AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR DE INTERESSE SOCIAL NO CLIMA DA SERRA GAÚCHA

Eduardo Pierozan (1); Elise Sommer Watzko (2); Enedir Ghisi (3)
(1) Engenheiro, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, eduardo.pierozan@posgrad.ufsc.br
(2) Doutora, Professora do Departamento de Engenharia de Energia, elise.sommer@ufsc.br
(3) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, enedir.ghisi@ ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Cx Postal 476, Florianópolis–SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 5184

RESUMO
Os projetos de habitação social no Brasil tendem a fracassar em proporcionar conforto aos usuários, o que pode levar ao aumento do consumo de energia elétrica para climatização. Este artigo tem como objetivo avaliar o nível de desempenho térmico e a classe de eficiência energética da envoltória de uma edificação multifamiliar de interesse social no clima da serra gaúcha, por meio da aplicação dos novos métodos computacionais da Norma ABNT NBR 15.575 e da Instrução Normativa INI-R do INMETRO. O método está dividido em três etapas principais: definição do projeto de edificação multifamiliar, aplicação do procedimento computacional de avaliação de desempenho térmico previsto na Norma ABNT NBR 15.575, e aplicação do procedimento computacional de avaliação de eficiência energética previsto na INI-R. Os resultados são expressos em termos dos indicadores de percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa, temperaturas operativas anuais máxima e mínima e carga térmica total, cujos valores médios entre as doze unidades habitacionais avaliadas foram 67,7%, 29,9°C, 10,5°C e 2.582 kWh/ano, respectivamente. Todas as unidades habitacionais avaliadas atenderam aos critérios mínimos de desempenho térmico estabelecidos pela Norma ABNT NBR 15.575. Das doze unidades habitacionais avaliadas, cinco receberam a classe D de eficiência energética, e outras nove unidades receberam a Classe C de eficiência. As varáveis climáticas e propriedades térmicas da envoltória devem ser cuidadosamente avaliadas na fase de projeto para aumentar o desempenho térmico e energético da edificação.

Palavras-chave: desempenho térmico, eficiência energética, simulação computacional.

ABSTRACT
Social housing projects in Brazil tend to fail to provide comfort to their users, which can lead to an increase in the electricity consumption for air conditioning. This paper aims to evaluate the thermal and energy performance of a social interest multifamily building envelope in the southern Brazilian climate, through the application of the new computational methods of ABNT NBR 15.575 and INI-R Normative Instruction from INMETRO. The method is divided into three main stages: definition of the multifamily building, application of the computational procedure for evaluating thermal performance defined by ABNT NBR 15.575, and application of the computational procedure for evaluating energy efficiency defined by INI-R. The results are shown in terms of the following indicators: percentage of hours occupied within the operative temperature range, maximum and minimum annual operative temperatures and total electric load. The average values among the twelve housing units evaluated were 67.7%, 29.9°C, 10.5°C and 2,582kWh/year, respectively. All housing units met the minimum thermal performance criteria established by ABNT NBR 15.575. Among the housing units evaluated, five received label D for energy efficiency, and the other nine units received label C. The climatic variables and thermal properties of the envelope must be carefully evaluated in the design phase, in order to increase the thermal and energy performance of the building.

Keywords: thermal performance, energy efficiency, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

As edificações habitacionais tiveram seus requisitos mínimos de desempenho térmico estabelecidos em 2013 pela norma ABNT NBR 15.575 (ABNT, 2013), a qual previa a possibilidade de avaliação por meio dos métodos simplificado e computacional. Limitações identificadas no método computacional, tais como a análise restrita a um dia típico de projeto, a taxa de renovação de ar do ambiente considerada constante e o desprezo da ocorrência de cargas térmicas internas (SORGATO et al., 2012), motivaram a revisão dos procedimentos de avaliação do desempenho térmico dessa norma de modo a melhor refletir a realidade das habitações brasileiras (KRELLING et al., 2020). O comportamento termofísico de edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares apresenta diferenças significativas, sendo que a aplicação do novo método em edificações unifamiliares foi demonstrada por Veiga et al. (2020).

Quanto à avaliação de eficiência energética, o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R (INMETRO, 2012) foi instituído em 2012 com o propósito de especificar requisitos técnicos e métodos para classificação de edificações residenciais quanto à eficiência energética, e dessa forma criar condições para a etiquetagem do nível de eficiência energética de edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares. O RTQ-R classifica o desempenho energético das edificações utilizando um indicador de consumo que, apesar de permitir a sua classificação de A a E, não fornece uma ideia de grandeza relacionada ao consumo real da edificação, limitação essa que não permite que seja quantificada a economia gerada por medidas de eficiência energética empregadas na mesma (LabEEE, 2021). Nesse contexto, a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – INI-R (CB3E, 2020), que substituirá o RTQ-R, baseia-se no consumo de energia primária e compara a edificação considerando suas características reais com a mesma edificação adotando-se características de referências, que equivalem à classe D de eficiência energética.

O estabelecimento de padrões para a avaliação e classificação de edifícios, em termos de desempenho energético, é uma alternativa utilizada e reconhecida internacionalmente para reduzir o consumo de energia nas edificações (FOSSATI et al., 2016). Códigos de eficiência energética de edificações são mais amplamente adotados em regiões frias do que em regiões quentes, sendo que a maioria dos países industrializados tem códigos compulsórios. Mesmo entre os países em desenvolvimento, estes códigos prevalecem na Europa Oriental e Leste Asiático, regiões de clima frio que exigem aquecimento das edificações. Nos centros urbanos dos países em desenvolvimento da América Latina e do Caribe os códigos são raros, e mesmo onde estão disponíveis, não foram implementados. Edificações nestas regiões demandam principalmente por resfriamento, com exceção do sul da Argentina e Chile. Por esta razão, muitos países introduziram padrões de eficiência energética para os equipamentos utilizados para fins de resfriamento (LIU; MEYER; HOGAN, 2010).

As edificações respondem por mais da metade da energia elétrica consumida no Brasil (EPE, 2020). Paralelamente, sabe-se que as técnicas construtivas utilizadas nos projetos mais frequentes de habitação social no Brasil tendem a fracassar em proporcionar conforto aos usuários, o que pode levar à necessidade de maior uso de condicionamento de ar, e por consequência, aumento do consumo de energia (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). Nesse contexto, a revisão e atualização das normativas estabelecem métodos de avaliação de desempenho térmico e energético, tais como a ABNT NBR 15.575 e a INI-R, são de fundamental importância no sentido de desenvolver habitações que propiciem maior conforto térmico aos seus usuários e consumam menos energia elétrica.

2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo avaliar o nível de desempenho térmico e a classe de eficiência energética da envoltória de uma edificação multifamiliar no clima da serra gaúcha por meio da aplicação dos novos métodos computacionais da Norma ABNT NBR 15.575 e da Instrução Normativa INI-R do INMETRO.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em três etapas principais:

- Definição do projeto de edificação multifamiliar objeto da avaliação.
- Aplicação do procedimento computacional de avaliação de desempenho térmico previsto na Norma ABNT NBR 15.575.
- Aplicação do procedimento computacional de avaliação de eficiência energética previsto na INI-R.

O programa EnergyPlus versão 9.3 foi utilizado tanto no procedimento computacional da ABNT NBR 15.575 quanto no da INI-R.

3.1. Definição do objeto estudo de caso

Para a definição do projeto de edificação multifamiliar objeto da avaliação buscou-se na literatura por estudos que tivessem definido projetos representativos de habitação social. Triana et al. (2015) caracterizaram projetos representativos de habitação de interesse social no Brasil, construídos por meio do Programa Minha Casa Minha Vida, iniciativa do Governo Federal que teve por finalidade criar mecanismos de incentivo à produção e aquisição de novas unidades habitacionais a famílias de baixa renda (BRASIL, 2009). Para a Faixa 1 do programa, verificou-se que a tipologia multifamiliar mais frequente é de edifícios de planta com formato "H", com 4 a 5 pavimentos, cujo projeto representativo obtido a partir de quatro amostras é apresentado na Figura 1. Na Tabela 1 são apresentadas as principais características da envoltória deste projeto representativo. Utilizou-se o arquivo climático Bento Gonçalves INMET 869790 (CLIMATE.ONEBUILDING, 2021) com dados básicos registrados pelo INMET (INMET, 2020) entre os anos de 2001 e 2010, que representa o clima da região onde se localiza o estudo de caso.

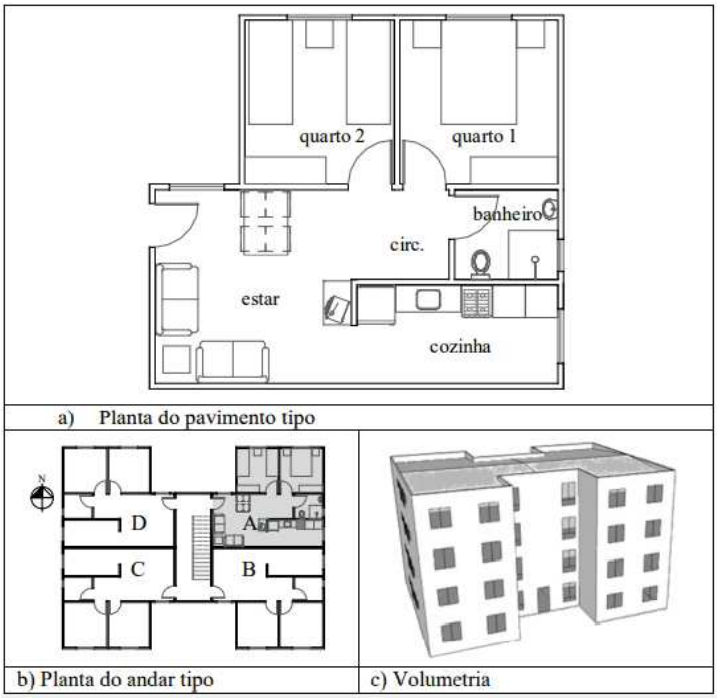


Figura 1 – Projeto representativo de habitação multifamiliar (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015).

Tabela 1– Principais características da envoltória do projeto representativo de habitação multifamiliar (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). (U: Transmitância térmica; Ct: Capacidade térmica; α: absortância; FV: Fator de ventilação; FI: Fator de iluminação)

Elemento	Descrição
Paredes	painel de concreto 10 cm; U= 4,4 W/m²K; Ct =240 kJ/m²K; α=0,58
Cobertura	telhado em fibrocimento, quatro águas com inclinação média de 4,33º, estrutura metálica, ático com laje em concreto 10 cm; U=2,06 W/m²K; Ct =233 kJ/m²K, α=0,7
Janela (dormitórios)	1,44 m², duas folhas de correr (FV=0,45; FI=0,8), sem venezianas, vidros transparentes 4 mm, esquadrias em ferro ou alumínio
Janela (sala)	1,60 m², duas folhas de correr com janela fixa embaixo (FV=0,375; FI=0,8), sem venezianas, vidros transparentes 4 mm, esquadrias em ferro ou alumínio
Janela (cozinha)	1,20 m², duas folhas de correr (FV=0,45; FI=0,80), sem venezianas, vidros transparentes 4 mm, esquadrias em ferro ou alumínio
Janela (banheiro)	0,36 m², janela basculante, peitoril 1,50 m, sem venezianas, vidros transparentes 4 mm, esquadrias em ferro ou alumínio
Portas internas	0,80x2,10 m em madeira
Pé-direito	2,50 m
Piso	cerâmico

3.2. Método computacional de avaliação do nível desempenho térmico

O procedimento de simulação computacional é a maneira mais abrangente e representativa de análise do desempenho térmico disponível no método proposto na NBR 15.575 (ABNT, 2020), permitindo avaliações para a obtenção dos níveis de desempenho mínimo, intermediário e superior (LabEEE, 2021). Este procedimento avalia o desempenho térmico anual da envoltória da edificação em relação a esta envoltória com características de referência. Neste procedimento devem ser elaborados dois modelos:

- o modelo real, que conserva as características geométricas da unidade habitacional, as propriedades térmicas e composições dos elementos transparentes, paredes e cobertura;
- o modelo de referência, que representa a edificação avaliada, mas com características de referência determinadas pela Norma.

Na Tabela 2 são apresentadas as características dos modelos real e de referência.

Tabela 2 – Características dos modelos real e de referência.

Característica	**Modelo real**	**Modelo de referência**
Arquivo Climático	Condição real	
Geometria	Condição real	
Orientação solar	Condição real	
Tamanho das aberturas	Condição real	Condição de referência
Proteções solares	Condição real	Condição de referência
Componentes construtivos da envoltória	Condição real	Condição de referência
Padrão de ocupação	Conforme especificação da NBR 15.575	
Quantidade de ocupantes	Duas pessoas por dormitório	
Carga interna: pessoas	81 W/m² por pessoa (dormitório) 108 W/m² por pessoa (sala)	
Carga interna: iluminação	5 W/m² para sala e dormitórios	
Carga interna: equipamentos	120 W para sala	
Ventilação natural: portas	Conforme especificação da NBR 15.575	
Ventilação natural: janelas	Conforme especificação da NBR 15.575	
Temperatura de setpoint (condição sem ventilação natural)	Temp. Mínima = 21ºC Temp. Máxima = 23ºC	

Quando avaliado o desempenho térmico para o atendimento do nível mínimo, os modelos real e de referência devem ser simulados considerando somente o uso da ventilação natural nos ambientes de permanência prolongada. Para a obtenção dos níveis intermediário e superior, os modelos real e de referência devem ser simulados em duas condições, com e sem o uso da ventilação natural (ABNT, 2020). A partir da simulação com o uso da ventilação natural, devem ser determinados:

- O percentual de horas ocupadas dos ambientes de permanência prolongada dentro de uma faixa de temperatura operativa, sendo que a faixa de temperatura operativa considerada para a condição climática em questão é de 18º C a 26º C;
- As temperaturas operativas anuais máxima e mínima de cada ambiente de permanência prolongada, considerando apenas os períodos de ocupação dos mesmos.

Após a obtenção dos valores de percentual de horas ocupadas dos ambientes de permanência prolongada dentro da faixa de temperatura operativa, temperaturas operativas anuais máxima e mínima para cada ambiente de permanência prolongada, deve-se determinar o percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa, temperaturas operativas anuais máxima e mínima da unidade habitacional (ABNT, 2020). A partir da simulação sem o uso da ventilação natural, devem ser determinados:

- O somatório anual dos valores horários da carga térmica de resfriamento;
- O somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento.

A partir dos valores de carga térmica de resfriamento e carga térmica de aquecimento para cada ambiente de permanência prolongada, deve-se determinar o somatório anual dos valores horários da carga térmica total da unidade habitacional (ABNT, 2020).

Os níveis de desempenho térmico da unidade habitacional (mínimo, intermediário e superior) são definidos a partir dos seguintes critérios:

- Mínimo, que avalia o percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e temperaturas operativas anuais máxima e mínima da unidade habitacional do modelo real, em relação ao modelo de referência;

- Intermediário, que avalia o modelo real no atendimento dos critérios do nível mínimo, assim como quanto ao incremento do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e quanto à redução da carga térmica total do modelo real, em relação ao modelo de referência;
- Superior, que avalia o modelo real no atendimento dos critérios do nível mínimo, assim como quanto ao incremento do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e à redução da carga térmica total do modelo real, em relação ao modelo de referência. Diferencia-se do nível intermediário na obtenção de reduções mais elevadas da carga térmica total (ABNT, 2020).

Na Tabela 3 são apresentados os critérios para os níveis de desempenho intermediário e superior, sendo que os valores de incremento mínimo do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e redução mínima da carga térmica total variam em função do pavimento avaliado, percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e redução de carga térmica total do modelo de referência. Para todos os níveis a tolerância para temperatura operativa máxima adotada é de 2°C para as unidades do pavimento cobertura e 1°C para as unidades dos demais pavimentos. A tolerância para temperatura operativa mínima adotada é de 1°C para todas as unidades.

Tabela 3 – Critérios para definição no nível de desempenho térmico da envoltória.

Nível de desempenho	Critérios
Intermediário	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{mínI}$, $Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx$, $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín$ e $RedCgTT \geq RedCgTT_{mínI}$
Superior	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{mínS}$, $Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx$, $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín$ e $RedCgTT \geq RedCgTT_{mínS}$
Sendo que: $\Delta PHFT$ – incremento do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa; $\Delta PHFT_{mínI}$ – incremento mínimo do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa para nível intermediário; $\Delta PHFT_{mínS}$ – incremento mínimo do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa para nível superior; $Tomáx_{UH,real}$ – temperatura operativa máxima da unidade habitacional real; $Tomáx_{UH,ref}$ – temperatura operativa máxima da unidade habitacional de referência; $\Delta Tomáx$ – tolerância para a temperatura operativa máxima; $Tomín_{UH,real}$ – temperatura operativa mínima da unidade habitacional real; $Tomín_{UH,ref}$ – temperatura operativa mínima da unidade habitacional de referência; $\Delta Tomín$ – tolerância para a temperatura operativa mínima; $RedCgTT$ – redução da carga térmica total; $RedCgTT_{mínI}$ – redução mínima da carga térmica total para nível intermediário; $RedCgTT_{mínS}$ – redução mínima da carga térmica total para nível superior.	

Quando avaliadas unidades habitacionais de edificações multifamiliares, a exemplo de edifícios de apartamentos, devem ser considerados o pavimento térreo, o pavimento tipo e o pavimento de cobertura, sendo que todas as unidades habitacionais destes pavimentos devem ser consideradas (ABNT, 2020).

Nesse contexto, a análise foi realizada em doze unidades habitacionais, sendo quatro do pavimento térreo, quatro do pavimento tipo e quatro do pavimento cobertura. Na Figura 2 é apresentado o modelo geométrico da edificação real, onde considerou-se a existência de outras edificações com mesmas dimensões em seu entorno, com afastamento de doze metros entre elas.

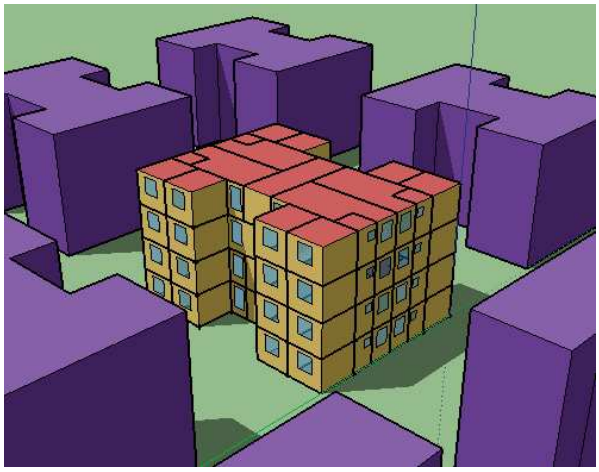


Figura 2 – Modelo geométrico da edificação real.

Os indicadores utilizados pela Norma ABNT NBR 15.575 permitem uma análise mais representativa dos diversos cenários climáticos aos quais o desempenho térmico está sujeito.

Os métodos de avaliação não se propõem a estabelecer valores fixos a serem atendidos para cada um dos indicadores, ao invés disso a abordagem se faz a partir da comparação com um modelo de referência, que representa o desempenho referencial a ser superado, permitindo assim a avaliação do desempenho térmico e energético da edificação dentro das limitações impostas por cada clima (KRELLING et al., 2020).

3.3. Método computacional de avaliação da classe de eficiência energética

A determinação da classe de eficiência energética é realizada em função do atendimento dos critérios de percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa, temperaturas operativas anuais máxima e mínima e redução de carga térmica total, quando comparado com o desempenho da envoltória com características de referência (Tabela 4), sendo que o método para a modelagem da envoltória, bem como o procedimento de cálculo dos critérios de avaliação, são os mesmos determinados pela Norma ABNT NBR 15.575.

Os valores de incremento mínimo do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e redução mínima de carga térmica total para cada classe de eficiência variam em função do pavimento avaliado, percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e redução de carga térmica total do modelo de referência. Para todas as classes a tolerância para temperatura operativa máxima adotada é de 2°C para as unidades do pavimento cobertura e 1°C para as unidades dos demais pavimentos. A tolerância para temperatura operativa mínima adotada é de 1°C para todas as unidades.

Tabela 4 – Critérios para definição da classe de eficiência energética da envoltória.

Classe de eficiência energética	**Critério**		
	PHFT	**Tomáx e Tomín**	**RedCgTT**
Classe D	$PHFT_{UH,real} > 0{,}9.PHFT_{UH,ref}$	$Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx$ e $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín$	$RedCgTT \geq RedCgTT_{mínD}$
Classe C	$PHFT_{UH,real} > 0{,}9.PHFT_{UH,ref}$		$RedCgTT \geq 0\%$ e $RedCgTT \geq RedCgTT_{mínD}$
Classe B	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{mínB}$		$RedCgTT \geq RedCgTT_{mínB}$
Classe A	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{mínA}$		$RedCgTT \geq RedCgTT_{mínA}$

Sendo que: $PHFT_{UH,real}$ – percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa na unidade habitacional real; $PHFT_{UH,ref}$ – percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa na unidade habitacional de referência; $\Delta PHFT$ – incremento do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa; $\Delta PHFT_{mínB}$ – incremento mínimo do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa para classe B; $\Delta PHFT_{mínA}$ – incremento mínimo do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa para classe A; $Tomáx_{UH,real}$ – temperatura operativa máxima da unidade habitacional real; $Tomáx_{UH,ref}$ – temperatura operativa máxima da unidade habitacional de referência; $\Delta Tomáx$ – tolerância para a temperatura operativa máxima; $Tomín_{UH,real}$ – temperatura operativa mínima da unidade habitacional real; $Tomín_{UH,ref}$ – temperatura operativa mínima da unidade habitacional de referência; $\Delta Tomín$ – tolerância para a temperatura operativa mínima; RedCgTT – redução da carga térmica total; $RedCgTT_{mínD}$ – redução mínima da carga térmica total para classe D; $RedCgTT_{mínB}$ – redução mínima da carga térmica total para classe B; $RedCgTT_{mínA}$ – redução mínima da carga térmica total para classe A).

Uma vez que a NBR 15.575 e a INI-R utilizam o mesmo método de modelagem da envoltória e os mesmos indicadores de desempenho, existe uma relação de equivalência entre os níveis de desempenho térmico e classe de eficiência energética da envoltória, a qual é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Equivalência entre os níveis de desempenho térmico e classe de eficiência energética da envoltória.

Nível de desempenho térmico	**Classe de eficiência energética**
-	Classe E
Nível Mínimo	Classe D
	Classe C
Nível Intermediário	Classe B
Nível Superior	Classe A

4. RESULTADOS

Por meio da aplicação do método descrito obtiveram-se os resultados de percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa, temperaturas operativas anuais máxima e mínima para a edificação real. Estes indicadores de desempenho são apresentados na Figura 3, onde também foi indicado o percentual de horas abaixo e acima da faixa de temperatura operativa (<18ºC e >26ºC, respectivamente). Apesar de não serem critérios de avaliação da Norma, os percentuais de horas abaixo e acima da faixa de temperatura operativa indicam se o desconforto térmico preponderante na habitação é devido ao frio ou ao calor. Na Figura 4 é apresentada a comparação do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa, temperaturas operativas anuais máxima e mínima para a edificação de referência e real. As cargas térmicas de aquecimento e resfriamento da edificação real são apresentadas na Figura 5, enquanto a comparação entre as cargas térmicas totais da edificação real e de referência é apresentada na Figura 6. Na Tabela 6 são apresentados os valores de incremento do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e a redução de carga térmica total, quando comparadas as edificações de referência e real. Os resultados são identificados em função do pavimento e orientação da unidade habitacional: nordeste (NE), noroeste (NO), sudeste (SE) e sudoeste (SO).

4.1.Percentual de horas na faixa de temperatura operativa

Quanto aos resultados para a edificação real, o percentual médio de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa foi de 67,7% para as doze unidades habitacionais. As unidades habitacionais do pavimento térreo tiveram o melhor desempenho, com média de 72,6% de percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa, seguido das unidades do pavimento tipo, com 69,9% de percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa em média. O pior desempenho foi das unidades do pavimento cobertura, com 60,7% de percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa em média.

Estes resultados estão relacionados com a parcela da envoltória que cada unidade tem em contato com o ambiente externo. No pavimento tipo, o teto e o piso são considerados adiabáticos na simulação, pois na condição real, estes elementos trocariam calor com outras unidades, e não com o ambiente externo. No pavimento cobertura, o piso é considerado adiabático enquanto o teto está em contato com o ambiente externo, recebendo incidência solar direta em toda cobertura, o que explicaria o alto percentual de horas acima da faixa de temperatura operativa. Destaca-se que por ter absortância maior, a superfície da cobertura (α=0,7) aquece mais do que a superfície das paredes (α=0,58) durante o dia. No pavimento térreo, por sua vez, o teto é considerado adiabático e o piso troca calor com o solo. Presume-se que o solo atue como um termorregulador, por possuir uma menor amplitude térmica quando comparado ao ar do ambiente externo, e dessa forma contribui para a manutenção da temperatura interna das unidades do pavimento térreo.

O melhor desempenho entre as doze unidades foi da unidade NO do pavimento térreo, com 74% de percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa, enquanto o pior desempenho foi da unidade SO do pavimento cobertura, com 59,5%, com uma diferença de 14,5%. A diferença de percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa entre as unidades de um mesmo pavimento não foi significativa (1,7% na cobertura, 3,2% no pavimento tipo e 2,8% no pavimento térreo).

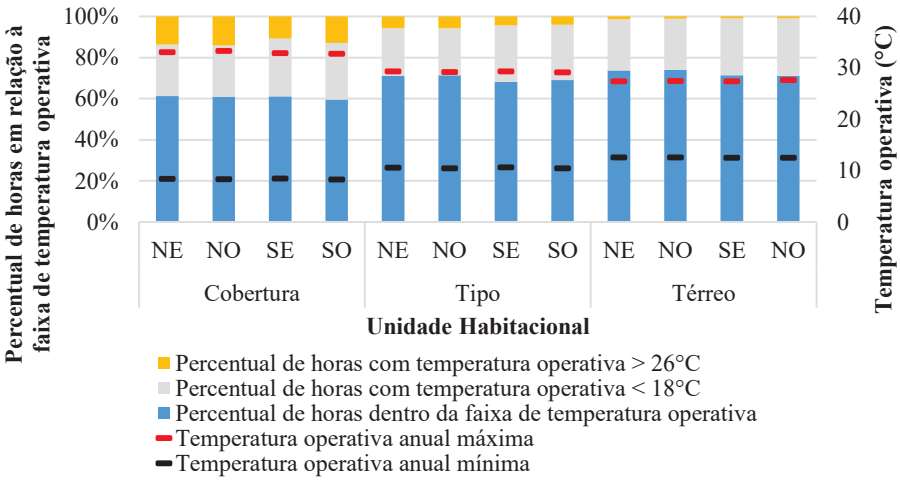


Figura 3 – Resultados para a edificação real na condição de uso com ventilação natural.

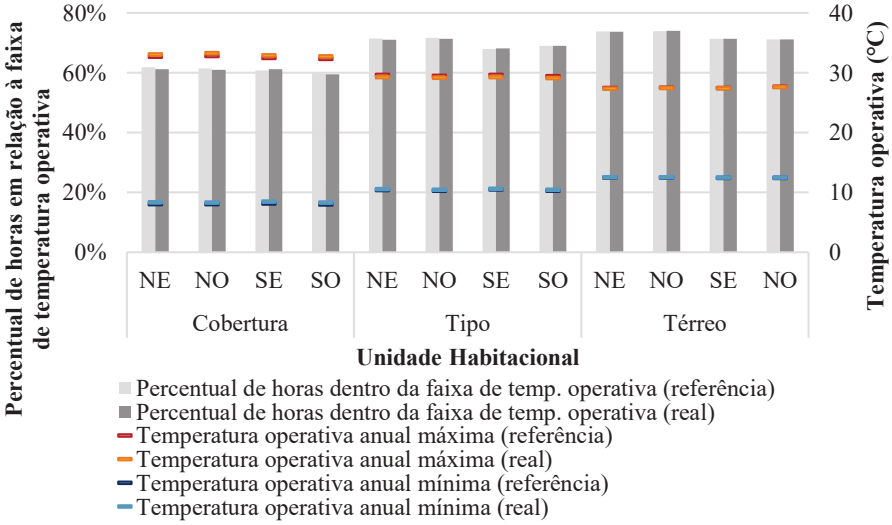


Figura 4 – Comparação de resultados entre a edificação de referência e real na condição de uso com ventilação natural.

4.2.Temperaturas operativas

Quanto às temperaturas operativas da edificação real, verificou-se que a média das máximas entre as 12 unidades é de 29,9°C, enquanto a média das mínimas é de 10,5°C. As unidades habitacionais do pavimento térreo tiveram as menores temperaturas máximas (27,5°C) e maiores temperaturas mínimas (12,5°C), considerando a média no pavimento, enquanto as unidades do pavimento tipo tiveram máxima de 33,0°C e mínima de 10,5°C, em média. O pior desempenho foi das unidades do pavimento cobertura, com máxima de 29,2°C e mínima de 8,4°C, em média.

O mau desempenho das unidades da cobertura deve-se ao fato de que neste pavimento, o teto está exposto ao ambiente externo. A incidência de radiação solar direta provoca aumento excessivo da temperatura interna nos períodos mais quentes, enquanto nos períodos mais frios, há maior perda de calor devido à parcela de envoltória exposta ao ambiente externo. O solo possui maior inércia térmica quando comparado ao ar do ambiente externo, o que garante às unidades do pavimento térreo menores amplitudes térmicas internas em relação às unidades dos demais pavimentos.

O melhor desempenho foi observado nas unidades NE e SE do pavimento térreo, com máxima de 27,4°C e mínima de 12,5°C. O pior desempenho foi da unidade NO do pavimento cobertura, com máxima de 33,3°C e mínima de 8,3°C. A diferença de máxima e mínima entre as unidades de um mesmo pavimento não foi significativa, não chegando a 1°C em todos os casos.

4.3.Carga térmica total

Na edificação real as maiores cargas térmicas foram observadas nas unidades da cobertura, com média de 2.582 kWh/ano. Nas unidades do pavimento tipo a média da carga térmica total foi de 1.166 kWh/ano, enquanto no pavimento térreo a média foi de 876 kWh/ano. Entre todas as unidades da edificação, aquela que demandou a maior carga térmica foi a unidade NO da cobertura (2.596 kWh/ano), enquanto a unidade que menos demandou carga térmica foi a unidade NO do pavimento térreo (820 kWh/ano), uma redução equivalente a 68%. Nas unidades dos pavimentos tipo e térreo as cargas térmicas de aquecimento foram preponderantes, enquanto no pavimento cobertura, as cargas térmicas de resfriamento foram mais representativas. Os resultados de carga térmica total são inversamente proporcionais aos resultados de percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa para cada unidade analisada. Quanto maior o percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa, menor é a demanda por aquecimento e resfriamento para que a temperatura interna esteja dentro da temperatura de *setpoint* determinada.

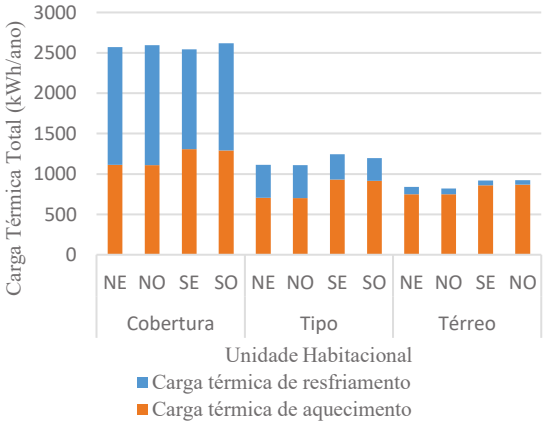


Figura 5 – Cargas térmicas de aquecimento e resfriamento na edificação real, na condição de uso sem ventilação natural.

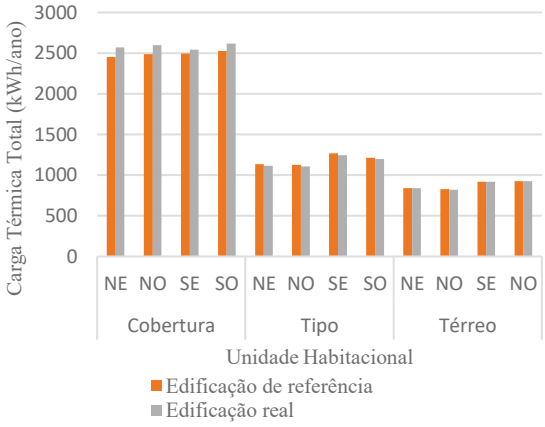


Figura 6 – Comparação entre as cargas térmicas totais na edificação de referência e real.

4.4. Nível de desempenho térmico e classe de eficiência energética

As unidades habitacionais foram avaliadas individualmente, por meio da comparação dos critérios de percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa, temperaturas operativas anuais máxima e mínima e redução de carga térmica total da edificação real em relação à edificação de referência. Todas as unidades atenderam aos critérios para o nível mínimo de desempenho térmico. Nenhuma delas, no entanto, demonstrou simultaneamente capacidade de incremento do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e de redução da carga térmica total para obtenção do nível intermediário ou superior de desempenho.

Quanto à classe de eficiência energética, as quatro unidades habitacionais do pavimento cobertura e a unidade NE do pavimento térreo receberam a classe D de eficiência energética, devido ao critério da redução da carga térmica total. Nestas unidades a carga térmica total da edificação real foi maior do que a carga térmica total da edificação de referência. Todas as demais unidades receberam a Classe C de eficiência, por não demonstrarem simultaneamente capacidade de incremento do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e de redução da carga térmica total para obtenção da classe B de eficiência energética da envoltória. Na Tabela 7 é apresentada a classificação de cada uma das unidades habitacionais avaliadas quanto ao nível de desempenho térmico e a classe de eficiência energética.

Entre os fatores que ocasionam o baixo desempenho térmico e energético da edificação está a composição da envoltória, cujos materiais constituintes são selecionados visando exclusivamente a redução de custo, em detrimento das suas propriedades térmicas. Tubelo et al. (2018) e Dalbem et al. (2019) destacaram a importância de utilizar materiais com baixa transmitância térmica visando o aumento do desempenho das habitações na Zona Bioclimática ZB1. Por outro lado, mesmo nas regiões mais frias deve-se visar a elaboração de projetos que reduzam o consumo de energia para resfriamento, tendo em vista as mudanças climáticas futuras (INVIDIATA; GHISI, 2016). As variáveis climáticas costumam ser desprezadas ao passo que se percebe o uso de projetos semelhantes em diferentes zonas bioclimáticas (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). Destaca-se ainda como fator negativo o projeto arquitetônico carente de elementos de sombreamento, estratégia adequada para várias zonas bioclimáticas (BAVARESCO et al., 2021).

Tabela 6 – Incremento do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa (ΔPHFT) e a redução de carga térmica total (RedCgTT).

Pavimento	Unidade	ΔPHFT (%)	RedCgTT (%)
Cobertura	NE	-0,6	-4,8
	NO	-0,5	-4,4
	SE	0,4	-1,9
	SO	-0,3	-3,6
Tipo	NE	-0,3	1,7
	NO	-0,3	1,6
	SE	0,2	1,9
	SO	0,1	1,3
Térreo	NE	-0,1	-0,2
	NO	0,1	0,9
	SE	0,0	0,1
	NO	0,0	0,4

Tabela 7 – Verificação dos critérios para atendimento do nível de desempenho e classe de eficiência energética da envoltória.

Pavimento	Unidade	Avaliação de desempenho térmico				Avaliação de eficiência energética			
		Critério			Nível de desempenho térmico	Critério			Classe de eficiência energética
		PHFT	Tomáx e Tomín	RedCgTT		PHFT	Tomáx e Tomín	RedCgTT	
Cobertura	NE	Mínimo	Superior	Mínimo	Mínimo	Classe C	Classe A	Classe D	Classe D
	NO	Mínimo	Superior	Mínimo	Mínimo	Classe C	Classe A	Classe D	Classe D
	SE	Mínimo	Superior	Mínimo	Mínimo	Classe C	Classe A	Classe D	Classe D
	SO	Mínimo	Superior	Mínimo	Mínimo	Classe C	Classe A	Classe D	Classe D
Tipo	NE	Mínimo	Superior	Mínimo	Mínimo	Classe C	Classe A	Classe C	Classe C
	NO	Mínimo	Superior	Mínimo	Mínimo	Classe C	Classe A	Classe C	Classe C
	SE	Mínimo	Superior	Superior	Mínimo	Classe C	Classe A	Classe A	Classe C
	SO	Mínimo	Superior	Superior	Mínimo	Classe C	Classe A	Classe A	Classe C
Térreo	NE	Mínimo	Superior	Mínimo	Mínimo	Classe C	Classe A	Classe D	Classe D
	NO	Superior	Superior	Mínimo	Mínimo	Classe A	Classe A	Classe C	Classe C
	SE	Mínimo	Superior	Mínimo	Mínimo	Classe C	Classe A	Classe C	Classe C
	NO	Superior	Superior	Mínimo	Mínimo	Classe A	Classe A	Classe C	Classe C

Sendo que: PHFT – percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa; Tomáx – temperatura operativa máxima; Tomín – temperatura operativa mínima; RedCgTT – redução da carga térmica total.

5. CONCLUSÕES

Constatou-se que todas as unidades habitacionais avaliadas na edificação estudo de caso atenderam aos critérios mínimos de desempenho térmico estabelecidos pela Norma ABNT NBR 15.575. No entanto, estes critérios só foram atendidos por conta das tolerâncias previstas, uma vez que algumas unidades da edificação real tiveram desempenho pior do que a edificação de referência nos indicadores de desempenho avaliados. Nenhuma das unidades demonstrou simultaneamente capacidade de incremento do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e de redução da carga térmica total para obtenção do nível intermediário ou superior de desempenho.

Das doze unidades habitacionais avaliadas, cinco receberam a classe D de eficiência energética, devido à carga térmica total da edificação real nestas unidades ser maior do que a carga térmica total da edificação de referência. As outras nove unidades receberam a Classe C de eficiência, por não demonstrarem a simultaneamente capacidade de incremento do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e de redução da carga térmica total para obtenção da classe B de eficiência energética da envoltória.

Com relação à diferença de desempenho entre as unidades da edificação real, percebeu-se que as unidades do pavimento térreo obtiveram os melhores resultados de desempenho térmico, enquanto os piores resultados foram verificados nas unidades do pavimento cobertura. As unidades do pavimento tipo, por sua vez, tiveram desempenho intermediário entre as duas anteriores. Estes resultados estão relacionados com a parcela da envoltória que cada unidade tem em contato com o ambiente externo. No pavimento tipo, o teto e o piso são considerados adiabáticos na simulação, pois na condição real, estes elementos trocariam calor com outras unidades, e não com o ambiente externo. No pavimento cobertura, o piso é considerado adiabático enquanto o teto está em contato com o ambiente externo, recebendo incidência solar direta e realizando troca térmica com o ambiente externo. No pavimento térreo, o teto é considerado adiabático e o piso troca calor com o solo. Presume-se que o solo atue como um termorregulador, por possuir menor amplitude térmica quando comparado ao ar do ambiente externo, e dessa forma contribui para a manutenção da temperatura interna das unidades do pavimento térreo. Constatou-se ainda que a posição solar exerce influência menos significativa sobre o desempenho térmico das unidades de um mesmo pavimento quando comparada à influência exercida pelas condições de contorno da envoltória nos diferentes pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho.** Rio de Janeiro, 2013.

BAVARESCO, M. V; CUCHIVAGUE, H. Y. O.; SCHINAZI, A.; GHISI, E. Aspectos impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 263–292, jan. 2021.

BRASIL. **Lei nº 11.977. Dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV e a regularização fundiária de assentamentos localizados em áreas urbanas**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L11977.htm>. Acesso em: 2 dez. 2020.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** Florianópolis: [s.n.]. Disponível em: <http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/2020.11.09-INI-R_V1.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2020.

CLIMATE.ONEBUILDING. **BRA_RS_Bento.Goncalves.869790_INMET.zip.** Disponível em: <http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html>. Acesso em: 17 fev. 2021.

DALBEM, R.; GRALA, E.; VICENTE, R.; FIGUEIREDO, A.; OLIVEIRA, R.; SILVA, A. Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept. **Energy**, v. 167, p. 1278–1296, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 26 jan. 2021.

FOSSATI, M.; SCALCO, V.; LINCZUK, V.; LAMBERTS, R. Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1216–1231, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados históricos.** Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/servicos/bdmep-dados-históricos>. Acesso em: 26 jan. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.inmetro.gov.br>. Acesso em: 27 jan. 2021.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20–32, 2016.

KRELLING, A. F.; VEIGA, R. K. S.; OLINGER, M. S.; ELI, L. G.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Proposta de método de avaliação do desempenho térmico de residências: NBR 15575 1**. Porto Alegre: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2020.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Novo método de avaliação energética de edificações.** Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/novo-metodo-avaliacao-cb3e>. Acesso em: 26 fev. 2021.

LIU, F.; MEYER, A. S.; HOGAN, J. F. **Mainstreaming Building Energy Efficiency Codes in Developing Countries: Global Experiences and Lessons from Early Adopters.**World Bank Working Paper. Washington, D.C., 2010.

SORGATO, M. J.; MARINOSKI, D. L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública**. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/397>. Acesso em: 2 mar. 2020.

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, p. 524–541, 2015.

TUBELO, R.; RODRIGUES, L.; GILLOTT, M.; CARLA, J.; SOARES, G.; Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil ' s moderate climates zones. **Building and Environment**, v. 133 p. 213–227, 2018.

VEIGA, R. K. S.; OLINGER, M. S.; KRELLING, A. F.; ELI, L. G.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Proposta para as escalas dos níveis de desempenho térmico de residências: NBR 15575 1.** Porto Alegre: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2020.