13,5 ºC	32,7 ºC	12,5 ºC	34,7 ºC
Palmas (TO)	-	36,0 ºC	-	38,0 ºC

Tabela 9 - Valores de PHFT obtidos na simulação de referência, e seus limites tolerados.

Cidade	PHFT (simulado)	PHFT (tolerado para as classes C e D)	PHFT (tolerado para as classes A e B)
Florianópolis (SC)	72,9 %	65,6 %	72,9 %
Palmas (TO)	36,7 %	33,0 %	60,4 %

Tabela 10 - Valores exigidos para RedCgTTmín de acordo com a classe de eficiência energética.

Cidade	$RedCgTT_{mín}$ Classe D	$RedCgTT_{mín}$ Classe C	$RedCgTT_{mín}$ Classe B	$RedCgTT_{mín}$ Classe A
Florianópolis (SC)	- 17%	0 %	17 %	35 %
Palmas (TO)	- 17%	0 %	27 %	55 %

A partir dos resultados obtidos pelas simulações das diferentes estratégias de eficiência energética, foi possível classificá-las de acordo com os critérios estabelecidos para os climas e para a edificação de referência. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para cada indicador. As linhas pontilhadas indicam os limites exigidos para obtenção da classe C de eficiência energética.

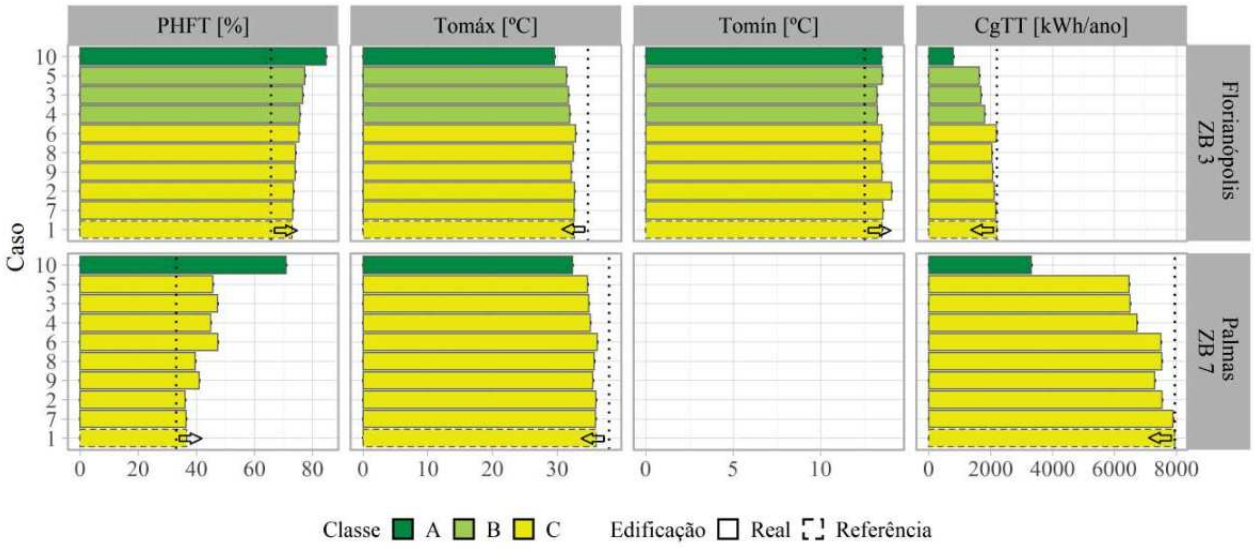


Figura 3 - Resultado da eficiência energética.

Pelos resultados, é possível observar que as estratégias de eficiência energética, quando aplicadas de maneira isolada, foram capazes de melhorar o desempenho da edificação na maioria dos casos. No entanto, a obtenção da classe A de eficiência energética foi possível apenas com a adoção de uma combinação de estratégias. Enquanto que a referência (caso 1) apresentou CgTT igual a 2.200 kWh/ano e 7.949 kWh/ano para Florianópolis e Palmas, respectivamente, para a combinação de estratégias (caso 10), a UH obteve CgTT igual a 791 kWh/ano em Florianópolis e 3.315 kWh/ano em Palmas, ou seja, valor inferior à metade da CgTT da referência (caso 1) para ambos os climas. Em Florianópolis, apesar da redução expressiva de CgTT no caso 10, houve um aumento da CgTA, o que indica que as estratégias adotadas nesse caso resultam

em um número maior de horas ocupadas com temperaturas operativas inferiores a 18 °C. Quando analisado o PHFT e as Tomáx e Tomín, em Florianópolis, o caso 10 apresentou PHFT igual a 85%, Tomáx igual a 30 ºC e Tomín igual a 13 ºC, já em Palmas, o PHFT foi igual a 71% e a Tomáx igual a 32 ºC. A adoção de estratégias para mitigar os efeitos da radiação solar, reduzindo a absortância das superfícies externas e adotando elementos de sombreamento, mostraram-se eficazes em ambos os climas. No caso de Florianópolis, essas estratégias foram capazes de elevar a eficiência da edificação para a classe B.

Na Figura 4 é apresentado o balanço térmico de cada superfície da envoltória da sala. A análise foi aplicada na edificação base para a condição de uso naturalmente ventilada, uma vez que essa condição impacta em todos os indicadores analisados. No gráfico, a parcela amarela representa as trocas de calor por condução, sendo negativa quando a superfície transfere o calor do ambiente interno para o ambiente externo e positiva quando a superfície transfere calor do ambiente externo para o interno. A parcela verde-clara representa os ganhos e perdas de calor por convecção, sendo negativo quando a superfície perde calor para o ar do ambiente e positivo quando o calor é transferido do ar do ambiente para a superfície. A parcela verde-escura representa as trocas que ocorrem na superfície por radiação de onda curta, sendo negativas quando a superfície emite radiação para as demais superfícies do ambiente e positivas quando recebe. A radiação solar que entra pelas janelas é representada por rosa, e é sempre positiva. É na radiação solar que vemos o impacto da área envidraçada e do sombreamento das janelas no desempenho térmico, pois essa parcela mostra a quantidade de radiação solar que está entrando no ambiente e potencialmente elevando a temperatura das superfícies.

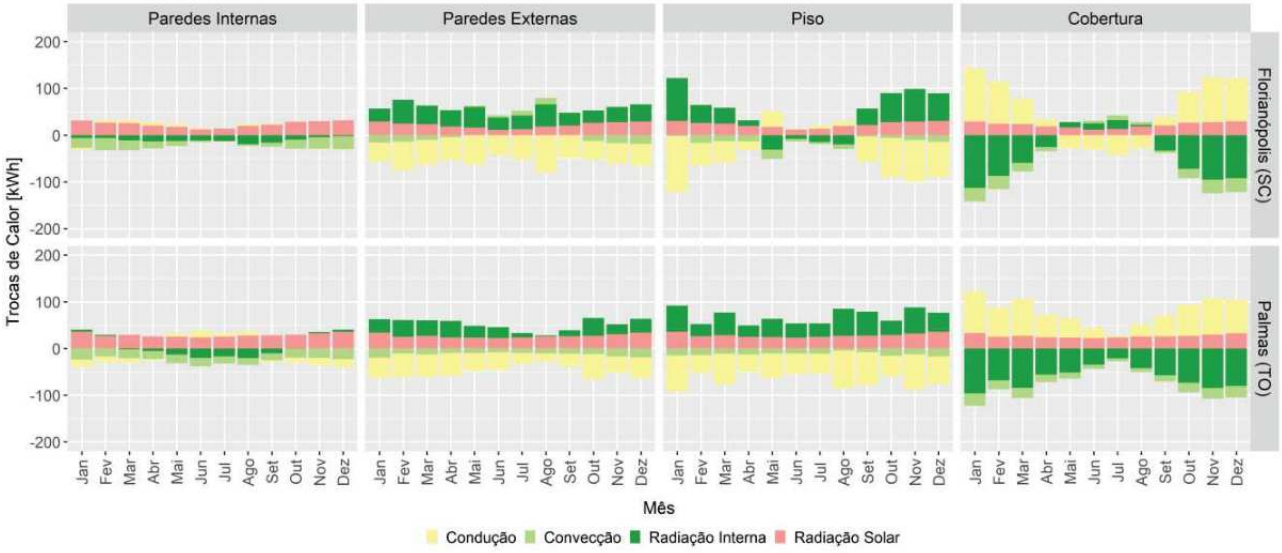


Figura 4 - Balanço térmico na sala do modelo de referência naturalmente ventilado.

O balanço térmico de cada superfície mostra que grande parte do ganho de calor é devido à radiação solar que entra no ambiente pelas janelas, confirmando o fato de que a estratégia 5 de sombreamento tem um impacto positivo na eficiência energética da UH, chegando a alcançar classe B em Florianópolis (SC). Dentre as superfícies, a cobertura é a maior responsável por ganhar calor por condução (condução positiva). Devido a este comportamento da UH no modelo de referência, alterar a absortância da telha de 0,65 para 0,39 foi uma das estratégias de eficiência energética que alcançou classe B em Florianópolis (SC). Em Palmas (TO), mesmo alcançando somente classe C, pode-se observar na Figura 3 que a estratégia 3 foi a que obteve o maior valor de PHFT e menor de CgTT. Outro ponto de destaque é a convecção, pois é possível observar no balanço térmico que essa forma de transferência de calor é responsável por retirar calor das superfícies, especialmente no verão. Como exemplo do efeito da convecção, foi possível elevar o PHFT em Palmas com a aplicação da estratégia 6. No entanto, quando esta estratégia é aplicada isoladamente, sem sombreamento, o aumento da área de ventilação leva à presença de maior área envidraçada. Consequentemente, ocorre maior incidência de radiação solar no ambiente, influenciando negativamente outros indicadores, principalmente a CgTT.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou a eficiência energética da envoltória de uma edificação unifamiliar térrea, conforme o novo procedimento de simulação computacional presente na Instrução Normativa do Inmetro para Classificação da Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (LABEEE, 2021). Foi analisado

o caso base (modelo de referência), como também nove estratégias de eficiência energética. Para complementar as análises, foi apresentado também o balanço térmico.

A análise da eficiência energética da envoltória mostrou que, dentre as medidas de eficiência energética adotadas, o sombreamento das janelas e a redução da absortância solar da envoltória foram as estratégias que isoladamente apresentaram o maior ganho de PHFT e maior redução da Tomáx e da CgTT. Porém, isoladamente, estas estratégias não chegaram a classe A de eficiência energética. A classe A foi obtida somente com as medidas combinadas, que incluem alteração no tipo de vidro, de simples para vidro duplo, redução na absortância da envoltória, optando por cores mais claras, utilização de sombreamento nas janelas com beirais e venezianas. Isto demonstra a importância de se analisar a edificação como um todo e não somente pontos específicos da envoltória.

Com o balanço térmico foi possível verificar que estratégias de eficiência energética que visem o sombreamento das aberturas e melhoria na cobertura da UH são as mais recomendadas para aprimorar o desempenho da envoltória da edificação unifamiliar analisada e para as cidades de Florianópolis (SC) e Palmas (TO). Com esse resultado pode-se concluir que analisar o balanço térmico em etapas anteriores à determinação da envoltória auxilia na tomada de decisão das medidas de eficiência energética a serem aplicadas no projeto. A análise pelo balanço térmico mostra precisamente quais as formas de transferência do calor que ocorrem na envoltória da edificação, como também por quais superfícies elas ocorrem. Dessa forma, é possível aplicar melhorias exatamente nos pontos nos quais é necessário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1:2013 Emenda 1:2021**: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2021a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **TR 15575-1-1:2021**: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1-1: Base-padrão de arquivos climáticos para a avaliação do desempenho térmico por meio do procedimento de simulação computacional. Rio de Janeiro, 2021b.

BRASIL. DECRETO nº 4.059, DE 19 DE DEZEMBRO DE 2001. Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. 2001.

BRASIL, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria nº 42 – Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. 2021.

BRASIL, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria nº 163 - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. 2009.

BRASIL, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria nº 372 - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. 2010a.

BRASIL, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria nº 449 - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. 2010b.

BRASIL, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria complementar nº 18 - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. 2013.

ELI, L. G. et al. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto *Ground Domain* no programa *EnergyPlus* – Versão 9.0.1**. Florianópolis, Brasil. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, LabEEE. 2019.

HENSEN, Jan L. M.; LAMBERTS, Roberto (ed.); SPITLER, Jeffrey D. (subcapítulo autor). **Building Performance Simulation for Design and Operation**: thermal load and energy performance prediction. 2. ed. New York, Usa: Routledge, 2019.

HONG, T.; LANGEVIN, J.; SUN, K., Building simulation: Ten challenges. **Building Simulation**, v. 11, n. 5, p. 871–898, 2018.

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2021. Desenvolvimento da instrução normativa do Inmetro para classificação da eficiência energética de edificações residenciais (INI-R). Relatório interno.

KRELLING, A.F.; ELI, L.G.; VEIGA, R.K.S.; OLINGER, M.S.; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. Proposta de método de avaliação do desempenho térmico de residências: NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

PROCEL. **Pesquisas de Posse e Hábitos de Consumo de Energia (PPHs)**. 2019. Disponível em: <http://www.procel.gov.br/main.asp?View=%7B4A5E324F-A3B0-482A-B1CD-F75A2A150480%7D>. Acesso em: 20 mar. 2021.

RAMOS, G. et al. Adaptive behaviour and air conditioning use in Brazilian residential buildings. **Building Research & Information**, p. 1-16, 2020.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1–13, 2016.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P., Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, v. 87, n. December 2014, p. 524–541, 2015.