

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA RESIDÊNCIA USANDO ESTRATÉGIAS  
DE ARQUITETURA PASSIVA E ENERGIA SOLAR**

por

**Natália Vicente Canton**

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, julho de 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA RESIDÊNCIA USANDO  
ESTRATÉGIAS DE ARQUITETURA PASSIVA E ENERGIA SOLAR

por

Natália Vicente Canton

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne  
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

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

Banca examinadora:

Prof.<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Letícia Jenisch Rodrigues – DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider – DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin – DEMEC/UFRGS

Porto Alegre, 12 de julho de 2018.

## DEDICATÓRIA

À minha família – pais, irmã, avós e madrinha –, por serem meus maiores incentivadores e apoiadores desde sempre, fundamentais para que eu tenha chegado ao fim da graduação.

Aos meus queridos amigos, que estiveram presente nos melhores – e piores – momentos ao longo destes seis anos e meio de curso.

Ao Pedro, meu companheiro, que com muito amor me deu suporte a qualquer hora e de qualquer lugar.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Letícia Jenisch Rodrigues, um exemplo de profissional e uma esperança para o futuro da academia no Brasil, trazendo ideias inovadoras e despertando a curiosidade dos alunos.

À todos os professores e profissionais da UFRGS que estudam e trabalham para o desenvolvimento da pesquisa no país apesar de todas as adversidades, incentivando e inspirando alunos à curiosidade e a disseminação de conhecimento.

CANTON, N. V. **Análise de Eficiência Energética de uma Residência Usando Estratégias de Arquitetura Passiva e Energia Solar.** 2018. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## RESUMO

Esta monografia apresenta um estudo de desempenho térmico e energético de uma residência unifamiliar para a cidade de Porto Alegre. O modelo de residência utilizado foi o proposto por LAMBERTS *et al.*, 2010. Nele, são empregados sistemas de energia solar térmica e fotovoltaica e estratégias de arquitetura passiva, a fim de se obter a melhor utilização dos recursos naturais disponíveis. Foi simulada a temperatura dos ambientes da residência em quatro meses específicos ao longo de um ano e comparada à temperatura exterior, com o objetivo de se verificar a obtenção da condição de conforto térmico. Dentre os meses estudados, não se atingiu o conforto térmico em apenas um, junho. Também foi simulado o consumo de energia elétrica da residência para os casos de utilização de equipamentos convencionais e equipamentos eficientes, em comparação com o consumo real de uma residência unifamiliar em Porto Alegre. O resultado para o caso de equipamentos eficientes, com média de 270 kWh mensais, se assemelhou muito ao caso real, com média de 304 kWh mensais. O sistema de aquecimento solar de água foi dimensionado para suprir um consumo diário de 510 litros de água, e para a armazenagem foi usado um reservatório com capacidade para 400 litros. O sistema fotovoltaico, projetado para suprir a demanda de 326,5 kWh, é capaz de alimentar a residência durante meses de consumo típico, tornando-a independente da rede enquanto não houver aumento de consumo não planejado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Arquitetura Passiva, Energia Solar, Eficiência Energética, Coletor Solar, Sistema Fotovoltaico, Conforto Térmico, ABNT NBR 15220.

CANTON, N. V. **Energy Efficiency Analysis of a Residence Using Passive Cooling Strategies and Solar Energy.** 2018. 26 pp. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## ABSTRACT

This work presents the thermal and energy performance analysis of a single family residence for Porto Alegre. The residence model used is the one presented in LAMBERTS *et al.*, 2010. In it, systems of thermal and photovoltaic energy are used, besides passive architecture strategies, in order to obtain the best use of the available natural resources. The simulation comprised the residence rooms temperature in four specific months during a year and it was compared to the exterior temperature, for the purpose of achieve the thermal comfort condition. Among the studied months, the condition of thermal comfort wasn't achieved in only one, June. The residence electric energy consumption was also simulated for the conventional equipments and efficient equipments cases, in comparison with the real consumption of a single family residence in Porto Alegre. The results for the efficient equipments case, with an average of 270 kWh a month, were very similar to the real case, with an average of 304 kWh a month. The solar water heating system was designed to meet the daily consumption of 510 liters of water, and for the storage of the system a reservoir with 400 liters capacity was used. The photovoltaic system, designed to meet the 326.5 kWh demand, is able to supply the residence during typical consumption months, bringing it to be independent of the power grid as long as there is no consumption increase.

**KEYWORDS:** Passive Architecture, Solar Energy, Energy Efficiency, Solar Collector, Photovoltaic System, Thermal Comfort, ABNT NBR 15220.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
2.1. Conforto Térmico, Zoneamento Bioclimático e Arquitetura Passiva .....	2
2.1.1. Caracterização climática de Porto Alegre.....	5
2.2. Energia Solar.....	6
2.2.1. Energia Solar Térmica .....	6
2.2.2. Energia Solar Fotovoltaica .....	8
2.3. LUMINOTÉCNICA .....	9
3. METODOLOGIA .....	9
3.1. Energia Solar.....	9
3.1.1. Energia Solar Térmica .....	9
3.1.1. Energia Solar Fotovoltaica .....	11
3.2. Modelagem da Residência .....	12
3.3. Simulação no EnergyPlus .....	13
4. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	15
5. CONCLUSÃO .....	18
6. TRABALHOS FUTUROS.....	19
REFERÊNCIAS .....	20
APÊNDICES .....	22
Apêndice A .....	22
Apêndice B.....	23
Apêndice C.....	23
ANEXOS.....	24
Anexo A .....	24
Anexo B .....	24
Anexo C .....	25
Anexo D.....	26

## 1. INTRODUÇÃO

Em 2016, o uso residencial de energia elétrica foi de 132,92 TWh, ou o equivalente a 25,6% do consumo final de energia elétrica daquele ano (MME, 2017). Na maior parte das residências brasileiras, é através da energia elétrica que se garante iluminação, uso de eletrodomésticos para tarefas diárias e de lazer, aquecimento de água e também para promover o conforto térmico, através de equipamentos como ventiladores, aquecedores e aparelhos de ar condicionado. Com a taxa de urbanização cada vez maior no país 84,36% em 2010 (IBGE, 2018), pode-se questionar sobre a qualidade de vida dos brasileiros. É possível viver sem abrir mão do conforto e grandes mudanças de hábitos para se ter melhor qualidade de vida e melhor utilização dos recursos naturais? Através de medidas simples, como a mudança da tecnologia das lâmpadas utilizadas em casa ou troca de um equipamento muito antigo que consome muita energia elétrica podem ser soluções iniciais para a redução do consumo.

Além da eficiência dos equipamentos, a localização da residência também impacta diretamente no seu consumo de energia elétrica, que pode ser pautado pelo uso de condicionadores de ar, ventiladores ou aquecedores, dependendo da temperatura média do local e das características de cada estação do ano. O conceito de zoneamento bioclimático brasileiro, definido pela norma ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 15220 – Parte 3 (ABNT, 2005) divide o território do país em oito zonas cujas cidades possuem climas parecidos. A norma procura apresentar, para cada zona, um conjunto de recomendações e técnicas para construção de residências unifamiliares com o objetivo de condicionar o ambiente de forma passiva<sup>1</sup>.

A publicação Casa Eficiente (LAMBERTS *et al.*, 2010) apresenta resultados experimentais e simulados de uma casa em Florianópolis, Santa Catarina, construída visando à eficiência energética e redução do impacto ambiental, utilizando técnicas como telhado vegetal, instalação de painéis fotovoltaicos e aquecimento solar de água. O modelo de residência escolhido para o estudo realizado nesta monografia é o mesmo da Casa Eficiente, por ser um projeto já existente e de livre acesso.

O estudo de BAGNATI, 2013, abrange as normas e regulamentações atuais no Brasil sobre zoneamento bioclimático, contemplando também um histórico das pesquisas já realizadas no país e no exterior acerca do assunto. Na dissertação, são definidas e especificadas as principais estratégias de projeto, relacionando-as com os tipos de climas adequados e às recomendações da ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005). BAGNATI, 2013, também aborda o processo de etiquetagem PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) Edifica, que é uma ferramenta para averiguação da eficiência energética em edificações, mas não está no escopo do presente trabalho.

Também no Brasil, pode-se citar o estudo de VETTORAZZI *et al.*, 2010, que utiliza estratégias de arquitetura bioclimática aliadas ao método de Mahoney para projeto de uma residência unifamiliar na cidade de Santa Maria, RS. O método de Mahoney relaciona variáveis climáticas com zonas de conforto, e propõe recomendações ao projeto de acordo com as características do clima local – estações bem definidas e grande amplitude térmica ao longo do dia. Nesse projeto, foram utilizadas duas estratégias que não são contempladas no desenvolvimento desta monografia: ventilação por chaminé e parede trombe.

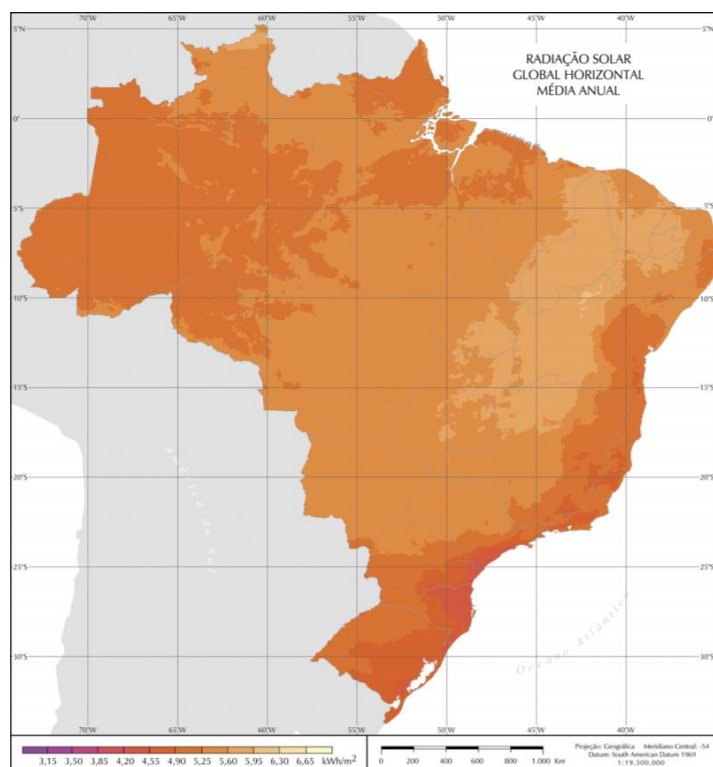
No âmbito da energia solar, percebe-se que o Brasil apresenta grande potencial de aproveitamento para a instalação de sistemas fotovoltaicos, com irradiação solar global incidente entre 1500 e 2500 kWh/m<sup>2</sup> em todo o território do país, valores superiores aos de países da União Europeia que possuem grande incentivo governamental para projetos de aproveitamento dos recursos solares, como Alemanha (900-1250 kWh/m<sup>2</sup>) e França (900-1650 kWh/m<sup>2</sup>) (PEREIRA *et al.*, 2006). A Figura 1 apresenta a radiação solar global horizontal média anual no Brasil, em kWh/m<sup>2</sup>.

Na Figura 1, percebe-se que as regiões com maiores radiações solares médias anuais são Nordeste e partes do Sudeste (em especial Minas Gerais) e Centro-Oeste (com destaque para Goiás). Apesar disso, verifica-se que as médias anuais são altas em todo o país, apresentando um enorme potencial de exploração de energia solar, tanto para aquecimento de água quanto para geração de energia elétrica. Incentivos governamentais, como a isenção de ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) para microgeração e minigeração distribuída, cuja adesão já alcança todos os estados brasileiros (ABSOLAR, 2018), e possibilidade de financiamento de equipamentos fotovoltaicos por pessoa física, através do programa FNE Sol (BANCO DO NORDESTE, 2018) são exemplos de formas de impulsionar a expansão de fontes de energia renováveis em âmbito residencial.

---

<sup>1</sup> Condicionamento passivo significa proporcionar condições confortáveis de temperatura e iluminação em um determinado ambiente apenas explorando recursos naturais, como o vento e a luz do Sol.

Figura 1 – Irradiação solar global horizontal média anual no Brasil, em kWh/m<sup>2</sup>.



Fonte: Pereira *et al.*, 2006.

Este trabalho tem por objetivo avaliar, através de simulação pelo *software* EnergyPlus®, desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, 2017), o desempenho térmico e energético de uma residência na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Na simulação, serão consideradas estratégias de arquitetura passiva referentes às aberturas da residência (portas e janelas), princípios de luminotécnica e energia solar térmica e fotovoltaica. No projeto desenvolvido neste trabalho, o uso de energia solar térmica se dará apenas para aquecimento de água para consumo, não contemplando o aquecimento de ambientes.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

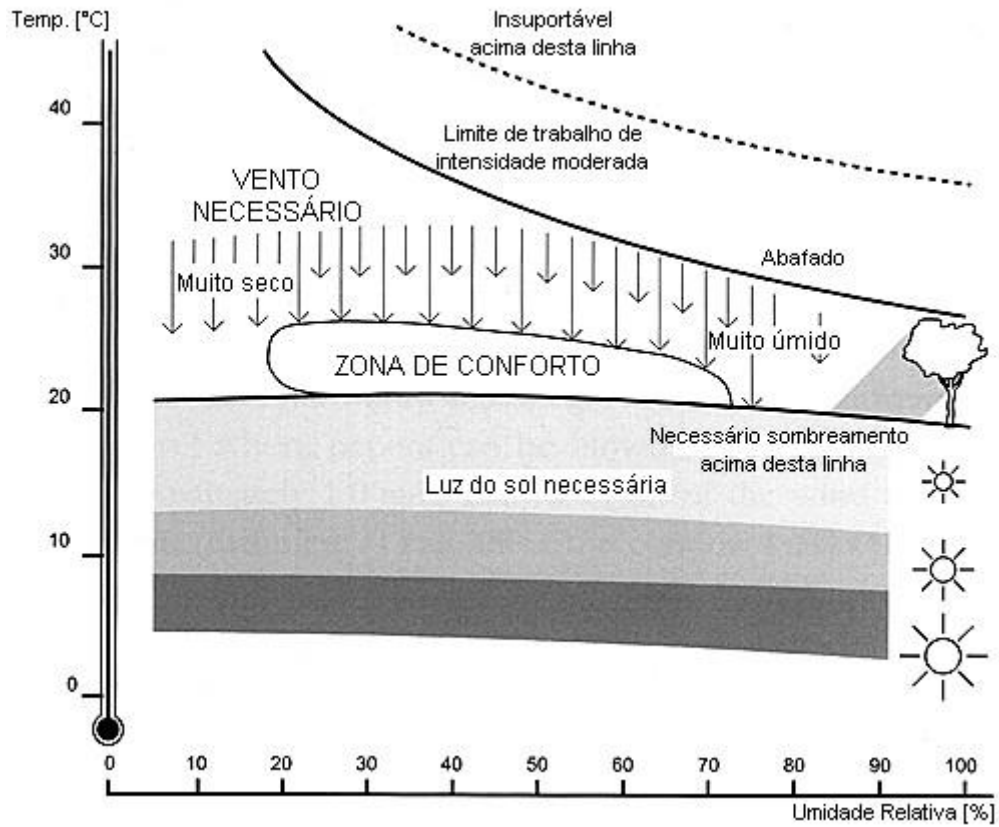
Nesta seção são apresentadas definições de conceitos-chave para o desenvolvimento do trabalho, contemplando um histórico do estudo de bioclimática, energia solar e luminotécnica.

### 2.1. Conforto Térmico, Zoneamento Bioclimático e Arquitetura Passiva

O estudo de estratégias de conforto térmico baseia-se em três principais fatores: o bem estar dos seres humanos (sentir-se confortável), seu desempenho em realizar tarefas (uma boa iluminação, por exemplo, faz com que tarefas sejam feitas com maior precisão) e a conservação de energia. Com o objetivo de aliar clima e conforto, a expressão “projeto bioclimático” foi cunhada por OLGAYAY, 1963, em estudo que deu origem à Carta Bioclimática de Olgay, que propõe uma zona de conforto térmico em função da temperatura ambiente e umidade relativa, apresentada na Figura 2.

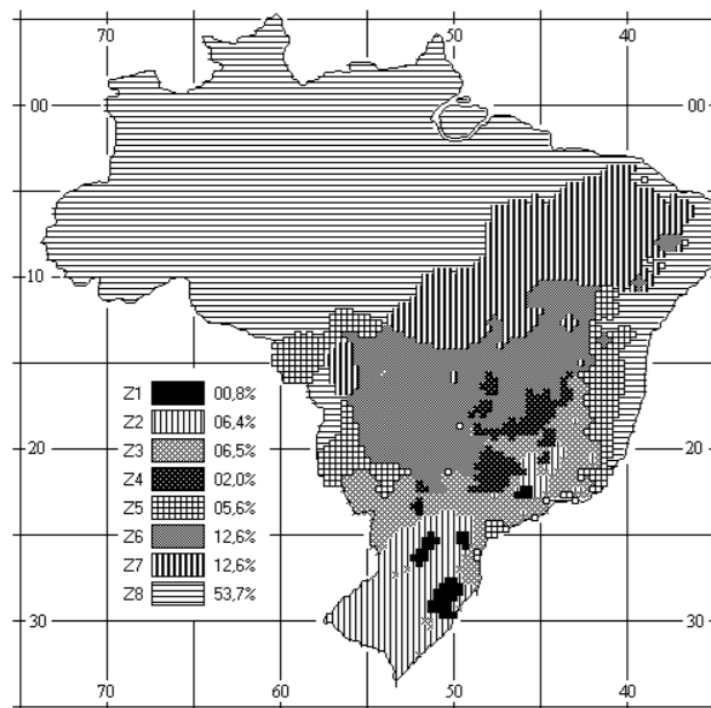
Baseado no estudo de OLGAYAY, 1963, e na carta psicrométrica, GIVONI, 1969 criou uma Carta Bioclimática para Edifícios, em que propunha estratégias a fim de adequar construções ao clima no qual estavam inseridas. Para o Brasil, foi feita uma adaptação da Carta de GIVONI, 1969, utilizando dados climáticos obtidos entre 1931 e 1990, resultando em 8 diferentes zonas, definidas pela ABNT NBR 15220 – Parte 3 (ABNT, 2005) e apresentadas na Figura 3.

Figura 2 – Carta Bioclimática de Olgay.



Fonte: Adaptado de OLGAY, 1963.

Figura 3 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro.



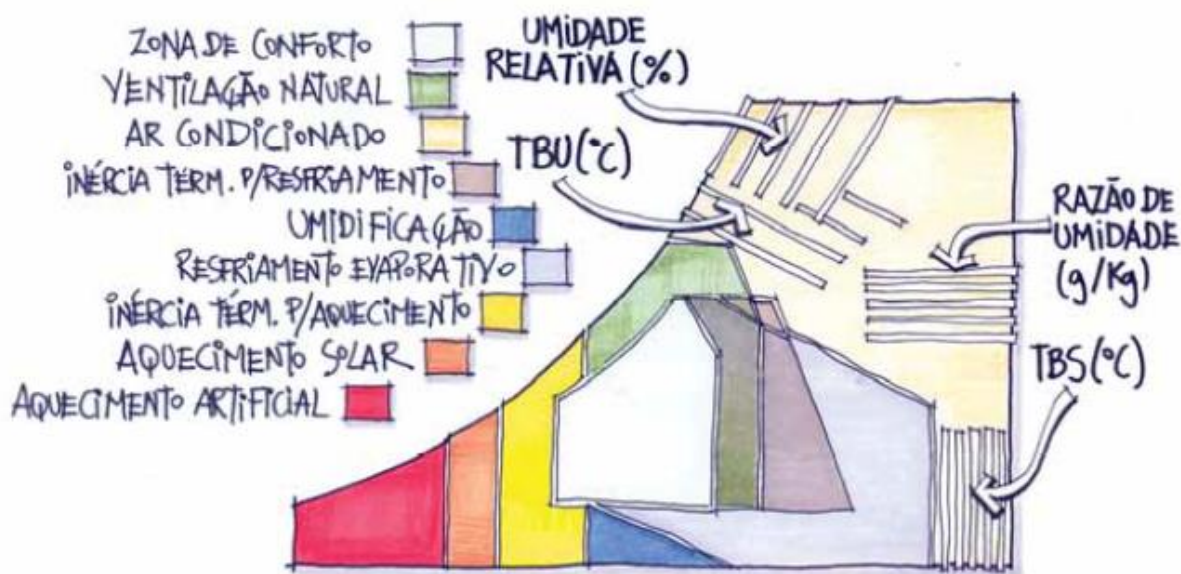
Fonte: ABNT NBR 15220 – Parte 3 (ABNT, 2005)



Para cada zona definida, são recomendados o tamanho e proteção das aberturas para ventilação, tipo de parede externa e cobertura e estratégias de condicionamento de ar passivo, como energia solar térmica ou ventilação cruzada. A carta bioclimática (esquemático incluindo as proposições de estratégias de conforto térmico com base na carta psicrométrica) adotada para o Brasil está apresentada na Figura 4.

As diversas estratégias de conforto que podem ser adotadas em um projeto de edificação envolvem os processos de condução, convecção, radiação e evaporação, com o objetivo de diminuir o desconforto por frio, no inverno, e o desconforto por calor, no verão. Na Figura 4, a região em branco representa a zona de conforto para as pessoas em um ambiente. Esta zona está compreendida entre 20 e 80% de umidade relativa e 18 e 29°C – nesta zona, os efeitos do vento foram desprezados, pois causariam desconforto nas temperaturas mais baixas, como 18°C. Por não se conseguir atingir a zona de conforto naturalmente, independentemente das características dos ambientes, as outras zonas mapeadas da carta apresentam formas de se aumentar o conforto de uma edificação.

Figura 4 – Esquema de carta bioclimática adotada para o Brasil.



Fonte: LAMBERTS, 2014.

Dentre as características das zonas de estratégias de conforto térmico, é importante salientar algumas características e principais formas de como são usadas:

- Zona de Ventilação Natural: a estratégia mais simples desta zona é a ventilação cruzada, usada para que a temperatura interior do ambiente acompanhe a variação de temperatura exterior. Também se aplica ventilação em localidades onde a temperatura durante o dia é muito mais alta do que durante a noite, com o objetivo de aproveitar o ar mais fresco noturno para resfriar o interior do ambiente.
- Zona de Inércia Térmica para Resfriamento: tem por objetivo diminuir a amplitude da temperatura interior com relação à temperatura exterior. Pode-se obter inércia térmica de materiais isolantes em construções, além de fechamento de portas e janelas.
- Zona de Resfriamento Evaporativo e Umidificação: com a evaporação da água, pode-se reduzir a temperatura e aumentar a umidade de um ambiente ao mesmo tempo. Exemplos de uso de resfriamento evaporativo são a inserção de vegetação ou fontes d'água.
- Zona de Aquecimento Solar: nesta zona, o mais indicado é aliar aquecimento solar passivo com isolamento térmico, para evitar perdas de calor. Se recomenda para a edificação superfícies

envidraçadas orientadas ao sol, e aberturas reduzidas nas orientações menos favoráveis. Exemplos de estratégias são coletores solares de água ou ar, painéis refletores externos e parede trombe<sup>2</sup>.

- Zonas de Condicionamento Artificial com Isolamento Térmico: no caso de a temperatura de bulbo seco do local da edificação ser maior do que 44°C e a temperatura de bulbo úmido maior do que 24°C, recomenda-se o uso de condicionadores de ar para atingir conforto térmico. Da mesma forma, em locais com temperaturas usualmente inferiores a 10,5°C, o aquecimento solar passivo pode não ser suficiente para conforto. Nesse caso, utiliza-se aquecimento artificial.
- Zona de Sombreamento: uma das estratégias mais importantes no Brasil é o sombreamento, pois a maior parte do país apresenta clima quente em grande parte do ano. As principais estratégias de sombreamento são o uso de grandes beirais de telhado, marquises, sacadas e persianas. Além disso, a orientação solar do ambiente também contribui para o sombreamento.

### 2.1.1. Caracterização climática de Porto Alegre

A cidade de Porto Alegre localiza-se entre as coordenadas geográficas 29°10'30" e 30°10'00" de latitude Sul e 51°05'00" Oeste e 51°16'15" de longitude Oeste, e possui altitude média de 10 metros, situando-se na região Leste do Rio Grande do Sul.

Quanto à classificação da ABNT NBR 15220, Porto Alegre se encontra na Zona Bioclimática 3, com temperaturas médias entre 15°C e 25°C e umidade relativa usualmente acima de 60%. Para a referida Zona, as recomendações sobre aberturas, vedações e condicionamento passivo estão apresentadas nas Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 1 – Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para Zona Bioclimática 3.

<b>Aberturas para Ventilação</b>	<b>Sombreamento das Aberturas</b>
Médias	Permitir sol durante o inverno

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15520 – Parte 3 (ABNT, 2005)

Tabela 2 – Tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática 3.

<b>Vedações Externas</b>
Parede: Leve refletora
Cobertura: Leve isolada

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15520 – Parte 3 (ABNT, 2005)

Tabela 3 – Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 3.

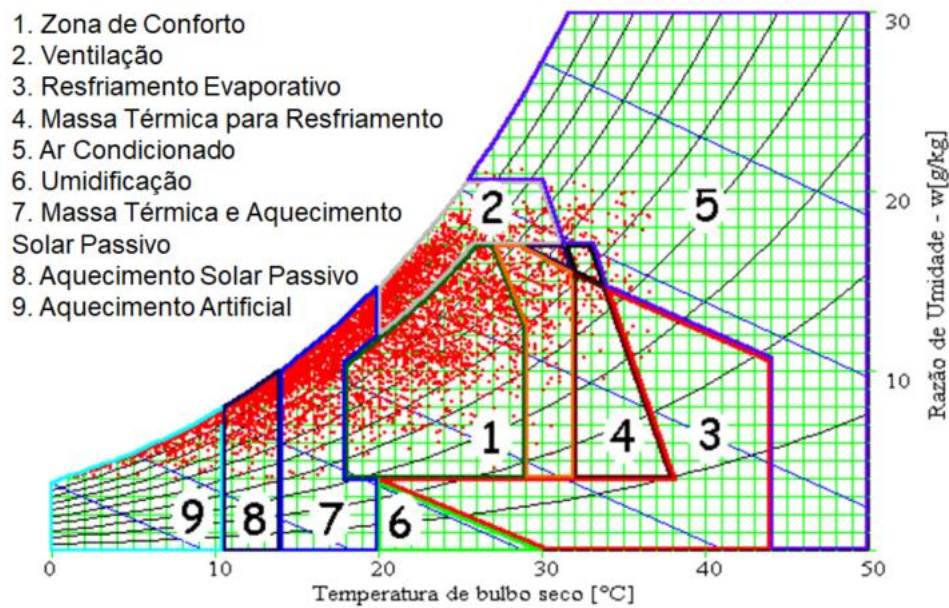
<b>Estação</b>	<b>Estratégias de condicionamento térmico passivo</b>
Verão	Ventilação cruzada
Inverno	Aquecimento solar da edificação
	Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15520 – Parte 3 (ABNT, 2005)

O período de tempo utilizado neste estudo foi de um ano, adotando-se um Ano Climático de Referência – ou *Test Reference Year* (TRY). A carta bioclimática que apresenta todo o espectro de temperaturas e umidade relativa deste período está apresentada na Figura 5.

<sup>2</sup> É chamada de parede trombe a construção de parede com face para o sol no inverno, composta por uma camada interna de material com alta capacidade térmica e uma camada externa de vidro simples ou duplo, separadas por uma camada de ar (TORCELLINI; PLESS, 2004).

Figura 5 – Carta bioclimática para um Ano Climático de Referência em Porto Alegre, RS.



Fonte: Adaptado de GOULART *et al.*, 1998.

## 2.2. Energia Solar

Nesta seção, é apresentado o referencial teórico utilizado para dimensionamento de sistemas de aquecimento solar e fotovoltaico. O presente trabalho considera a utilização destes dois tipos de energia – térmica e elétrica – combinados, a fim de se obter a maior eficiência energética e melhor aproveitamento da área de telhado da residência estudada.

### 2.2.1. Energia Solar Térmica

O aproveitamento da energia em forma de calor que um corpo é capaz de absorver a partir da radiação solar é o princípio da energia solar térmica. Para captar essa energia, são utilizados coletores solares, que aquecem um fluido – água, por exemplo – e este é mantido em um reservatório isolado para o uso final (CRESESB, 2008). Em residências, são usados principalmente coletores solares planos, com o objetivo de reduzir o uso de energia elétrica no processo de aquecimento de água.

Um sistema de aquecimento solar (SAS), de acordo com a ABNT NBR 15569:2008 (ABNT, 2008), é definido como “sistema composto por coletor(es) solar(es), reservatório(s) térmico(s), aquecimento auxiliar, acessórios e suas interligações hidráulicas, que funciona por circulação natural ou forçada”. Neste estudo, o dimensionamento do SAS será feito a partir do consumo de água quente da residência, considerando torneiras, chuveiro e máquina de lavar roupas. O aquecimento auxiliar provém da energia elétrica. A Figura 6 apresenta um esquema de funcionamento de um SAS.

O método da fração  $f$  ( $f$ -chart), proposto por BECKMAN *et al.*, 1977, permite dimensionar sistemas de aquecimento de água através da fração da carga de aquecimento mensal fornecida pelo SAS. Esse método contempla três configurações de sistemas, podendo dimensionar o aquecimento do ambiente e de água usando água como fluido de trabalho, aquecimento do ambiente e de água usando ar como fluido de trabalho e água quente de processo. Neste trabalho, o interesse é pelo aquecimento de água usando água como fluido de trabalho.

A fração mensal da carga de energia solar é determinada através da relação entre duas variáveis adimensionais,  $X$  e  $Y$ , definidas por

$$X = \frac{A_C F_R' U_L \Delta t (100 - \bar{T}_a)}{L} \quad (1)$$

$$Y = \frac{A_C F_R' \bar{\tau} \bar{\alpha} H_T N}{L} \quad (2)$$

nas quais  $A_C$  é a área do coletor, em  $m^2$ ,  $F'_R$  o fator de remoção do calor corrigido (adimensional),  $U_L$  o coeficiente de perda do coletor, em  $W/(m^2K)$ .  $T_a$  a temperatura ambiente média mensal, em  $^{\circ}C$ ,  $\Delta t$  é o número de horas no mês e  $L$  a carga de aquecimento total mensal, em Joule, abrangendo ambiente e água. Na Equação 2, além das variáveis comuns à Equação 1,  $\overline{\tau\alpha}$  é o produto  $\tau\alpha$  médio mensal do coletor (adimensional),  $H_T$  a irradiação média mensal incidente na superfície do coletor, em  $J/m^2$ , e  $N$  é o número de dias do mês. É recomendável, também, corrigir a variável adimensional  $X$  em função da temperatura desejada de aquecimento da água e da temperatura ambiente. A função de correção é dada por

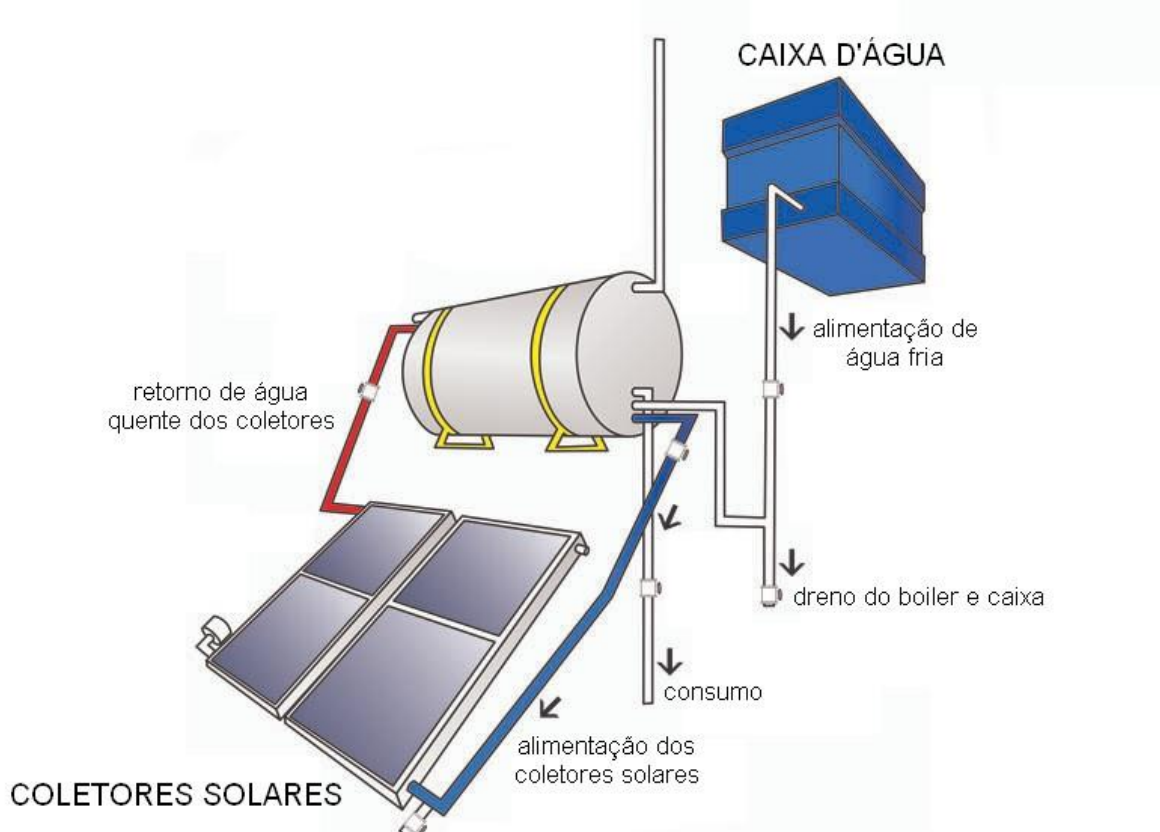
$$X_{c2} = \frac{11,6 + 1,18T_w + 3,86T_m - 2,32T_a}{100 - T_a} \quad (3)$$

na qual  $T_w$  é a temperatura desejada da água do sistema, em  $^{\circ}C$ , e  $T_m$  é a temperatura média da água para alimentação do sistema. Conhecendo  $X_{c2}$  e  $Y$ , pode-se calcular a fração  $f$ , definida por

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X_{c2} - 0,245 \cdot Y^2 + 0,0018 \cdot X_{c2}^2 + 0,0215 \cdot Y^3 \quad (4)$$

Quanto mais próximo de 1 o valor de  $f$ , melhor o dimensionamento do sistema, significando que maior fração da carga de aquecimento é atendida. Uma vez que cada mês do ano apresenta diferentes temperaturas médias e características de consumo, o fator  $f$  é calculado mensalmente.

Figura 6 – Esquema de funcionamento de um SAS.

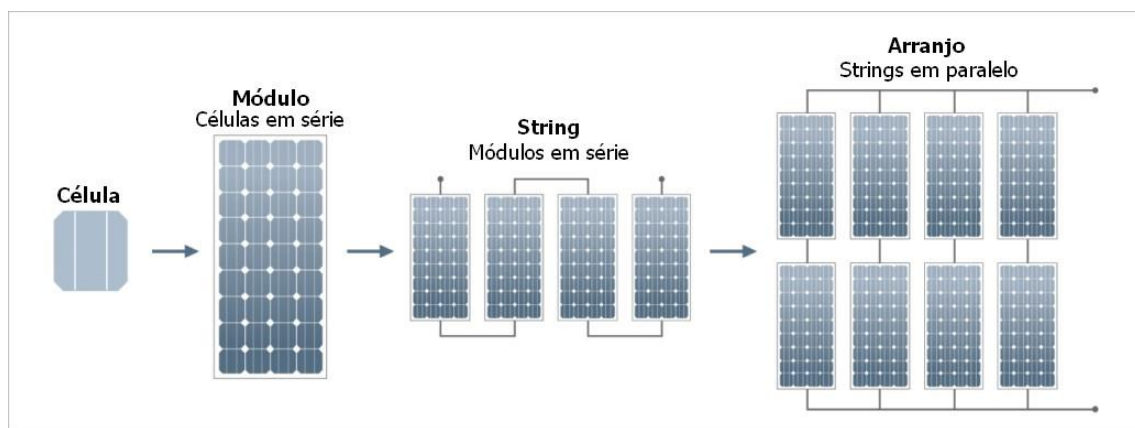


Fonte: Adaptado de Soletrol, 2018.

## 2.2.2. Energia Solar Fotovoltaica

A energia elétrica obtida através conversão da energia do espectro radiante proveniente do sol com o auxílio de um material semicondutor<sup>3</sup> é chamada de energia solar fotovoltaica. O efeito do aparecimento de uma diferença de potencial causada pela absorção de luz é denominado efeito fotovoltaico, e foi reconhecido pela primeira vez pelo físico francês Alexandre Becquerel, em 1839. A unidade fundamental do processo de conversão de energia é a célula fotovoltaica. Um módulo fotovoltaico é definido por PINHO *et al.*, 2014, como “uma unidade básica, formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica [...]”. A Figura 7 apresenta como são organizadas as células fotovoltaicas para que componham um módulo e este módulo venha a compor um arranjo – módulos conectados em série, a fim de aumentar a potência gerada.

Figura 7 – Organização de um sistema fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de YHA, 2018.

O atual mercado de energia fotovoltaica utiliza principalmente células de silício ou de filmes finos. O silício que compõe as células pode ser monocristalino (c-Si) ou policristalino (p-Si), e esta tecnologia é considerada consolidada por apresentar as maiores eficiências, ocupando também maior parte no mercado. Além do silício mono e policristalino, na categoria dos filmes finos está o silício amorfo (a-Si), o telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), todos com menores participações do mercado.

Para o dimensionamento do sistema apresentado neste trabalho, o equacionamento utilizado foi o de dimensionamento pela demanda (RODRIGUES, 2017), que considera inicialmente a avaliação dos melhores cenários de irradiação média diária para o local onde se irá instalar o sistema e a demanda que se deseja suprir. Conhecendo a disponibilidade média mensal de irradiação, os cálculos são feitos considerando quatro inclinações possíveis para o sistema, a fim de se obter melhor utilização dos recursos disponíveis. As inclinações comumente utilizadas são: inclinação igual à latitude, maior média anual e maior mínimo mensal, os dois últimos se referindo à avaliação da irradiação. Conhecendo esses dados, é possível calcular a potência necessária do conjunto gerador fotovoltaico,  $P_{FV}$ ,

$$P_{FV} = \frac{E G_{STC}}{TD H_{TOT}} \quad (5)$$

na qual  $E$  representa a energia que deve ser gerada, em Wh,  $G_{STC}$  a irradiância, em W/m<sup>2</sup>,  $TD$  a taxa de desempenho e  $H_{TOT}$  a irradiação total (Wh/m<sup>2</sup>). A partir da potência total necessária, escolhe-se um modelo de painel fotovoltaico e calcula-se o número de módulos necessários dividindo a potência total pela potência de um módulo. Para determinar a faixa de operação no ponto de máxima potência para um

<sup>3</sup> Materiais semicondutores são aqueles que, quando aquecidos ou combinados com outros materiais, são capazes de conduzir eletricidade. Para células fotovoltaicas, o material semicondutor mais comum é o Silício. (PINHO; GALDINO, 2014)

determinado arranjo, são feitas correções a partir da temperatura, para a tensão de circuito aberto e tensões de máxima potência. Essas correções estão apresentadas nas equações abaixo

$$V_{OC_{max}} = \frac{N_{mod}}{N_{str}} \cdot V_{OC_{mod}} \cdot \left( 1 - \left( \left( \frac{CoefTempVOC}{100} \right) \cdot (25 - Temp_{min}) \right) \right) \quad (6)$$

$$V_{mp_{min}} = \frac{N_{mod}}{N_{str}} \cdot V_{mp_{mod}} \cdot \left( 1 - \left( \left( \frac{CoefTempVmp}{100} \right) \cdot (25 - Temp_{max}) \right) \right) \quad (7)$$

$$V_{mp_{max}} = \frac{N_{mod}}{N_{str}} \cdot V_{mp_{mod}} \cdot \left( 1 - \left( \left( \frac{CoefTempVmp}{100} \right) \cdot (25 - Temp_{min}) \right) \right) \quad (8)$$

nas quais,  $V_{OC_{mod}}$  e  $V_{mp_{mod}}$  são, respectivamente, a tensão de circuito aberto e a tensão de máxima potência, em V, informadas no *datasheet* do módulo escolhido. Além das tensões, as temperaturas máxima e mínima, em °C, e o coeficiente de temperatura de circuito aberto e de máxima potência, em %/°C, também são encontrados no *datasheet* do módulo. Conhecendo os limites de tensão dos módulos fotovoltaicos, é possível escolher um modelo de inversor que atenda às necessidades do sistema.

### 2.3. LUMINOTÉCNICA

Uma vez que este trabalho visa a eficiência energética, uma forma de reduzir o consumo de energia elétrica de uma residência é através do dimensionamento correto da iluminação dos ambientes, garantindo que os moradores consigam realizar tarefas domésticas com conforto e sem a falta ou excesso de luminosidade, através da escolha de lâmpadas de baixo consumo e melhor aproveitamento de sua potência para iluminação, bem como fazer uso da iluminação externa de forma adequada.

O projeto luminotécnico leva em consideração alguns critérios, como a quantidade de luz (iluminamento, em Lux), potência de radiação total emitida por uma fonte de luz (fluxo luminoso, em Lumens), o equilíbrio de iluminação, o ofuscamento, a temperatura da cor e o índice de reprodutibilidade de cor, IRC (ABNT, 2013). Antes do projeto, portanto, é necessário que se defina qual o tipo de lâmpada e luminária que se deseja utilizar. Para este estudo, considerou-se apenas o uso de lâmpadas com tecnologia LED, cujas principais características são: baixa potência (quando comparadas a outros tipos de lâmpadas que oferecem o mesmo fluxo luminoso) e grande vida útil (em torno de 15 mil horas).

## 3. METODOLOGIA

A presente seção tem por objetivo apresentar como foi realizado o desenvolvimento do projeto, abordando as etapas de dimensionamento dos sistemas de energia solar térmica e fotovoltaica e a modelagem da residência estudada.

### 3.1. Energia Solar

Nesta seção, são apresentados o dimensionamento para os sistemas de aquecimento de água, através de coletores solares, e geração de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos.

#### 3.1.1. Energia Solar Térmica

O dimensionamento do sistema de aquecimento de água foi feito para uma residência unifamiliar capaz de comportar de 2 a 4 pessoas. Os equipamentos considerados para utilizarem a água aquecida foram chuveiro elétrico, com vazão de 7 litros/minuto, duas torneiras, cada uma com vazão de 3 litros/minuto (ABNT, 2008) e uma máquina de lavar roupas com capacidade de 10 kg que consome 105 litros por ciclo (INMETRO, 2018) – para este equipamento, foram considerados 3 ciclos de lavagem por semana. As temperaturas de consumo foram consideradas 50°C para o chuveiro e 45°C para as torneiras e lava roupas. A Tabela 4 apresenta as características de uso de água aquecida da residência, e o consumo total diário.

Tabela 4 – Consumo de água aquecida na residência estudada.

Equipamento	Vazão [l/min]	Consumo [min/dia]	Consumo diário [l]
Chuveiro	7	60	420
Torneira – Cozinha	3	20	60
Torneira – Banheiro	3	10	30
Lava-roupas	105 litros/ciclo		45
Consumo total diário (l)			510

Fonte: Elaborado pela autora.

Sabendo que o consumo total diário é de 510 litros e que o reservatório de água do sistema precisa ter pelo menos 75% deste volume, foi selecionado um reservatório com capacidade para 400 litros. O modelo escolhido foi o Heliotek MK400 (HELIOTEK). Por dispôr de grande área de telhado para instalação de um sistema de coletores solares, a partir do método de dimensionamento A da NBR 15569 (ABNT, 2008), chegou-se a um total de 8 coletores, organizados em dois arranjos de 4 coletores. O modelo escolhido foi o Heliotek MC15 Evolution Pro, cujas especificações estão apresentadas na Tabela 5. Para este sistema, a razão  $F_R'/F_R$  foi considerada igual a 1, pois não há trocador de calor associado ao sistema.

Tabela 5 – Características do coletor solar selecionado.

Coletor Solar Heliotek MC15 Evolution Pro	
Área externa do coletor	1,5 m <sup>2</sup>
Material da superfície absorvedora	Alumínio
Classificação PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem)	A
	$F_R \overline{\tau \alpha}$ 0,739
	$F_R UL$ 5,051

Fonte: INMETRO, 2017

O cálculo da temperatura ambiente média mensal foi realizado a partir dos dados mensais de temperatura máxima média e temperatura mínima média de 2000 a 2017 do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), fazendo-se uma média para cada mês do ano. A temperatura média da água para alimentação do sistema foi considerada igual à temperatura ambiente mensal, e a temperatura desejada da água do sistema de aquecimento foi adotada como 80°C. A energia necessária para aquecimento da água no mês foi calculada a partir do consumo diário de água da residência, do calor e massa específicos da água e da diferença entre a temperatura desejada da água e a temperatura ambiente.

Sabendo que o telhado da residência estudada possui inclinação de 30°, a irradiação média mensal incidente na superfície do coletor foi obtida a partir da localização geográfica de Porto Alegre no programa SunData (CRESESB, 2018), que calcula a irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional. Conhecendo todos os dados necessários, é possível calcular as variáveis adimensionais  $X_{c2}$  e  $Y$ , e então a fração  $f$  mensal. A Tabela 6 apresenta os dados fundamentais para o cálculo e os valores encontrados.

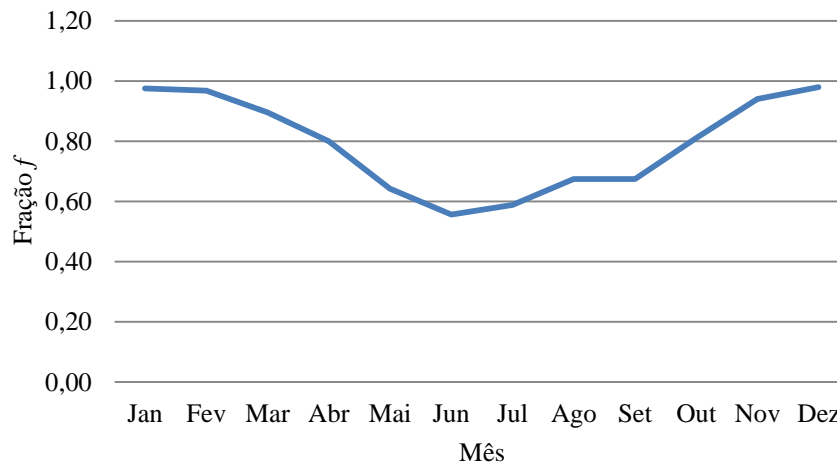
Tabela 6 – Fração  $f$  mensal.

Mês	$T_a$ [°C]	$X_{c2}$	$Y$	$f$
Janeiro	25,49	1,95	1,57	0,98
Fevereiro	25,98	1,97	1,56	0,97
Março	24,45	1,90	1,39	0,90
Abril	21,66	1,78	1,18	0,80
Mai	17,98	1,63	0,90	0,64
Junho	15,90	1,55	0,76	0,56
Julho	15,25	1,53	0,81	0,59
Agosto	16,51	1,57	0,95	0,67
Setembro	18,12	1,64	0,95	0,67
Outubro	20,62	1,74	1,20	0,81
Novembro	22,46	1,81	1,47	0,94
Dezembro	24,60	1,91	1,58	0,98

Fonte: Elaborado pela autora.

A fração  $f$  média anual foi de 0,78, significando que o sistema de aquecimento de água foi capaz de suprir 78% da demanda anual da residência. Os melhores meses foram os de janeiro e dezembro, por possuírem maior irradiação solar e temperaturas médias do ambiente elevadas, resultando em uma fração  $f$  de 0,98. O mês que o sistema apresentou menor desempenho foi junho, com fração  $f$  de 0,56, causado pela menor irradiação solar. O desempenho do sistema representado pela fração  $f$  mensal também pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Fração  $f$  mensal.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.1.1. Energia Solar Fotovoltaica

Com 33,2 m<sup>2</sup> de área de telhado com face Norte (azimute igual a 0°), inclinado a 30°, foram estudados três casos possíveis de inclinação para os módulos fotovoltaicos do sistema. Os casos considerados foram:

- Ângulo igual à latitude: 30° (azimute N)
- Maior média de irradiação solar anual: 22° (azimute N)
- Maior mínimo de irradiação solar mensal: 50° (azimute N)

Para todos estes casos, foi calculada a potência mensal do gerador fotovoltaico, a fim de realizar análise posterior. A irradiação média diária foi obtida a partir do programa SunData (CRESESB, 2018). O consumo médio mensal da residência foi considerado 326,5 kWh, tendo como base as faturas de energia elétrica de uma residência unifamiliar com quatro moradores. A taxa de desempenho  $TD$  foi considerada 0,77 – uma vez que  $TD$  pode variar de 0,7 a 0,85, adotou-se o valor médio –, e a irradiância STC (*Standard Test Conditions*) é de 1000 W/m<sup>2</sup>. Os valores preliminares para a potência mensal do gerador fotovoltaico, em kWp/mês, estão apresentados na Tabela 7, bem como a média de irradiação para os casos considerados para estudo. Avaliando os resultados da potência do gerador fotovoltaico, por simplificação de projeto, opta-se pela inclinação de 30° N dos módulos.

Tabela 7 – Irradiação média diária (kWh/m<sup>2</sup>.dia) e potência do gerador fotovoltaico (kWp/mês)

	30°	22°	50°
Irradiância Média Diária [kWh/m <sup>2</sup> .dia]	4,64	4,67	4,30
Potência do Gerador FV [kWp/mês]	3,05	3,03	3,28

Fonte: Elaborado pela autora.

Para o presente estudo, foram selecionados módulos *Canadian Solar*, modelo CS6K-270 (CANADIAN SOLAR, 2018). As características técnicas do módulo são fornecidas no *datasheet* do fabricante, estando algumas apresentadas na Tabela 8 e as demais disponíveis no Anexo A.

Utilizando o modelo apresentado, serão necessários 15 módulos para suprir a demanda de potência da residência. Para fins de layout, serão utilizados 16 módulos, organizados em um arranjo 4x4



(quatro módulos em série e quatro módulos em paralelo), ocupando uma área total de 19,64 m<sup>2</sup> no telhado. Para determinação da faixa de operação no ponto de máxima potência considerando o arranjo proposto, foram calculadas as correções para as tensões de circuito aberto e de máxima potência. Os valores das correções estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 8 – Características do módulo selecionado.

<b>Canadian Solar CS6K-270</b>	
Potência Nominal Máxima [W <sub>p</sub> ]	270
Eficiência Máxima [%]	17,11
Tensão no ponto de máxima potência (STC) [V]	30,6
Tensão de circuito aberto (STC) [V]	37,9
Coefficiente de temperatura (V <sub>OC</sub> ) [%/°C]	-0,31
Coefficiente de temperatura (V <sub>MP</sub> ) [%/°C]	-0,40
Coefficiente de temperatura (I <sub>SC</sub> ) [%/°C]	0,05
Temperatura mínima [°C]	-40
Temperatura máxima [°C]	85

Fonte: CANADIAN SOLAR, 2018.

Tabela 9 – Correções de tensão de circuito aberto e de máxima potência para a temperatura.

<b>Correção</b>	<b>Valor</b>
Tensão máxima de circuito aberto (V <sub>OC<sub>max</sub></sub> ) [V]	546,44
Tensão mínima de máxima potência (V <sub>MP<sub>min</sub></sub> ) [V]	276,88
Tensão máxima de máxima potência (V <sub>MP<sub>max</sub></sub> ) [V]	465,06

Fonte: Elaborado pela autora.

Conhecendo os limites de tensão, é possível dimensionar e selecionar o inversor. Como o arranjo será organizado em quatro *strings*, será utilizado apenas um inversor com 4 entradas CC. O modelo escolhido foi o SIW300 M050, da fabricante WEG. As características de tensão do inversor informadas no *datasheet* estão apresentadas na Tabela 10, e as demais características estão disponíveis no Anexo B.

Tabela 10 – Características do inversor selecionado.

<b>SIW300 M015 WEG</b>	
Tensão máxima [V]	600
Tensão mínima de máxima potência (V <sub>MP<sub>min</sub></sub> ) [V]	160
Tensão máxima de máxima potência (V <sub>MP<sub>max</sub></sub> ) [V]	500

Fonte: WEG, 2018.

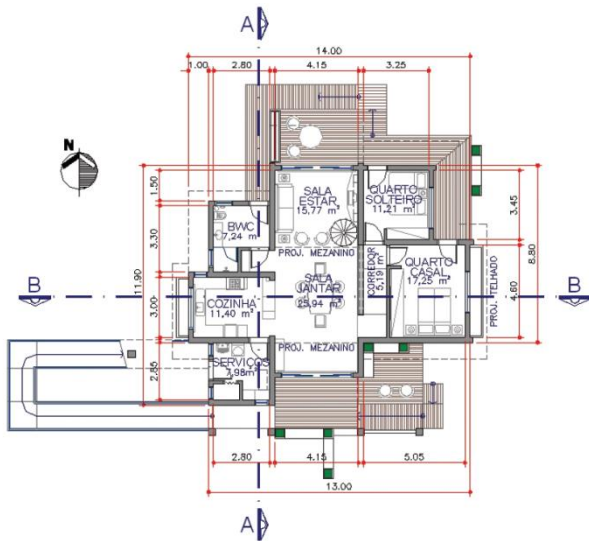
### 3.2. Modelagem da Residência

O projeto da residência usada neste estudo foi obtido de LAMBERTS *et al.*, 2010, por ser um projeto já existente – e construído – e suas informações serem de livre acesso. Trata-se de uma residência de dois dormitórios, capaz de comportar uma família de 2 a 4 pessoas. Além dos dormitórios, o projeto inclui cozinha, um banheiro, área de serviço e sala de estar com dois ambientes no primeiro pavimento. O segundo pavimento possui apenas espaço para a caixa d'água, acima da cozinha, e uma zona para o reservatório de água quente do sistema de energia solar térmica, acima do corredor que conecta a sala aos dormitórios. A planta baixa dos dois pavimentos está apresentada nas Figura 9 e Figura 10.

O modelo da residência para estudo foi feito através do *plugin* OpenStudio®, desenvolvido pelo NREL, que utiliza o *software* SketchUp® como base. Usou-se a versão 2.5 do OpenStudio® em conjunto com o SketchUp Pro 2017 durante o período *trial*. A Figura 11 apresenta a fachada Nordeste do modelo desenvolvido com indicação dos ambientes da residência. Ressalta-se que, diferente do modelo proposto por LAMBERTS *et al.*, 2010, este possui inclinação de telhados de 30°, de modo que favorecesse a instalação de sistemas solares térmico e fotovoltaico, já que esta inclinação é a mesma da latitude para a cidade de Porto Alegre. No modelo, foram adicionados também os elementos de sombreamento referentes

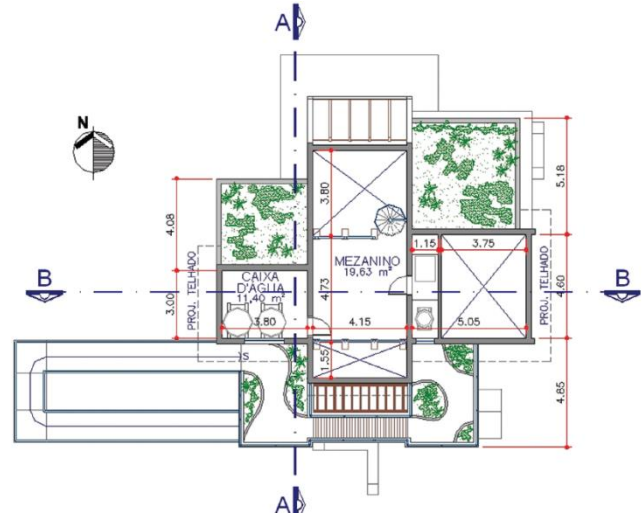
às áreas de telhado e ajardinadas no segundo pavimento. No Apêndice A podem ser vistas mais imagens do modelo.

Figura 9 – Planta baixa da residência – térreo.



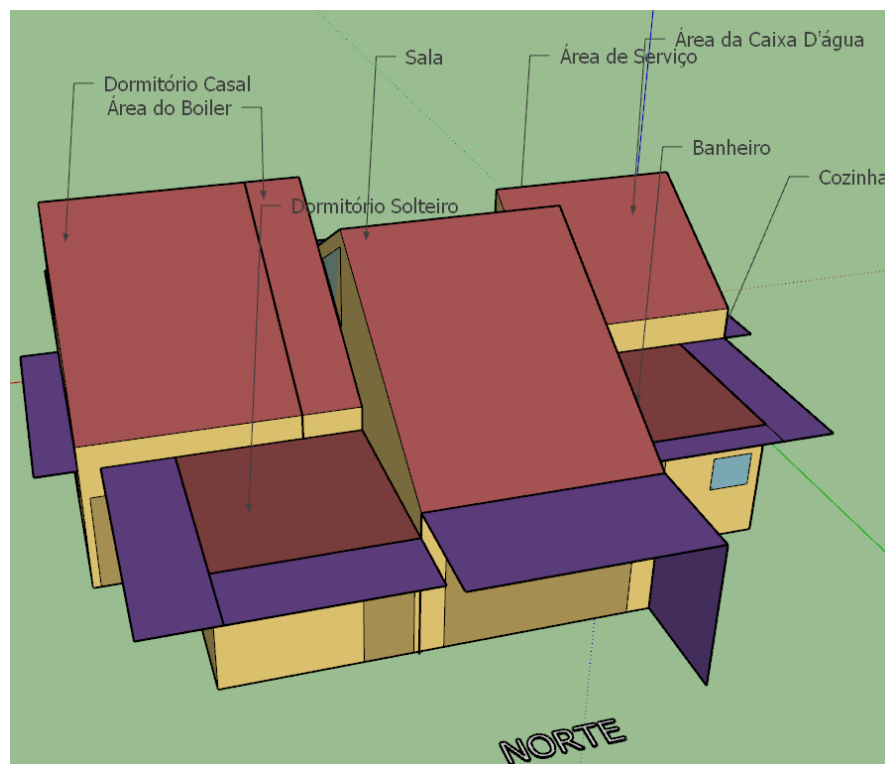
Fonte: LAMBERTS *et al.*, 2010.

Figura 10 – Planta baixa da residência – mezanino.



Fonte: LAMBERTS *et al.*, 2010

Figura 11 – Modelo da residência – fachada Nordeste.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.3. Simulação no EnergyPlus

A fim de realizar a simulação no EnergyPlus®, o modelo feito no OpenStudio® foi convertido para a extensão compatível com o *software* de análise. Isso permite com que cada elemento de construção

– portas, janelas, paredes e telhados – seja lido como uma superfície, na qual é possível alterar o tipo de material que a compõe e, no caso de aberturas como portas e janelas, o tempo que ficam abertas ou fechadas ao longo do dia. Foram mapeadas mais de 100 superfícies e adequadas aos materiais utilizados na Casa Eficiente (LAMBERTS *et al.*, 2010). Cada ambiente da residência foi avaliado como uma zona térmica diferente, podendo-se obter resultados especificamente para cada ambiente desejado. Os materiais definidos para as superfícies são definidos a seguir. As características dos materiais usados para a simulação estão apresentadas no Anexo C. Para o telhado vegetado, foram usadas as características *default* que o EnergyPlus® sugere, apenas definindo-se a altura de 10cm para a vegetação.

- Paredes externas: paredes duplas, duas camadas de tijolo maciço separadas por uma camada de manta de lã de rocha.
- Paredes internas: parede simples, uma camada de tijolo maciço entre duas camadas de reboco.
- Piso: camada de concreto com 10 cm de espessura.
- Cobertura da cozinha e corredor: laje de concreto com 10 cm de espessura.
- Cobertura do quarto de casal, área do boiler e área das caixas d'água: telha cerâmica, câmara de ar, polietileno aluminizado, câmara de ar, manta de lã de rocha e forro de madeira.
- Cobertura da sala: telha metálica com pintura branca nas duas faces, câmara de ar, manta de lã de rocha e forro de madeira. Na face Norte do telhado, há ainda outra câmara de ar e uma camada de vidro opaco, para representar o painel fotovoltaico.
- Cobertura do banheiro, quarto de solteiro e área de serviço: cobertura vegetada com altura de 10 cm, poliestireno extrudado e laje de concreto de 10 cm de espessura.
- Janelas: duas camadas de vidro incolor de espessura 3 cm separadas por uma câmara de ar de 12 cm de espessura.

Para a simulação de iluminação, ocupação por pessoas e equipamentos elétricos, foram considerados dois casos. O primeiro deles é o mesmo proposto por LAMBERTS *et al.*, 2010, e o segundo sugere melhorias para a iluminação e equipamentos elétricos, já que o estudo da Casa Eficiente foi proposto em 2007 e desde então materiais mais modernos foram desenvolvidos, possibilitando menor uso de energia elétrica.

As informações referentes à ocupação de pessoas nos ambientes foram obtidas em valores de taxa metabólica, em  $W/m^2$ , baseados no que foi determinado pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE, 2005). As atividades consideradas foram limpeza doméstica, sentado, lendo e/ou escrevendo e em pé.

Os *schedules*, grupo do EnergyPlus® em que se definem as escalas de funcionamento das informações inseridas na simulação ao longo do tempo, foram utilizados para definição do tempo de abertura das janelas, carga de ocupação de pessoas nos ambientes, funcionamento de equipamentos que utilizam energia elétrica, iluminação nos ambientes e janela de atividade solar.

Entre janeiro e abril, as janelas da residência ficaram abertas das 9h às 18h, todos os dias – dias úteis e finais de semana. De maio a setembro, as janelas estiveram fechadas durante o dia inteiro, a fim de provocar inércia térmica, como recomendado pela ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005). De outubro a dezembro, as janelas ficaram abertas todos os dias das 9h às 18h. A janela de atividade solar considerada para esta simulação foi entre as 9h e às 16h. A iluminação dos dormitórios e da sala foi ligada entre as 19h e às 23h, e das 18h às 20h na cozinha, área de serviço e banheiro.

Dentre os equipamentos, a geladeira e o freezer foram considerados ligados todos os dias durante o dia todo. O forno de micro-ondas funcionou durante uma hora diária, assim como o ferro de passar e o chuveiro. A televisão e o computador foram considerados ligados durante três horas todos os dias.

Para a infiltração de ar através de portas e janelas, o parâmetro *Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed* (coeficiente de fluxo de massa de ar quando as janelas estão fechadas), dado em

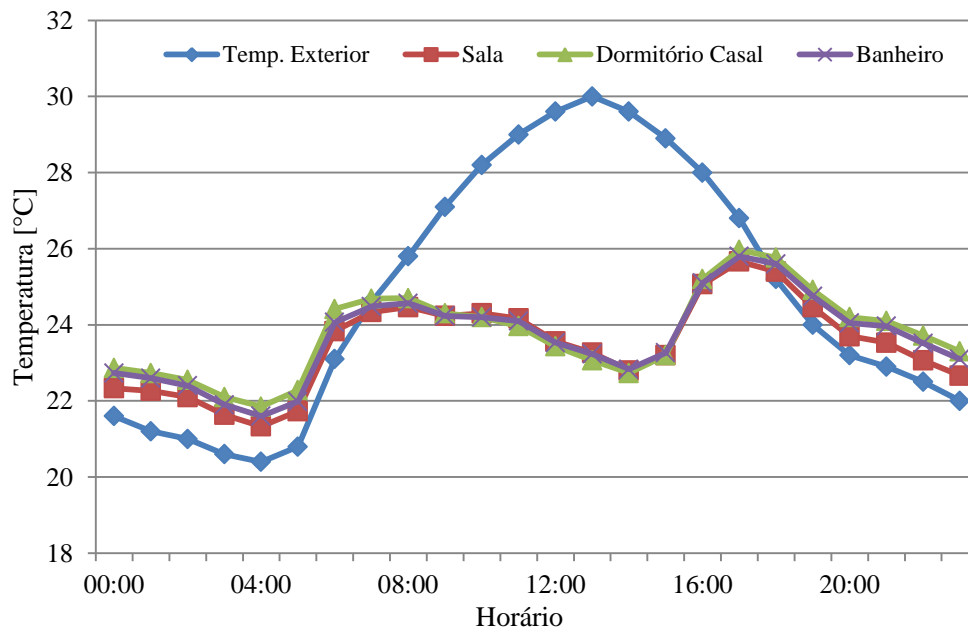
kg/m.s (para 1 Pa por metro de fresta), foi considerado 0,001 kg/m.s, e o coeficiente de descarga utilizado para as trocas de ar quando portas e janelas estão abertas foi 0,6.

#### 4. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A simulação realizada foi feita para um ano padrão – também chamado de Ano Climático de Referência – para a cidade de Porto Alegre, RS. Os dados de temperatura de bulbo seco, bulbo úmido, umidade relativa e velocidade do vento foram obtidos diretamente do *site* do EnergyPlus®, com base em dados do INMET (NREL, 2018). Foram selecionados quatro meses específicos para as análises: dezembro, por se tratar do mês que a simulação da Casa Eficiente foi realizada, possibilitando comparações entre os resultados, março, por ser o mês de início do outono, junho, por ser o mês de início do inverno e outubro, para representar um mês de primavera. O Anexo D apresenta as informações de temperatura de bulbo seco e velocidade do vento para estes meses.

Inicialmente, simulou-se as temperaturas nos ambientes da casa, a fim de realizar comparação com os resultados obtidos na análise de Casa Eficiente de LAMBERTS *et al.*, 2010, e também avaliar se o modelo de residência empregado neste estudo, sem a adição de ventilação forçada – condicionador de ar ou ventilador –, permite que os ocupantes da casa fiquem em situação de conforto térmico ao longo do ano. Os ambientes escolhidos para avaliação foram os mesmos da publicação de LAMBERTS *et al.*, 2010, – sala de estar, quarto do casal e banheiro. O quarto do casal e o banheiro estão em faces opostas da residência, um a Oeste e outro a Leste, e a sala possui fachada para sul e Norte. A Figura 12 apresenta os resultados obtidos para a temperatura externa e dos ambientes no mês de dezembro.

Figura 12 – Temperaturas exterior e dos ambientes da residência em dezembro.

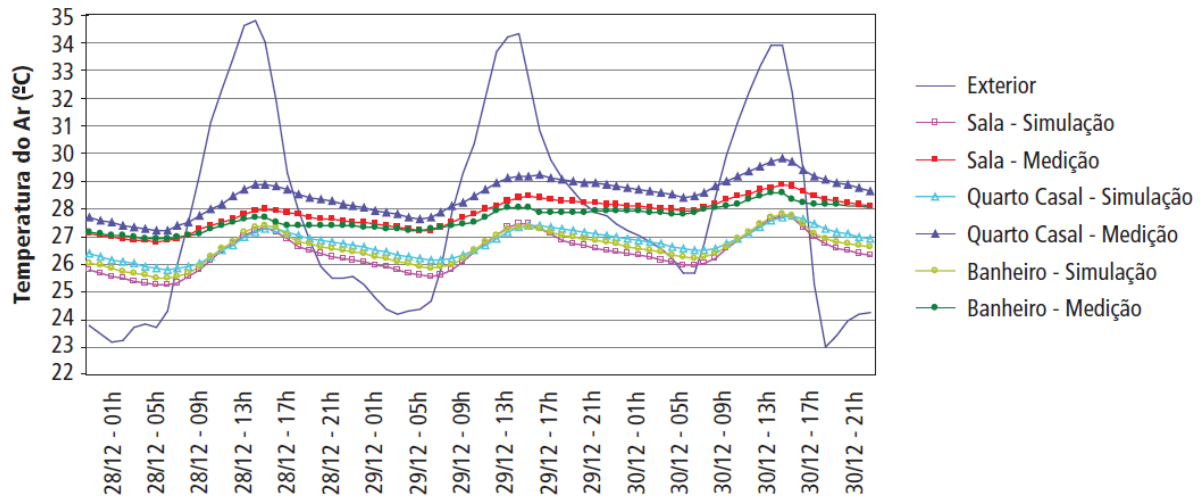


Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se, na Figura 12, que as temperaturas simuladas pelo EnergyPlus® ficaram entre 21,9 e 25,1°C para o mês de dezembro em Porto Alegre, se enquadrando na faixa de conforto térmico, definida no estudo de GOULART *et al.*, 1998, e adotado pela ABNT. Durante a madrugada até o início da manhã a temperatura nos ambientes da residência fica levemente acima da temperatura exterior, e se mantém variando pouco até o início da tarde, quando sofre redução. Observando as características climáticas de Porto Alegre, atribui-se esta diminuição de temperatura ao aumento da velocidade do vento que ocorre na cidade durante a tarde no mês de dezembro. As informações de temperatura exterior e velocidade do vento nos meses estudados estão apresentadas no Anexo D.

Para fins de comparação, a Figura 13 traz os resultados obtidos no estudo de LAMBERTS *et al.*, 2010, para três dias do mês de dezembro, compreendendo a simulação e a temperatura medida na residência. Nela, vê-se que, por as temperaturas em Florianópolis terem sido mais altas no período observado, a temperatura média obtida na simulação foi mais alta do que o simulado para Porto Alegre durante o mesmo mês. Apesar disso, as curvas de simulação seguiram um padrão parecido, porém para Florianópolis não se observa a redução de temperatura durante a tarde.

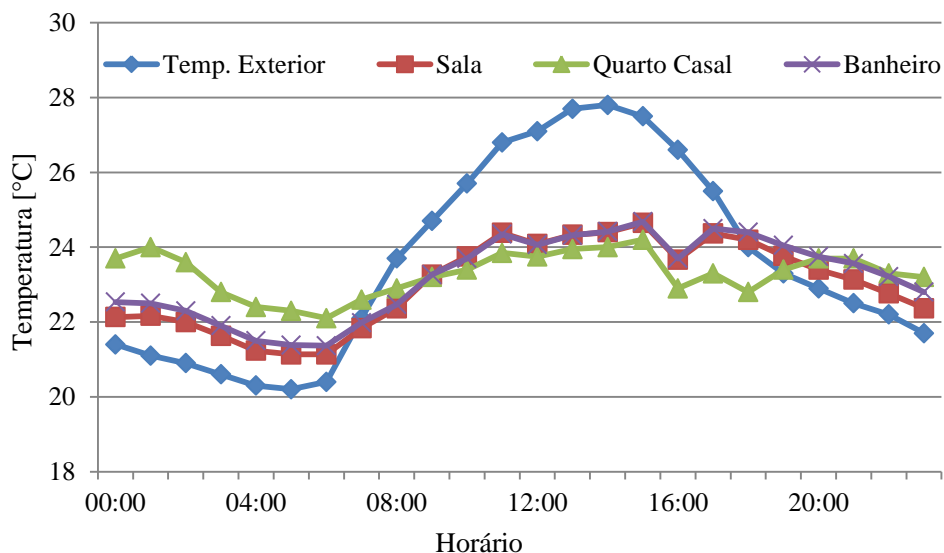
Figura 13 – Temperaturas simuladas e medidas na Casa Eficiente para três dias de dezembro.



Fonte: LAMBERTS *et al.*, 2010.

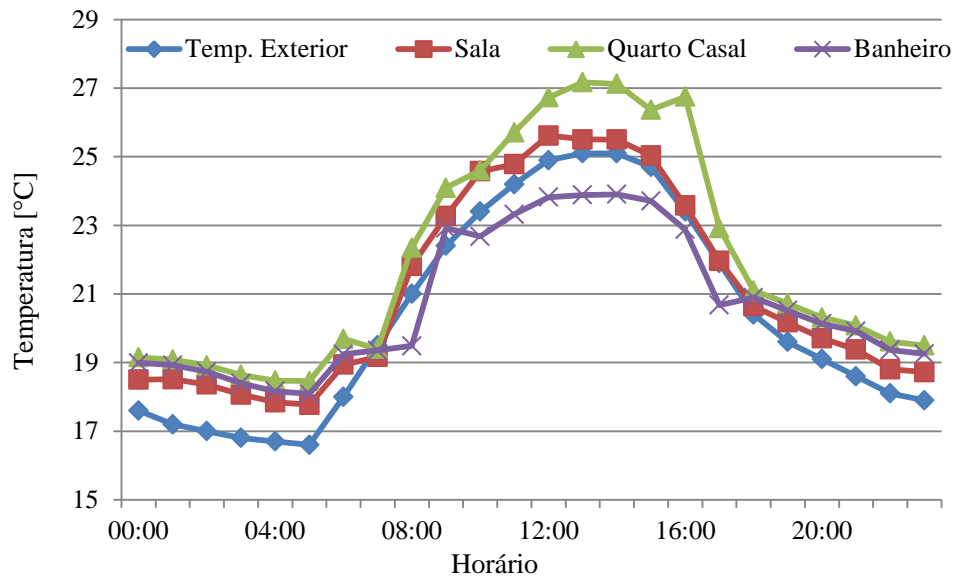
Assim como em dezembro, as simulações para as temperaturas dos ambientes da residência durante os meses de março e outubro também ficaram dentro da faixa de conforto térmico adotada pela ABNT – de 18 a 28°C. As Figura 14 e Figura 15 apresentam os resultados obtidos para estes períodos.

Figura 14 – Temperaturas exterior e dos ambientes da residência em março.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 – Temperaturas exterior e dos ambientes da residência em outubro.

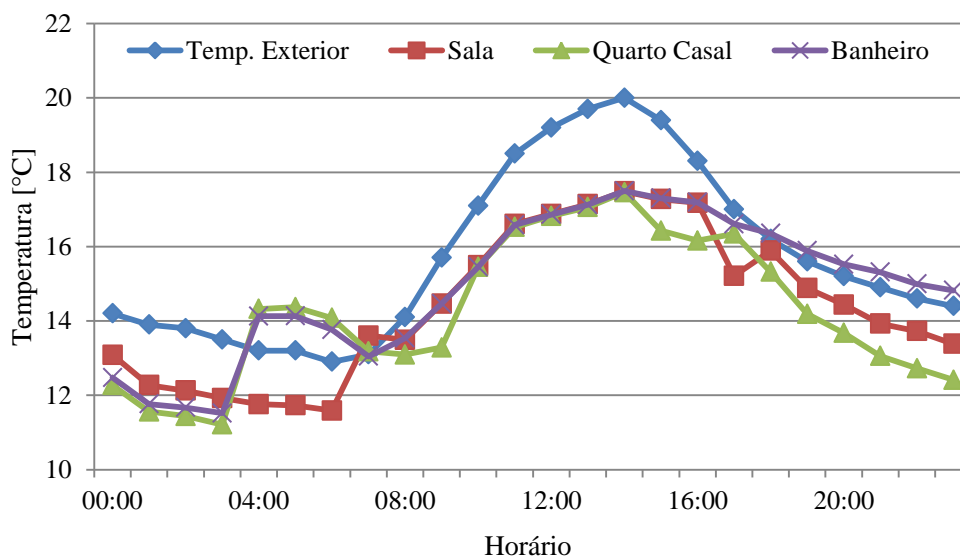


Fonte: Elaborado pela autora.

Para o mês de março, observa-se pouca variação da temperatura da simulação ao longo do dia, enquanto a temperatura exterior chega a variar em torno de 10°C. Apesar de não se manter constante, a temperatura nos ambientes da residência permaneceu dentro dos limites de conforto térmico. Já no mês de outubro, a temperatura dos ambientes da residência se mostra bastante semelhante à temperatura do exterior. O uso da ventilação natural mantendo as janelas da residência abertas das 9h às 18h durante todos os dias é responsável pela temperatura dos ambientes da residência estar tão próxima à temperatura do exterior.

Em contraponto, apesar de promover a inércia térmica mantendo todas as janelas fechadas durante o mês de junho, não foi possível obter temperaturas de conforto térmico em nenhum horário do dia, como se pode observar na Figura 16. Nela, vê-se que a temperatura dos ambientes da casa chegou próximo ou foi superior à do exterior em poucos momentos, para o quarto do casal e a sala entre as 4h e 7h e para o banheiro após as 18h, tornando necessário aliar outro método para aumentar a temperatura a fim de atingir o conforto térmico.

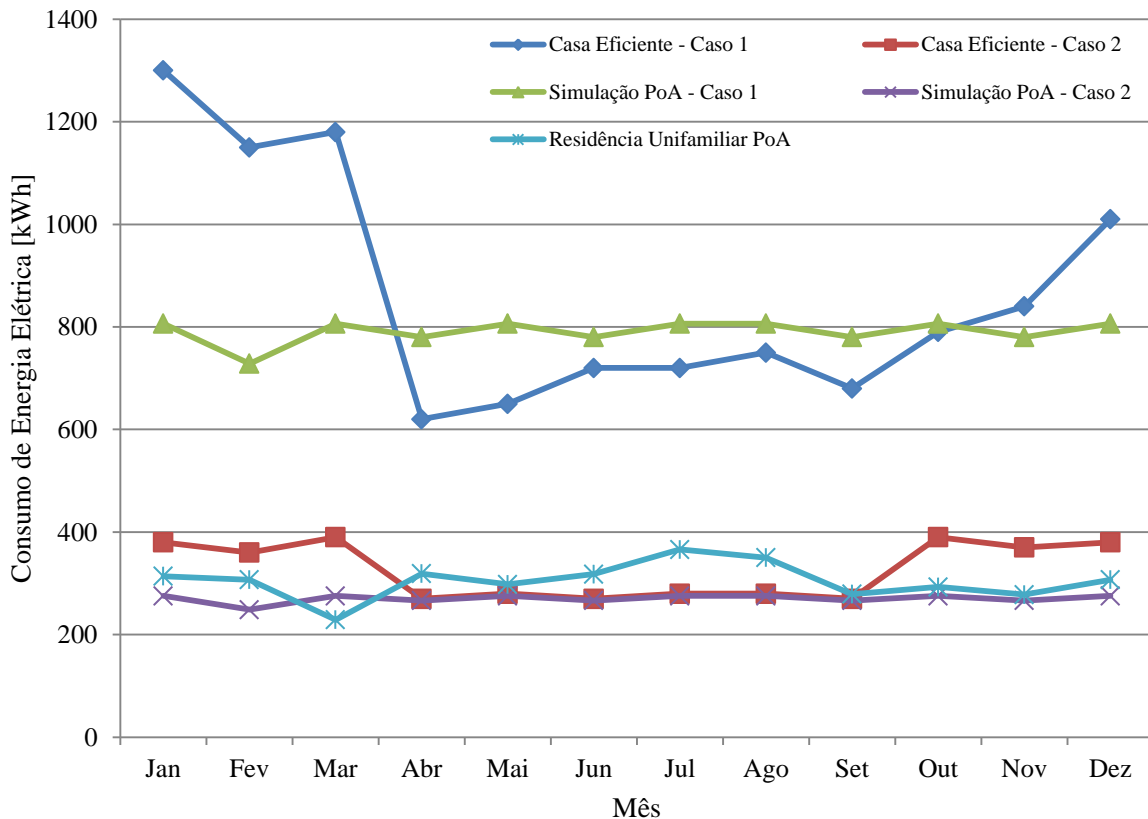
Figura 16 – Temperaturas exterior e dos ambientes da residência em junho.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a simulação do consumo de energia elétrica foram considerados dois casos: com a potência de equipamentos elétricos fornecidas no relatório da Casa Eficiente (LAMBERTS *et al.*, 2010) e com equipamentos mais eficientes e tecnologias mais modernas, uma vez que a Casa Eficiente foi construída em 2007. Ambos os casos foram comparados ao consumo real de uma residência unifamiliar com 4 moradores ao longo de um ano. Os resultados podem ser observados na Figura 17. Os dados completos estão apresentados no Apêndice B.

Figura 17 – Consumo de energia elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 17, foi considerado Caso 1 o uso de equipamentos convencionais – usualmente com alto consumo – e Caso 2 o uso de equipamentos eficientes – iluminação através de lâmpadas LED e outros equipamentos com baixos consumos de energia elétrica para sua categoria. A residência em comparação também utiliza equipamentos com baixo consumo e iluminação majoritariamente por lâmpadas LED. Observa-se, então, que o consumo simulado do Caso 2 para a Casa Eficiente (LAMBERTS *et al.*, 2010) em Florianópolis e Porto Alegre são muito semelhantes, e também à residência unifamiliar utilizada para fins de comparação. O consumo para o Caso 1 apresenta maiores semelhanças a partir de abril, e durante os meses de verão – dezembro, janeiro e fevereiro – veem-se significativas diferenças.

## 5. CONCLUSÃO

A presente monografia foi proposta a fim de observar os resultados de temperatura e energia elétrica para uma residência unifamiliar na cidade de Porto Alegre, buscando melhores alternativas e melhor uso de recursos naturais para o conforto térmico do que ventilação forçada. Para conduzir este estudo, foi feito um modelo da residência e os resultados obtidos no EnergyPlus®. Também foram projetados sistemas de energia solar térmica e fotovoltaica, para suprir a demanda de ar quente e de energia elétrica, contribuindo para que a residência dependesse menos da energia elétrica da rede para suprir equipamentos elétricos e realizar o aquecimento da água.

Concluiu-se que, dentre os quatro meses selecionados para estudo, a temperatura da residência atingiu as condições de conforto térmico (entre 18°C e 28°C) em três deles, demandando um sistema de aquecimento auxiliar – podendo ser este solar ou com a utilização de ar condicionado ou estufa. Na simulação do consumo de energia elétrica da residência, viu-se que se assemelha muito aos resultados obtidos por LAMBERTS *et al.*, 2010 no estudo da Casa Eficiente para Florianópolis e aos dados reais de consumo de uma residência unifamiliar em Porto Alegre, com média de 270 kWh mensais. Vê-se que o sistema de energia solar fotovoltaica, projetado para suprir uma demanda média de 326,5 kWh, poderia atender toda a demanda de energia elétrica da residência em períodos típicos.

Ao final do estudo, percebe-se a importância social de incentivar o crescimento da utilização da energia solar no Brasil, tanto para aquecimento de água quanto para geração de energia elétrica. Também vale ressaltar a necessidade de se repensar como as construções são feitas no Brasil, um país abundante em recursos naturais e com posição solar privilegiada, para que se aumente a utilização de estratégias naturais de ventilação e iluminação de ambientes, a fim de diminuir a dependência da ventilação forçada e iluminação artificial.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, propõe-se a realização de análise de viabilidade econômica do estudo, levando em consideração os custos dos materiais construtivos da residência, bem como dos equipamentos instalados e os sistemas de energia solar térmica e fotovoltaica. Também se sugerem alterações no modelo proposto da residência, a fim de melhor adequá-la para o período do inverno, no qual não foi possível atingir a condição de conforto térmico. Tais mudanças poderiam ser em materiais – alteração do tipo de tijolo para as paredes, por exemplo – ou através da inserção de um sistema de ar condicionado. Outra forma de se aquecer os ambientes seria aproveitar o sistema de aquecimento de água através de energia solar e adaptá-lo para que alimente um circuito de circulação forçada de água quente pelas paredes da residência. Além de melhorias no atual modelo, pode-se também realizar simulações para outras cidades do Brasil, a fim de verificar a viabilidade das estratégias empregadas no projeto e quais as maiores diferenças entre diferentes características climáticas e latitudes. Não obstante, podem ser avaliadas outras orientações para a casa.



## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 15220 - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro. 2005.
- ABNT. **NBR 15569 - Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Direto - Projeto e Instalação**. ABNT. Rio de Janeiro. 2008.
- ABNT. **NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de Ambientes de Trabalho**. Rio de Janeiro. 2013.
- ABSOLAR. Isenção de Microgeração e Minigeração Distribuída Alcança Todos os Estados Brasileiros. **ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica**, 2018. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/isencao-de-microgeracao-e-minigeracao-distribuida-alcanca-todos-os-estados-brasileiros.html>>. Acesso em: 07 jun. 2018.
- ASHRAE. Capítulo 8: Thermal Comfort. In: **ASHRAE ASHRAE Handbook - Fundamentals**. Atlanta: [s.n.], 2005.
- BAGNATI, M. M. **Zoneamento Bioclimático e Arquitetura Brasileira: Qualidade do Ambiente Construído**. UFRGS. Porto Alegre, p. 133. 2013.
- BANCO DO NORDESTE. Governo Federal libera financiamento de energia solar para pessoas físicas. **Banco do Nordeste**, 2018. Disponível em: <[https://www.bnb.gov.br/noticias/-/asset\\_publisher/x8xtPijhdmFZ/content/governo-federal-libera-financiamento-de-energia-solar-para-pessoas-fisicas/50120?inheritRedirect=true](https://www.bnb.gov.br/noticias/-/asset_publisher/x8xtPijhdmFZ/content/governo-federal-libera-financiamento-de-energia-solar-para-pessoas-fisicas/50120?inheritRedirect=true)>. Acesso em: 07 jun. 2018.
- BECKMAN, W. A.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. **Solar Heating Design by the f-Chart Method**. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- CANADIAN SOLAR. CS6K-270|275|280 P. **Canadian Solar**. Disponível em: <[https://www.canadiansolar.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/datasheets/en/new/Canadian\\_Solar-Datasheet-CS6K-P\\_en.pdf](https://www.canadiansolar.com/fileadmin/user_upload/downloads/datasheets/en/new/Canadian_Solar-Datasheet-CS6K-P_en.pdf)>. Acesso em: 03 maio 2018.
- CRESESB. Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica. **CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio Brito**, 2008. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=tutorial\\_solar](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_solar)>. Acesso em: 30 nov. 2017.
- CRESESB. Potencial Solar - SunData v 3.0. **CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito**, 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 03 maio 2018.
- GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. 1ª. ed. [S.l.]: Elsevier Science Ltd., 1969. 377 p.
- GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras**. 2ª. ed. Florianópolis: [s.n.], 1998.
- HELIOTEK. Reservatórios Térmicos Alta e Baixa Pressão. **Heliotek**. Disponível em: <<http://www.heliotek.com.br/para-casa/aquecedor-solar-para-banho/reservatorios-termicos/alta-e-baixa-pressao>>. Acesso em: 03 maio 2018.
- IBGE. Séries Estatísticas & Séries Históricas. **IBGE**. Disponível em: <<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=POP122>>. Acesso em: 07 jun. 2018.
- INMET. BDMEP - Dados Históricos. **INMET (Instituto Nacional de Meteorologia)**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 03 maio 2018.

INMETRO. **PBE - Coletor Solar aplicação Banho e Piscina**. INMETRO. [S.l.]. 2017.

INMETRO. **Programa Brasileiro de Etiquetagem - Lavadoras de Roupa Automáticas com Abertura Superior**. INMETRO. [S.l.], p. 12. 2018.

LAMBERTS, R. et al. **Casa Eficiente: Bioclimatologia e Desempenho Térmico**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, p. 346. 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; O. R. PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª. ed. Florianópolis, Santa Catarina: ELETROBRAS/PROCEL, 2014. 366 p.

MME. **Balço Energético Nacional - Relatório Final**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Brasília, p. 296. 2017.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. EnergyPlus, 2017. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 01 jan. 2018.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. OpenStudio, 2017. Disponível em: <<https://www.openstudio.net/>>. Acesso em: 01 jan. 2018.

NREL. Weather Data By Region. **EnergyPlus**. Disponível em: <[https://www.energyplus.net/weather-region/south\\_america\\_wmo\\_region\\_3/BRA%20%20](https://www.energyplus.net/weather-region/south_america_wmo_region_3/BRA%20%20)>. Acesso em: 08 jun. 2018.

OLGYAY, V. **Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism**. 4ª. ed. New Jersey: Princeton University Press, 1963. 224 p.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1ª. ed. São José dos Campos: [s.n.], 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.

RODRIGUES, L. J. **Notas de Aula. ENG 03074 - Engenharia Solar Fotovoltaica**. UFRGS. Porto Alegre. 2017.

SOLETROL. Como Funciona o Aquecedor Solar Soletrol. Disponível em: <<http://www.soletrol.com.br/extras/como-funciona-o-aquecedor-solar-soletrol/>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

TORCELLINI, P.; PLESS, S. **Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Practical Experiences**. NREL. Golden, Colorado. 2004.

TRIMBLE INC. SketchUp, 2017. Disponível em: <<https://www.sketchup.com/>>. Acesso em: 01 jan. 2018.

VETTORAZZI, E.; RUSSI, M.; SANTOS, J. C. P. D. **A utilização de estratégias passivas de conforto térmico e eficiência energética para o desenvolvimento de uma habitação unifamiliar**. UFSM. Santa Maria, p. 10. 2010.

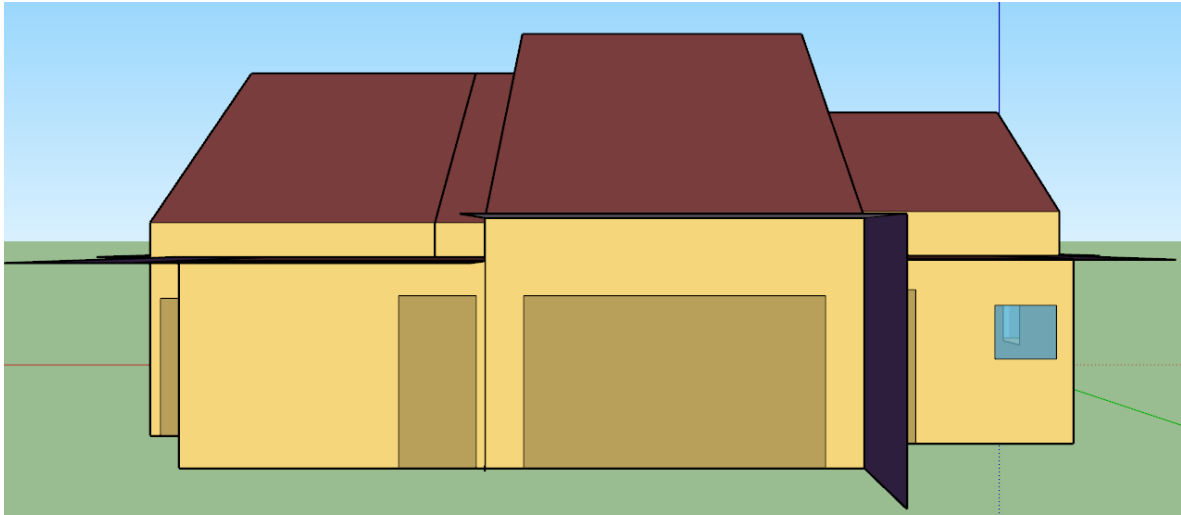
WEG. Automação - Inversores Fotovoltaicos SIW. **WEG**. Disponível em: <<http://static.weg.net/medias/downloadcenter/h2d/h89/WEG-inversores-solares-siw-50049414-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2018.

YOUR HOME AUSTRALIA. Disponível em: <[http://www.yourhome.gov.au/sites/prod.yourhome.gov.au/files/images/E-PVsystems-SolarPVProductsConfigs-01\\_fmt.png](http://www.yourhome.gov.au/sites/prod.yourhome.gov.au/files/images/E-PVsystems-SolarPVProductsConfigs-01_fmt.png)>. Acesso em: 20 abr. 2018.

## APÊNDICES

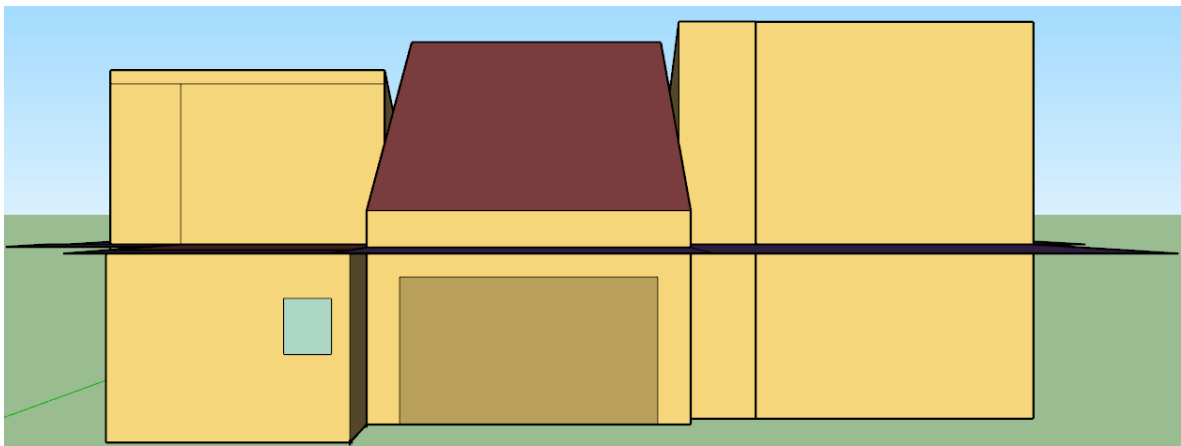
### Apêndice A – Vistas do modelo da residência

Figura 18 – Vista da fachada Norte do modelo.



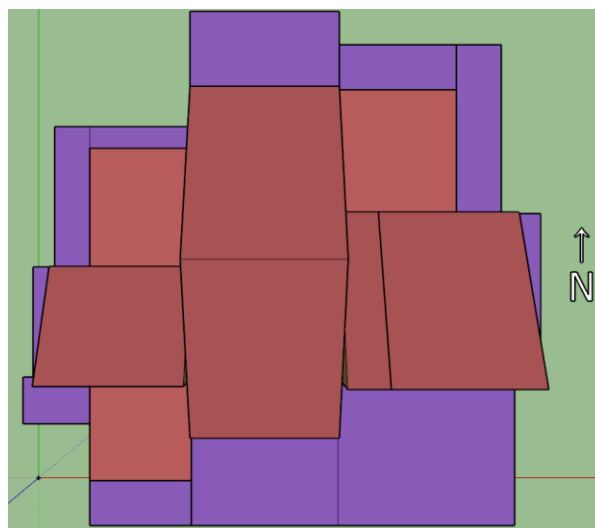
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 – Vista da fachada sul do modelo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 – Vista superior do modelo.

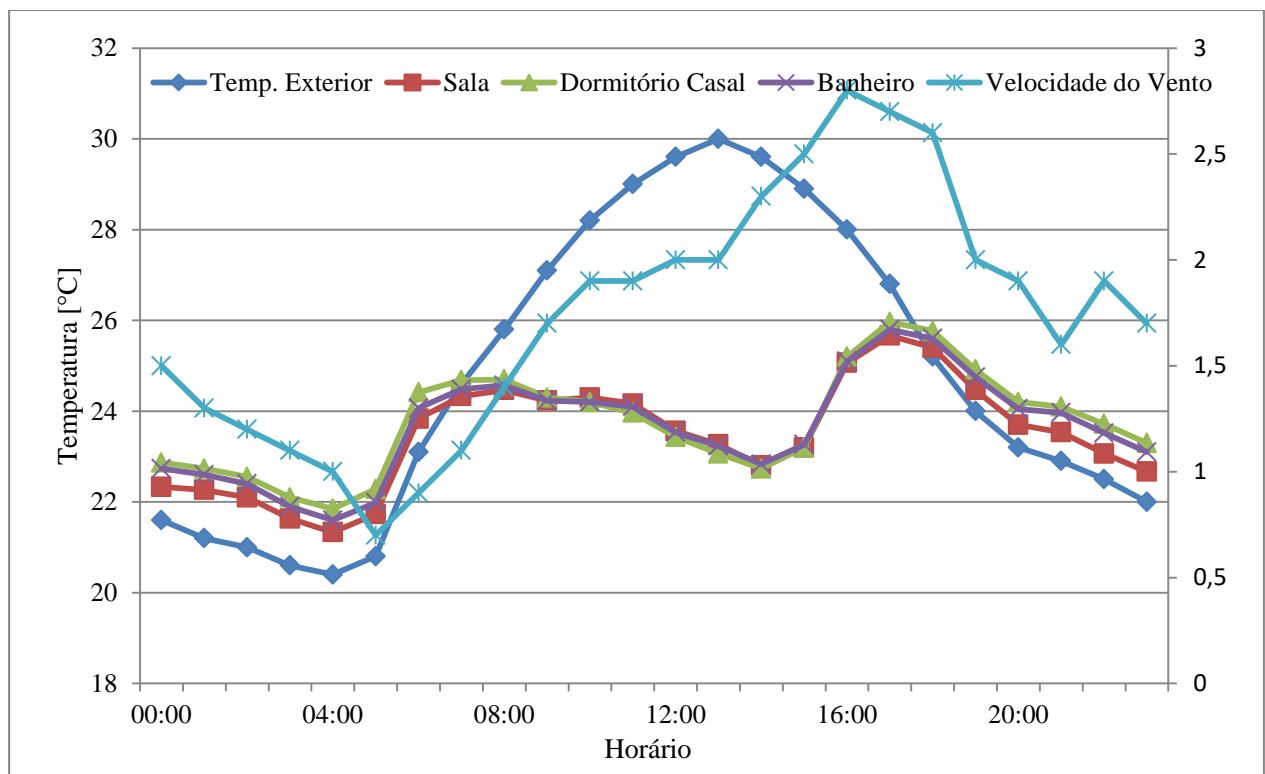


Fonte: Elaborado pela autora.

**Apêndice B** – Consumo de energia elétrica, considerando equipamentos convencionais e eficientes, comparados com o consumo de uma residência unifamiliar de Porto Alegre.

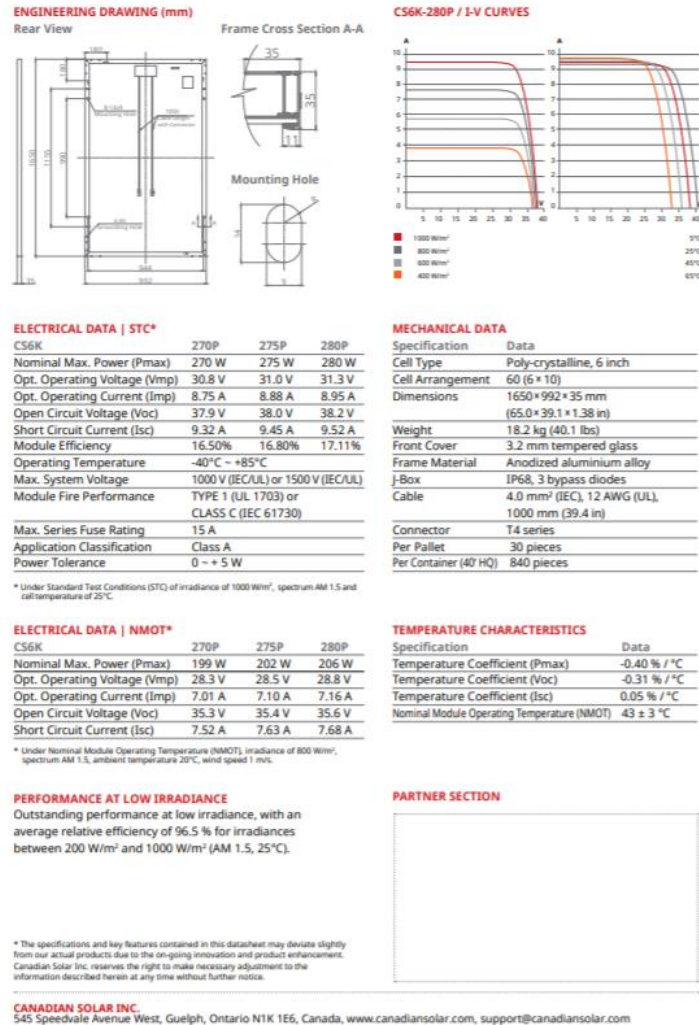
Mês	Casa Eficiente – Equipamentos Convencionais [kWh]	Casa Eficiente – Equipamentos Eficientes [kWh]	Simulação Porto Alegre – Equipamentos Convencionais [kWh]	Simulação Porto Alegre – Equipamentos Eficientes [kWh]	Residência Unifamiliar em Porto Alegre [kWh]
Janeiro	1300	380	806	275	314
Fevereiro	1150	360	728	249	307
Março	1180	390	806	275	229
Abril	620	270	780	266	319
Maiο	650	280	806	275	298
Junho	720	270	780	266	318
Julho	720	280	806	275	366
Agosto	750	280	806	275	350
Setembro	680	270	780	266	279
Outubro	790	390	806	275	293
Novembro	840	370	780	266	278
Dezembro	1010	380	806	275	307

**Apêndice C** – Temperaturas exterior e dos ambientes em março, em graus Celsius, em comparação à velocidade do vento, em m/s, ao longo do dia.



# ANEXOS

## Anexo A – Datasheet dos módulos fotovoltaicos utilizados no projeto



Fonte: Canadian Solar.

## Anexo B – Datasheet do inversor selecionado para o projeto fotovoltaico

### Inversor Monofásico SIW300

Modelo	SIW300 M015	SIW300 M025	SIW300 M050
	<b>Entrada (CC)</b>		
Tensão máxima	600 V		750 V
Faixa de tensão MPPT	160...500 V	260...500 V	175-500 V
Tensão nominal	360 V		400 V
Corrente máxima / por string	10 A		15 / 15 A
Número de MPPTs / strings por MPPT	1 / 1		2 / 2
	<b>Saída (CA)</b>		
Potência nominal	1.500 W	2.500 W	4.600 W
Tensão nominal	220 V		
Faixa de tensão	180-280 V		
Frequência da rede	60 Hz		
Corrente máxima	7 A	11 A	22 A
Eficiência máxima	97,20%		97%
	<b>Dados gerais</b>		
Dimensões (C / A / L) em mm	460 / 357 / 122		490 / 519 / 185
Massa	9,2 kg		26 kg
Faixa de temperatura de operação	-40...+60 °C		
Grau de proteção (IEC 60529)	IP65		
Categoria climática (IEC 60721-3-4)	4K4H		
Topologia	Transformerless		
Refrigeração	Convecção natural		
Ruído	<25 dB		
Garantia	Wi-Fi / EtherNet		Bluetooth / EtherNet

Fonte: WEG.

**Anexo C** – Características dos materiais utilizados no modelo de simulação.

Figura 21. Características dos materiais utilizados no modelo de simulação.

<b>Material</b>	<b>Espessura [cm]</b>	<b>Condutividade Térmica [W/m.K]</b>	<b>Massa Específica [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Calor Específico [J/kg.K]</b>	<b>Absortância</b>
Tijolo cerâmico maciço	10	0,900	1764	920	0,3
Argamassa para reboco	2,5	1,150	2000	1000	0,2
Concreto maciço	10	1,750	2200	1000	0,3
Telha cerâmica	1	1,050	2000	920	0,4
Telha metálica	0,1	112,00	7100	380	0,2
Madeira para forro	1,5	0,140	600	2300	0,7
Madeira para porta	3	0,150	600	1340	0,2
PVC para esquadria	1	0,200	1350	960	0,2
Polietileno aluminizado	0,5	0,400	1200	2299	0,3
Manta de lã de rocha	2,5	0,045	100	750	-
Polietileno extrudado	2	0,035	30	1420	-

Fonte: (LAMBERTS *et al.*, 2010)

Figura 22. Características das câmaras de ar utilizadas no modelo de simulação.

<b>Material</b>	<b>Resistência Térmica [m<sup>2</sup>.K/W]</b>
Câmara de ar de baixa emissividade, espessura >5,0 cm – fluxo descendente	0,61
Câmara de ar de alta emissividade, espessura >5,0 cm – fluxo descendente	0,21
Câmara de ar de baixa emissividade, espessura 3 cm – fluxo descendente	0,18

Fonte: (LAMBERTS *et al.*, 2010)

**Anexo D** – Temperaturas de bulbo seco e velocidades do vento para o meses estudados de um Ano Climático de Referência em Porto Alegre.

Horário	Março		Junho		Outubro		Dezembro	
	$V_p$ [m/s]	$T_{bs}$ [°C]	$V_p$ [m/s]	$T_{bs}$ [°C]	$V_p$ [m/s]	$T_{bs}$ [°C]	$V_p$ [m/s]	$T_{bs}$ [°C]
0:01- 1:00	1,2	21,4	0,9	14,2	1,7	17,6	1,5	21,6
1:01- 2:00	1,0	21,1	0,9	13,9	1,5	17,2	1,3	21,2
2:01- 3:00	1,0	20,9	1,0	13,8	1,3	17,0	1,2	21,0
3:01- 4:00	0,9	20,6	0,8	13,5	1,1	16,8	1,1	20,6
4:01- 5:00	0,9	20,3	0,8	13,2	0,9	16,7	1,0	20,4
5:01- 6:00	0,9	20,2	1,0	13,2	1,0	16,6	0,7	20,8
6:01- 7:00	0,9	20,4	0,9	12,9	1,2	18,0	0,9	23,1
7:01- 8:00	1,0	22,1	0,8	13,1	1,6	19,5	1,1	24,6
8:01- 9:00	1,4	23,7	0,9	14,1	1,8	21,0	1,4	25,8
9:01-10:00	1,7	24,7	1,1	15,7	1,9	22,4	1,7	27,1
10:01-11:00	1,8	25,7	1,5	17,1	1,9	23,4	1,9	28,2
11:01-12:00	1,8	26,8	1,7	18,5	2,1	24,2	1,9	29,0
12:01-13:00	2,0	27,1	1,7	19,2	2,1	24,9	2,0	29,6
13:01-14:00	2,0	27,7	1,8	19,7	2,2	25,1	2,0	30,0
14:01-15:00	2,1	27,8	1,8	20,0	2,5	25,1	2,3	29,6
15:01-16:00	2,3	27,5	1,7	19,4	2,5	24,7	2,5	28,9
16:01-17:00	2,6	26,6	1,6	18,3	2,8	23,4	2,8	28,0
17:01-18:00	2,3	25,5	1,2	17,0	2,7	21,9	2,7	26,8
18:01-19:00	1,9	24,0	1,4	16,2	2,7	20,4	2,6	25,2
19:01-20:00	1,8	23,3	1,5	15,6	2,2	19,6	2,0	24,0
20:01-21:00	1,8	22,9	1,5	15,2	2,0	19,1	1,9	23,2
21:01-22:00	1,4	22,5	1,3	14,9	2,1	18,6	1,6	22,9
22:01-23:00	1,5	22,2	1,2	14,7	1,8	18,1	1,9	22,5
23:01-24:00	1,3	21,7	1,0	14,4	1,7	17,9	1,7	22,0