

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

João Luiz Dobrovolski Tochetto

**INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS DE FECHAMENTOS VERTICAIS E  
HORIZONTAIS NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA HABITAÇÃO  
UNIFAMILIAR TÉRREA PADRÃO NORMAL EM SANTA MARIA/RS**

Santa Maria, RS

2021

**João Luiz Dobrovolski Tochetto**

**INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS DE FECHAMENTOS VERTICAIS E HORIZONTAIS  
NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA HABITAÇÃO UNIFAMILIAR TÉRREA  
PADRÃO NORMAL EM SANTA MARIA/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Engenharia Civil,  
da Universidade Federal de Santa Maria  
(UFSM, RS), como requisito parcial para a  
obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

Santa Maria, RS  
2021

**João Luiz Dobrovolski Tochetto**

**INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS DE FECHAMENTOS VERTICAIS E HORIZONTAIS  
NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA HABITAÇÃO UNIFAMILIAR TÉRREA  
PADRÃO NORMAL EM SANTA MARIA/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada ao curso de Engenharia Civil,  
da Universidade Federal de Santa Maria  
(UFSM, RS), como requisito parcial para a  
obtenção do Grau de **Engenheiro Civil**.

**Aprovado em XX de novembro de 2021:**

---

**Joaquim Pizzutti dos Santos, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/orientador)

---

**Alexandre Silva De Vargas, Dr. (UFSM)**

---

**Rogério Cattelan Antochaves De Lima, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço principalmente a minha mãe Milena, ao meu pai Nelcir e ao meu irmão Felipe, por todo o suporte que fez possível a conclusão do meu curso de graduação.

Agradeço também ao professor Joaquim, pelas ideias, sugestões e contribuições que tornaram este trabalho possível e me permitiram ter um grande aprendizado durante o processo.

*“Do not pray for an easy life, pray for  
the strength to endure a difficult one”  
Bruce Lee*

## RESUMO

### INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS DE FECHAMENTOS VERTICAIS E HORIZONTAIS NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA HABITAÇÃO UNIFAMILIAR TÉRREA PADRÃO NORMAL EM SANTA MARIA/RS

AUTOR: João Luiz Dobrovolski Tochetto

ORIENTADOR: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

Edificações mais eficientes energeticamente têm grande impacto na diminuição do consumo energético nacional, pois propiciam conforto térmico a seus usuários com um menor consumo de eletricidade. Em decorrência disso, este trabalho avaliou o impacto que o uso de EPS em fechamentos verticais e horizontais, de vidro duplo e de telhas de alta refletância tem sobre a eficiência energética de uma edificação unifamiliar térrea padrão normal na cidade de Santa Maria/RS. A influência dos diferentes materiais foi analisada através de dados de simulações computacionais realizadas no *software EnergyPlus*, as quais permitiram determinar, para as diferentes tipologias construtivas adotadas, o consumo anual de eletricidade de aparelhos de ar condicionado e o nível de desempenho térmico segundo a NBR 15575/2021. Após a realização das simulações, foi possível concluir que a utilização de EPS como isolante térmico na laje de cobertura propiciou a maior redução no consumo energético anual do sistema de condicionamento de ar entre todas as melhorias individuais analisadas, com valor de 27,14%, seguido do uso de EPS como isolante em fechamentos verticais e de vidro duplo nos fechamentos transparentes. A tipologia com telhas cerâmicas de alta refletância apresentou menor desempenho energético em relação à tipologia típica devido ao alto consumo de eletricidade para aquecimento, e a tipologia com todas as melhorias térmicas apresentou o melhor desempenho, com redução máxima de consumo de 45,88%.

**Palavras-chave:** Eficiência energética. EPS. Vidro duplo. Telha de alta refletância.

## ABSTRACT

### INFLUENCE OF VERTICAL AND HORIZONTAL CLOSURE MATERIALS ON THE ENERGY EFFICIENCY OF A NORMAL STANDARD SINGLE STOREY HOUSE

AUTHOR: JOÃO LUIZ DOBROVOLSKI TOCHETTO

ADVISOR: JOAQUIM CESAR PIZZUTTI DOS SANTOS

More efficient buildings have a great impact on reducing national energy consumption, as they provide thermal comfort to their users with less electricity consumption. This work evaluated the impact that the use of EPS in vertical and horizontal closures, double glazing and high-reflectance tiles have on the energy efficiency of a single storey house in the city of Santa Maria/RS. The influence of different materials was analyzed using data from computer simulations performed in the EnergyPlus software, which allowed to determine, for the different construction typologies adopted, the annual electricity consumption of air conditioners and the level of thermal performance according to NBR 15575/2021. After carrying out the simulations, it was possible to conclude that the use of EPS as a thermal insulator in the roof slab provided the greatest reduction in the annual energy consumption of the air conditioning system among all individual improvements analyzed, with a value of 27,14%, followed by the use of EPS as an insulator in vertical closures and double glazing in transparent closures. The typology with high-reflectance ceramic tiles had lower energy performance compared to the typical typology due to the high consumption of electricity for heating, and the typology with all improvements showed the best performance, with a maximum consumption reduction of 45,88%.

**Palavras-chave:** Energy efficiency. EPS. Double glazing. High-reflectance tiles.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Convecção natural .....	24
Figura 2 - A radiação térmica dentro do espectro eletromagnético .....	25
Figura 3 - Esquema representativo das radiações incidente, refletida, absorvida e transmitida.....	26
Figura 4 - Altura e azimute solar .....	29
Figura 5 - Rosa dos ventos da cidade de Santa Maria.....	30
Figura 6 - Amortecimento e atraso da onda de calor devido à inércia térmica.....	32
Figura 7 - Reflexão, absorção e transmissão de radiação solar em superfícies transparentes .....	35
Figura 8 - Termografia de superfícies.....	36
Figura 9 - Modelagem geométrica da edificação real - porção anterior .....	40
Figura 10 - Modelagem geométrica da edificação real - porção posterior.....	40
Figura 11 - Modelagem geométrica da edificação de referência conforme NBR 15575-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b) - porção anterior .....	41
Figura 12 - Modelagem geométrica da edificação de referência - conforme NBR 15575-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b) - porção anterior .....	41
Figura 13 - Estrutura das simulações.....	44
Figura 14 - Cor e tonalidade das tintas especificadas.....	46
Figura 15 - PHFT das tipologias para a orientação 0°.....	51
Figura 16 - PHFT das tipologias para a orientação 90°.....	51
Figura 17 - PHFT das tipologias para a orientação 180°.....	52
Figura 18 - PHFT das tipologias para a orientação 270°.....	52
Figura 19 - Valores de PHFT para cada tipologia de acordo com a orientação .....	53
Figura 20 - Temperaturas operativas máximas e mínimas das tipologias para a orientação 0° .....	55
Figura 21 - Temperaturas operativas máximas e mínimas das tipologias para a orientação 90° .....	56
Figura 22 - Temperaturas operativas máximas e mínimas das tipologias para a orientação 180° .....	56
Figura 23 - Temperaturas operativas máximas e mínimas das tipologias para a orientação 270° .....	57
Figura 24 - Variação de temperatura do ambiente Estar para o dia 21/12.....	57
Figura 25 - Variação de temperatura do ambiente Suíte para o dia 21/12.....	58
Figura 26 - Variação de temperatura do ambiente Estar para o dia 21/06.....	58
Figura 27 - Variação de temperatura do ambiente Suíte para o dia 21/06.....	59

Figura 28 - Carga térmica total das tipologias para a orientação 0° .....	60
Figura 29 - Carga térmica total das tipologias para a orientação 90° .....	60
Figura 30 - Carga térmica total das tipologias para a orientação 180° .....	61
Figura 31 - Carga térmica total das tipologias para a orientação 270° .....	61
Figura 32 - Consumo anual de eletricidade das tipologias para a orientação 0° .....	63
Figura 33 - Consumo anual de eletricidade das tipologias para a orientação 90° .....	63
Figura 34 - Consumo anual de eletricidade das tipologias para a orientação 180° ...	64
Figura 35 - Consumo anual de eletricidade das tipologias para a orientação 270° ...	64
Figura 36 - Variação mensal de consumo de eletricidade entre a tipologia C (180°) e a tipologia F (270°) .....	65
Figura 37 - Consumo de eletricidade para cada tipologia conforme orientação .....	66
Figura 38 - Consumo anual discretizado de eletricidade das tipologias para a orientação 0° .....	67
Figura 39 - Consumo anual discretizado de eletricidade das tipologias para a orientação 90° .....	67
Figura 40 - Consumo anual discretizado de eletricidade das tipologias para a orientação 180° .....	68
Figura 41 - Consumo anual discretizado de eletricidade das tipologias para a orientação 270° .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios de emissividade para diferentes tipos de materiais .....	26
Tabela 2 - Refletância de telhas de fibrocimento .....	34
Tabela 3 - Propriedades dos elementos opacos utilizados na simulação .....	44
Tabela 4 - Propriedades dos elementos transparentes utilizados na simulação .....	46
Tabela 5 - Absortância solar dos materiais opacos utilizados nas simulações .....	47
Tabela 6 - Percentual de horas fora da faixa de temperatura estipulada pela NBR 15575 .....	54
Tabela 7 - Variação no consumo de eletricidade das tipologias B, C, D, E e F em relação à tipologia A.....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- $\Delta$ PHFT<sub>min</sub> - Redução no Valor de PHFT
- ABIVIDRO - Associação Brasileira das Indústrias de Vidro
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRAVIDRO - Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos
- APP - Ambientes de Permanência Prolongada
- APT - Ambientes de Permanência Transitória
- ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*
- BEN - Balanço Energético Nacional
- CA - Consumo de Eletricidade para Aquecimento
- CgTT - Carga Térmica Total de Resfriamento e Aquecimento da Unidade Habitacional
- COP - Coeficiente de Performance
- CR - Consumo de Eletricidade para Resfriamento
- CT - Consumo Total de Eletricidade (aquecimento, resfriamento e ventilação)
- CUB - Custo Unitário Básico
- Dif CT, A - Diferença de Consumo Total em Relação à Tipologia A
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética
- EPS - Poliestireno Expandido
- LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina
- LG - Life's Good
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico
- PHFT - Percentual de Horas de Ocupação Dentro da Faixa de Temperatura Operativa da Unidade Habitacional
- PHFT<sub>REF</sub> - Percentual de Horas de Ocupação Dentro da Faixa de Temperatura Operativa da Unidade Habitacional de Referência
- PIB – Produto Interno Bruto
- RedCgTT<sub>min</sub> - Redução no Valor de Carga Térmica Total
- SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
- TMY - *Typical Meteorological Year* (Ano Meteorológico Típico)
- T<sub>Omax</sub> - Temperatura Operativa Máxima da Unidade Habitacional
- T<sub>Omin</sub> - Temperatura Operativa Mínima da Unidade Habitacional
- Var CA, A - Variação do Consumo para Aquecimento em Relação à Tipologia A
- Var CR, A - Variação do Consumo para Resfriamento em Relação à Tipologia A

Var CT, A - Variação do Consumo Total em Relação à Tipologia A  
XPS - Poliestireno Extrudado

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C - Graus Célsius

A - Azimute solar

BTU/h - Potência de Resfriamento/Aquecimento

H - Altura solar

J/K - Capacidade Térmica

J/kg.K - Calor Específico

kg/m<sup>3</sup> - Massa Específica

kg/s - Fluxo Mássico

kWh - Energia Consumida

m - Metros

m<sup>2</sup>K/W - Resistência Térmica Total

m<sup>3</sup>/s - Taxa de Ventilação/Infiltração

mm - Milímetros

renovações/hora - Taxa de Renovação de Ar por Hora

W/m<sup>2</sup>K - Transmitância Térmica

W/mK - Condutividade Térmica

ε - Emissividade

μm – Micrômetro

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
1.3 JUSTIFICATIVA .....	18
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	19
2.1 NORMAS BRASILEIRAS RELACIONADAS AO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES .....	19
2.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	22
2.3 CONFORTO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	27
2.4 CLIMA E ORIENTAÇÃO SOLAR .....	28
2.5 DESEMPENHO TÉRMICO DE FECHAMENTOS OPACOS E TRANSPARENTES .....	31
2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	37
2.7 PADRÃO NORMAL DAS EDIFICAÇÕES SEGUNDO A NBR 12721.....	38
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	39
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	50
4.1 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE DESEMPENHO SEGUNDO A NBR 15575/2021 .....	50
4.2 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ANUAL DE ELETRICIDADE PARA O CENÁRIO DE CLIMATIZAÇÃO HÍBRIDA .....	62
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO</b> .....	72
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	74
<b>APÊNDICE A – PLANTA BAIXA DA UNIDADE HABITACIONAL</b> .....	78

## 1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética, de acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), pode ser vista como uma característica da edificação que representa a sua capacidade de, com baixo consumo de energia, cumprir com a sua função e possibilitar conforto aos seus usuários; portanto, uma edificação é mais eficiente energeticamente que outra quando possibilita as mesmas condições sob um gasto de energia menor. Os autores observam que, a partir da crise do petróleo de 1973, a produção de eletricidade cresceu muito em todo o mundo, levando à construção de mais usinas hidrelétricas, termoelétricas e nucleares. Deve-se, portanto, reduzir o consumo energético nacional para que os impactos causados pelos sistemas convencionais de geração de energia sejam minimizados.

Com o crescimento populacional e o desenvolvimento social, a aquisição de aparelhos de ar condicionado será cada vez maior, assim como a demanda por energia elétrica. Segundo o Balanço Energético Nacional 2021 (BEN 2021), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), o consumo residencial de eletricidade no ano de 2020 correspondeu a 27,6% do consumo total do país, comprovando a grande participação do setor na demanda energética nacional.

Aliada ao crescimento da demanda por energia elétrica encontra-se a diminuição da oferta de energia proveniente de fontes hídricas, que possui importante participação na produção da energia nacional e apresentou queda de 0,4% no ano de 2020 em relação a 2019 (EPE, 2021). Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2021), o Brasil enfrenta a pior crise hídrica desde 1930, que está causando um grande impacto no nível de água dos reservatórios em todo o país e, conseqüentemente, há necessidade de ampliação da importação de energia proveniente de países vizinhos e de aumento da produção de energia através de usinas termoelétricas, elevando consideravelmente o seu custo de produção. O preço da energia elétrica no setor residencial sofreu um acréscimo de 7,15% nos primeiros oito meses de 2021, e apresenta tendência de crescimento ainda maior para 2022 (SABINO, 2021).

No cenário arquitetônico, as edificações podem ser projetadas de forma ineficiente, tendo no uso de condicionadores de ar a solução para atingir o conforto térmico.

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO, 2016), as fontes de ganho e perda de calor em uma edificação são a cobertura, o piso, as paredes, as janelas, as pessoas, os equipamentos, a iluminação artificial e a infiltração de ar, de modo que o somatório destes componentes impacta na temperatura do ambiente interno e no gasto energético com climatização artificial para manter o ambiente à temperatura desejada. Um aumento na área de fechamentos transparentes não provocará necessariamente um aumento ou perda proporcional de calor, já que são oito os fatores que influenciam no balanço energético (ABIVIDRO, 2016). A simulação computacional permite avaliar, para as circunstâncias de projeto, o impacto que cada um dos oito componentes tem no desempenho térmico da edificação.

Nos Estados Unidos, o governo federal criou em 2005 o *Energy Policy Act* objetivando uma política energética que inclui incentivo fiscal para a implementação de medidas que promovam a eficiência energética em edificações novas e já existentes, além de estabelecer a norma *ASHRAE Standard 90.1* como requisito mínimo de eficiência energética para todo o país (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O Brasil possui norma técnica referente ao conforto térmico desde 2005, a NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a), e em 2013 foi criada a norma de desempenho de edificações residenciais, NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a), a qual teve uma emenda publicada referente ao desempenho térmico no primeiro semestre de 2021. A NBR 15220: Desempenho térmico de edificações, é composta por cinco partes que englobam definições, cálculos de transmitância térmica e outros parâmetros das superfícies, zoneamento bioclimático brasileiro e métodos de medição de resistência térmica. A NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho, é composta por seis partes que especificam níveis de desempenho para edificações residenciais referentes a diversos requisitos, como o térmico, o acústico, o estrutural, entre outros.

Neste trabalho, serão analisados os dados provenientes de simulações computacionais a serem realizadas com o *software EnergyPlus*, objetivando compreender a influência que o uso de EPS em fechamentos verticais e horizontais, de vidros duplos e de telhas cerâmicas de alta refletância tem sobre a eficiência energética de uma edificação unifamiliar térrea padrão normal na cidade de Santa Maria/RS. As simulações serão realizadas para seis tipologias construtivas, referentes

a uma edificação com materiais típicos, a quatro edificações com melhorias térmicas individuais e uma edificação contendo todas as melhorias em conjunto. Além disso, cada tipologia construtiva será simulada para quatro orientações geográficas diferentes, sendo elas 0°, 90°, 180° e 270°. A análise dos dados extraídos das simulações permitirá determinar o nível de desempenho térmico segundo a NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a) e o consumo anual de eletricidade de aparelhos de ar condicionado para cada tipologia e orientação analisada.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho objetiva determinar o impacto da utilização nos fechamentos verticais e horizontais de poliestireno expandido (EPS), vidro duplo e telhas de alta refletância no consumo energético de ar condicionado para uma edificação unifamiliar térrea padrão normal na cidade de Santa Maria/RS, localizada na Zona Bioclimática Brasileira 2.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos que compõem este trabalho são:

- Determinar o consumo energético de ar condicionado para a edificação com materiais tradicionalmente usados;
- Determinar o consumo energético de ar condicionado para a edificação com o uso de EPS em fechamentos verticais e horizontais, vidro duplo nas aberturas e telha cerâmica de alta refletância;
- Avaliar a eficiência na redução do consumo energético de cada melhoria térmica, individualmente e no conjunto das soluções;
- Determinar o nível de desempenho térmico da edificação com materiais tradicionalmente utilizados e com melhorias térmicas segundo a NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a).

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A construção civil no Brasil evolui lentamente em relação à aplicação e ao uso de novos materiais e técnicas construtivas. Os resultados obtidos neste trabalho poderão ajudar engenheiros civis e arquitetos a projetar edificações que apresentem um desempenho energético superior ao de edificações tipicamente construídas, possibilitando construções mais eficientes que proporcionam maior conforto térmico ao usuário, além de auxiliar na compreensão do impacto que decisões tomadas durante a elaboração do projeto possuem sobre o consumo anual de eletricidade de aparelhos de ar condicionado. Por fim, o país vive atualmente uma crise energética devido ao baixo volume de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas de todo o território nacional, o que obriga à utilização de usinas termoelétricas, e, por conseguinte, encarece o custo da energia elétrica e causa um impacto ambiental maior. Portanto, é de extrema importância que as edificações brasileiras sejam mais eficientes no quesito energético, pois assim será possível diminuir a demanda por energia elétrica, reduzir o custo da mesma e ainda diminuir o impacto ambiental que é inevitável devido ao uso de energia de fontes não renováveis.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura apresenta os principais tópicos do tema abordado por este trabalho. Primeiramente, discute-se sobre as normas NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a) e 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a) e suas relações com a eficiência energética das edificações. Na sequência são apresentados conceitos de troca de calor entre corpos, de variáveis climáticas e de eficiência térmica de fechamentos opacos e transparentes. Por último, são abordados alguns dos *softwares* utilizados no desenvolvimento das simulações computacionais.

### 2.1 NORMAS BRASILEIRAS RELACIONADAS AO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

Atualmente, existem duas normas desenvolvidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que abordam critérios de desempenho térmico das edificações: a NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a) e a NBR 15575 ((ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a).

A norma NBR 15220: Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005a) aborda o desempenho térmico de edificações em cinco partes, e foi publicada em 2005. Na primeira parte encontram-se definições, símbolos e unidades relacionados ao tema, que estão presentes na Tabela 1 da NBR 15220-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b) e foram sintetizados no Quadro 1.

Quadro 1 – Grandezas térmicas segundo a NBR 15220-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b)

(continua)

GRANDEZA	DEFINIÇÃO	UNIDADE
Condutividade térmica	Propriedade física de um material no qual se verifica um fluxo de calor constante quando submetido a um gradiente de temperatura	$\frac{W}{mK}$

Quadro 1 – Grandezas térmicas segundo a NBR 15220-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b)

(conclusão)

Resistência térmica total	Somatório do conjunto de resistências térmicas das camadas de um elemento construtivo, incluindo as resistências superficiais interna e externa	$\frac{m^2K}{W}$
Transmitância térmica	Inverso da resistência térmica total	$\frac{W}{m^2K}$
Capacidade térmica	Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema	$\frac{J}{K}$
Emissividade	Quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro a mesma temperatura	$\varepsilon$
Absortância à radiação solar	Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente	-
Refletância à radiação solar	Quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente	-
Transmitância à radiação solar	Quociente da taxa de radiação solar que atravessa um elemento pela taxa de radiação solar incidente	-
Taxa de ventilação	Vazão de ar exterior que circula por um ambiente através de aberturas intencionais	$\frac{m^3}{s}$
Taxa de infiltração	Vazão de ar exterior que circula por um ambiente através de aberturas não intencionais	$\frac{m^3}{s}$
Taxa de renovação de ar	Número de trocas de ar de um ambiente por unidade de tempo	$\frac{\text{renovações}}{\text{hora}}$

Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005b, p. 1)

A segunda parte da NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c) trata de métodos de cálculo de transmitância térmica, de capacidade térmica, de fator solar e outras características das superfícies. O cálculo da transmitância térmica pode ser feito para uma superfície composta por diversas camadas, sendo necessário conhecer *a priori* a espessura e a condutividade térmica de cada camada, e é baseado na determinação da resistência térmica total da

superfície. A norma permite considerar componentes com câmara de ar ventilada e não ventilada, condições que podem ser consideradas para paredes duplas com câmara de ar ou para coberturas.

A parte 3 da NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005d) define o zoneamento bioclimático brasileiro e especifica diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. O zoneamento bioclimático compreende oito zonas que possuem características relativamente homogêneas em relação ao clima, e que foram divididas de acordo com dados de temperatura e umidade relativa de normais climatológicos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005d).

A cidade de Santa Maria se encontra na Zona Bioclimática 2, que tem como diretrizes construtivas o tamanho médio das aberturas para ventilação que permitam a entrada de radiação solar durante o inverno, as vedações externas constituídas de paredes leves e a cobertura do tipo leve isolada. A NBR 15220-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005d) indica que para a cidade as estratégias bioclimáticas sejam o uso de aquecimento artificial em períodos de frio intenso, a implantação da edificação de modo que as aberturas permitam a entrada de radiação solar no inverno, a adoção de paredes internas pesadas para manter o interior aquecido e a desumidificação dos ambientes através de ventilação cruzada.

A NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a) foi publicada inicialmente em 2013 e teve uma emenda referente ao desempenho térmico publicada no primeiro semestre de 2021. A norma apresenta, entre os diversos tópicos abrangidos, o desempenho térmico para edificações residenciais, que pode ser analisado através do método simplificado ou do método computacional. O método simplificado apresenta requisitos mínimos para os ambientes de permanência prolongada (APP), especificando parâmetros dos sistemas de cobertura, referentes à transmitância térmica, e de vedações verticais internas e externas da edificação, referentes à transmitância térmica, à capacidade térmica, ao percentual de aberturas para ventilação, ao percentual de elementos transparentes e à área de superfície dos elementos transparentes, para as diferentes regiões bioclimáticas definidas na NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a), não sendo considerados para os ambientes de permanência transitória (APT). O método simplificado permite unicamente a classificação de nível de desempenho mínimo, sendo necessário realizar a simulação computacional para classificações de

desempenho intermediário e superior. Além disso, caso a edificação apresente parâmetros inferiores aos apresentados no método simplificado, é possível aplicar o método da simulação computacional para determinar se a mesma atinge os requisitos de desempenho mínimo ou não.

O método da simulação computacional avalia o desempenho térmico anual da edificação real em relação a uma edificação de referência, que apresenta as mesmas características geométricas, mas diferentes propriedades térmicas dos materiais opacos e transparentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b). Para o atendimento do nível mínimo de desempenho é necessário avaliar os modelos real e de referência apenas para a condição de ventilação natural; já para o atendimento dos níveis intermediário e superior é necessário avaliar as condições de climatização natural e de climatização artificial separadamente. A comparação entre os modelos de referência e real para a determinação do nível de desempenho é realizada através do percentual de horas de ocupação da unidade habitacional dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), das temperaturas operativas máxima (T<sub>Omax</sub>) e mínima (T<sub>Omin</sub>) da unidade habitacional, da carga térmica total de resfriamento e aquecimento da unidade habitacional (C<sub>gTT</sub>), da redução no valor de PHFT ( $\Delta\text{PHFT}_{\min}$ ) e da redução no valor de carga térmica total (RedC<sub>gTT</sub><sub>min</sub>) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b).

Através dos dados extraídos das simulações é possível comparar o modelo de referência com cada uma das tipologias adotadas, a fim de determinar o nível de desempenho térmico das mesmas. Para atingir o nível de desempenho mínimo é necessário que a edificação real cumpra com os critérios estabelecidos pela norma sobre os valores de PHFT e de temperaturas operativas, em relação ao cenário de ventilação natural; para atingir o nível de desempenho intermediário ou superior, é necessário também que o modelo real satisfaça dos valores de  $\Delta\text{PHFT}_{\min}$  e RedC<sub>gTT</sub><sub>min</sub>, referentes aos cenários de ventilação natural e de climatização artificial, respectivamente.

## 2.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Compreender os mecanismos de transferência de calor é de grande relevância para o estudo da eficiência energética de uma edificação. O comportamento térmico

da edificação deve ser previsto desde o projeto arquitetônico, analisando, por exemplo, em quais paredes a transferência de calor será maior devido a uma maior incidência de radiação solar, ou como ocorrerá a ventilação dos ambientes devido à convecção do ar. Posteriormente, para a especificação dos materiais que irão compor as superfícies, é necessário conhecer suas propriedades físicas como condutividade térmica, emissividade, absorvidade e outras.

Segundo Incropera et al. (2008), calor pode ser definido como a energia térmica em trânsito devido à diferença de temperatura no espaço, e a transmissão pode ocorrer de três formas: condução, convecção e radiação.

A transferência de calor por condução é descrita pela lei de Fourier, a qual define que o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura e à área da seção perpendicular ao fluxo, e constante de proporcionalidade é denominada condutividade térmica do material (HOLMAN, 1999).

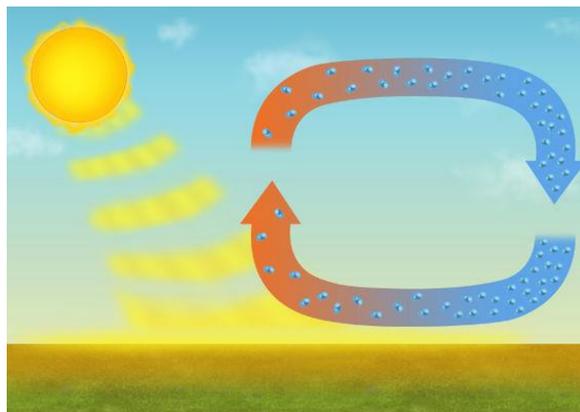
A transferência de calor por convecção envolve uma parcela de condução, referente à energia do movimento molecular, e uma parcela relacionada à transferência de energia através do movimento macroscópico do fluido (KREITH; BOHN, 2003). Conforme o autor, este tipo de transferência de calor é mais complexo que a transferência por condução e depende de um número maior de variáveis.

O escoamento de um fluido sobre um corpo sólido faz com que o primeiro fique aderido ao segundo, criando uma região de velocidade variável entre o corpo sólido e a camada de fluxo livre, denominada camada-limite, cuja altura é função da posição do fluido ao longo da superfície, da velocidade em escoamento livre, da densidade e da viscosidade dinâmica do fluido (LIENHARD IV; LIENHARD V, 2019). De forma análoga à camada-limite de velocidade, a camada-limite térmica se formará sempre que a superfície apresentar uma temperatura diferente da temperatura do fluido em escoamento livre, e uma camada-limite de concentração se formará quando houver gradiente de concentração de alguma espécie, caracterizando um fenômeno de transferência de massa (INCROPERA et al., 2008). Segundo os mesmos autores, no caso de existir uma diferença de temperatura entre a superfície de contato e o fluido, ocorrerá uma transferência de calor por condução da superfície para as partículas do fluido, que trocam calor com a camada de fluido adjacente por convecção, formando gradientes de temperatura ao longo da altura do fluido, até a camada-limite térmica.

A convecção pode ser forçada ou natural, sendo a natural de grande importância para a eficiência térmica de uma edificação. Na convecção natural, o

movimento do fluido ocorre devido a mudanças de densidade que ocorrem em decorrência do processo de aquecimento do mesmo, e tem sua origem na atuação das forças de empuxo, chamadas forças de corpo, que estão sob ação de força gravitacional ou centrífuga (HOLMAN, 1999). A Figura 1 ilustra o processo de circulação do ar devido à convecção natural, no qual o ar recebe calor proveniente do solo e tem a sua temperatura aumentada, reduzindo conseqüentemente a sua densidade e tendendo a ascender, enquanto o ar frio, que é mais denso, tende a ficar nas proximidades do solo.

Figura 1 - Convecção natural



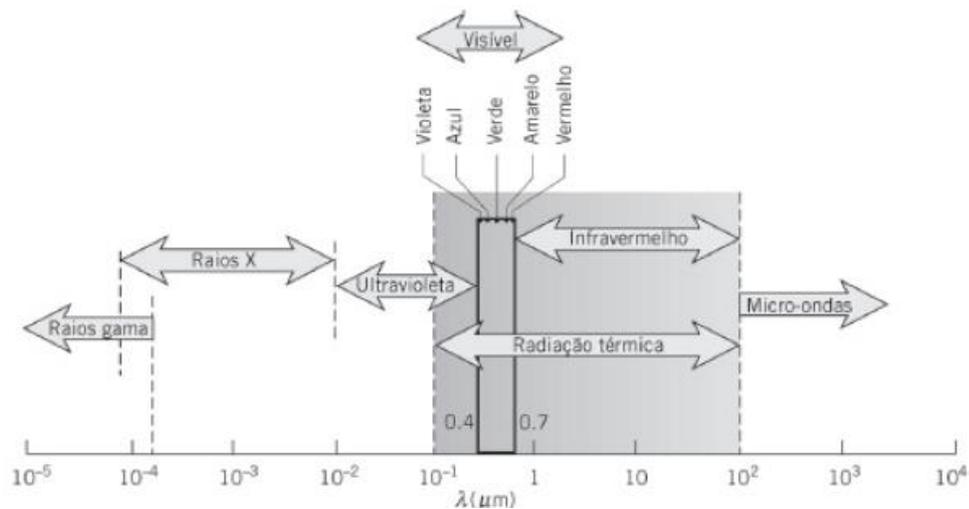
Fonte: HELERBROCK (2021?)

A Figura 1 demonstra a circulação do ar formada pelos movimentos ascendente do ar quente e descendente do ar frio, tendo sua origem relacionada à diferença de densidades e à presença da força gravitacional.

Além da transmissão de calor por condução e convecção, há a transmissão por radiação, única que não exige matéria para tal. Em gases e sólidos semitransparentes, a emissão da radiação é um fenômeno volumétrico; contudo, na maioria de sólidos e líquidos a radiação emitida pelas moléculas do interior do volume é absorvida pelas moléculas adjacentes, fazendo com que a radiação emitida ao exterior ocorre pelas moléculas que estão próximas à superfície, caracterizando um fenômeno de emissão superficial (INCROPERA et al., 2008). De acordo com os autores, a radiação térmica

compreende uma faixa do espectro eletromagnético apenas, compreendendo aproximadamente os comprimentos de onda entre 0,1 e 100  $\mu\text{m}$ , conforme mostra a Figura 2, que apresenta também outras faixas do espectro.

Figura 2 - A radiação térmica dentro do espectro eletromagnético



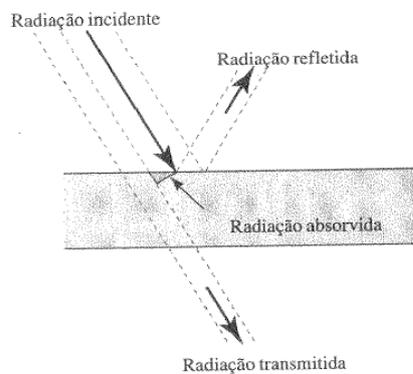
Fonte: INCROPERA et al. (2008, p. 461)

É possível perceber que a radiação térmica envolve toda a faixa visível do espectro eletromagnético, além da faixa do infravermelho e a faixa de maior comprimento de onda do ultravioleta.

Através da taxa de radiação incidente sobre a superfície por unidade de área, chamada de irradiação, e dos valores de absorvidade, refletividade e transmissividade do material, que relacionam as características do mesmo com as características de um corpo negro, é possível determinar a quantidade de radiação absorvida, refletida e transmitida pela superfície (KREITH; BOHN, 2003). No caso de materiais opacos, a absorvidade e a refletividade têm forte relação com a cor superficial; entretanto, uma superfície pode possuir uma grande refletividade para a radiação do espectro visível, característica de cores claras, mas pode possuir grande absorvidade para outros comprimentos de onda, como foi observado por Dornelles (2008) em seu trabalho. A autora demonstrou que uma superfície pintada com uma tinta de cor branco gelo apresentou uma absorvância à radiação visível de 36,5% e de

46,4% à radiação infravermelho, enquanto que a tinta de cor branca apresentou absorvância de 14,0% à radiação visível e 28,4% à radiação infravermelho, comprovando que a simples análise pela cor pode levar a um equívoco no entendimento do comportamento térmico da edificação. A Figura 3 ilustra as parcelas de radiação refletida, absorvida e transmitida por uma superfície.

Figura 3 - Esquema representativo das radiações incidente, refletida, absorvida e transmitida



Fonte: KREITH; BOHN (2003, p.494)

Além da análise referente à irradiação, é importante determinar o poder emissivo de um corpo, que é o fluxo de radiação emitida pelo mesmo e que tem relação com a sua temperatura (LIENHARD IV; LIENHARD V, 2019). O poder emissivo de um corpo real é relacionado com o de um corpo negro através da emissividade, que tem forte relação com a natureza do material. A Tabela 1 apresenta valores de emissividade para diversos tipos de materiais.

Tabela 1 - Valores médios de emissividade para diferentes tipos de materiais

(continua)

METAIS			NÃO METAIS		
Superfície	Temperatura (°C)	Emissividade	Superfície	Temperatura (°C)	Emissividade
Alumínio polido, 98% puro	200 - 600	0,04 - 0,06	Concreto áspero	40	0,94

Tabela 1 - Valores médios de emissividade para diferentes tipos de materiais

					(conclusão)
Aço polido	40 - 260	0,07 – 0,10	Vidro liso	40	0,94
Aço inox polido	40	0,07 – 0,17	Gesso	40	0,80 – 0,90
Chapa de aço fortemente oxidada	40	0,80	Madeira de carvalho aplainada	20	0,90
Ouro puro polido	90 - 600	0,02 – 0,035	Tijolo vermelho áspero	40	0,93

Fonte: Adaptado de LIENHARD IV; LIENHARD V (2019, p. 542, tradução nossa)

A emissividade de metais é geralmente baixa quando considerada a não metais, com exceção de metais oxidados, conforme mostra a Tabela 1.

Em uma edificação, ocorre a transferência de calor pelos três mecanismos descritos. É de fundamental importância, pois, compreender esses mecanismos para que seja possível projetá-la a fim de melhorar a sua eficiência energética.

### 2.3 CONFORTO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O conforto térmico está relacionado à perda do calor produzido pelo organismo para o ambiente, compatível com a sua atividade e sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação, que pode ser o aumento da resistência térmica da pele por meio da vasoconstrição ou do arrepios para quando há grandes perdas de calor, ou a vasodilatação e o suor para quando há excesso de calor (FROTA; SCHIFFER, 2001). Segundo as autoras, além dos mecanismos termorreguladores do corpo, as roupas possuem um papel fundamental no conforto térmico, permitindo redução no ganho de calor devido à radiação direta, isolamento térmico e redução da sensibilidade a variações de temperatura e à velocidade do ar.

Além das variáveis humanas, as variáveis ambientais também impactam diretamente no conforto térmico. De acordo com Lamberts et al. (2016), a velocidade do ar impacta nos efeitos de evaporação no corpo humano, retirando a água em

contato com a pele e reduzindo a sensação de calor, e a umidade relativa, se suficientemente elevada, dificulta as perdas de calor por evaporação. Além disso, em climas secos, a amplitude térmica diária é consideravelmente maior que em climas úmidos devido à absorção de radiação solar pelas partículas de água em suspensão no ar, que atuam como um obstáculo para a radiação que atinge o solo durante o dia e para a dissipação de calor proveniente do solo durante a noite (FROTA; SCHIFFER, 2001).

O conforto térmico, contudo, está atrelado a um consumo energético, geralmente de sistemas de condicionamento de ar, de iluminação artificial, de equipamentos elétricos e de aquecimento de água. Em virtude disso, é de fundamental importância o investimento em eficiência energética para edificações, promovendo a redução da utilização de fontes não renováveis de produção de energia e do consumo anual de eletricidade nas edificações consumidoras.

## 2.4 CLIMA E ORIENTAÇÃO SOLAR

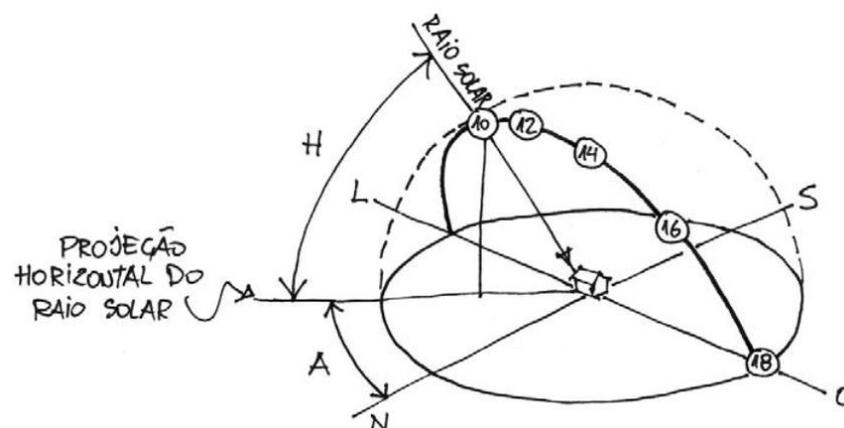
Para que seja possível projetar uma edificação eficiente termicamente é necessário conhecer as características do clima no qual ela será implantada. O macroclima está relacionado com as características de uma região que apresenta o mesmo clima, e pode ser analisado através de dados referentes às temperaturas diárias, à pluviosidade, à umidade relativa do ar, à radiação solar, entre outros, que estão disponíveis em diversos tipos de arquivo, especificando valores para as 8760 horas de um ano específico ou não, e são utilizadas por programas de simulação computacional (LAMBERTS et al., 2016). Entre os diferentes tipos de arquivo está o *Typical Meteorological Year* (TMY, Ano Meteorológico Típico), disponível para diversas cidades brasileiras, incluindo Santa Maria, representando um ano climático sem extremos de temperatura a partir de séries de dados anuais (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). O microclima, por sua vez, está relacionado com o entorno da edificação, como a poluição do ar em uma determinada zona, a influência de edificações vizinhas, a vegetação e a presença de obstáculos naturais ou artificiais para iluminação e vento (LAMBERTS et al., 2016).

O sol pode ser identificado na abóboda celeste através dos chamados ângulos solares, que variam de acordo com a hora do dia e o dia do ano, e entre eles

destacam-se: a altura solar, ângulo formado entre os raios solares e o plano horizontal, sendo igual ou próximo a  $90^\circ$  ao meio-dia e igual a  $0^\circ$  ao nascer e pôr do sol; o azimute solar, ângulo formado entre o norte geográfico e a projeção horizontal dos raios solares; e a inclinação solar, ângulo formado entre os raios solares e o plano equatorial, que varia de  $23,45^\circ$  a  $-23,45^\circ$ , valores de inclinação durante os solstícios (TIWARI; DUBEY, 2010). A temperatura do ar tem relação com a intensidade da radiação solar, pois a absorvância da superfície receptora da radiação, como o solo, e as suas características térmicas, influenciam nas trocas de calor por convecção, processo pelo qual a temperatura do ar aumenta ao longo do dia (LAMBERTS et al, 2016). Atualmente, *softwares* de projeto arquitetônico como *Revit* e *Sketchup* permitem analisar a posição solar ao longo do ano, de acordo com a localização do projeto, permitindo definir a orientação dos ambientes, a posição das aberturas e as superfícies de sombreamento de maneira mais eficaz.

A Figura 4 ilustra a altura solar, representada por H, e o azimute solar, representado por A.

Figura 4 - Altura e azimute solar



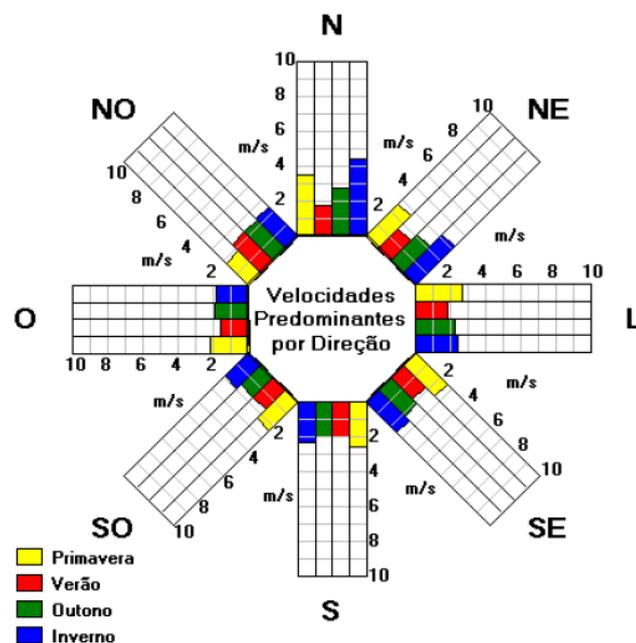
Fonte: LAMBERTS et al. (2016, p. 52)

A radiação solar que incide na Terra pode ser direta ou difusa, sendo a primeira referente às ondas que se propagam em uma única linha que intercepta o sol e a superfície terrestre, e a segunda referente às ondas eletromagnéticas que não possuem uma única direção devido a sua dispersão na atmosfera por aerossóis,

moléculas e poeiras; a soma das parcelas difusa e direta da radiação é denominada radiação global (TIWARI; DUBEY, 2010). Não apenas a radiação global compõe a radiação térmica que atua no ganho térmico das edificações, mas também a radiação solar refletida pelo solo e entorno e a radiação térmica emitida pelas próprias superfícies; a radiação solar é classificada como onda curta, característica de superfícies com elevadas temperaturas, e a radiação emitida pelas superfícies é classificada como onda longa, devido à baixa temperatura das mesmas (SILVA; CHAVES; LIMA, 2011).

Em escala global, a diferença de aquecimento entre terras e mares, o gradiente de temperatura terrestre e a rotação da Terra originam variações de pressões atmosféricas, que por sua vez influenciam na direção e intensidade dos ventos (FROTA; SCHIFFER, 2001). A Figura 5 apresenta a rosa dos ventos para a cidade de Santa Maria, que foi desenvolvida a partir de um arquivo com dados climáticos do município.

Figura 5 - Rosa dos ventos da cidade de Santa Maria



Fonte: FLORES (2014, p. 78)

É possível perceber que os ventos de maior intensidade são provenientes da direção norte, principalmente na primavera e no inverno.

Um projeto arquitetônico projetado especialmente para determinadas condições de vento e radiação solar apresentará aumento de performance mesmo sem a adoção de materiais isolantes. Para os períodos de verão, as proteções solares são muito importantes e auxiliam na obstrução da radiação solar direta, e de acordo com Garlet (2017), o uso de proteção solar através de cortina de rolo externa à janela se mostrou mais eficiente que o uso interno para um edifício comercial na cidade de Santa Maria; além disso, o uso de brise externo com aletas ao longo da altura das janelas, em substituição à cortina, permite a regulagem da proteção de acordo com o ângulo de incidência da radiação solar, possibilitando um desempenho térmico ainda melhor.

## 2.5 DESEMPENHO TÉRMICO DE FECHAMENTOS OPACOS E TRANSPARENTES

Diversos são os materiais empregados na construção civil no Brasil, que podem ser opacos ou transparentes. Os fechamentos opacos podem ser constituídos, por exemplo, de tijolos cerâmicos, blocos de concreto, argamassa de cimento e areia, argamassa de gesso, além de materiais isolantes. Segundo Vila Real (1990), os materiais isolantes podem ter origem mineral, como a lã de vidro e lã de rocha, origem orgânica, como a cortiça, e origem sintética, como o poliestireno expandido (EPS), o poliestireno extrudado (XPS) e o poliuretano (PU). Ainda segundo o autor, o EPS, isolante analisado neste trabalho, é um produto de baixa densidade, apresentando cerca de 98% do seu volume composto por ar, com baixa absorção de água e grande resistência à umidade e ao ataque de fungos e outros parasitas, além de poder ser usado com qualquer tipo de argamassa.

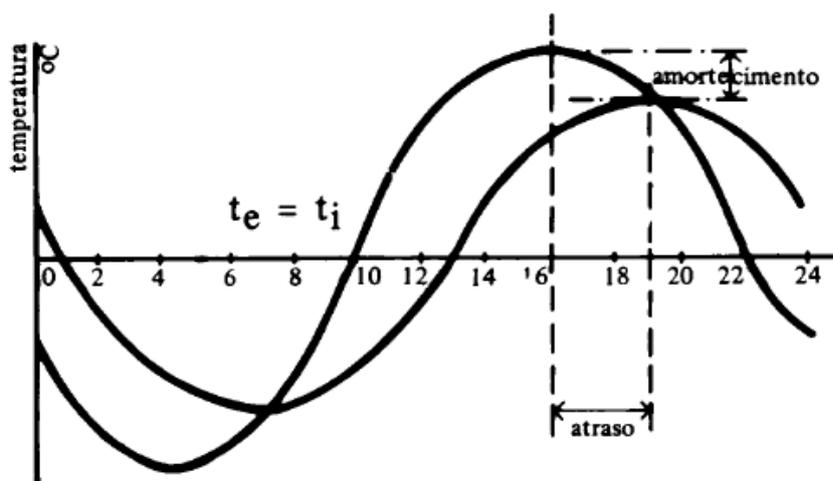
O EPS é um material isolante que pode ser utilizado em fechamentos opacos a fim de melhorar o desempenho térmico da edificação. De acordo com Araújo (2004), a utilização de paredes compostas por EPS e revestimento argamassado com tela de aço permitiu a redução na temperatura do ar em ambientes internos em relação a paredes compostas por tijolo oito furos com revestimento argamassado sem tela. Contudo, o autor ressalva que a utilização de ambos os materiais em conjunto, com o EPS voltado para a face interna da parede e o tijolo para a parte externa, pode apresentar desempenho ainda melhor devido ao fato de o tijolo apresentar menor

absorção à radiação externa que a tela de aço utilizada para o revestimento do EPS, proporcionando uma menor temperatura radiante média da superfície.

Para o cálculo do fluxo de calor através de uma superfície, é necessário conhecer a sua transmitância térmica, que pode ser determinada conforme a NBR 15220-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c). Contudo, a interpretação dos resultados com base apenas em valores de transmitância pode ser equivocada para certas ocasiões. No caso de coberturas, a transmitância térmica para telhados executados com telha cerâmica ou com fibrocimento é semelhante; entretanto, a porosidade da telha cerâmica é maior e, portanto, a absorção de água também o é, de modo que há uma redução na taxa de fluxo de calor porque parte do mesmo é dissipado no aquecimento e na evaporação da água absorvida (LAMBERTS et al, 2016).

Além da transmitância, o fluxo de calor também depende da inércia térmica do fechamento, que é função da densidade, da condutividade e do calor específico dos materiais que o compõem (FROTA; SCHIFFER, 2001). O uso de materiais com maior inércia térmica pode ser uma estratégia para promover o amortecimento e o atraso da onda de calor, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Amortecimento e atraso da onda de calor devido à inércia térmica



Fonte: FROTA; SCHIFFER (2001, p. 51)

A curva com os maiores extremos da Figura 7 representa a temperatura externa, enquanto a outra curva representa a temperatura interna do ambiente. Neste caso, o amortecimento da onda de calor proporcionado pela inércia térmica do fechamento permitiu que a temperatura interna não atingisse os valores máximo e mínimo da temperatura externa, e o pico de ambas as temperaturas ocorreu com um atraso de aproximadamente três horas.

Tabarelli (2017) analisou a influência do tipo de telha, da transmitância, da ventilação e do isolamento de coberturas tipicamente utilizadas em Santa Maria, através de simulação computacional para uma edificação multifamiliar. Segundo a autora, a temperatura do ambiente imediatamente abaixo da cobertura é afetada principalmente pela absorvância solar das telhas, seguido da transmitância da cobertura e por último da ventilação da mesma. Conclui-se, portanto, que para melhorar as condições térmicas nos ambientes de permanência prolongada em períodos quentes é necessário adotar telhas de baixa absorvância solar, com cores preferencialmente claras, e um sistema de cobertura de baixa transmitância térmica composto pelas telhas, câmara de ar, isolante térmico e forro ou laje. A utilização de uma superfície com baixa absorvância, entretanto, tem impacto negativo no conforto térmico durante o inverno, período para o qual um valor maior de absorvância é recomendado. Ainda, segundo Tabarelli (2017), o consumo energético anual do pavimento de cobertura condicionado artificialmente tem relação direta com a transmitância térmica da cobertura, de modo que valores baixos de transmitância permitem uma redução no gasto energético, tornando a edificação mais eficiente.

A absorvância das superfícies pode ser modificada através da pintura das mesmas. No estudo realizado por Ikematsu (2007), a autora analisou a influência de diversas tintas na refletância de telhas de fibrocimento. Entre os resultados encontrados, as telhas de fibrocimento pintadas com tinta branca convencional e com tinta branca refletiva apresentaram reduções significativas nos índices de refletância em relação à telha original. A Tabela 2 apresenta os valores de refletância para as três situações.

Tabela 2 - Refletância de telhas de fibrocimento

<b>Amostra</b>	<b>Ultravioleta (%)</b>	<b>Visível (%)</b>	<b>Infravermelho (%)</b>	<b>Total (%)</b>
Telha original	23,5	46,3	48,2	45,9
Telha com tinta branca refletiva	8,2	72,8	73,0	67,9
Telha com tinta branca convencional	9,4	77,3	62,2	60,7

Fonte: Adaptado de Ikematsu (2007, p. 73)

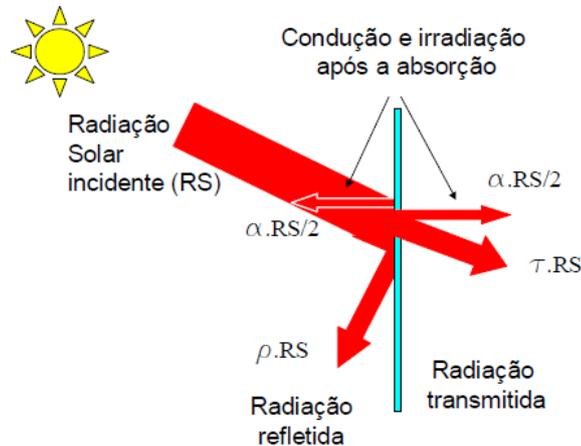
Os valores apresentados na Tabela 2 demonstram o impacto que a utilização de tintas pode ter na redução da absorção da superfície. O emprego de tintas que proporcionam maiores valores de refletância às telhas pode contribuir na redução do desconforto térmico em dias quentes para pavimentos de cobertura ou em casas térreas.

Os fechamentos transparentes geralmente apresentam alta transmitância térmica devido a sua pequena espessura e permitem a entrada direta de radiação solar por transmissão, impactando nas trocas de calor entre meios interno e externo, (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Segundo a ABIVIDRO (2016), a condutividade térmica é praticamente a mesma para os diversos tipos de vidro, e como a espessura geralmente é da ordem de milímetros, a transmitância térmica só apresenta variações significativas em vidros insulados, como os vidros duplos, nos quais a camada de ar aumenta consideravelmente a resistência térmica do sistema, ou em vidros de baixa emissividade, que reduzem as trocas por radiação.

O fluxo de calor em superfícies transparentes tem relação com as parcelas absorvida, refletida e transmitida, como discutido anteriormente, e é ilustrado na Figura 7.

A parcela de radiação solar transmitida é a que mais impacta no ganho de calor dos ambientes internos, de maneira que vidros com maior absorção e menor transmitância do espectro solar são considerados mais eficientes. Em seu trabalho, Castro (2006) demonstrou que o vidro laminado verde com película PVB incolor apresenta uma absorção aproximadamente três vezes maior que o vidro laminado incolor com película verde, comprovando a influência da cor do vidro na transmissão da radiação.

Figura 7 - Reflexão, absorção e transmissão de radiação solar em superfícies transparentes



Fonte: LAMBERTS et al. (2016, p. 98)

$\alpha$ : absorvidade do vidro

$\rho$ : refletividade do vidro

$\tau$ : transmissividade do vidro

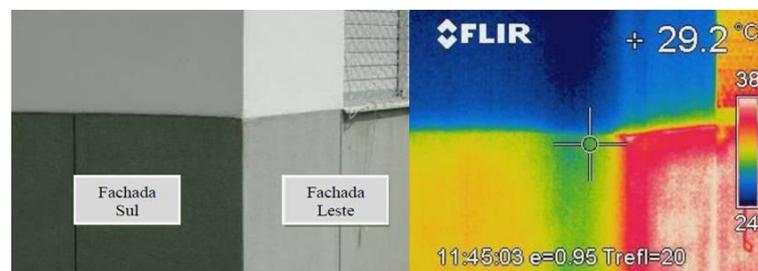
Em um vidro comum, a faixa de radiação para a qual o material é transparente é de aproximadamente 0,2 a 2,8  $\mu\text{m}$  e inclui a radiação visível e uma parte das radiações infravermelho e ultravioleta. A partir deste limite, a transmissão cai significativamente até que, para comprimentos de onda acima de 4  $\mu\text{m}$ , o vidro apresenta comportamento de um material opaco (LAMBERTS et al., 2016). Em ambientes internos, a radiação solar é transmitida através do vidro e é absorvida pelas superfícies, que aumentam suas temperaturas e emitem radiação de ondas longas, para a qual o vidro é um material opaco, fazendo com que a radiação fique aprisionada e a temperatura do ambiente aumente.

Segundo a Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (ABRAVIDRO, c2021), o fator solar representa a razão entre a quantidade de radiação solar que atravessa o vidro, direta e indiretamente, e a radiação incidente, e tem grande impacto nos ganhos de calor do ambiente interno por radiação. O fator solar de um vidro comum é 0,87, o que significa que a soma da radiação diretamente transmitida pelo vidro com a radiação que primeiro é absorvida e posteriormente é transmitida equivale a 87% da radiação normal incidente, enquanto que vidros de controle solar apresentam fator solar inferior a 40% (ABIVIDRO, 2016).

A arquitetura projetada com base nas características climáticas é a primeira etapa para o desenvolvimento de uma edificação termicamente eficiente, e a segunda etapa é a especificação adequada dos materiais dos fechamentos opacos e transparentes. Em relação aos materiais, deve-se atentar para características como condutividade, transmitância térmica, calor específico, capacidade térmica, absorvidade, transmissividade, refletividade e fator solar (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Para entender melhor como as características físicas de uma edificação interagem com as variáveis do meio, pode-se recorrer à termografia. Com câmeras especiais é possível mapear gradientes de temperatura através da detecção de radiação infravermelha emitida pelas superfícies (LAMBERTS et al, 2016). A Figura 8 apresenta a diferença de temperatura na interseção de duas fachadas de uma edificação.

Figura 8 - Termografia de superfícies



Fonte: LAMBERTS et al (2016, p. 96)

Por meio da Figura 9 percebe-se que há uma grande diferença de temperatura entre a cor mais clara, superior, e a mais escura, inferior, devido a diferença de absorvância solar entre as superfícies; além disso, a cor mais escura apresenta maior variação de temperatura de acordo com a orientação da fachada. Essas informações são relevantes na determinação dos principais pontos que reduzem a eficiência energética de uma edificação.

## 2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A utilização de simulação computacional é interessante e permite ao projetista entender detalhadamente o comportamento térmico da edificação. A análise pode ser feita considerando diversos fatores, como posição solar, sombreamento, absorvância e transmitância à radiação, transmitância térmica, ventilação, entre outros, o que resulta em uma maior precisão que a análise segundo o método simplificado indicado pela NBR 15575-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b).

O *EnergyPlus*, programa de simulação computacional mundialmente utilizado, teve sua primeira versão desenvolvida em 2001, tendo a sua origem relacionada aos programas *BLAST* e *DOE-2*, que foram desenvolvidos na década de 1970 e início da década de 1980 com o objetivo de permitir a simulação energética e o dimensionamento de aparelhos de ar condicionado, analisando critérios de custo benefício e otimização da eficiência energética (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2021a). O programa utiliza funções baseadas no balanço energético, analisando simultaneamente os efeitos de radiação e convecção em ambientes internos e externos e transferência de calor por condução em regime transitório, além de considerar diversas variáveis ambientais, como a velocidade e a direção do vento, a influência do solo na transferência de calor, a poluição ambiental, entre outros. A simulação pode ser realizada para dias típicos de projeto ou para todos os dias de um ano.

Contudo, o programa não apresenta uma interface simples para a modelagem da edificação, já que todas as superfícies devem ser inseridas manualmente através de coordenadas. Felizmente, foram desenvolvidos outros meios para realizar a modelagem de forma mais rápida, como o *plugin OpenStudio*, desenvolvido para o *Sketchup*. Com o auxílio destas ferramentas é possível realizar a modelagem das superfícies de maneira simplificada, além de permitir a visualização da volumetria e dos resultados da simulação através da importação dos valores do *EnergyPlus*.

Entre os diversos dados de entrada exigidos pelo *EnergyPlus* para realizar as simulações estão o arquivo climático da cidade de Santa Maria, os parâmetros físicos dos materiais considerados para os fechamentos verticais e horizontais de cada tipologia, o padrão de ocupação dos ambientes e as características técnicas do modelo de ar condicionado adotado. A partir de cada simulação é possível extrair

dados horários referentes às temperaturas operativas, à carga térmica total e ao consumo de eletricidade de aparelhos de ar condicionado, a fim de determinar o consumo energético anual para climatização artificial e o nível de desempenho térmico segundo a NBR 15575.

## 2.7 PADRÃO NORMAL DAS EDIFICAÇÕES SEGUNDO A NBR 12721 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021c)

A NBR 12721: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras considerações para condomínios edilícios – Procedimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021c), foi inicialmente publicada em 2006 e teve sua última revisão publicada em 2021. A norma define três tipos de padrões de edificações, que são utilizados para fins de incorporação imobiliária, orçamentação e definição do Custo Unitário Básico (CUB), sendo eles baixo, normal e alto (ABNT, 2021c).

A Caixa Econômica Federal adota os mesmos padrões da NBR 12721 e os utiliza no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). A Ficha Técnica para Residência Unifamiliar Térrea Padrão Normal exemplifica uma edificação de 100,41 m<sup>2</sup>, construída em concreto armado com laje de cobertura, alvenaria de vedação em blocos cerâmicos, telhado com telha cerâmica, beiral e estrutura em madeira e instalações de água fria, sanitária, elétrica, telefônica e de TV convencionais, possuindo uma sala, dois quartos, uma suíte, banheiros social e de serviço, cozinha, área de serviço e garagem coberta (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2021). Este mesmo padrão de edificação foi adotado como projeto base para o desenvolvimento deste trabalho.

### 3. METODOLOGIA

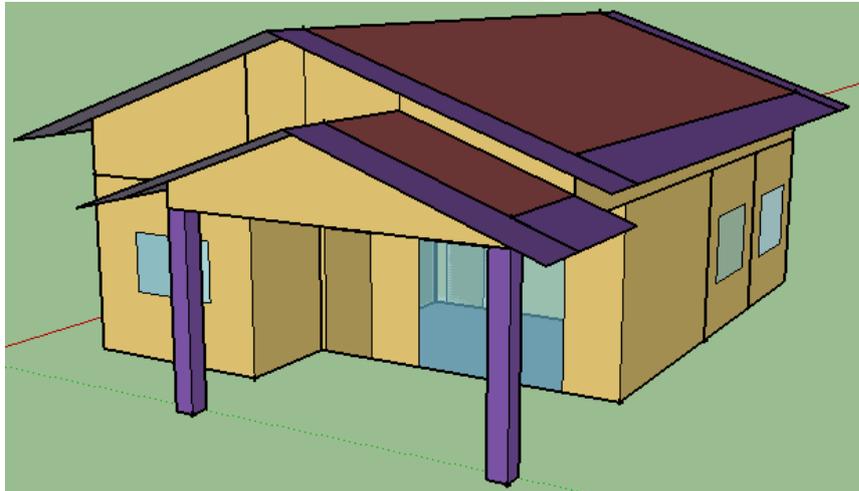
A simulação computacional e a análise desenvolvidas neste trabalho envolveram a utilização dos programas *EnergyPlus 8.7.0* (licença gratuita), *Sketchup 2016* (licença paga) e *Excel 2019* (licença paga), além do *plug-in OpenStudio 1.12.0* (licença gratuita).

A edificação em estudo é fictícia, desenvolvida especialmente para este trabalho, e é enquadrada no padrão normal da NBR 12721 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021c), sendo composta por uma suíte, dois dormitórios, um banheiro social, um corredor, uma sala de estar, uma cozinha, uma área de serviço e uma garagem coberta. A área construída da residência é de 118,87m<sup>2</sup>, semelhante à área construída apresentada na Ficha Técnica para Residência Unifamiliar Térrea Padrão Normal (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2021). A planta baixa da edificação é apresentada no Apêndice A.

Inicialmente, a edificação foi modelada no *Sketchup* através das ferramentas do *OpenStudio*, visando a obtenção do arquivo de entrada para o *EnergyPlus*. Este modelo foi denominado edificação real (edificação fictícia em estudo), já que a NBR 15575-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b), especifica também um modelo de referência, ou edificação de referência, a qual é apresentada posteriormente. Cada ambiente da edificação foi considerado como uma zona térmica, incluindo os áticos da cobertura. As Figuras 9 e 10 mostram a porção anterior e posterior da edificação modelada, respectivamente.

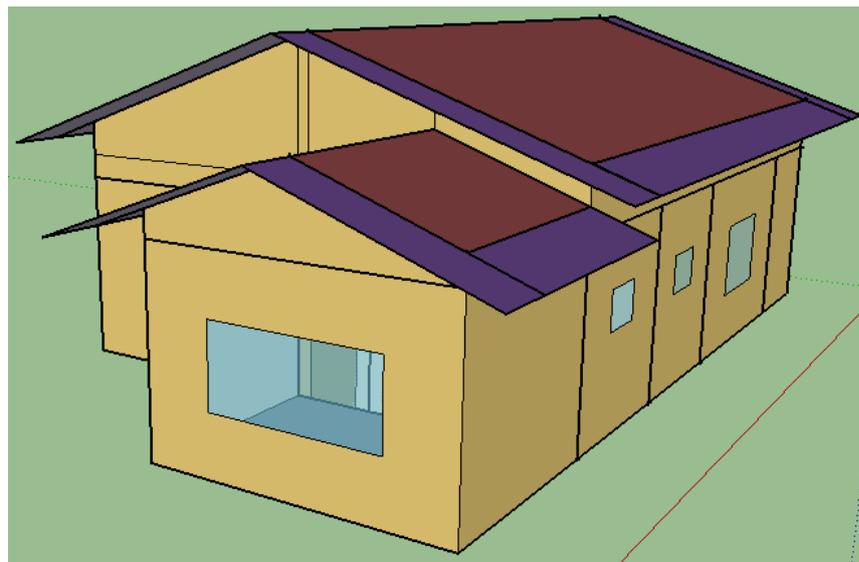
Além da edificação real, foi necessário modelar a edificação de referência, segundo as especificações da NBR 15575-1, para que o desempenho entre ambos os modelos fosse comparado, permitindo a determinação do nível de desempenho térmico. Para tal, a volumetria dos ambientes internos foi considerada a mesma do modelo real, alterando apenas a área dos elementos transparentes dos ambientes de permanência prolongada de acordo com a área do piso. O modelo de referência não deve apresentar superfícies que promovam sombreamento, como beirais ou sacadas, e a cobertura deve ser modelada como uma superfície única, sem a presença de áticos, pois a resistência térmica do ar é considerada como uma camada da superfície de cobertura durante a modelagem energética no *EnergyPlus* (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b). O modelo de referência é apresentado nas Figuras 11 e 12.

Figura 9 - Modelagem geométrica da edificação real - porção anterior



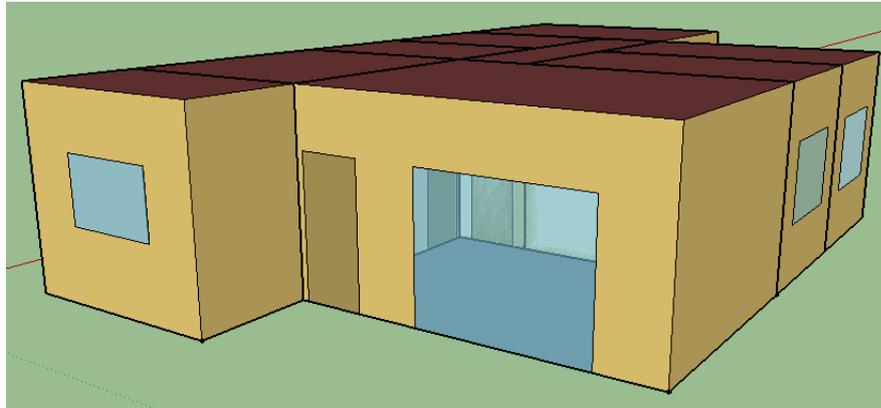
Fonte: Autor

Figura 10 - Modelagem geométrica da edificação real - porção posterior



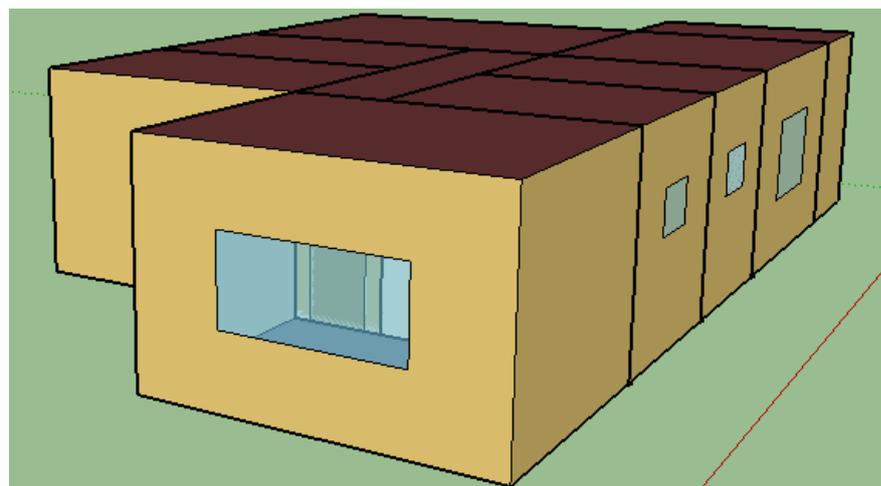
Fonte: Autor

Figura 11 - Modelagem geométrica da edificação de referência conforme NBR 15575-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b) - porção anterior



Fonte: Autor

Figura 12 - Modelagem geométrica da edificação de referência conforme NBR 15575-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b) - porção posterior



Fonte: Autor

Posterior à modelagem geométrica, foi realizada a modelagem energética das edificações real e de referência através da definição de diversos objetos no *EnergyPlus*. Esta etapa consistiu em modelar as diferentes tipologias construtivas com

os parâmetros de simulação, objetivando a determinação do nível de eficiência energética segundo a NBR 15575, para os cenários de climatização natural e climatização artificial, e o consumo anual de eletricidade dos aparelhos de ar condicionado para o cenário de climatização híbrida. O arquivo climático utilizado para a simulação foi o TMY da cidade de Santa Maria.

As tipologias construtivas adotadas neste trabalho foram identificadas por letras, sendo a tipologia A referente à edificação com materiais tipicamente utilizados, as tipologias B, C, D e E referentes à edificação com melhorias térmicas individuais e a tipologia F referente ao conjunto das melhorias. O Quadro 2 apresenta os materiais utilizados para os fechamentos opacos e transparentes da tipologia A.

Quadro 2 – Elementos construtivos da tipologia com materiais tipicamente utilizados na construção de edificações unifamiliares

<b>TIPOLOGIA A</b>	
Paredes externas e internas	2,5 cm de revestimento de argamassa de cimento e areia / tijolo 9 furos / 2,5 cm de revestimento de argamassa de cimento e areia
Paredes do banheiro	2,5 cm de revestimento de argamassa de cimento e areia / tijolo 9 furos / 2,5 cm de revestimento de argamassa de cimento e areia / revestimento cerâmico
Laje de cobertura	Laje pré-moldada composta de tabelas cerâmicas e vigotas de concreto, executadas com 4 cm de capa de concreto / 2,5 cm de revestimento de argamassa de cimento e areia (revestimento inferior)
Telhado	Telha cerâmica cor natural
Piso	Revestimento cerâmico / 4 cm de argamassa de regularização / 5 cm de piso de concreto
Janelas	Esquadria de alumínio com vidro simples de 3 mm
Portas	Porta de madeira

Fonte: Autor

Em relação à tipologia A, apresentada no Quadro 2, as demais tipologias apresentaram as seguintes alterações:

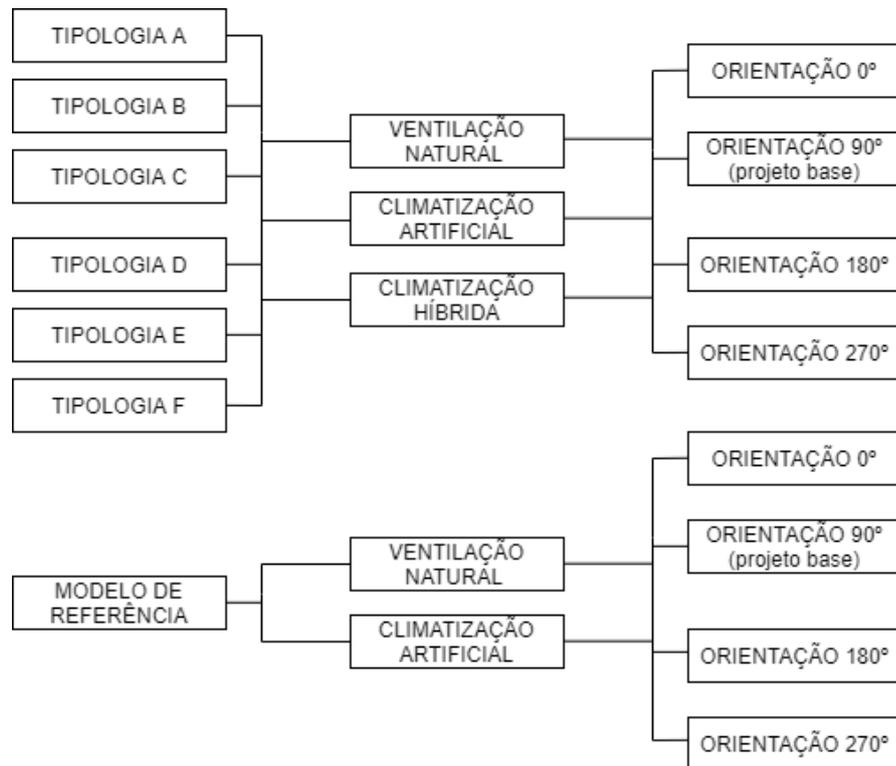
- Tipologia B: utilização de vidros duplos nas aberturas transparentes, compostos por duas camadas de vidro com espessura de 5,7 mm e uma camada de ar com espessura de 12,0 mm;
- Tipologia C: utilização de telha cerâmica de alta refletância, considerando a pintura da mesma com tinta acrílica cor branca;
- Tipologia D: utilização de isolante térmico na laje de cobertura. Foi adotada uma camada de 4 cm de argamassa de regularização sobre 3 cm de EPS, imediatamente acima da capa de concreto de laje;
- Tipologia E: utilização de isolante térmico nas paredes externas, com exceção das paredes dos banheiros e da cobertura. As paredes externas são constituídas por 3 cm de EPS entre as camadas de revestimento argamassado interno e de tijolo;
- Tipologia F: utilização em conjunto das melhorias térmicas das tipologias B, C, D e E.

Para cada tipologia foram realizadas simulações referentes ao cenário de ventilação natural, de climatização artificial e de climatização híbrida, variando o ângulo de orientação do projeto de 90° em 90°. Os cenários de ventilação natural e de climatização artificial foram simulados com o objetivo de determinar o nível de desempenho térmico segundo a NBR 15575, sendo necessário também realizar as simulações para o modelo de referência. O cenário de climatização híbrida, que representa com maior precisão o real cenário de utilização da edificação e não é especificado pela norma, foi simulado com o objetivo de determinar o consumo anual de eletricidade dos aparelhos de ar condicionado nos ambientes de permanência prolongada para cada tipologia e, conseqüentemente, determinar qual é mais eficiente energeticamente. O ângulo de orientação foi definido como o ângulo entre o norte geográfico e o comprimento da edificação, medido no sentido horário, sendo o projeto base originalmente desenvolvido para a orientação 90°. A Figura 13 apresenta a estrutura das simulações realizadas.

As propriedades térmicas dos materiais do modelo de referência foram especificadas segundo a Tabelas 7, 8, 10 e 12 da NBR 15575-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b). As propriedades dos materiais opacos utilizados no modelo real foram definidas a partir de especificações da Tabela B.3 da NBR 15220-2 (ABNT, 2005c) e do Anexo A do relatório *Desenvolvimento de*

um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LABEEE, 2017), e são apresentadas na Tabela 3.

Figura 13 - Estrutura das simulações



Fonte: Autor

Tabela 3 - Propriedades dos elementos opacos utilizados na simulação

(continua)

Material	Espessura (m)	Condutividade térmica (W/m.K)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)
Argamassa de revestimento à base de cimento e areia	0,025	1,15	2000	1000

Tabela 3 - Propriedades dos elementos opacos utilizados na simulação

				(conclusão)
Placas de EPS	0,03	0,04	35	1420
Camada equivalente de tijolo 9 furos 14x19x29 cm	0,0165	0,90	1600	920
Camada equivalente de câmara de ar de tijolo 9 furos	0,107	0,344	-	-
Capa de concreto de laje pré- moldada	0,04	1,75	2200	1000
Camada equivalente de tabela cerâmica	0,012	1,05	2000	920
Camada equivalente de câmara de ar de tabela cerâmica	0,046	0,565	-	-
Telha cerâmica	0,01	1,05	2000	920
Piso de concreto	0,05	1,75	2200	1000
Contrapiso	0,04	1,15	2000	1000
Revestimento cerâmico (piso e paredes)	0,0075	1,05	2000	920
Porta de aglomerado de partículas de madeira	0,03	0,17	700	2300

Fonte: Adaptado de ABNT (2005c, p.13) e LABEEE (2017, p. 43)

As propriedades dos elementos transparentes foram definidas através da biblioteca de materiais do programa *Window*, conforme a Tabela 4. As esquadrias do modelo real foram definidas como sendo de alumínio, com largura de 50 milímetros, sem *thermal break* e com transmitância térmica de 13,51 W/m<sup>2</sup>.K, conforme a Tabela

1 do capítulo 15 do livro *ASHRAE Handbook - Fundamentals 2017*, da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE, 2017). As janelas dos banheiros foram definidas como pivotantes e as demais como de correr com uma folha móvel.

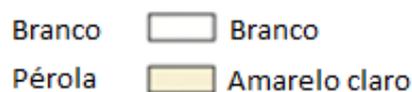
Tabela 4 - Propriedades dos elementos transparentes utilizados na simulação

Material	Espessura (mm)	Condutividade térmica (W/m.K)	Emissividade
Vidro simples	3,0	1	0,84
Vidro duplo (por camada)	5,7	1	0,84
Camada de ar (vidro duplo)	12,0	sem dado	-

Fonte: WINDOW (2021)

Os valores de absorção de todas as superfícies do modelo real foram definidas conforme a Tabela B.2 da NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), com exceção das superfícies compostas por argamassa de cimento e por telhas brancas, que foram definidas conforme Dornelles (2008) para as cores de tinta acrílica pérola e branca da marca *Sherwin Williams*. A cor pérola foi especificada para a pintura das paredes e a cor branca foi especificada para a pintura das telhas. A Figura 14 demonstra a cor e a tonalidade das cores das tintas especificadas.

Figura 14 - Cor e tonalidade das tintas especificadas



Fonte: Adaptado de DORNELLES (2008, p. 69)

Os valores de absorção apresentados por Dornelles (2008) são representativos de amostras não degradadas pela ação de intempéries, sendo realizada a correção destes valores considerando um envelhecimento de três anos

conforme a Equação 1, sugerida pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021b). A Tabela 5 apresenta os valores utilizados de absorvância solar para o modelo real.

$$\alpha_{t=3} = 0,07. (\alpha_{t=0})^2 + 0,59. \alpha_{t=0} + 0,27 \quad (1)$$

Tabela 5 - Absorvância solar dos materiais opacos utilizados nas simulações

<b>Material</b>	<b>Absorvância solar (%)</b>
Argamassa de cimento cor pérola com pintura degradada	47,2
Placas de EPS	20,0
Tijolo 9 furos 14x19x29 cm	70,0
Capa de concreto da laje pré-moldada	80,0
Tabela cerâmica	70,0
Telha cerâmica cor natural	75,0
Telha cerâmica cor branca com pintura degradada	36,5
Piso de concreto	80,0
Contrapiso	50,0
Revestimento cerâmico (piso e paredes)	30,0
Porta de aglomerado de partículas de madeira	30,0

Fonte: Adaptado de ABNT (2005c, p. 13)

As simulações segundo a NBR 15575 foram realizadas com o objetivo de determinar o nível de desempenho térmico de cada tipologia construtiva da edificação, e foram utilizados, além dos objetos pertencentes a todos os tipos de simulação, objetos da classe *AirflowNetwork* para modelar a ventilação natural, da classe *HVACTemplate* para o condicionamento de ar com cargas ideais, da classe *Schedule* para definir padrões de ocupação e funcionamento de aparelhos elétricos e iluminação, da classe *InternalGains* para definir as cargas térmicas provenientes de ocupação, equipamentos elétricos e iluminação, e da classe *Detailed Ground Heat Transfer* para a utilização do *Slab*. O subprograma *Slab*, presente no *EnergyPlus*, foi utilizado para determinar as temperaturas do solo abaixo da edificação, já que os dados fornecidos pelo arquivo climático são extraídos de solos expostos ao ambiente

e podem apresentar distorções em relação a um solo protegido. Foi necessário, portanto, realizar uma simulação extra para cada uma das simulações apresentadas na Figura 15, com o objetivo de extrair a temperatura interna dos ambientes, informação que é requisito para a utilização do *Slab*. Além disso, não foram considerados dias de chuva para as simulações segundo a norma.

A NBR 15575 não especifica critérios de ventilação para os áticos da cobertura, sendo adotado para todas as simulações um coeficiente de fluxo mássico de ar de 0,192 kg/s por metro de beiral, conforme o trabalho de Bortoloni, Bottarelli e Piva (2017), no qual os autores analisaram através de programa computacional o comportamento de coberturas ventiladas com beiral.

Os coeficientes de pressão do vento utilizados foram os de Swami e Chandra (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2021b), e os coeficientes para determinação da vazão de infiltração e de ventilação de aberturas foram especificados segundo a Tabela 18 da NBR 15575-1. As especificações de padrão de ocupação, de equipamentos elétricos e de iluminação foram definidas conforme as Tabelas 13 a 17 da norma. Para os modelos com ventilação natural, a abertura das janelas dos APP foi definida apenas para períodos de ocupação em que a temperatura operativa do ambiente fosse superior a 19°C ou à temperatura externa, e a abertura de portas internas entre APP e APT foi considerada durante todo o ano, assim como as janelas dos banheiros; as janelas dos APT e a porta externa da edificação foram consideradas sempre fechadas. Por fim, as temperaturas de *setpoint* de resfriamento e aquecimento do sistema de condicionamento de ar para o cenário de climatização artificial foram definidas como 23°C e 21°C, respectivamente, e as portas e janelas para este modelo foram consideradas permanentemente fechadas, com exceção das janelas dos banheiros.

As simulações para o cenário de climatização híbrida exigiram a utilização dos objetos da classe *Energy Management System*, através dos quais é possível controlar a abertura de portas e janelas em momentos de utilização ou não do ar condicionado, que teve seus *setpoints* de resfriamento e aquecimento definidos como 26°C e 18°C, respectivamente. Para períodos de ventilação natural, as janelas da cozinha e área de serviço foram consideradas abertas para os horários de ocupação da sala, assim como as portas internas que separam os ambientes. O sistema de condicionamento de ar foi definido com dados de performance fornecidos pela fabricante Life's Good (LG) a fim de obter um modelo mais próximo à realidade, e foram obtidos no site

*Building Components Library* (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2021?), sendo adotado o modelo ARNU073SEL2 para a evaporadora, com 8000 BTU/h de potência de resfriamento e 9000 BTU/h de aquecimento, e o modelo ARUN072BTE4 para a condensadora, com coeficiente de performance (COP) de 4,03 para resfriamento e de 4,05 para aquecimento.

Entre as principais variáveis horárias extraídas de cada simulação encontram-se a temperatura de bulbo seco externa, a temperatura operativa dos ambientes de permanência prolongada e o consumo de energia para aquecimento e resfriamento. Através destas informações foi possível determinar o percentual de horas de ocupação da unidade habitacional dentro da faixa de temperaturas estabelecida pela norma, as temperaturas operativas máximas e mínimas e a carga térmica total para cada uma das tipologias e orientações simuladas, possibilitando determinar o nível de desempenho das mesmas. Por fim, a análise do consumo de energia elétrica para aquecimento e resfriamento permitiu determinar quais tipologias são mais eficientes energeticamente para o cenário de climatização híbrida.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

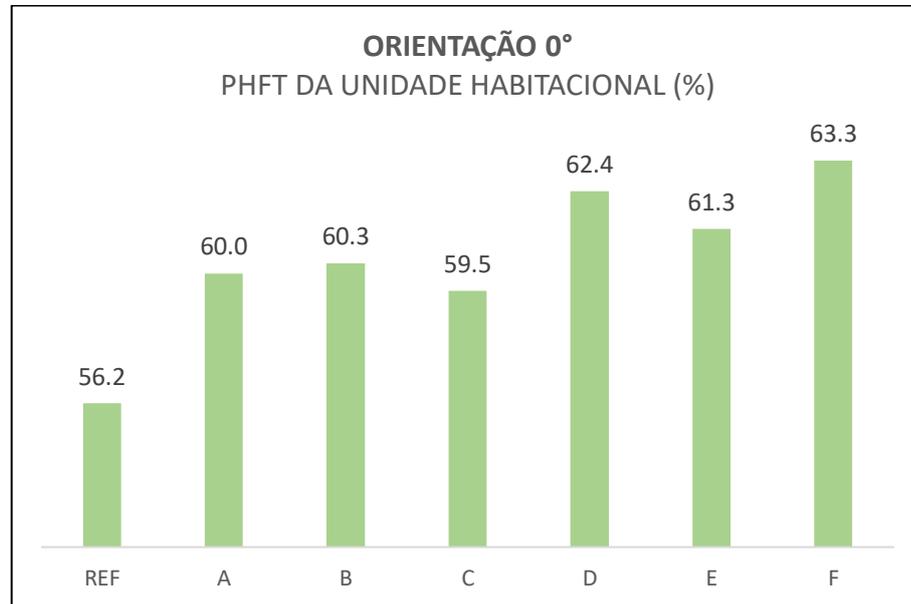
Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas. Inicialmente são discutidos os dados referentes à classificação de desempenho térmico segundo a NBR 15575 para as diferentes tipologias construtivas e orientações da unidade habitacional, e posteriormente são analisados os dados referentes ao consumo elétrico para o cenário de climatização híbrida.

### 4.1 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE DESEMPENHO SEGUNDO A NBR 15575/2021

Inicialmente verifica-se se as edificações atingem o nível mínimo de desempenho, que envolve a análise do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa da unidade habitacional (PHFT), a temperatura operativa máxima da unidade habitacional (TO<sub>max</sub>) e a temperatura operativa mínima da unidade habitacional (TO<sub>min</sub>). Após verificado o nível mínimo, analisa-se se as edificações atingem o nível intermediário, que requer a análise da carga térmica total de resfriamento e aquecimento da unidade habitacional (Cg<sub>TT</sub>), da redução no valor de PHFT ( $\Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$ ) e da redução no valor de carga térmica total (RedCg<sub>TT</sub><sub>min</sub>).

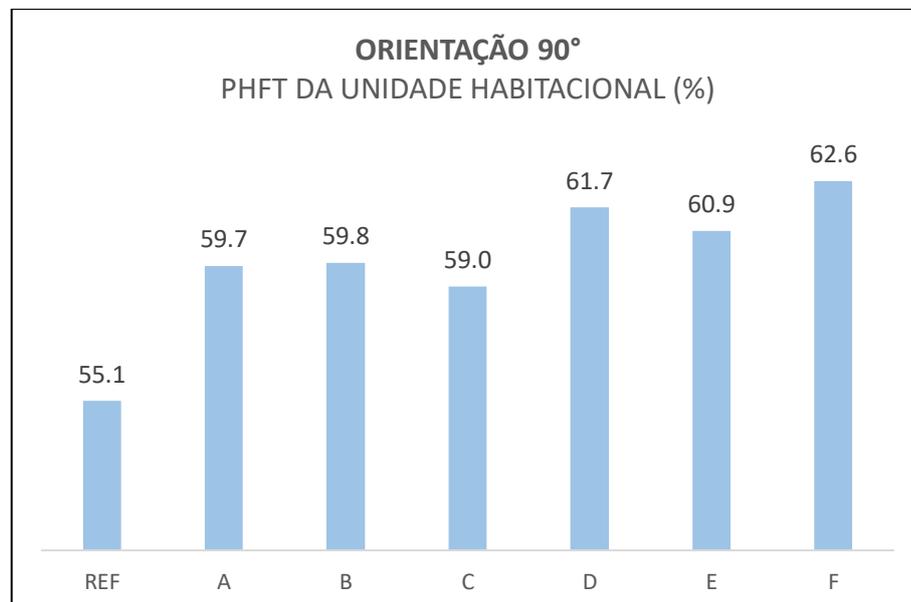
O nível de desempenho mínimo exige que o modelo real apresente um valor de PHFT da unidade habitacional igual ou superior a 90% do PHFT do modelo de referência, além de valores de temperatura operativa de acordo com os limites estabelecidos, sendo a temperatura máxima igual ou inferior à temperatura operativa máxima do modelo de referência acrescida de 2°C, e a temperatura mínima igual ou superior à temperatura operativa mínima do modelo de referência subtraída de 1°C, para o cenário de ventilação natural. As Figuras 15, 16, 17 e 18 apresentam os valores de PHFT para cada tipologia construtiva e orientação solar, e a Figura 19 apresenta a variação nos valores de PHFT de acordo com a orientação para uma mesma tipologia.

Figura 15 - PHFT das tipologias para a orientação 0°



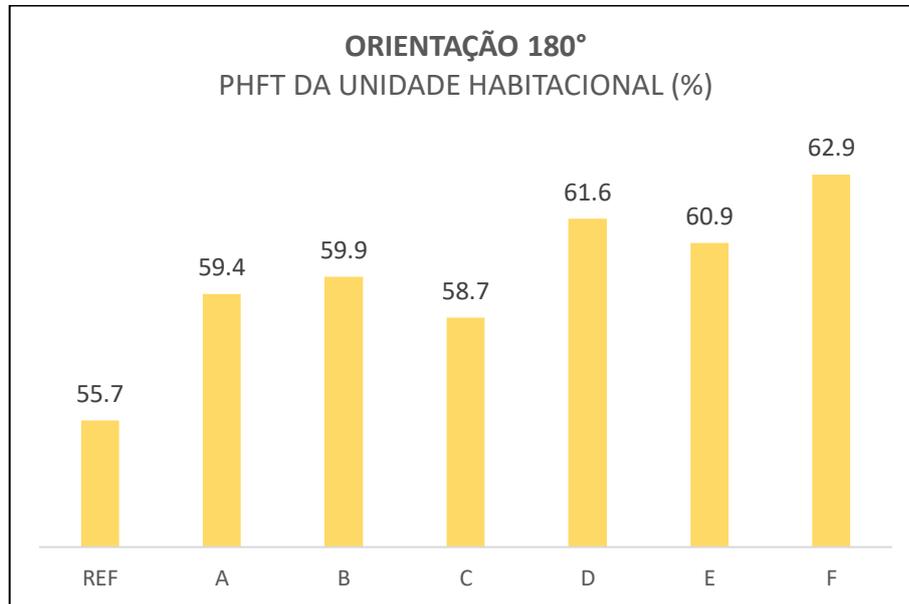
Fonte: Autor

Figura 16 - PHFT das tipologias para a orientação 90°



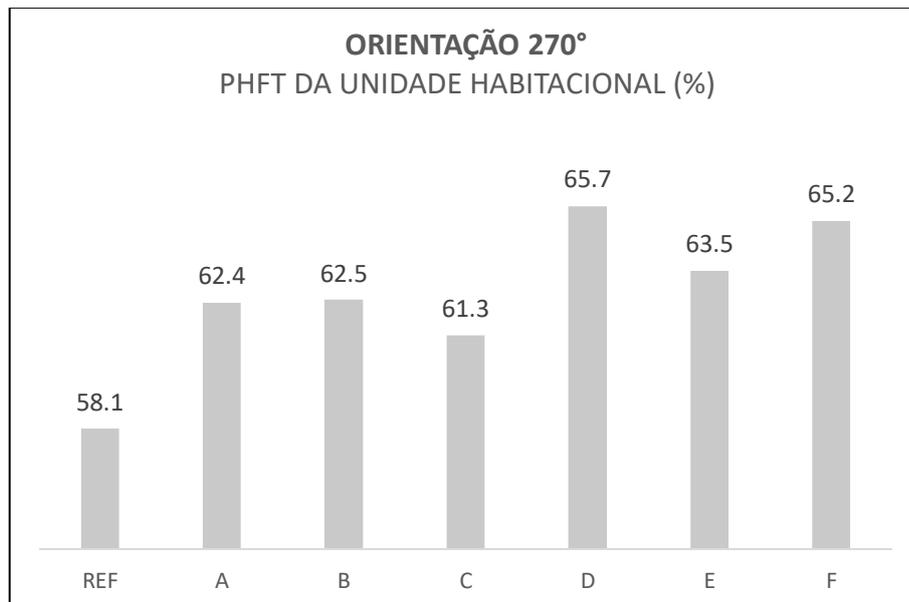
Fonte: Autor

Figura 17 - PHFT das tipologias para a orientação 180°



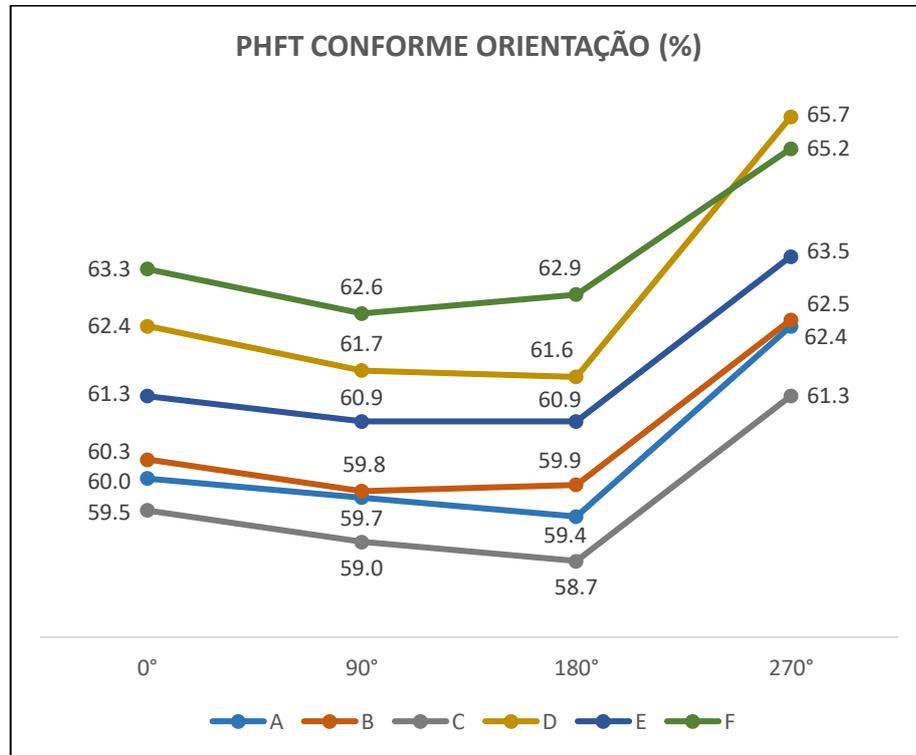
Fonte: Autor

Figura 18 - PHFT das tipologias para a orientação 270°



Fonte: Autor

Figura 19 - Valores de PHFT para cada tipologia de acordo com a orientação



Fonte: Autor

A tipologia F apresentou os melhores valores de PHFT para três orientações, além de apresentar o segundo maior valor para a orientação 270°. A segunda tipologia que apresentou os melhores valores de PHFT foi a D, sendo possível concluir que a adoção de laje de cobertura com isolante térmico é a solução individual mais eficiente para promover conforto térmico. A adoção de paredes externas com isolamento térmico, representada pela tipologia E, mostrou ser a segunda solução individual mais eficiente. A utilização de vidros duplos (tipologia B) como única solução para melhorar o PHFT não apresentou diferença expressiva em relação à tipologia com materiais típicos (tipologia A). A tipologia C apresentou os menores valores de PHFT entre todas as tipologias.

A Figura 19 ainda permite concluir que a orientação 270° apresentou os maiores valores de PHFT para todas as tipologias construtivas. A orientação 90°, que é a orientação original do projeto, apresentou o menor valor de PHFT para as tipologias B, E e F, e o segundo menor valor para as tipologias A, C e D. As variações nos valores de PHFT para cada tipologia não foram, entretanto, expressivas, sendo a

maior taxa de variação igual a 6,66%, referente à tipologia D para as orientações 180° e 270°.

Para compreender o impacto de cada material no conforto térmico para dias quentes e frios é possível analisar o percentual de horas em que a temperatura da unidade habitacional esteve fora dos limites estipulados pela norma. A Tabela 6 apresenta, para todas as tipologias e orientações, o percentual de horas com ocupação em que a temperatura da unidade habitacional foi maior ou igual a 26°C e menor ou igual a 18°C.

Tabela 6 - Percentual de horas fora da faixa de temperatura estipulada pela NBR 15575

Tipologia	Orientação 0°		Orientação 90°		Orientação 180°		Orientação 270°	
	T≥26°C	T≤18°C	T≥26°C	T≤18°C	T≥26°C	T≤18°C	T≥26°C	T≤18°C
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A	6,9	33,1	6,6	33,7	7,3	33,3	6,7	30,9
B	6,7	32,9	6,6	33,6	7,1	33,0	6,6	30,9
C	3,7	36,8	3,5	37,5	4,1	37,2	3,4	35,4
D	3,3	34,2	3,0	35,2	3,8	34,6	2,9	31,5
E	6,6	32,0	6,6	32,4	6,8	32,3	6,4	30,1
F	1,2	35,6	1,2	36,2	1,2	35,9	1,0	33,8

Fonte: Autor

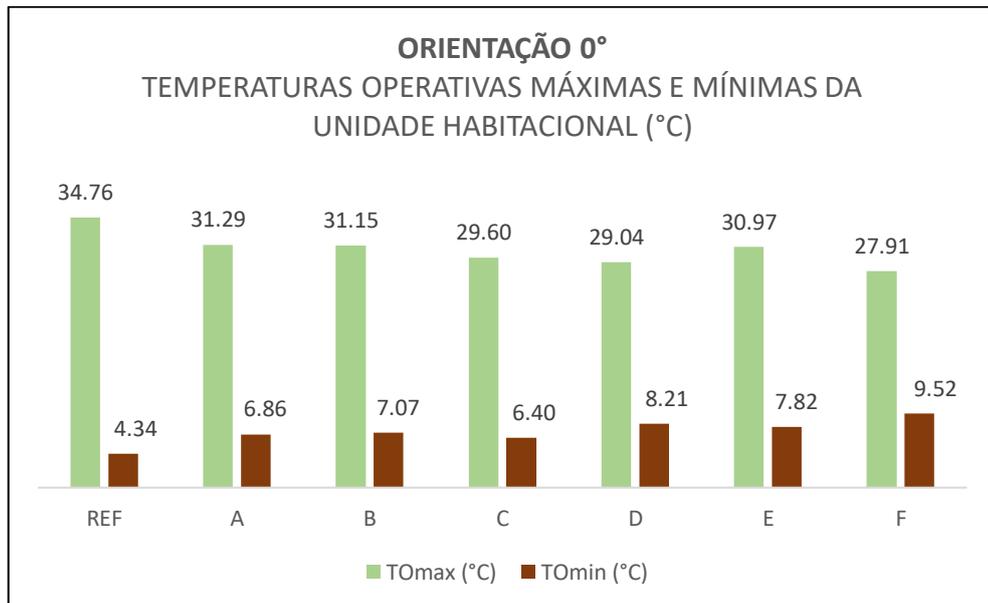
Conclui-se que, para uma cidade como Santa Maria, situada na Zona Bioclimática 2, os períodos frios do ano impactam significativamente mais no conforto térmico que os períodos quentes. Além disso, a tipologia E apresentou o melhor conforto térmico para os períodos frios, já que as paredes externas constituídas de EPS promovem uma redução na perda de calor por condução para o ambiente externo. A utilização de vidro duplo também promove uma redução nas perdas por condução, mas de forma menos significativa quando comparada ao isolamento propiciado pelo EPS nos fechamentos verticais. Por outro lado, as tipologias B e E possibilitam menos horas de conforto térmico para períodos quentes quando comparadas às demais melhorias térmicas individuais (tipologias C e D), já que o calor proveniente de fontes internas, como equipamentos elétricos e ocupação, e de fontes

externas, como a radiação transmitida pelas aberturas e o calor conduzido pela cobertura, fica aprisionado nos ambientes devido a menor condutibilidade térmica das paredes para a tipologia E e das aberturas para a tipologia B.

As Figuras 20, 21, 22 e 23 apresentam os valores de temperaturas operativas anuais máximas e mínimas da unidade habitacional para cada orientação e tipologia.

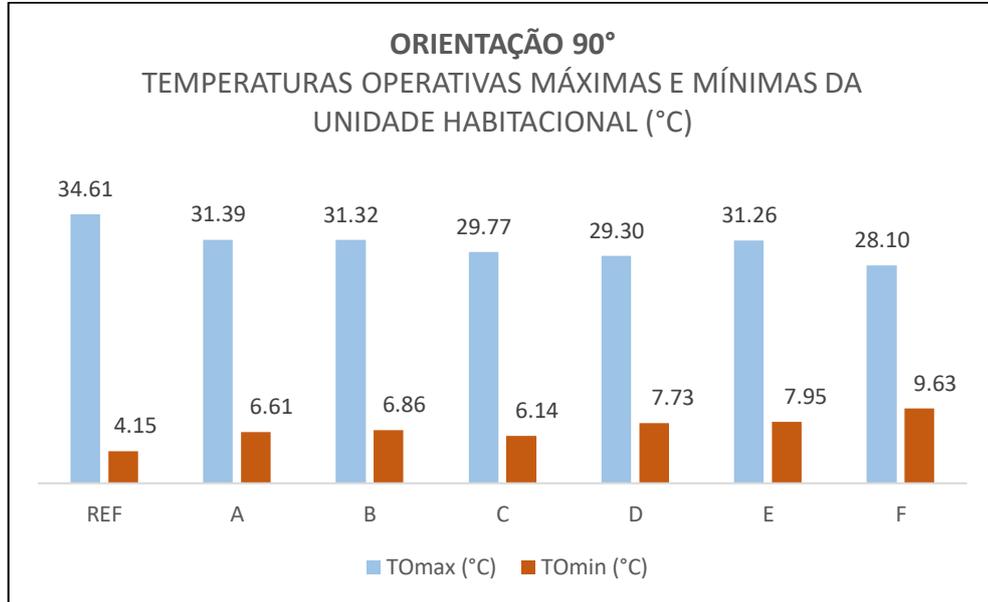
A maior temperatura operativa mínima anual foi de 9,63°C, referente à tipologia F para a orientação 90°, e a menor foi de 5,51°C, referente à tipologia C para a orientação 180°. A menor temperatura operativa máxima foi de 27,91°C, referente à tipologia F para a orientação 0°, e a maior foi de 32,69°C, referente à tipologia A para a orientação 270°C.

Figura 20 - Temperaturas operativas máximas e mínimas das tipologias para a orientação 0°



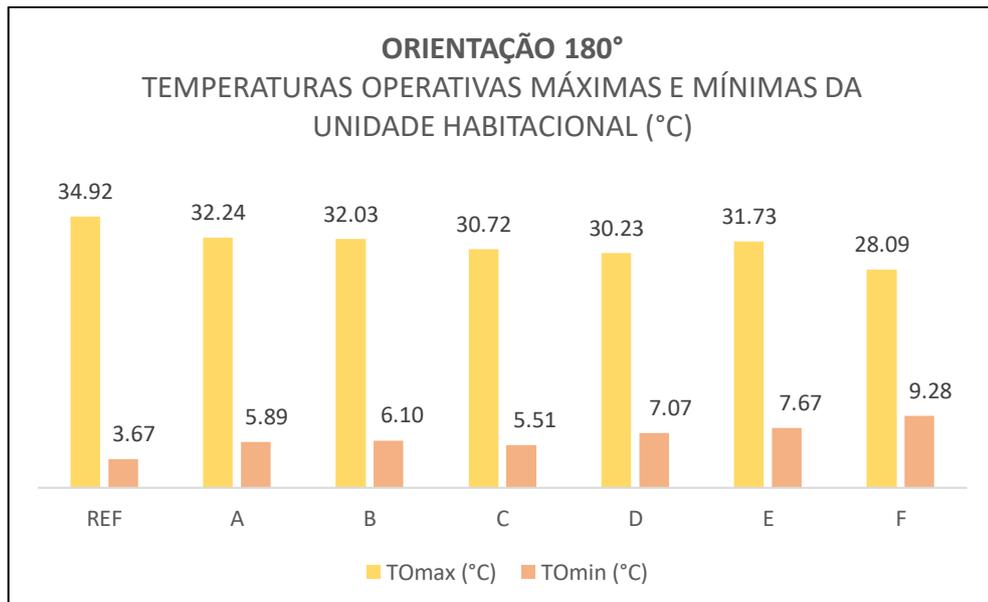
Fonte: Autor

Figura 21 - Temperaturas operativas máximas e mínimas das tipologias para a orientação 90°



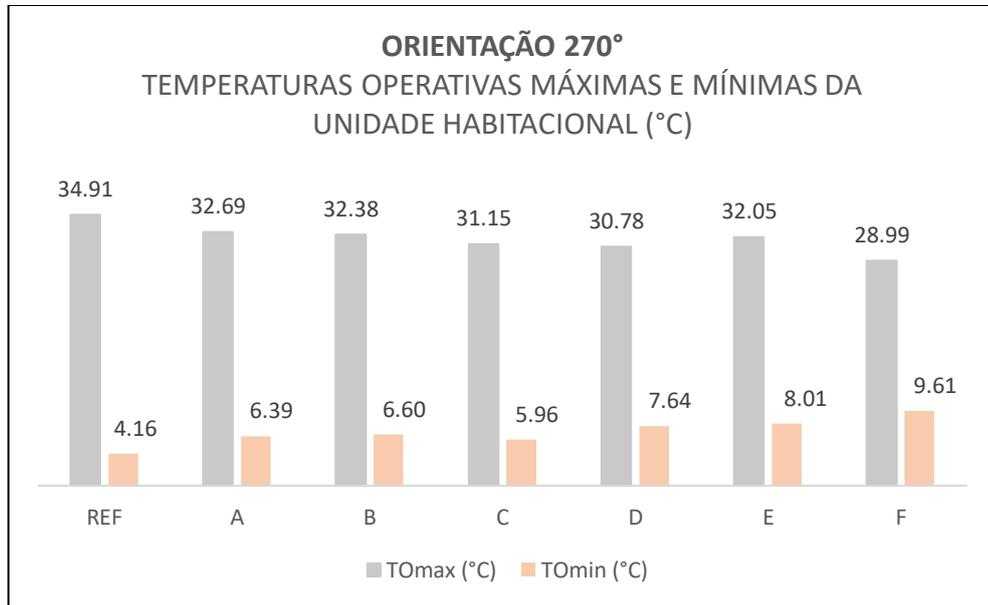
Fonte: Autor

Figura 22 - Temperaturas operativas máximas e mínimas das tipologias para a orientação 180°



Fonte: Autor

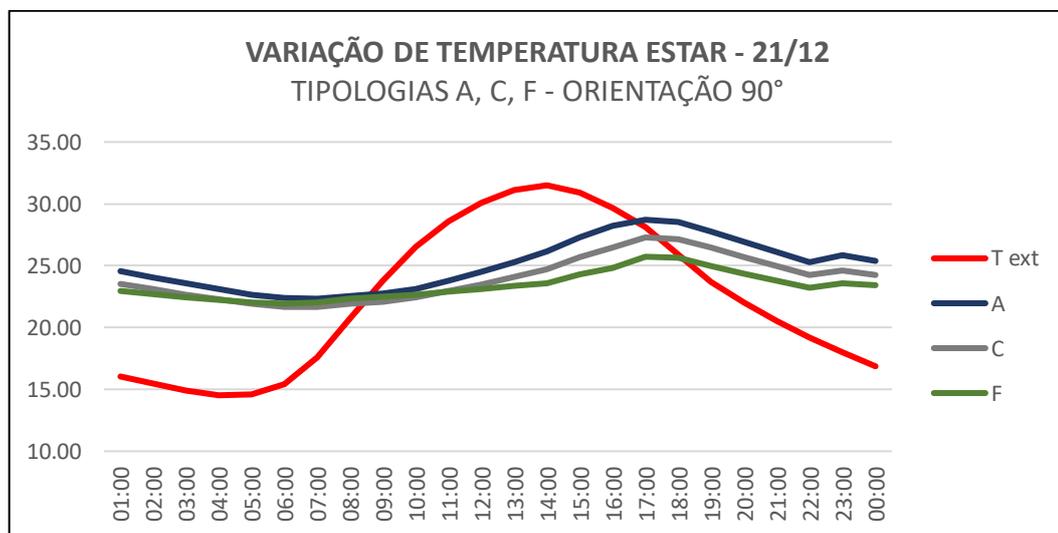
Figura 23 - Temperaturas operativas máximas e mínimas das tipologias para a orientação 270°



Fonte: Autor

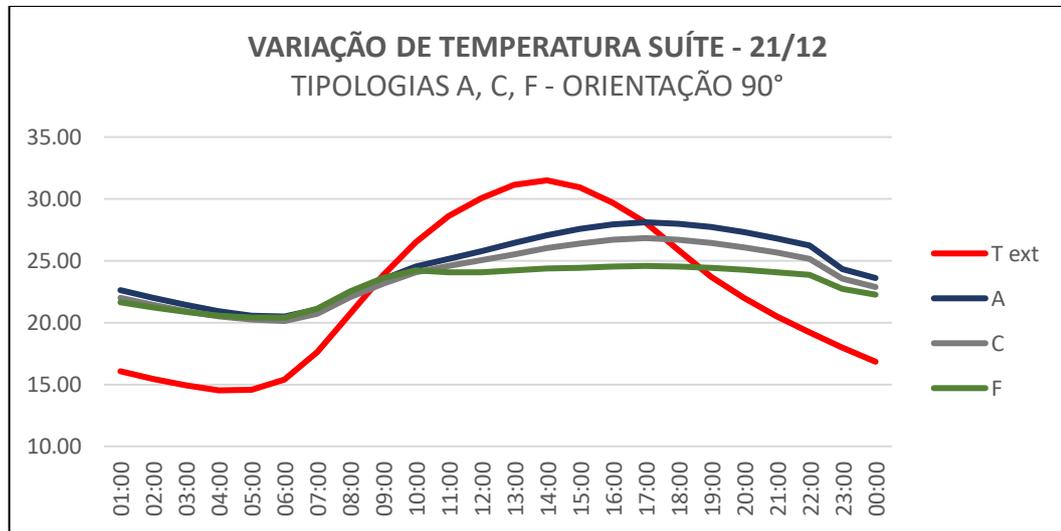
As Figuras 24, 25, 26 e 27 apresentam, para os dias 21 de dezembro e 21 de junho, a variação da temperatura de bulbo seco externa e das temperaturas operativas dos ambientes Estar e Suíte das tipologias A, C e F para a orientação do projeto base.

Figura 24 - Variação de temperatura do ambiente Estar para o dia 21/12



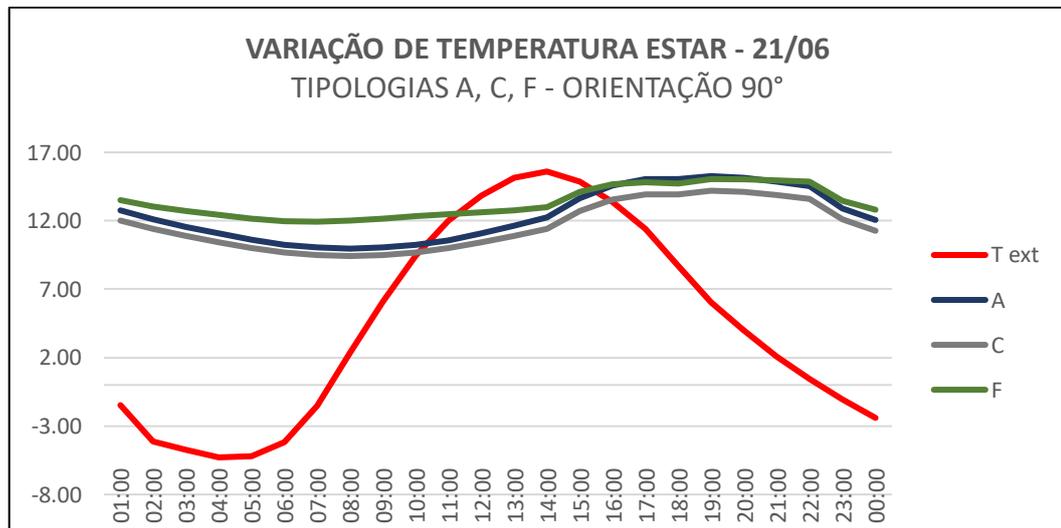
Fonte: Autor

Figura 25 - Variação de temperatura do ambiente Suíte para o dia 21/12



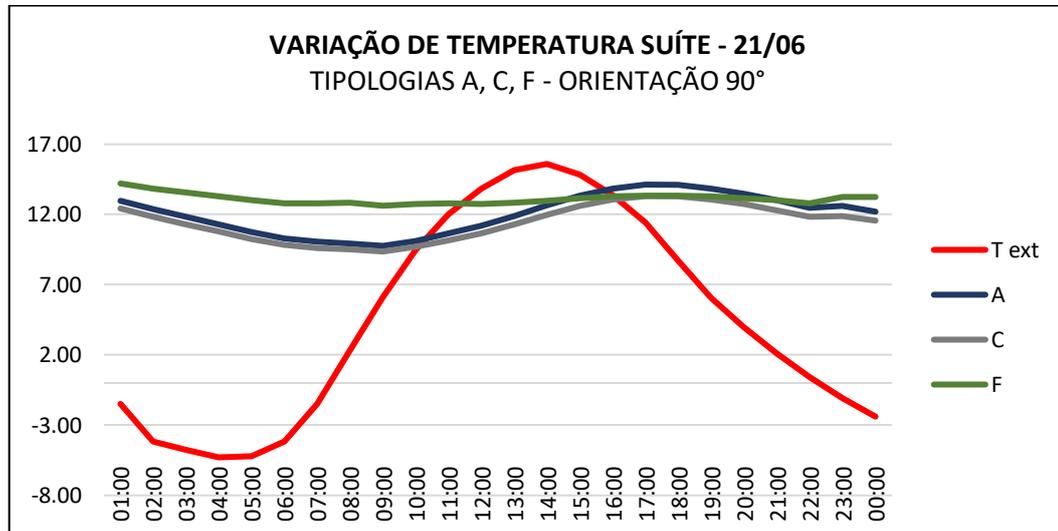
Fonte: Autor

Figura 26 - Variação de temperatura do ambiente Estar para o dia 21/06



Fonte: Autor

Figura 27 - Variação de temperatura do ambiente Suíte para o dia 21/06



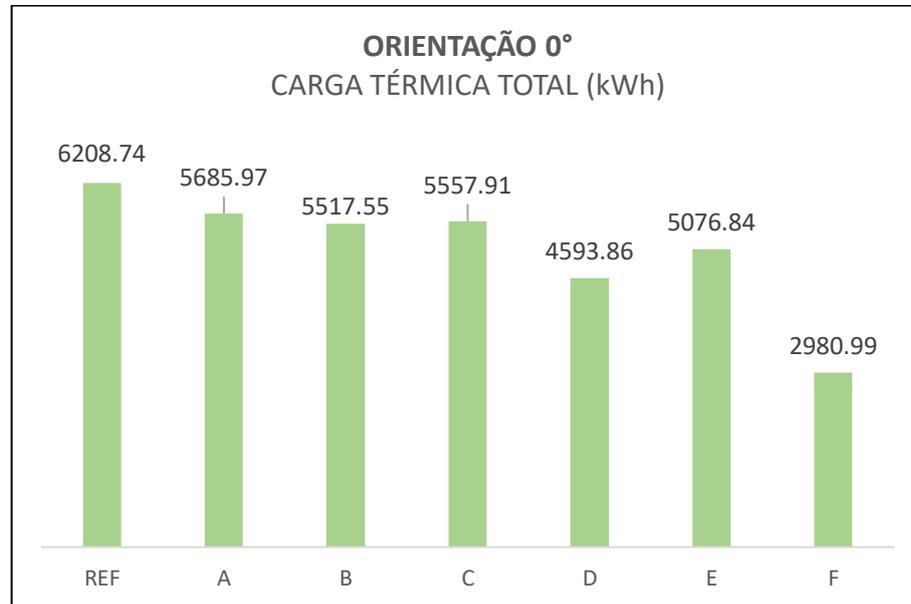
Fonte: Autor

Para o dia 21 de dezembro, a adoção da tipologia C permite atingir temperaturas internas inferiores à tipologia A, comprovando o impacto positivo em dias quentes causado pelo aumento da refletância das telhas; contudo, para o dia 21 de junho, a tipologia C apresentou as menores temperaturas, sendo possível concluir que a solução não é eficiente para dias frios. A tipologia F apresentou as menores temperaturas para o dia 21/21; para o dia 21/06, a tipologia apresentou valores de temperatura semelhantes ao da tipologia A durante o período de ocupação do ambiente Estar (14:00 às 22:00 horas) e valores superiores às demais tipologias durante o período de ocupação da Suíte (22:00 às 08:00 horas).

A partir dos dados expostos, pode-se concluir que todas as tipologias construtivas atingem o nível de desempenho mínimo para todas as orientações, pois os valores de PHFT são superiores ao da tipologia de referência e todos os valores de temperaturas operativas máxima e mínima são inferiores e superiores aos valores de referência, respectivamente.

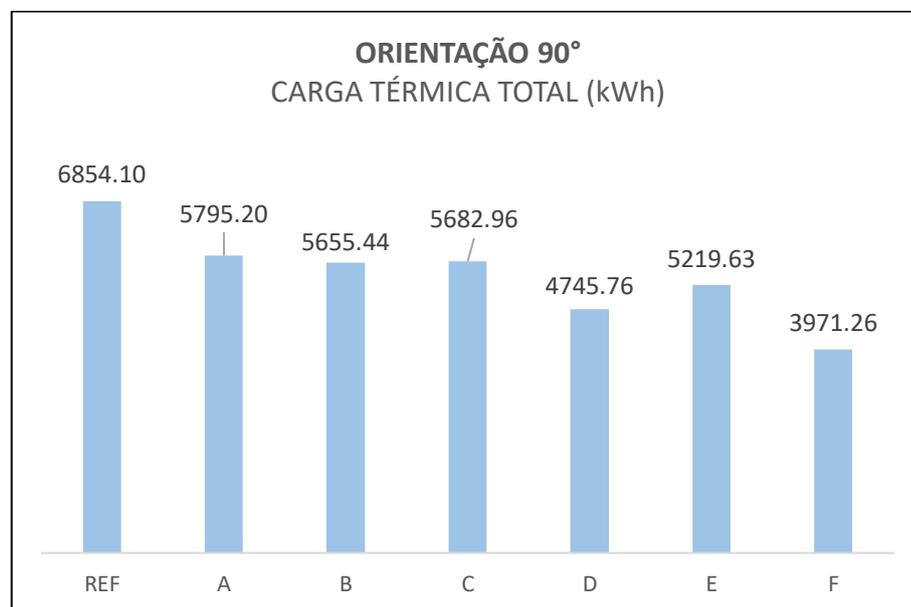
Para determinar se a unidade habitacional atende aos requisitos do nível de desempenho intermediário, é necessário avaliar a redução nos valores de PHFT ( $\Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$ ) e de carga térmica ( $\text{RedCgTT}_{\text{min}}$ ) em relação à tipologia de referência. As figuras 28, 29, 30 e 31 apresentam os valores totais de carga térmica anual para as diversas tipologias construtivas.

Figura 28 - Carga térmica total das tipologias para a orientação 0°



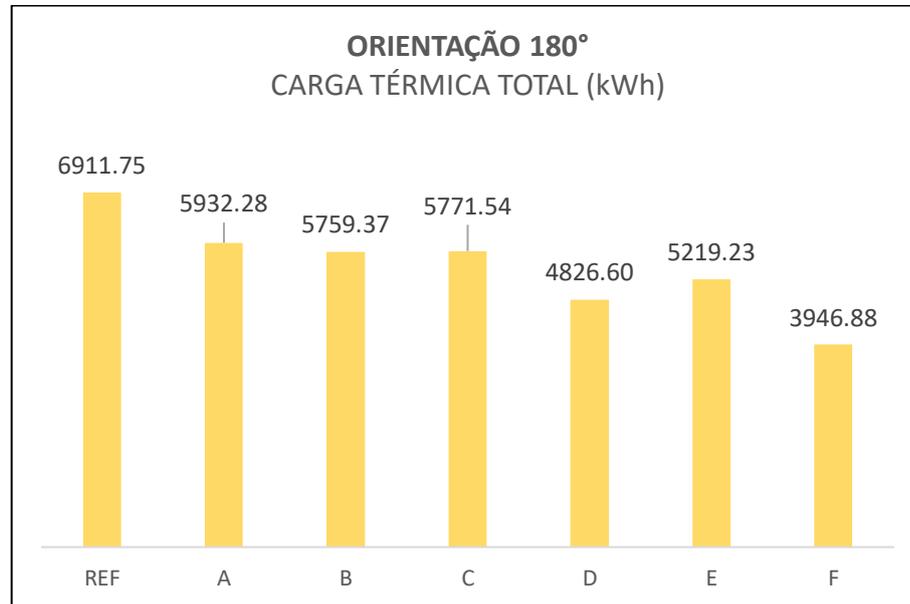
Fonte: Autor

Figura 29 - Carga térmica total das tipologias para a orientação 90°



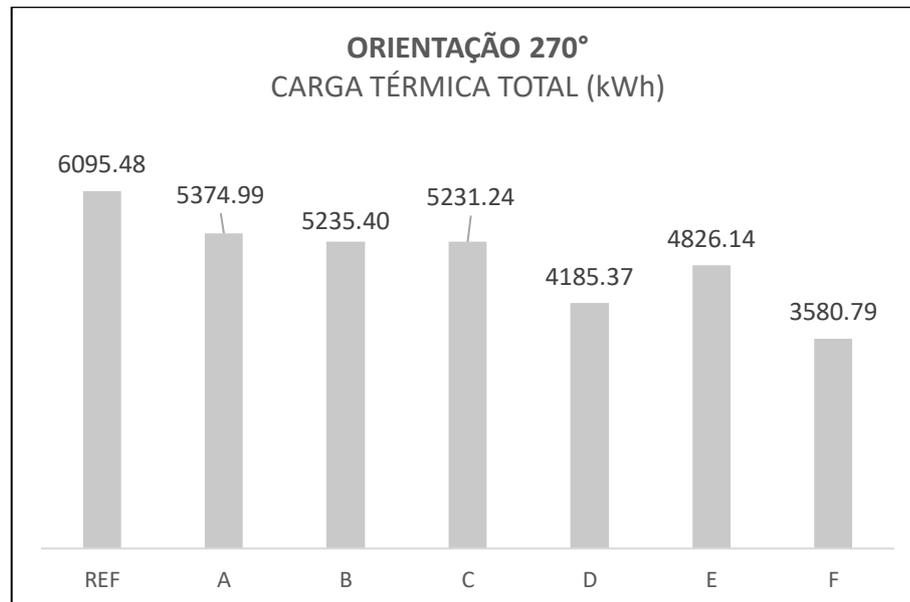
Fonte: Autor

Figura 30 - Carga térmica total das tipologias para a orientação 180°



Fonte: Autor

Figura 31 - Carga térmica total das tipologias para a orientação 270°



Fonte: Autor

Para atingir o nível de desempenho intermediário, a unidade habitacional real deve apresentar valores de  $\Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$  e  $\text{RedCgTT}_{\text{min}}$  conforme a Tabela 20 da NBR

15575-1 (ABNT, 2021b). Os valores de PHFT da unidade habitacional de referência ( $PHFT_{REF}$ ) foram inferiores a 70% para todas as orientações, conforme apresentado nas Figuras 15 a 18, de modo que o valor de  $\Delta PHFT_{min}$  para cada tipologia para atingir o nível de desempenho intermediário é definido a partir da Equação 2, apresentada na NBR 15575.

$$\Delta PHFT_{min} = 45 - 0,58 \cdot PHFT_{ref} \quad (2)$$

Em relação à redução da carga térmica total, a norma especifica que, para unidades habitacionais de referência com valores de  $PHFT_{REF}$  inferiores a 70%, o valor de  $RedCgTT_{min}$  pode ser igual a zero.

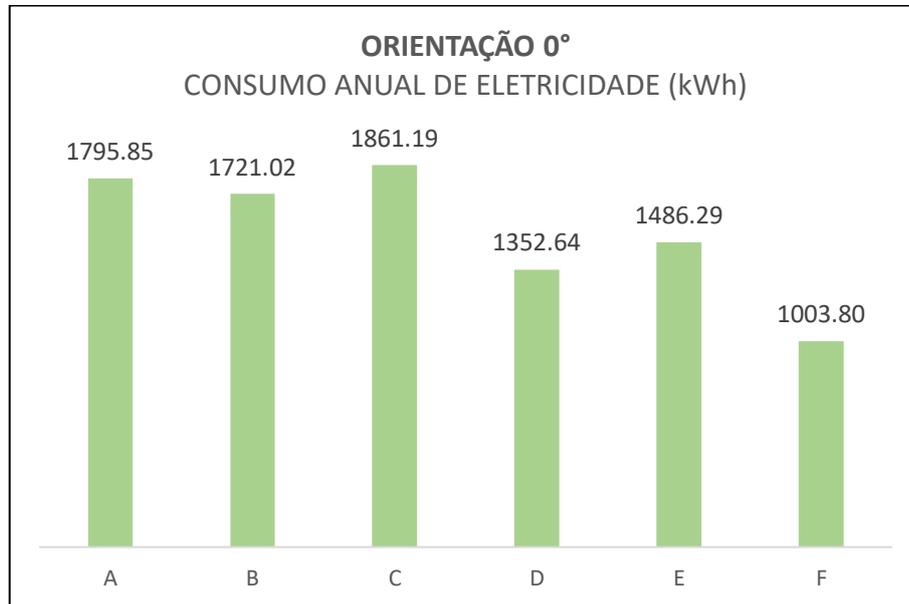
Todas as tipologias construtivas, para as diversas orientações, não atingiram o valor de  $\Delta PHFT_{min}$  determinado a partir da Equação 2. Portanto, apesar de todas terem apresentado valores de  $RedCgTT_{min}$  superiores a zero, as tipologias tiveram seu nível de desempenho térmico classificado como mínimo.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ANUAL DE ELETRICIDADE PARA O CENÁRIO DE CLIMATIZAÇÃO HÍBRIDA

Após a determinação do nível de desempenho, é fundamental analisar o comportamento térmico das edificações para o cenário de climatização híbrida, o qual representa com mais precisão a utilização da unidade habitacional, já que o cenário de climatização totalmente artificial é mais comum para edificações comerciais e não reflete com precisão a situação de uma residência que terá o sistema de ar condicionado funcionando apenas quando a ventilação natural não for suficiente para promover o conforto térmico. Esta análise permite determinar qual tipologia construtiva apresenta maior eficiência energética, mesmo que todas tenham sido classificadas com o mesmo nível de desempenho segundo a norma.

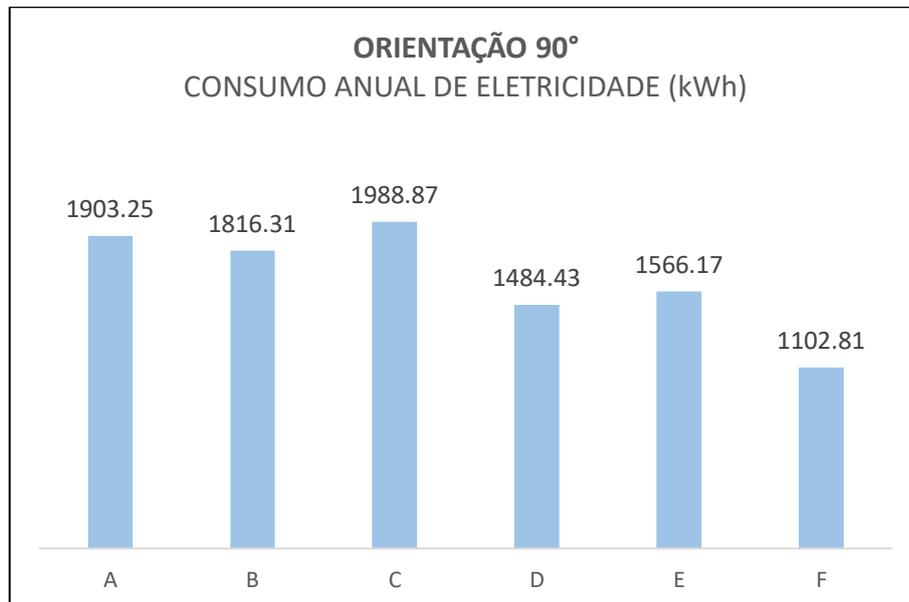
As Figuras 32, 33, 34 e 35 apresentam o consumo anual de eletricidade relacionado ao sistema de condicionamento de ar para cada tipologia construtiva e orientação.

Figura 32 - Consumo anual de eletricidade das tipologias para a orientação 0°



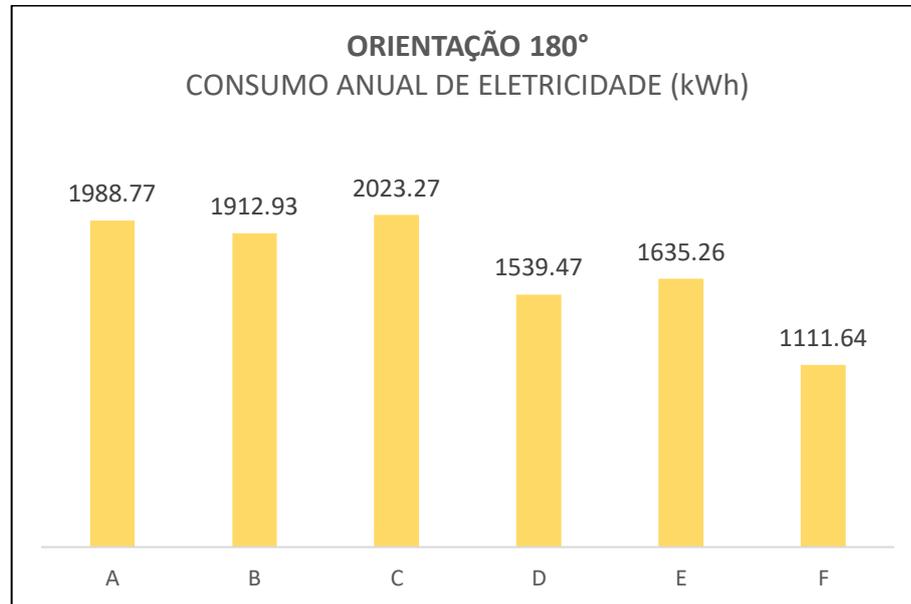
Fonte: Autor

Figura 33 - Consumo anual de eletricidade das tipologias para a orientação 90°



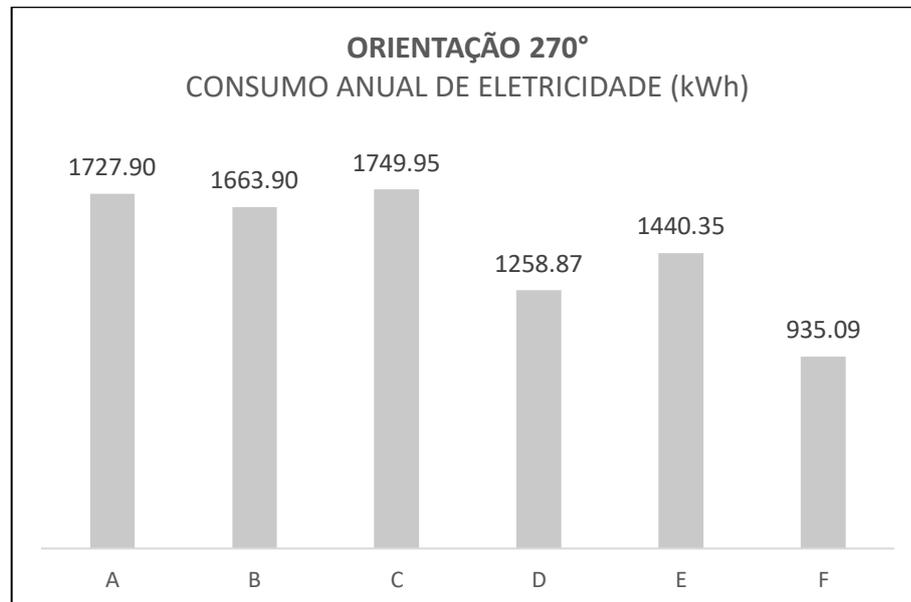
Fonte: Autor

Figura 34 - Consumo anual de eletricidade das tipologias para a orientação 180°



Fonte: Autor

Figura 35 - Consumo anual de eletricidade das tipologias para a orientação 270°

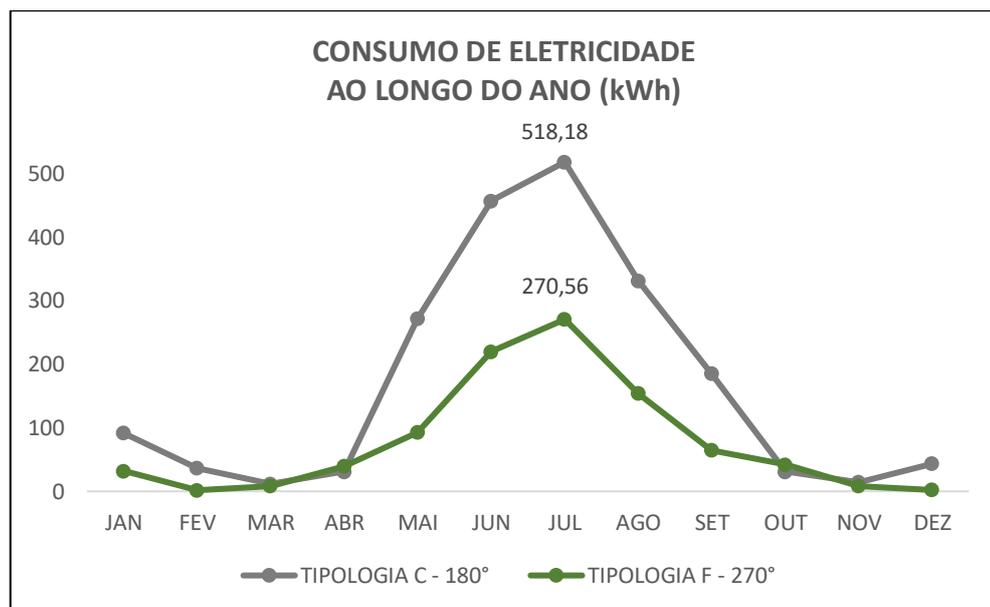


Fonte: Autor

Para uma mesma orientação, a redução no consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar entre as tipologias mais eficiente e menos eficiente

pode chegar a 46,56%, como é o caso das tipologias C e F para a orientação de 270°. Essa diferença implica em uma redução de consumo anual de 814,86 kWh, impactando diretamente na eficiência energética da edificação e no valor gasto anualmente com energia elétrica. Para todas as orientações, a tipologia construtiva mais eficiente é a F, pois apresenta o menor consumo energético. Considerando as diferentes orientações, a maior redução no consumo energético foi de 53,78%, valor que corresponde a uma diferença de 1088,18 kWh, referente às tipologias F com orientação 270° e C com orientação 180°, conforme a variação mensal de consumo mostrada na Figura 36.

Figura 36 - Variação mensal de consumo de eletricidade entre a tipologia C (180°) e a tipologia F (270°)

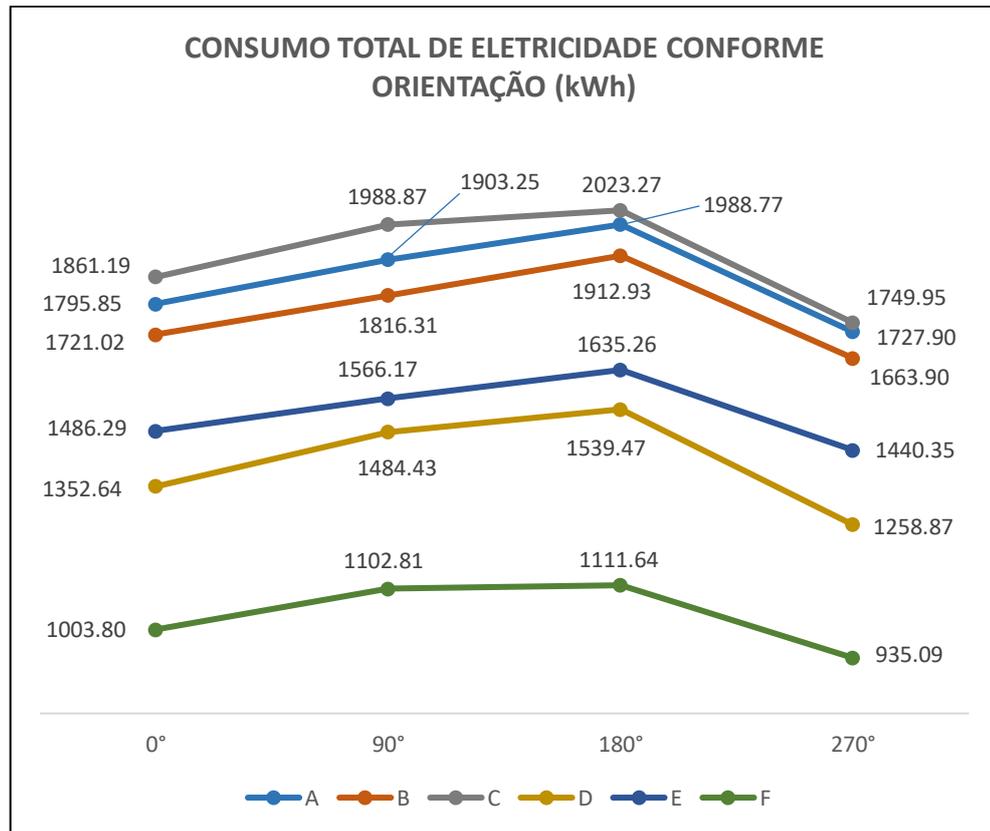


Fonte: Autor

Percebe-se que ambas as tipologias apresentam consumo mensal de eletricidade máximo no mês de julho. Isto ocorre devido a diferença entre a temperatura mínima dos ambientes e a temperatura de *setpoint* de aquecimento do ar condicionado (18°C). Nos meses de verão, a diferença entre a temperatura máxima dos ambientes e a temperatura de *setpoint* de resfriamento (26°C) é menor, o que leva a um menor consumo energético nos dias quentes.

A Figura 37 apresenta a variação no consumo energético para cada tipologia conforme a orientação.

Figura 37 - Consumo de eletricidade para cada tipologia conforme orientação

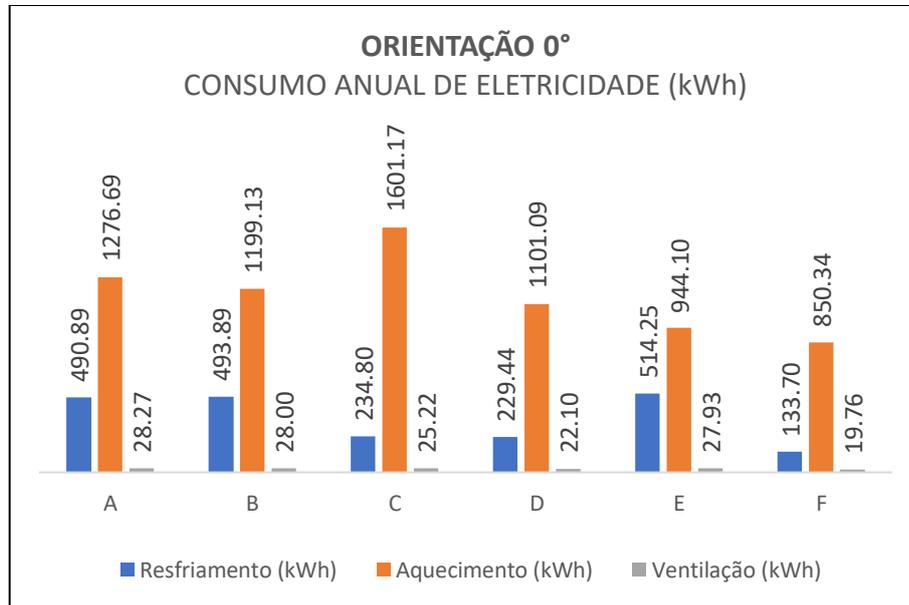


Fonte: Autor

A orientação 270° apresentou os menores consumos energéticos para todas as tipologias, enquanto que a orientação 180° apresentou os maiores valores. As maiores reduções no consumo, para uma mesma tipologia, foram de 13,12%, 13,02%, 13,51%, 18,23%, 11,92% e 15,88% para as tipologias A, B, C, D, E e F, respectivamente. Estes valores comprovam o impacto que a orientação do projeto arquitetônico possui sobre a eficiência energética das edificações.

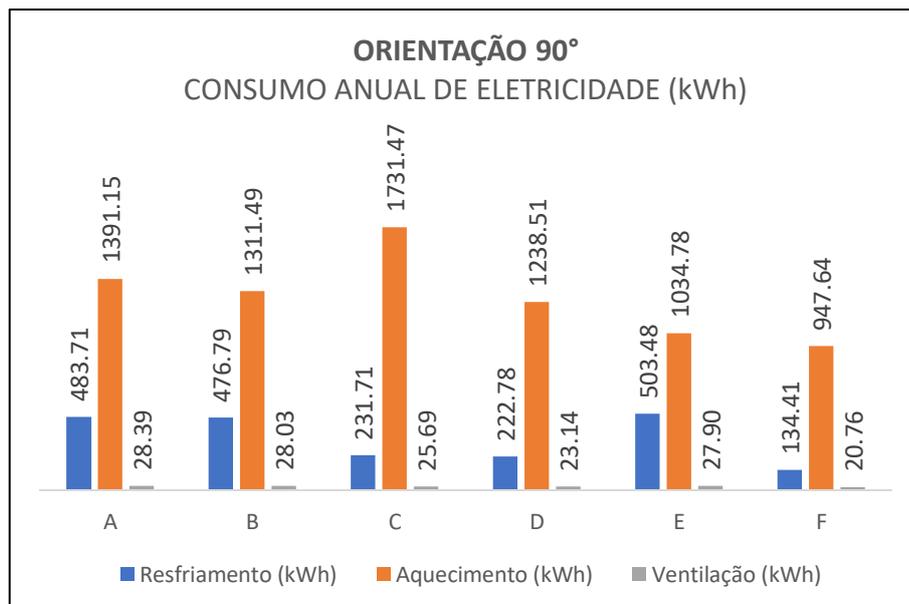
A fim de uma melhor compreensão sobre a influência de cada tipologia e orientação no consumo anual de energia elétrica, é necessário analisar separadamente o consumo de aquecimento e de resfriamento. As Figuras 38, 39, 40 e 41 discretizam o consumo de aquecimento, resfriamento e ventilação do sistema de ar condicionado para cada orientação e tipologia.

Figura 38 - Consumo anual discretizado de eletricidade das tipologias para a orientação 0°



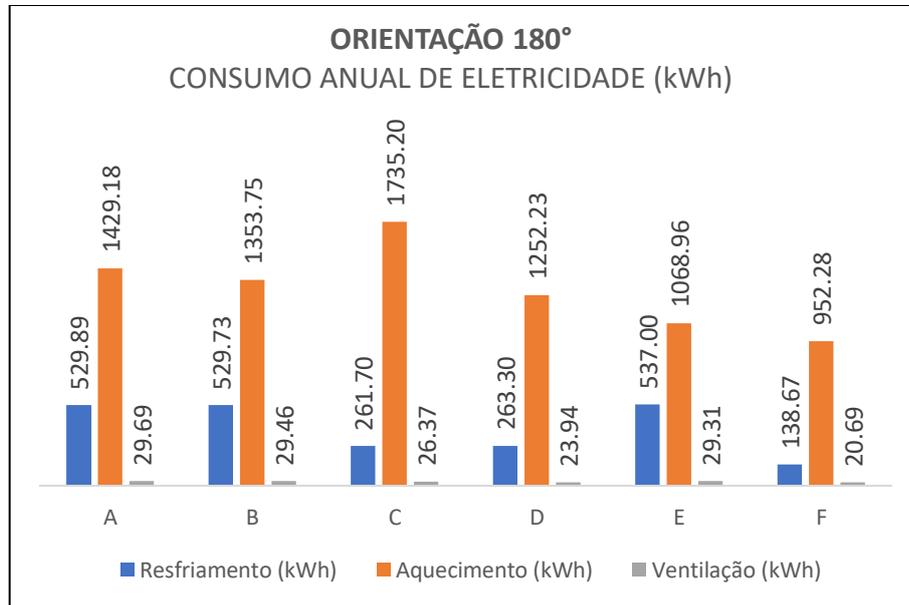
Fonte: Autor

Figura 39 - Consumo anual discretizado de eletricidade das tipologias para a orientação 90°



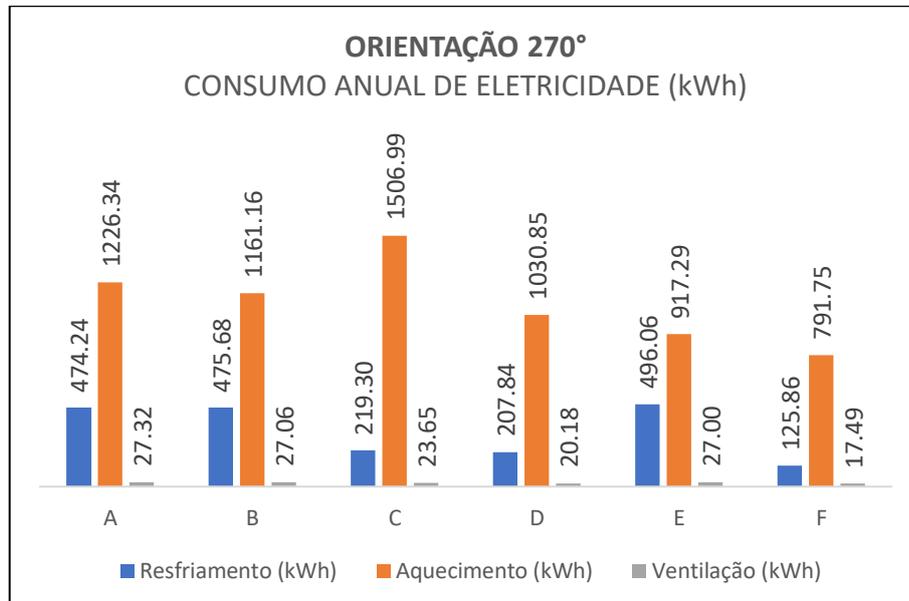
Fonte: Autor

Figura 40 - Consumo anual discretizado de eletricidade das tipologias para a orientação 180°



Fonte: Autor

Figura 41 - Consumo anual discretizado de eletricidade das tipologias para a orientação 270°



Fonte: Autor

A utilização de vidro duplo como solução individual para melhorar a eficiência energética permitiu, para todas as orientações, uma redução no consumo anual para

aquecimento em relação à unidade habitacional típica, com redução máxima de 6,08%, referente à orientação 0°. O consumo anual para resfriamento teve variação máxima não significativa entre as duas tipologias, da ordem de 1%. A tipologia B apresentou, em relação à tipologia A, uma economia total anual máxima de 86,94 kWh, para a orientação 90°, e mínima foi de 64,00 kWh, para a orientação 270°.

O uso de telha cerâmica de alta refletância, considerando a redução da mesma devido ao envelhecimento de três anos da pintura, permitiu uma redução significativa no consumo para resfriamento em relação à tipologia A. A orientação 270° apresentou a maior redução, de 53,76%, e a orientação 180° apresentou a menor, de 50,61%. Em relação ao consumo para aquecimento, a tipologia C apresentou aumentos que variam de 21,41%, para a orientação 180°, a 25,42%, para a orientação 0°. O aumento expressivo no consumo para aquecimento faz com que a tipologia C seja menos eficiente energeticamente que a tipologia A, independente da orientação, com diferenças de consumo anual de eletricidade que variam de 22,05 kWh para a orientação 270° a 85,32 kWh para a orientação 90°.

A tipologia D demonstrou possuir a solução individual mais eficiente, já que apenas a tipologia F apresentou menor consumo anual de energia. Em relação à tipologia A, a tipologia D apresentou reduções no consumo de resfriamento que variam de 50,31% para a orientação 180° a 56,17% para a orientação 270°, e reduções no consumo de aquecimento que variam de 10,97% para a orientação 90° a 15,94% para a orientação 270°. A diferença no consumo anual de eletricidade entre as duas tipologias teve valor máximo de 469,03 kWh, referente à orientação 270°, e valor mínimo de 418,82 kWh, referente à orientação 180°.

O uso de EPS como isolante térmico para as paredes externas da unidade habitacional, com exceção das paredes dos banheiros, permitiu uma economia no consumo total de eletricidade em relação à tipologia A devido a uma redução significativa no consumo para dias frios. A orientação 0° apresentou a maior redução no consumo para aquecimento, de 26,05%, e as orientações 180° e 270° apresentaram a menor redução, ambas de 25,20%. Em relação ao consumo para resfriamento da tipologia A, a tipologia E apresentou um aumento que variou de 1,34% para a orientação 180° a 4,76% para a orientação 0°. A adoção de isolante térmico nas paredes como solução individual para melhorar a eficiência energética da edificação permitiu uma economia total anual máxima de 353,51 kWh, referente à orientação 180°, e mínima de 287,55 kWh, referente à orientação 270°.

A tipologia F, composta por quatro soluções para melhorar a eficiência energética da edificação, apresentou reduções significativas no consumo de eletricidade em relação à tipologia típica. A redução no consumo para resfriamento foi semelhante para todas as orientações, variando de 72,21% a 73,83%, assim como a redução no consumo para aquecimento, que variou de 31,88% a 35,44%. A diferença máxima no consumo total anual entre as tipologias A e F foi de 877,13 kWh, referente à orientação 180°, e a mínima foi de 792,05 kWh, referente à orientação 0°.

As variações nos consumos de aquecimento, de resfriamento e total para cada tipologia em relação à tipologia A podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Variação no consumo de eletricidade das tipologias B, C, D, E e F em relação à tipologia A

(continua)

		TIPOLOGIAS					
		A	B	C	D	E	F
ORIENTAÇÃO 0°	CA (kWh)	1276,69	1199,13	1601,17	1101,09	944,10	850,34
	Var CA, A (%)	-	-6,08	25,42	-13,75	-26,05	-33,39
	CR (kWh)	490,89	493,89	234,80	229,44	514,25	133,70
	Var CR, A (%)	-	0,61	-52,17	-53,26	4,76	-72,76
	CT (kWh)	1795,85	1721,02	1861,19	1352,64	1486,29	1003,80
	Var CT, A (%)	-	-4,17	3,64	-24,68	-17,24	-44,10
	Dif CT, A (%)	-	-74,83	65,34	-443,21	-309,56	-792,05
ORIENTAÇÃO 90°	CA (kWh)	1391,15	1311,49	1731,47	1238,51	1034,78	947,64
	Var CA, A (%)	-	-5,73	24,46	-10,97	-25,62	-31,88
	CR (kWh)	483,71	476,79	231,71	222,78	503,48	134,41
	Var CR, A (%)	-	-1,43	-52,10	-53,94	4,09	-72,21
	CT (kWh)	1903,25	1816,31	1988,87	1484,43	1566,17	1102,81
	Var CT, A (%)	-	-4,57	4,50	-22,01	-17,71	-42,06
	Dif CT, A (%)	-	-86,94	85,62	-418,82	-337,08	-800,44
ORIENTAÇÃO 180°	CA (kWh)	1429,18	1353,75	1735,20	1252,23	1068,96	952,28
	Var CA, A (%)	-	-5,28	21,41	-12,38	-25,20	-33,37
	CR (kWh)	529,89	529,73	261,70	263,30	537,00	138,67
	Var CR, A (%)	-	-0,03	-50,61	-50,31	1,34	-73,83
	CT (kWh)	1988,77	1912,93	2023,27	1539,47	1635,26	1111,64
	Var CT, A (%)	-	-3,81	1,73	-22,59	-17,78	-44,10
	Dif CT, A (%)	-	-75,84	34,50	-449,30	-353,51	-877,13

Tabela 7 - Variação no consumo de eletricidade das tipologias B, C, D, E e F em relação à tipologia A

(conclusão)

ORIENTAÇÃO 270°	CA (kWh)	1226,34	1161,16	1506,99	1030,85	917,29	791,75
	Var CA, A (%)	-	-5,32	22,89	-15,94	-25,20	-35,44
	CR (kWh)	474,24	475,68	219,30	207,84	496,06	125,86
	Var CR, A (%)	-	0,30	-53,76	-56,17	4,60	-73,46
	CT (kWh)	1727,90	1663,90	1749,95	1258,87	1440,35	935,09
	Var CT, A (%)	-	-3,70	1,28	-27,14	-16,64	-45,88
	Dif CT, A (%)	-	-64,00	22,05	-469,03	-287,55	-792,81

Fonte: Autor

CA: consumo de eletricidade para aquecimento

Var CA, A: variação do consumo para aquecimento em relação à tipologia A

CR: consumo de eletricidade para resfriamento

Var CR, A: variação do consumo para resfriamento em relação à tipologia A

CT: consumo total de eletricidade (aquecimento, resfriamento e ventilação)

Var CT, A: variação do consumo total em relação à tipologia A

Dif CT, A: diferença de consumo total em relação à tipologia A

A Tabela 7 reúne as informações necessárias para compreender o impacto que medidas de projeto, como a utilização de EPS como isolante térmico ou a definição da melhor orientação solar, possuem no desempenho energético das edificações.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

As informações apresentadas neste trabalho possibilitam compreender a influência que cada tipo de fechamento possui no desempenho energético de uma edificação térrea.

A metodologia adotada teve por base a utilização do programa *EnergyPlus* para a realização de simulações computacionais que fornecessem dados a respeito do comportamento térmico das diferentes tipologias. Após o tratamento dos dados, foi possível identificar as tipologias que apresentaram melhor conforto térmico e desempenho energético.

Os resultados mostraram que a tipologia D possui a melhor solução individual, entre as apresentadas, para a redução no consumo anual de eletricidade do sistema de ar condicionado; portanto, é possível concluir que para a edificação térrea analisada, as trocas de calor através da cobertura são as que mais impactam no consumo energético. Por outro lado, a tipologia C mostrou ser a menos eficiente entre todas, apresentando redução do consumo energético para resfriamento, aumento do consumo para aquecimento e consumo total anual superior em relação à tipologia. Em seu estudo, Tabarelli (2017) demonstrou que uma baixa transmitância térmica do sistema de cobertura, através da utilização de isolante térmico, reduz o consumo de ar condicionado para aquecimento e resfriamento dos ambientes localizados imediatamente abaixo, semelhante ao comportamento apresentado pela tipologia D. Além disso, a autora mostrou que uma baixa absorvância das telhas diminui o consumo energético para resfriamento dos mesmos ambientes, mas aumenta o consumo para aquecimento, e está relacionada com o comportamento apresentado pela tipologia C.

As simulações foram realizadas para quatro orientações, a fim de compreender a influência que as mesmas têm sobre a eficiência energética da edificação; contudo, por limitações físicas ou por outras razões, o projeto arquitetônico pode não ser implementado na orientação mais favorável. A variação no consumo de energia elétrica entre as diversas tipologias, para uma mesma orientação, apresentou valor máximo de 46,56% (tipologias C e F para a orientação de 270°), e a variação no consumo de uma mesma tipologia para as diferentes orientações apresentou valor máximo de 18,23% (tipologia D), ratificando a importância do projeto arquitetônico e da especificação adequada dos materiais dos fechamentos opacos e transparentes

para atingir uma maior eficiência energética nas edificações. Ademais, variações nos padrões de ocupação dos ambientes de permanência prolongada, nas temperaturas de *setpoint* para aquecimento e resfriamento e a adoção de proteção solar para os elementos transparentes também podem impactar nas estimativas de consumo energético anual.

Por fim, conclui-se que a análise do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura (PHFT), determinado a partir das simulações para as quais adota-se apenas a climatização natural, permite compreender qual tipologia fornece o melhor conforto térmico nesse cenário. Todavia, mesmo que os valores de PHFT não apresentem grandes variações entre as tipologias e as mesmas sejam classificadas sob o mesmo nível de desempenho térmico de acordo com a NBR 15575, a eficiência energética apresenta variações relevantes, e é possível realizar estudos de custo-benefício objetivando determinar o tempo a partir do qual a economia no consumo de eletricidade supera o valor investido com materiais e mão-de-obra para cada tipologia, ou seja, determinar o tempo de retorno do investimento.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVIDRO. **Manual técnico do vidro plano para edificações**. São Paulo: Abividro, 2016. Disponível em: <https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2021/08/Manual-Tecnico-Vidro-Plano-Para-Edificacoes.pdf>. Acesso em: 11 out. 2021.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING. **ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI Edition)**. Atlanta: ASHRAE, 2017.

ARAÚJO, R. C. **Estudo comparativo entre painéis verticais compostos por EPS e tijolo cerâmico de oito furos como isolantes térmicos para a cidade de Cuiabá-MT**. 2004. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2004. Disponível em: <https://pgfa.ufmt.br/index.php/en/utilities/dissertations/2-robinson-de-carvalho-araujo/file> >. Acesso em: 31 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721**: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios - Procedimento. Rio de Janeiro, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15520**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15520-1**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15520-2**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15520-3**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021b.

BORTOLONI, M; BOTTARELLI, M; PIVA, S. Summer thermal performance of ventilated roofs with tiled coverings. *In*: UIT Heat Transfer Conference 2016, 34., 2016. Ferrara. **Conference Proceedings...** Ferrara: IOP Publishing Ltd, 2017. Volume 796. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/796/1/012023>>. Acesso em: 14 out. 2021.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Ficha técnica – Residência unifamiliar térrea padrão normal (2018)**. 2021. Disponível em: [https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-demonstracoes-de-uso-fichas-tecnicas/Ficha\\_Tecnica\\_09664.pdf](https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-demonstracoes-de-uso-fichas-tecnicas/Ficha_Tecnica_09664.pdf)>. Acesso em: 13 out. 2021.

CASTRO, A. P. A. S. **Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil: estudo em células-teste**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/257744>>. Acesso em: 13 out. 2021.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/257698>>. Acesso em: 13 out. 2021.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional (BEN) 2021**: Ano base 2020. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 11 out. 2021.

Fator solar ou coeficiente de ganho de calor solar (CGCS). **ABRAVIDRO**, c2021. Disponível em: <<https://abravidro.org.br/vidros/fator-solar-ou-coeficiente-de-ganho-de-calor-solar-cgcs/>>. Acesso em: 13 out. 2021.

FLORES, M. **Geração da base climática de Santa Maria - RS – para análise de desempenho térmico e eficiência energética de edificações**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7862>>. Acesso em: 13 out. 2021.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GARLET, L. **Otimização do comportamento térmico de edificações industriais: estudo de caso em indústria metalomecânica na Zona Bioclimática Brasileira 2**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Preservação Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/13446>>. Acesso em: 13 out. 2021.

HELERBROCK, Rafael. “Convecção”; **Brasil Escola**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/conveccao.htm>>. Acesso em: 12 nov. 2021.

HOLMAN, Jack P. **Tranferencia de calor**. 10. ed. Ciudad de México: Compañía Editorial Continental, 1999.

IKEMATSU, P. **Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-26122008-105228/pt-br.php>>. Acesso em: 31 out. 2021.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2008.

KREITH, Frank; BOHN, Mark. **Princípios de transferência de calor**. 6. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning Ltda., 2003.

LABEEE. LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o ano no programa *Energyplus***. Florianópolis, 2017.

LAMBERTS, Roberto *et al.* **Desempenho térmico de edificações**. Apostila da disciplina de Desempenho Térmico de Edificações do curso de Engenharia Civil da UFSC, 2016. Disponível em: <[https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161\\_v2016.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf)>. Acesso em: 11 out. 2021.

LAMBERTS, Roberto. **Conforto e stress térmico**. Apostila da disciplina de Conforto Ambiental do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFSC, 2011. Disponível em: <[https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4200\\_apostila%202011.pdf\\_2.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4200_apostila%202011.pdf_2.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2021.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014. Disponível em: <[https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia\\_energetica\\_na\\_arquitetura.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf)>. Acesso em: 13 out. 2021.

LIENHARD IV, John H.; LIENHARD V, John H. **A heat transfer text book**. 5. ed. Cambridge: Phlogiston Press, 2019.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Building Component Library, 2021?. Disponível em: <<https://bcl.nrel.gov/>>. Acesso em: 29 ago. 2021.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Esclarecimento em relação à reportagem intitulada “Crise hídrica é resultado de má gestão dos reservatórios das usinas, dizem debatedores. **ONS**, 2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20210817-Esclarecimento-em-relacao-a-reportagem-intitulada-Crise-hidrica-e-resultado-de-ma-gestao-dos-reservatorios-das-usi.aspx#>>. Acesso em: 11 out. 2021.

SABINO, Marlla. Energia ficou mais cara em média 7% este ano e deve aumentar quase 17% em 2022; veja onde mais subiu. **O Estado de São Paulo**, 23 ago. 2021. Economia & negócios. Disponível em: <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,energia-ficou-mais-cara-em-media-7-este-ano-e-deve-aumentar-quase-17-em-2022-veja-onde-mais-subiu,70003818694>>. Acesso em: 11 out. 2021.

SILVA, Fernando M.; CHAVES, Marcelo S.; LIMA, Zuleide M. C. **Geografia física II**. 2. ed. Natal: EDUFRRN, 2011. Disponível em: <[http://bibliotecadigital.sedis.ufrn.br/pdf/geografia/Geo\\_Fis\\_II\\_Livro\\_WEB.pdf](http://bibliotecadigital.sedis.ufrn.br/pdf/geografia/Geo_Fis_II_Livro_WEB.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2021.

TABARELLI, G. **Influência do sistema de cobertura no comportamento térmico de edificações multifamiliares na Zona Bioclimática Brasileira 2**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/14727>>. Acesso em: 13 out. 2021.

TIWARI, Gopal. N.; DUBEY, Swapnil. **Fundamentals of photovoltaic modules and their application**. 1 ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2010.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Engineering Reference**. 2021b. Disponível em: <[https://energyplus.net/assets/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v9.6.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.6.0/EngineeringReference.pdf)>. Acesso em: 13 out. 2021.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Getting Started**. 2021a. Disponível em: <[https://energyplus.net/assets/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v9.6.0/GettingStarted.pdf](https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.6.0/GettingStarted.pdf)>. Acesso em: 13 out. 2021.

VILA REAL, J. A. M. M. F. **Análise técnico-econômica de várias soluções de isolamento térmico a aplicar em elementos de construção**. 1990. Dissertação (Mestrado em Construção de Edifícios) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Amarante, 1990. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10216/12539>>. Acesso em: 13 out. 2021.

WINDOW. Versão 7.8.28.0. [S.l.]: Berkeley Lab, 2021. Disponível em: <<https://windows.lbl.gov/tools/window/software-download>>. Acesso em: 12 nov. 2021.

**APÊNDICE A – PLANTA BAIXA DA UNIDADE HABITACIONAL FICTÍCIA  
ESTUDADA**

