

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
NÍVEL MESTRADO**

**HENRIQUE DE ARAUJO LAUFFER**

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL  
VERTICAL**

**SÃO LEOPOLDO  
2019**

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL VERTICAL

Henrique de Araujo Lauffer

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

São Leopoldo

2019



SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL VERTICAL

Henrique de Araujo Lauffer

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dra. Andrea Parisi Kern – PPGEC - Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dra. Ana Paula Mallmann – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

## **AGRADECIMENTO À CAPES**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, pelo apoio incondicional, por sempre incentivarem o melhor de mim, pela oportunidade de ter uma boa educação para que estivesse aqui e pelo exemplo de vida que sempre proporcionaram. Agradeço especialmente a minha esposa Alice Cassepp da Rocha pelo apoio, compreensão e incentivo durante todo programa de pós graduação.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. João Batista Dias e meu coorientador Prof. Dr. Paulo Roberto Wander pela orientação, compreensão e conhecimento compartilhado durante o trabalho. Agradeço também a todos professores, funcionários da UNISINOS e a CAPES pelo incentivo e fomento à pesquisa.

Agradeço aos meus amigos e as colegas que fizeram parte desta etapa. Em especial a Letícia Rech.

*“Boa sorte é o que acontece quando a oportunidade encontra o planejamento.”  
(Thomas Edison).*

## RESUMO

O Brasil enfrenta um aumento contínuo da demanda de energia, e um grande desafio para edifícios sustentáveis é reduzir o consumo de eletricidade e, ao mesmo tempo, suprir sua própria demanda de energia com autogeração. Os edifícios residenciais são responsáveis por 26% do consumo nacional de eletricidade. É necessário buscar novas fontes de energia para diversificar e complementar a matriz energética. A energia solar fotovoltaica integrada e/ou aplicada em edifícios está crescendo em todo o mundo e pode ser uma alternativa interessante para o Brasil devido às suas características modulares e à radiação solar disponível. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento energético de uma edificação residencial com geração de energia solar fotovoltaica aplicada na envoltória e comparar o desempenho de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas, local da edificação, diferentes orientações e, avaliar a possibilidade desta geração suprir o consumo típico de um edifício residencial. As simulações foram realizadas utilizando o software EnergyPlus para Porto Alegre/RS e Recife/PE. O modelo de construção é um típico edifício residencial e foi definido a partir do padrão de construção atual e dados estatísticos. Neste estudo se considera a aplicação de geração fotovoltaica em superfícies opacas do edifício com as tecnologias de silício monocristalino, multicristalino e amorfo, e das tecnologias CIGS e CdTe. O sistema fotovoltaico possui 1605 m<sup>2</sup> de área instalada de módulos e foi dividido em cinco subsistemas, um para as análises na cobertura e os demais para cada orientação das fachadas verticais. Para a cidade de Porto Alegre, todas as tecnologias apresentaram uma produção suficiente para suprir a demanda da edificação, já para a cidade de Recife, apenas a tecnologia a-Si não produziu energia suficiente para suprir a demanda. A tecnologia que apresentou a maior geração por unidade de área em Porto Alegre e Recife foi a de silício monocristalino, com produção de 140,7 kWh ano/m<sup>2</sup> e 146,6 kWh ano/m<sup>2</sup>, respectivamente. A partir dos resultados de geração, foram criadas relações entre a geração por área na cobertura versus a geração por área de fachada vertical. Para Porto Alegre, as fachadas verticais apresentam relações muito semelhante, exceto a fachada sul, sendo a fachada com melhor relação a leste com 1,73, seguida das fachadas norte com 1,75, oeste com 1,76, e a fachada sul apresentou uma relação de 3,30. Em Recife, a melhor fachada vertical para geração fotovoltaica é a fachada oeste, que apresentou uma relação de 1,39 vezes a área necessária para gerar a mesma quantidade de energia elétrica que a cobertura, seguida das fachadas leste com relação de 2,20, norte com 2,34 e por último a fachada sul com 2,69.

**Palavras-chave:** Energia solar fotovoltaica. BAPV. EnergyPlus. Edificação residencial. Desempenho energético. Geração fotovoltaica aplicada em edificações.

## ABSTRACT

Brazil faces a continuous increase in energy demand, and a major challenge for sustainable buildings is to reduce electricity consumption and at the same time supply its own energy demand with self-generation. Residential buildings account for 26% of national electricity consumption. It is necessary to seek new sources of energy to diversify and complement the electrical energy matrix. Photovoltaic solar energy integrated or applied in buildings is growing around the world and may be an interesting alternative to Brazil due to its modular features and available solar radiation. This work aims to analyze the energy behavior of a residential building with solar photovoltaic energy generation applied in the envelope and to compare the performance of different technologies of photovoltaic cells, building site, different orientations and evaluate the possibility of this generation to supply the typical consumption of a residential building. The simulations are performed using the EnergyPlus software for Porto Alegre/RS and Recife/PE. The building model is a typical residential building and has been defined from the current building pattern and the Brazilian statistical data. This study considers the application of photovoltaic generation on opaque surfaces of the building with monocrystalline silicon, multicrystalline, amorphous and also CIGS and CdTe technologies. The photovoltaic system has 1605 m<sup>2</sup> of installed module area and was divided into five sub-systems, to analyze the roof and the other four vertical façades orientation. For the city named Porto Alegre, all the technologies presented a sufficient production to supply the demand of the building electrical energy, but for Recife, only a-Si technology did not produce sufficient energy to supply the demand. The technology that presented the highest generation per unit area in Porto Alegre and Recife was monocrystalline silicon, with annual production of 140.7 kWh/m<sup>2</sup> and 146.6 kWh/m<sup>2</sup>, respectively. From the generation results, relationships between generation by area in the coverage versus generation by area of vertical facade were created. For Porto Alegre, the vertical façades have very similar relations, except for the south façade, with the façade with better relation to the east with 1.73, followed by the north façades with 1.75, the west with 1.76, and the south façade presented a ratio of 3.30. In Recife, the best vertical facade for photovoltaic generation is the west façade, which presented a ratio of 1.39 times the area required to generate the same amount of electricity as the roof, followed by the east façades with a ratio of 2.20, north with 2.34 and finally the south façade with 2.69.

Key words: Photovoltaic solar energy. BAPV. EnergyPlus. Residential building. Energy performance. Photovoltaic generation applied in buildings.

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Ganho de eficiência estimado em equipamentos eletrodomésticos no período de 2014 a 2024 .....	23
Tabela 2.2 – Consumo mensal médio residencial de energia elétrica por estado (kWh).....	29
Tabela 2.3 - Eficiências confirmadas do módulo terrestre medidas no espectro global AM1.5 (1000 W / m <sup>2</sup> ) a uma temperatura de célula de 25 ° C .....	33
Tabela 3.1 – Ocorrência das principais características das edificações residenciais brasileiras .....	44
Tabela 3.2 - Zonas térmicas da edificação residencial .....	45
Tabela 3.3 - Característica construtiva e parâmetros dos materiais do edifício residencial.....	46
Tabela 3.4 – Características de instalação dos subsistemas FV .....	52
Tabela 3.5 - Características dos módulos fotovoltaicos utilizados na simulação.....	53
Tabela 4.1 – Resumo do consumo e geração mensal de energia por tecnologia em Porto Alegre .....	61
Tabela 4.2 - Resumo do consumo e geração mensal de energia por tecnologia em Recife .....	62
Tabela 4.3 – Geração de energia por subsistema para os módulos de silício monocristalino..	65
Tabela 4.4 – Relações de geração anual de energia por área nos subsistemas e tecnologias para Porto Alegre.....	70
Tabela 4.5 - Relações de geração anual de energia por área nos subsistema e tecnologias para Recife.....	71

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Projeção do consumo de eletricidade e eficiência energética no setor residencial .....	23
Figura 2.2 - Oferta interna brasileira de energia elétrica por fonte .....	25
Figura 2.3 - Composição setorial do consumo de eletricidade.....	26
Figura 2.4 - Histórico da composição do consumo residencial por fonte de energia de 1975 à 2017 .....	27
Figura 2.5 - Composição do consumo residencial segundo SINPHA para a região Sul (a) com chuveiro elétrico e (b) sem chuveiro elétrico .....	28
Figura 2.6 - Curva de carga diária média dos equipamentos elétricos do setor residencial na (a) região Sul (b) região Nordeste .....	29
Figura 2.7 – Irradiação anual (kWh/m <sup>2</sup> ) em Florianópolis em relação a orientação e inclinação da superfície.....	31
Figura 2.8 – Tecnologias fotovoltaicas conforme classificação por gerações .....	32
Figura 2.9 - Evolução da eficiência dos módulos fotovoltaicos para diferentes tecnologias...	33
Figura 2.10 - Ilustração de um sistema de geração fotovoltaica conectada à rede.....	38
Figura 2.11 - Número de conexões de unidades consumidoras com geração distribuída e beneficiários dos créditos acumulado de 2012 a dezembro de 2018 no Brasil.....	40
Figura 2.12 - Número de conexões de geração distribuída por fonte de energia no Brasil.....	40
Figura 3.1 – Vista da edificação utilizada na simulação com o <i>EnergyPlus</i> .....	45
Figura 3.2 - Curva de carga diária dos equipamentos elétricos na simulação de um apartamento. ....	51
Figura 3.3 - Diagrama do sistema fotovoltaico da edificação .....	52
Figura 3.4 - Modelo tridimensional da edificação com sistema fotovoltaico integrado .....	56
Figura 3.5 – Imagens da edificação típica residencial com BIPV .....	56
Figura 4.1 - Temperatura média diária ao longo de um ano(mudar os tipos de linhas).....	57
Figura 4.2 - Irradiação média diária ao longo de um ano.....	58
Figura 4.3 – Distribuição do consumo médio anual em um apartamento em Porto Alegre.....	59
Figura 4.4 - Consumo de energia na edificação por mês e por tipo de uso final para Porto Alegre .....	59
Figura 4.5 - Distribuição do consumo anual em um apartamento em Recife .....	60
Figura 4.6 Consumo de energia na edificação por mês e por tipo de uso final para Recife.....	60
Figura 4.7 – Variação de geração por tecnologia entre Porto Alegre e Recife .....	63

Figura 4.8 – Eficiência operativa mínima, máxima e média de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos ao longo do ano por cidade .....	64
Figura 4.9 – Geração de energia mensal dos subsistemas com módulos de silício monocristalino para Porto Alegre.....	65
Figura 4.10 - Geração de energia mensal dos subsistemas com módulos de silício monocristalino para Recife.....	66
Figura 4.11 - Geração de energia fotovoltaica em um metro quadrado por subsistema ao longo do dia médio para Porto Alegre.....	67
Figura 4.12 - Geração fotovoltaica em um metro quadrado por subsistema ao longo do dia médio para Recife.....	68
Figura 4.13 – Relações de geração anual de energia por área nos subsistemas localizados em Porto Alegre.....	72
Figura 4.14 – Relações de geração anual de energia por área nos subsistemas localizados em Recife.....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	<i>Air Mass</i>
a-Si: H	Amorfo hidrogenado
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício Amorfo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BAPV	<i>Building Added/Attached Photovoltaic</i>
BIPV	<i>Building-Integrated Photovoltaic</i>
c.a.	Corrente alternada
c.c.	Corrente contínua
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio
CIS	Disseleneto de Cobre-Índio
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
COP	<i>Coefficient of performance</i>
CPV	Concentradores fotovoltaicos
c-Si	Silício Monocristalino
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
epw	<i>energyplus weather</i>
FV	Fotovoltaico
GD	Geração Distribuída
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadoria e Prestação de Serviços
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IRENA	Agência Internacional de Energias Renováveis

LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
mc-Si	Silício Multicristalino
NBR	Norma Brasileira Reguladora
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PNE	Plano Nacional de Energia
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RN	Resolução Normativa
SAM	<i>System Advisor Model</i>
SF	Sistemas Fotovoltaicos
SFCR	Sistema fotovoltaico conectado à rede
SFI	Sistema fotovoltaico isolado
SINPHA	Sistema de Informação de Posses e Hábitos de uso de Aparelhos Elétricos
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>
TF	Filmes finos
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
TRY	<i>Test Reference Year</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{surf}$	Área da superfície com módulos fotovoltaicos	[m <sup>2</sup> ]
$f_{activ}$	Fator de área fotovoltaica ativa	[-]
FF	Fator de Forma	[%]
G	Irradiância total incidente no módulo	[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>sc</sub>	Corrente de Curto Circuito	[A]
P	Potência elétrica	[W]
T <sub>c</sub>	Temperatura da célula	[°C]
T <sub>AMB</sub>	Temperatura de bulbo seco no ambiente externo à edificação	[°C]
T <sub>NOCT</sub>	Temperatura para condição normal de operação	[°C]
ΔT	Diferença de temperatura	[°C]
V <sub>oc</sub>	Tensão de circuito aberto	[V]
$\gamma_{PM}$	Coefficiente de perda de potência por aumento de temperatura	[%/°C]
$\eta_{NOCT}$	Eficiência NOCT	[%]
$\eta_{sistema}$	Eficiência do sistema fotovoltaico	[%]
$\eta_{STC}$	Eficiência STC	[%]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1 OBJETIVO .....	19
<b>1.1.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>19</b>
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	20
1.3 JUSTIFICATIVA .....	20
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	21
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>22</b>
2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	22
<b>2.1.1 Eficiência Energética em Edificações .....</b>	<b>24</b>
2.2 SETOR ELÉTRICO .....	24
<b>2.2.1 Perfil de Consumo Residencial .....</b>	<b>26</b>
2.3 ENERGIA SOLAR .....	30
<b>2.3.1 Energia Solar Fotovoltaica .....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.2 Tecnologias Fotovoltaicas .....</b>	<b>31</b>
2.3.2.1 Silício Monocristalino (c-Si) .....	33
2.3.2.2 Silício Multicristalino (mc-Si).....	34
2.3.2.3 Silício Amorfo (a-Si) .....	34
2.3.2.4 Telureto de Cádmio (CdTe).....	35
2.3.2.5 Disseleneto de Cobre-Índio e Cobre-Índio-gálio (CIS e CIGS).....	36
<b>2.3.3 Inversores .....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.4 Sistemas Fotovoltaicos .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3.5 Geração Distribuída.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.6 Energia Solar Aplicada em Edificações .....</b>	<b>41</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>43</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	43
<b>3.1.1 Caracterização da edificação.....</b>	<b>43</b>
3.1.1.1 Materiais Construtivos.....	46
3.2 DEFINIÇÃO DAS LOCALIDADES A SEREM APLICADAS NA SIMULAÇÃO .....	47
<b>3.2.1 Arquivo Climático .....</b>	<b>47</b>
3.3 PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZADO .....	48
<b>3.3.1 Simulações termoenergéticas .....</b>	<b>48</b>

<b>3.3.2 Padrões de Uso e Ocupação.....</b>	<b>50</b>
3.4 DEFINIÇÃO DAS TECNOLOGIAS E DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ESTUDADOS .....	51
3.5 APLICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NA EDIFICAÇÃO.....	55
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO EDIFÍCIO BASE .....	57
4.2 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA APLICADA NA ENVOLTÓRIA DA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL .....	61
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO I – PROPRIEDADES DE OCUPAÇÃO, EQUIPAMENTOS E CONSTRUTIVAS DE UMA EDIFICAÇÃO TÍPICA RESIDENCIAL.....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE A – PLANTAS BAIXAS DA EDIFICAÇÃO TIPO RESIDENCIAL .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE B – GERAÇÃO MENSAL POR ÁREA (KWH MÊS/M<sup>2</sup>) NAS DIFERENTES FACHADAS E TECNOLOGIA PARA A CIDADE DE PORTO ALEGRE E RECIFE .....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE C – GERAÇÃO POR ÁREA NAS DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO (KWH/M<sup>2</sup>) E PARTICIPAÇÃO NA GERAÇÃO ANUAL PARA PORTO ALEGRE (A) E RECIFE (B).....</b>	<b>86</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 70 com a crise do petróleo, o uso eficiente da energia, em especial a elétrica, está em pauta no mundo e iniciou-se os incentivos às fontes renováveis de energia e projetos de eficiência energética. Um dos principais objetivos é otimizar a cadeia energética, da produção até seu uso final, a fim de diminuir a emissão de poluentes oriundos da queima de combustíveis fósseis.

A eficiência energética consiste na possibilidade de utilizar menos energia para fornecer o mesmo valor energético. Promover a eficiência energética é utilizar o conhecimento no campo energético de forma aplicada, empregando os conceitos da engenharia, da economia e da administração aos sistemas energéticos (ELETROBRÁS, 2007). Programas que incentivam o uso eficiente de energia elétrica têm como objetivo o combate ao desperdício e o controle da demanda, assim possibilitam aliviar a expansão contínua do sistema elétrico.

A utilização de fontes renováveis de energia como soluções energéticas faz com que a matriz energética seja mais diversificada e mais limpa, pois estas fontes possuem uma participação pequena nas emissões de poluentes do tipo gases de efeito estufa em comparação com as fontes tradicionais fósseis.

A energia solar fotovoltaica é uma alternativa complementar aos sistemas energéticos tradicionais, por ser uma geração de energia limpa e com possibilidade de ser aplicada diretamente no local de consumo. É atualmente uma das fontes mais competitivas e promissoras para suprir o desenvolvimento energético da sociedade moderna. A energia gerada pelo Sol é considerada uma fonte de energia renovável, ou seja, inesgotável em escala terrestre tanto como fonte de luz, quanto como fonte de calor.

A geração independente de energia elétrica, que foi regulada a partir da Resolução Normativa 482 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2012), é uma alternativa interessante sob o ponto de vista do consumidor. Nos últimos anos o custo da geração de eletricidade a partir da energia fotovoltaica teve uma redução significativa, devido ao ganho de escala da produção de módulos fotovoltaicos no mundo. Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) (IRENA, 2016), o custo médio da eletricidade gerada por um sistema fotovoltaico deverá cair até 59% por volta de 2025, o que já fez com que a geração solar seja uma das formas mais baratas de produzir energia elétrica.

Os módulos fotovoltaicos de primeira geração (silício) respondem por cerca de 90% do mercado global, enquanto que a tecnologia de filmes finos (TF) representa apenas 10% do

mercado. Essa última (de segunda geração) pode ser subdividida em três tipologias sendo 5% correspondente às células de telureto de cádmio (CdTe), de silício amorfo com 2% e de disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) com outros 2%. Já os concentradores fotovoltaicos (CPV) participam com menos de 1% do mercado. Segundo a International Energy Agency (IEA, 2014), os sistemas de geração distribuída representam aproximadamente 60% do mercado global, enquanto os sistemas centralizados em torno de 40%, e os sistemas isolados (Off-grid) menos que 1%.

Embora a eficiência dos módulos com células de silício comercializadas no mercado mundial ao longo dos anos tenha demonstrado uma evolução nos últimos dez anos, a crescente demanda por uma solução com melhor relação custo-benefício e ao mesmo tempo com menor ocupação de áreas horizontais, propulsionou um rápido desenvolvimento de novas tecnologias fotovoltaicas.

Segundo Gunther, módulos de filme fino chegam atualmente a apresentar, em alguns casos, desempenhos melhores que os de silício cristalino com o menor custo, principalmente aqueles compostos por elementos calcogêneos como o telureto de cádmio (CdTe) ou o disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) (GUNTHER, 2015). Apesar das tecnologias de filme finos terem competitividade financeira, elas não possuem a mesma confiabilidade das tecnologias predominantes de silício mono e multi cristalino.

As edificações dos setores residencial, comercial e público consumiram 49,3% da energia elétrica no mundo em 2015 (IEA, 2017). No Brasil, estas edificações são responsáveis por 14,4% do consumo de energia e 43% do consumo da energia elétrica (EPE, 2018). O desafio para as edificações é a redução do consumo de energia através de ações de eficiência e geração local da energia. A grande disponibilidade de radiação solar é um fator significativo para o uso da tecnologia fotovoltaica. Sistemas fotovoltaicos podem ser aplicados e/ou integrados na edificação. Os módulos fotovoltaicos são mais usualmente aplicados na edificação através da cobertura e fachadas, mas pode também substituir elementos como proteção solar e vidros.

O conceito de *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV), ou sistema fotovoltaico integrado à edificação, vem contribuir no atendimento aos requisitos de desempenho do setor de construção civil no que tange a sustentabilidade e eficiência energética, além de favorecer no balanço energético brasileiro dentro do contexto do consumo de energia elétrica.

A flexibilidade e versatilidade de aplicação proporcionada pelos filmes finos torna essa tecnologia uma grande aliada do conceito BIPV, como elemento alternativo na parte

estrutural do envelopamento ou arquitetônico de um edifício, como telhados, fachadas, revestimentos de paredes, dispositivos de sombreamento ou janelas.

No entanto, sua aplicação como elemento integrado à estrutura do edifício, substituindo as vedações ou as fachadas, deve ser previamente avaliada, confrontando-se às características técnicas dos fabricantes com os requisitos das normas e regulamentações brasileiras, no que tange a engenharia e segurança na construção civil. Diante disso, a adoção de vidros fotovoltaicos em substituição aos vidros convencionais das edificações surge como alternativa mais simples e com maiores chances de aplicação neste momento.

Por outro lado, outro conceito denominado *Building Attached (ou Adapted) Photovoltaic* (BAPV), ou sistema fotovoltaico anexado (ou adaptado) à edificação, vem ganhando força no mercado mundial, pois permite o aproveitamento da área vertical disponível do edifício (fachadas cegas) sem a necessidade de interferência significativa na parte estrutural da construção. Além disso, possibilita a aplicação de tecnologias fotovoltaicas mais maduras, como as de primeira e de segunda geração.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho energético de uma edificação residencial com geração de energia solar fotovoltaica aplicada na envoltória e comparar o desempenho de diferentes tecnologias fotovoltaicas, localização geográfica, diferentes orientações das fachadas e cobertura e, avaliar a possibilidade desta geração suprir o consumo típico de um edifício residencial.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar e simular uma edificação residencial, perfil de utilização e o seu consumo;
- Comparar a demanda do consumo contra a geração estimada e avaliar a possibilidade de autonomia / geração do edifício;
- Comparar o desempenho energético sobre a geração de energia elétrica em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras;

- Avaliar o desempenho energético em duas diferentes tecnologias de células fotovoltaicas aplicadas nas superfícies da edificação;
- Analisar a geração de energia solar fotovoltaica na cobertura e nas fachadas para diferentes orientações;
- Estabelecer uma relação entre a geração de energia e a área de superfície instalada com módulos fotovoltaicos, em cobertura versus fachadas e suas orientações.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O trabalho limita-se a uma análise energética, em relação à geração de energia elétrica em uma edificação isolada a partir de sistemas fotovoltaicos, considerando todas as orientações a fim de quantificar a produção máxima e a participação de cada possibilidade de aplicação vertical na envoltória. Este estudo não considera impactos visuais, viabilidade e indicadores financeiros e montagem das estruturas.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente, o Brasil possui uma matriz de geração de energia elétrica majoritariamente renovável, porém, esta geração está centralizada em grandes usinas distante dos grandes centros de consumo, o que faz com que haja grandes perdas durante o processo de transmissão. O consumo residencial apresenta crescimento ao longo dos anos e a parcela de energia consumida por edificações residenciais, comerciais e de serviços públicos no Brasil é significativa. Estudos que relacionem edificações eficientes e que possuam geração *in loco* vêm sendo cada vez mais importantes, projetando os cenários futuros de demanda de energia em níveis brasileiro e mundial. Análises em edificações para avaliar o desempenho da geração em diferentes tecnologias fotovoltaicas e orientações ainda são escassas no Brasil, principalmente no setor residencial. A maioria dos estudos são em edificações comerciais, limitados a orientação e inclinação ótima dos sistemas fotovoltaicos ou aplicados somente na cobertura da edificação.

Com isso, justifica-se a necessidade de estudos que contribuam para a sustentabilidade do sistema elétrico brasileiro, onde se prevê uma demanda crescente e a necessidade de edificações mais eficientes e energeticamente mais independentes. O presente trabalho previu a análise de diferentes tecnologias fotovoltaicas aplicadas nas diversas superfícies da

edificação e assim avaliar o potencial de geração, não somente para a cobertura e fachada norte normalmente estudadas.

#### 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

O primeiro capítulo apresenta uma descrição sucinta acerca do contexto sobre o tema do trabalho, introduzindo os assuntos de eficiência energética, consumo de energia, geração distribuída e edificações com aplicação de geração fotovoltaica. Neste capítulo também é apresentado os objetivos, delimitação do trabalho e a justificativa do estudo.

O segundo capítulo apresenta a revisão da literatura, destacando as pesquisas que abordam o assunto de eficiência energética, o setor elétrico brasileiro com foco no consumo residencial e uma revisão sobre energia solar fotovoltaica e suas tecnologias e aplicações em edificações.

O terceiro capítulo expõe a metodologia utilizada para realização deste trabalho, a definição da edificação, escolha das localidades e dados de entrada do programa de simulação.

O quarto capítulo discorre sobre os resultados obtidos decorrentes das simulações computacionais realizadas. E, após isso, destaca-se no quinto capítulo as considerações finais e conclusões decorrentes do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo da dissertação é realizada uma abordagem teórica sobre os principais assuntos relacionados ao tema do trabalho.

### 2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética baseia-se em um conjunto de práticas e políticas, que têm como objetivo reduzir os custos com energia e aumentar a quantidade de energia oferecida sem aumento da geração.

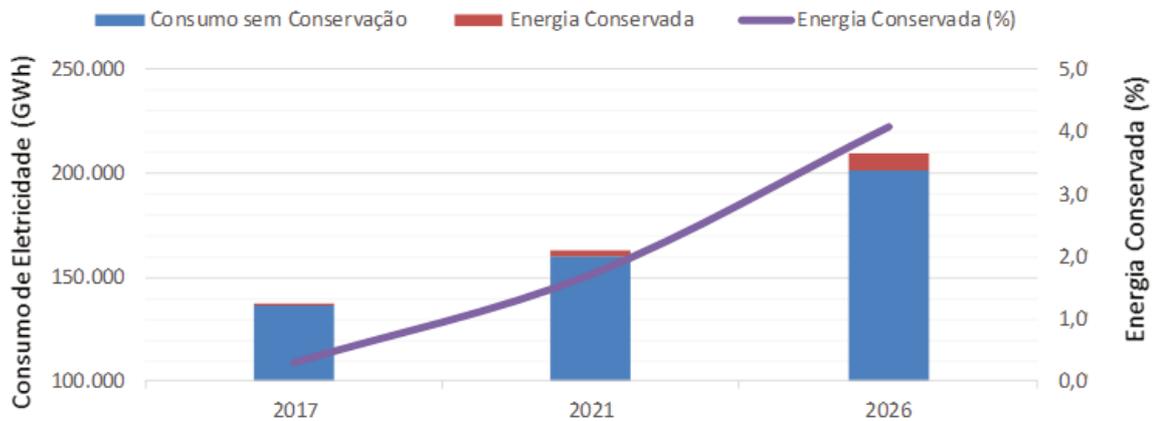
Na década de 70, com a crise energética gerada pelo mercado do petróleo, o uso eficiente da energia, em especial a elétrica, foi posto em pauta no mundo com objetivo de otimizar a cadeia energética, da produção até seu uso final. A fim de diminuir a emissão de poluentes oriundos da queima de combustíveis fósseis iniciou-se os incentivos às fontes renováveis de energia e projetos de eficiência energética.

Além da preocupação com a segurança energética, no início dos anos 90, o impacto das emissões de gases de efeito estufa tornou-se preocupação mundial devido à variação climática. Foram firmados acordos entre as nações para reduzir a emissão de poluentes e, para que isso fosse possível, tornou-se imprescindível a otimização da cadeia energética.

Uma das primeiras políticas de uso racional e eficiente de energia no setor elétrico brasileiro foi criada na década de 80, com a implantação do Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), da Eletrobrás. O uso de equipamentos e hábitos que provocam menor uso da energia para auferir o mesmo serviço prestado receberam o nome de medidas de eficiência energética.

Segundo o plano decenal de expansão de energia 2026 elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (EPE, 2017a) ilustrado na Figura 2.1, mostra que o Brasil, com programas no âmbito de eficiência energética, já apresenta um aumento na energia conservada, e a expectativa é que em 2026 a parcela de energia conservada alcance 4% do consumo total no setor residencial. Grande parte desta energia conservada se dá devido à retirada de equipamentos de iluminação incandescente do mercado e à substituição por lâmpadas fluorescentes e de LED (*Light Emitting Diode*) e à aquisição de equipamentos mais eficientes.

Figura 2.1 - Projeção do consumo de eletricidade e eficiência energética no setor residencial



Fonte: Adaptado de (EPE, 2017a)

Segundo o relatório de avaliação da eficiência energética e geração distribuída para os próximos 10 anos (2015-2024) (EPE, 2016a), o ganho de eficiência estimada para os equipamentos eletrodomésticos é apresentada na Tabela 2.1 no período de 2014 a 2024 em geral é positivo. As lâmpadas apresentam o maior percentual devido ao impacto estimado como consequência principalmente do banimento das lâmpadas incandescentes e à utilização das lâmpadas de LED. O percentual do chuveiro elétrico apresentou valor negativo, porém não significa que irá perder eficiência ao longo do tempo, mas traduz o resultado líquido do consumo unitário do equipamento em kWh. Estima-se que os chuveiros elétricos tenderão a ter maior potência à medida que as condições de renda da população aumentarem, e com o aumento de potência, aumenta o consumo individual o que acaba superando os ganhos de eficiência do equipamento.

Tabela 2.1 - Ganho de eficiência estimado em equipamentos eletrodomésticos no período de 2014 a 2024

Período	2019	2024
<b>Equipamento/Percentual</b>	(%)	(%)
Condicionador de Ar	3,4	4,7
Refrigerador	5,0	6,9
Freezer	7,6	9,0
Lâmpadas	40,4	58,5
Chuveiro elétrico	-1,9	-4,6
Máquina de lavar roupas	3,9	5,9
Televisor	2,9	4,1

Fonte: Adaptado de (EPE, 2016a)

### 2.1.1 Eficiência Energética em Edificações

A eficiência energética das edificações tem como objetivo torná-las sustentáveis energeticamente, mantendo suas condições adequadas de conforto ambiental, principalmente por meio de estratégias passivas, estratégias ativas eficientes e integração de ambas, além da produção de energia *in loco* a fim de suprir as próprias necessidades e eventualmente do entorno, reduzindo, assim, a demanda global (CGEE, 2017).

O consumo de energia nas edificações corresponde a cerca de 50% da energia elétrica nacional consumida (ABESCO, 2015). Segundo uma pesquisa realizada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), ações de eficiência energética praticadas durante uma reforma predial podem reduzir o consumo energético em até 30%; quando praticadas durante a construção do prédio, esta redução pode chegar até 50%. Tais indicadores ilustram a magnitude do impacto que a eficiência energética implica em um cenário nacional, pois, de acordo com estes índices, a redução máxima de consumo de energia elétrica para edificações que venham a ser modificadas, implicaria em uma redução de 15% da demanda nacional de energia elétrica (PROCEL, 2015).

## 2.2 SETOR ELÉTRICO

O Brasil possui um complexo sistema interligado de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O acesso à energia elétrica no Brasil é considerado um direito de todos os cidadãos. O crescimento natural da demanda de energia elétrica e a inserção de novas fontes de energia elétrica no sistema interligado nacional geram uma nova perspectiva no setor elétrico e novos desafios aos profissionais que atuam nas áreas de pesquisa, operação e planejamento.

A utilização de novas tecnologias e de processos alternativos que não consomem energia elétrica ou têm o potencial de reduzir o uso de energia elétrica, contribuem para a desaceleração do crescimento energético e para um planeta mais sustentável na utilização de recursos naturais.

Ações de eficiência energética, geração distribuída, armazenamento de energia, entre outros, são ferramentas que aliviam o sistema de distribuição e transmissão e com isso, o setor elétrico ganha tempo para o planejamento de projetos mais eficientes e produtivos, reduzindo

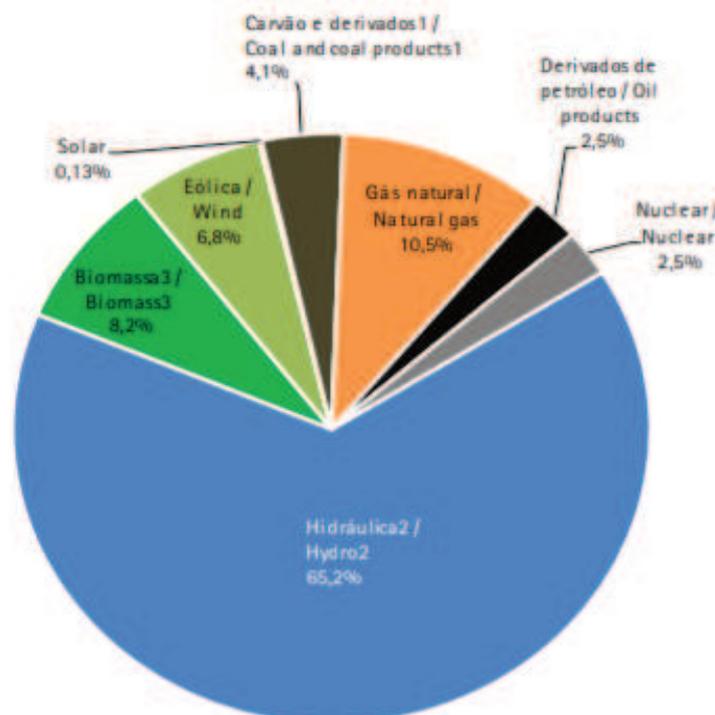
assim o aparecimento de projetos emergenciais que geralmente são menos eficientes e mais caros (MISZEWSKI, 2013).

Toda proposta de redução de demanda e de consumo de energia elétrica deve ser analisada e sua aplicação depende da comparação entre os custos da implantação do projeto e seus benefícios gerados. Em todas as classes de consumo há alternativas na realização de processos de eficiência energética. Este trabalho é focado nas alternativas de eficiência energética para o perfil de uso residencial.

A geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu 588,0 TWh em 2017, resultado 1,6% superior ao de 2016 (EPE, 2018).

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, como ilustrado na Figura 2.2, com destaque para a geração hidrelétrica que responde por 65,2% da oferta interna. As fontes renováveis representam 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2018).

Figura 2.2 - Oferta interna brasileira de energia elétrica por fonte

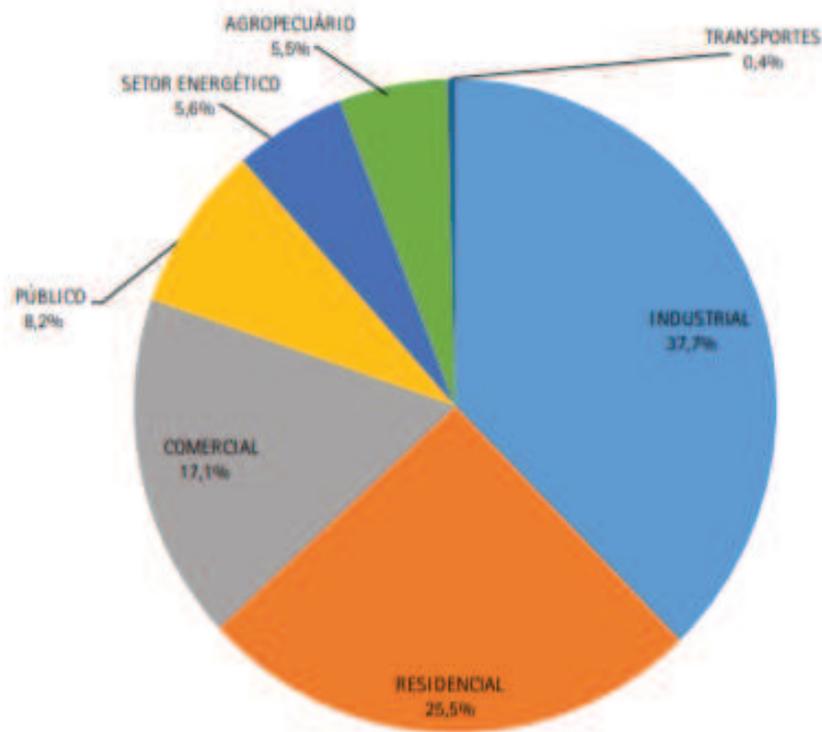


Fonte: Balanço Energético Nacional 2018 (EPE, 2018)

Segundo o Balanço Nacional de Energia 2018 (EPE, 2018), o consumo de eletricidade no Brasil no ano de 2017 apresentou um crescimento de 0,9% chegando a 526,2 TWh. A

Figura 2.3 mostra a composição setorial do consumo de eletricidade no Brasil com destaque para o setor residencial, avançando 0,9%. A maior parte da eletricidade consumida no Brasil é destinada às indústrias e em seguida ao setor residencial que em 2017 atingiu 25,5% de toda eletricidade consumida no território nacional com um consumo equivalente a 133,98 TWh.

Figura 2.3 - Composição setorial do consumo de eletricidade

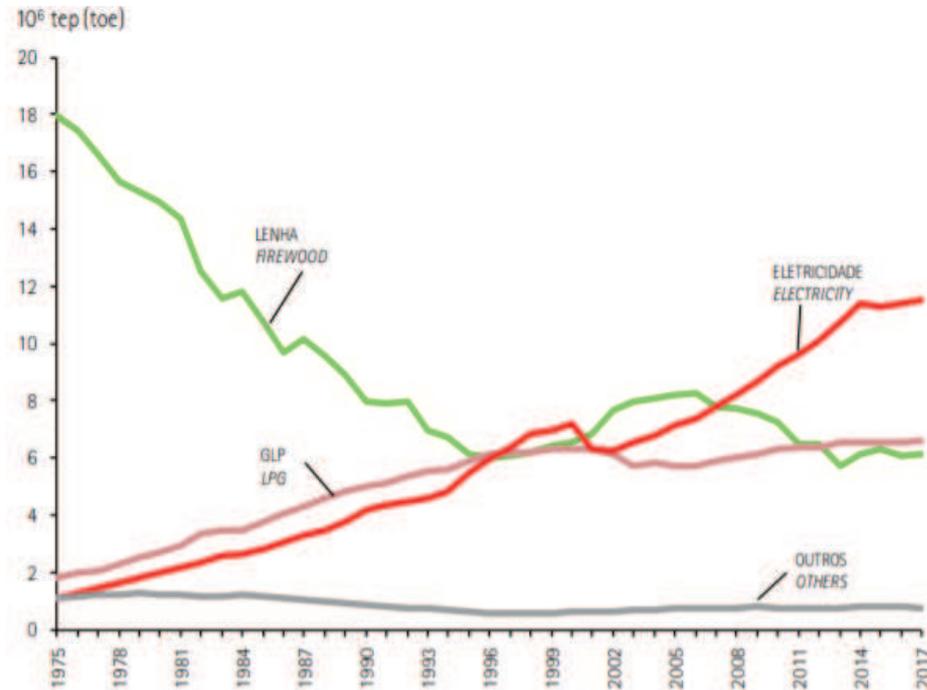


Fonte: Balanço Energético Nacional 2018 (EPE, 2018)

### 2.2.1 Perfil de Consumo Residencial

Segundo o Balanço Nacional de Energia de 2018, a eletricidade correspondeu em 2017 a 46,1% da energia final consumida no setor residencial (EPE, 2018). A participação da fonte de energia por eletricidade nas residências brasileiras vem crescendo ao longo dos anos conforme ilustra o histórico da composição do consumo de energia por fonte no período de 1975 a 2017. Atualmente é a principal fonte de energia das residências brasileiras e com perspectiva de crescimento, conforme mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Histórico da composição do consumo residencial por fonte de energia de 1975 à 2017



Fonte: Balanço Energético Nacional 2018 (EPE, 2018)

Segundo o plano decenal de expansão de energia 2026 (EPE, 2017a) e o Balanço energético nacional (EPE, 2018), espera-se que o consumo per capita cresça, e o consumo elétrico do setor residencial passe de 132,9 TWh/ano em 2016 para 194 TWh/ano em 2026, assim, com um crescimento de aproximadamente 46% neste período.

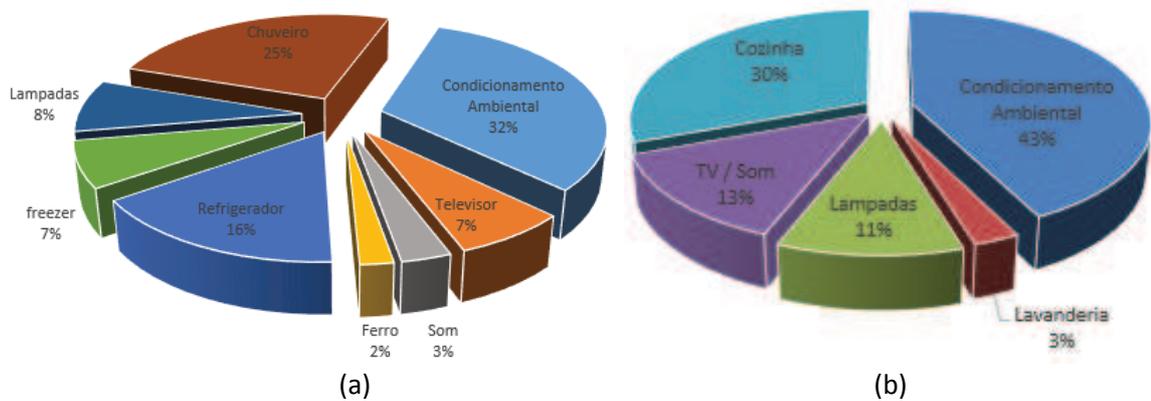
Uma pesquisa realizada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) em parceria com o Sistema de Informação de Posses e Hábitos de uso de Aparelhos Elétricos (SINPHA) no ano de 2005 (PROCEL, 2005) trouxe informações referentes ao perfil de consumo de unidades residenciais de todo o Brasil. Para a região Sul, foram realizadas amostras em clientes das concessionárias COPEL, CEEE-D, CELESC e RGE.

A pesquisa realizada pelo SINPHA aponta que 98,6% dos domicílios da região Sul utilizavam a energia elétrica como forma de aquecimento de água, o que torna a região sul a que mais utiliza o chuveiro elétrico para aquecimento de água para banho (PROCEL, 2005).

Nas regiões Sudeste e Sul, onde há temperaturas mais baixas, há uma participação maior de gastos com a utilização do chuveiro elétrico em relação a outras regiões do Brasil devido ao clima subtropical local. Conforme mostra a Figura 2.5 (a), para a região Sul, o consumo de energia com chuveiro elétrico é de 25% do total consumido por uma residência.

Além do chuveiro elétrico, outro uso final da eletricidade que apresenta uma grande parcela do consumo, segundo a Figura 2.5(a), é o condicionamento de ar que representa 32%, devido ao inverno e verão intensos nesta região. Quando se analisa o perfil de consumo sem a utilização do chuveiro elétrico na Figura 2.5(b), a proporção das demais utilizações aumentam, tornando os equipamentos utilizados para condicionamento ambiental os maiores responsáveis pelo consumo com 43%, seguido de demais equipamentos elétricos.

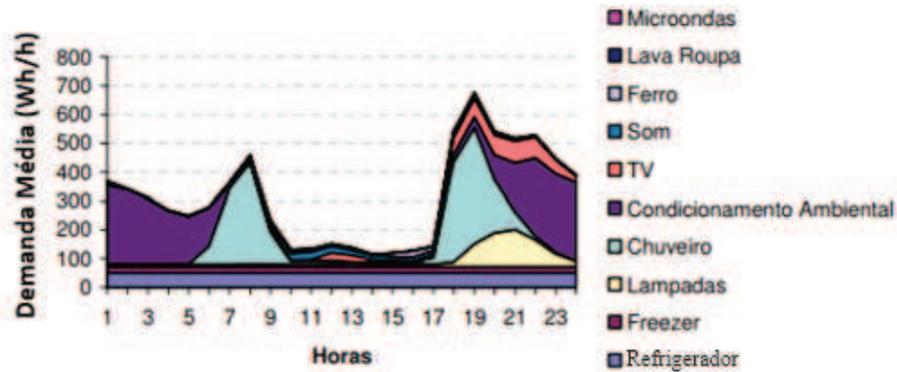
Figura 2.5 - Composição do consumo residencial segundo SINPHA para a região Sul (a) com chuveiro elétrico e (b) sem chuveiro elétrico



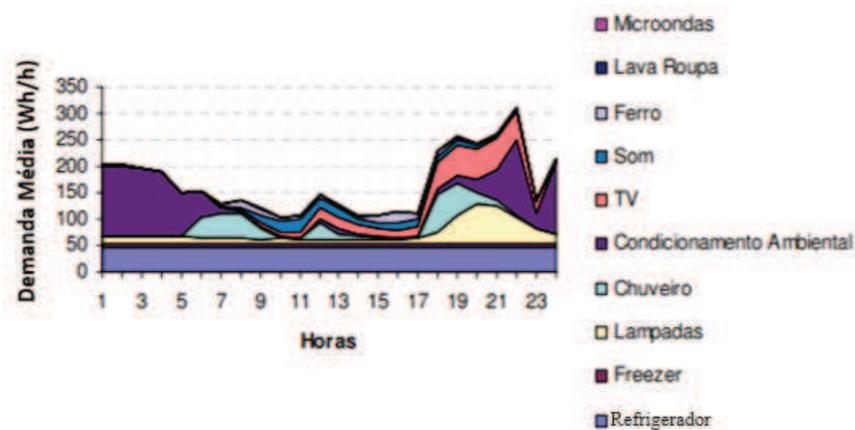
Fonte: Adaptado de (PROCEL, 2005)

Com base na pesquisa do SINPHA, o PROCEL elaborou a pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso (PROCEL, 2007), o chuveiro elétrico é um dos maiores problemas quando analisado o uso de energia elétrica em uma residência, uma vez que o chuveiro elétrico possui uma demanda alta e um uso final questionável quanto à utilização de uma energia nobre para aquecimento de água. Além disso, o chuveiro elétrico devido à sua potência demandada é hoje um dos principais problemas no sistema elétrico, por sua utilização ser concentrada em dois horários fazendo a demanda da rede do sistema elétrico estar preparada para suprir este uso nas residências. Na Figura 2.6 são apresentadas as curvas de carga típica de uma residência da região sul e da região nordeste, onde é apresentado a demanda elétrica média por faixa horária. Para a região sul pode-se observar dois picos devido ao chuveiro elétrico e uma demanda média superior à região nordeste. Pode-se observar também um perfil de consumo bastante diferente para as regiões, onde para o nordeste a carga é mais estável quando comparado ao sul.

Figura 2.6 - Curva de carga diária média dos equipamentos elétricos do setor residencial na (a) região Sul (b) região Nordeste



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de (PROCEL, 2007)

Conforme o relatório Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2017, são apresentados os dados relacionados ao consumo de energia elétrica dos anos de 2012 a 2016 na rede de distribuição brasileira. Na Tabela 2.2 é apresentado o consumo médio residencial para os estados Rio Grande do Sul e Pernambuco, os quais serão utilizados para simulações comparativas ao longo do trabalho.

Tabela 2.2 – Consumo mensal médio residencial de energia elétrica por estado (kWh)

Local	2012	2013	2014	2015	2016
Rio Grande do Sul	176,7	181,3	194,1	180,0	182,1
Pernambuco	118,0	129,9	131,2	130,0	127,4

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017b)

### 2.3 ENERGIA SOLAR

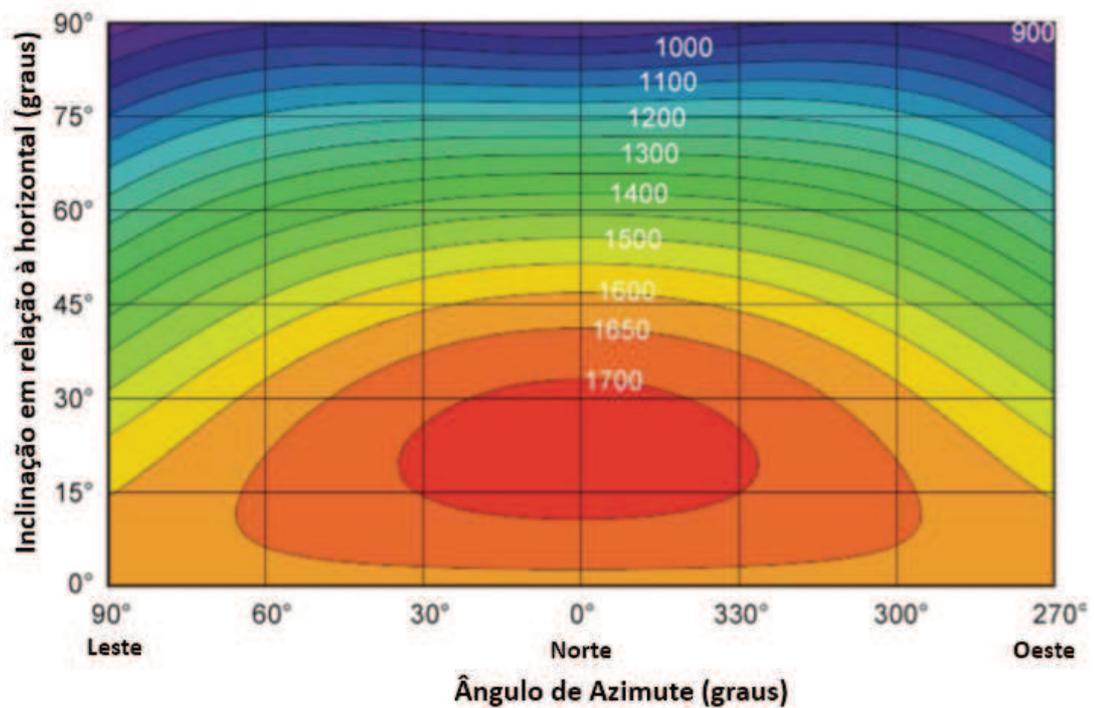
A energia solar é a energia proveniente da radiação eletromagnética produzida pelo Sol. A radiação solar incide sobre a superfície da Terra fornecendo a energia necessária para a existência de vida no planeta. A energia gerada pelo Sol é considerada uma fonte de energia inesgotável em escala terrestre tanto como fonte de luz quanto de calor.

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar de 2006, o Brasil possui altos índices de radiação solar em seu território. Os valores diários médios para um ano de irradiação solar no plano horizontal em regiões do território brasileiro estão entre 4,2 e 6,7 kWh/m<sup>2</sup>, muito superiores a países como por exemplo a Alemanha, que possui forte incentivo governamental para aproveitamento de recursos solares (PEREIRA, *et al.*, 2006). A irradiação solar possui uma distribuição variável em função do dia, mês e localização geográfica. Estes valores são fornecidos por diversas fontes e órgãos nacionais e internacionais.

A radiação que atinge um módulo fotovoltaico é dividida em três componentes, a radiação direta proveniente diretamente do sol, a radiação difusa, proveniente do espalhamento através da camada atmosférica e a radiação de albedo, devido às reflexões de superfícies próximas. A soma destas três componentes é considerada a radiação total que atinge a superfície do módulo fotovoltaico.

A inclinação de um módulo em ângulo próximo à latitude local e orientado ao norte geográfico quando instalado no hemisfério sul possibilita o maior aproveitamento da energia solar, isto devido à inclinação do eixo terrestre em relação a órbita solar. Conforme ilustrado na Figura 2.7, que apresenta a variação nos níveis de radiação recebida por um corpo conforme sua inclinação e azimute (BURGER e RÜTHER, 2006), pode-se perceber que quanto mais afastado do ponto ótimo relacionado à uma orientação ao norte e uma inclinação próxima à latitude, no caso de um módulo fotovoltaico, este recebe menos energia solar e consequentemente produz menos energia elétrica. Portanto, o posicionamento diferente do ideal, por motivos técnicos ou estéticos, acarreta em perdas no potencial de geração.

Figura 2.7 – Irradiação anual (kWh/m<sup>2</sup>) em Florianópolis em relação a orientação e inclinação da superfície



Fonte: Adaptado de (BURGER e RÜTHER, 2006)

### 2.3.1 Energia Solar Fotovoltaica

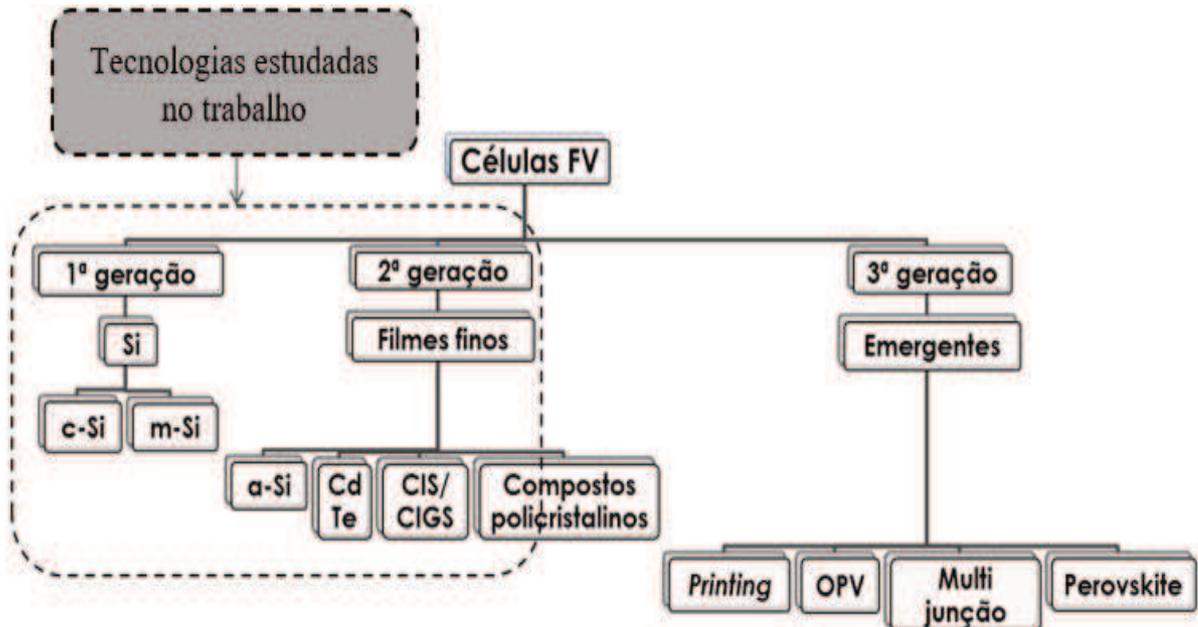
A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da radiação solar em eletricidade, que é conhecido como efeito fotovoltaico.

Segundo pesquisa realizada pela EPE (EPE, 2016b), estima-se que no ano 2050 a participação da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira será de 13%, o que representará um grande crescimento desta fonte que em 2017 representava aproximadamente 0,01%.

### 2.3.2 Tecnologias Fotovoltaicas

As tecnologias fotovoltaicas usualmente são agrupadas em três categorias conforme a geração, como mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Tecnologias fotovoltaicas conforme classificação por gerações



Fonte: Adaptado de (NAKANO, 2017).

As células fotovoltaicas podem ser classificadas de acordo com as tecnologias empregadas em sua construção. A tecnologia conhecida como primeira geração é constituída em células que possuem uma única superfície, usualmente de silício mono ou multicristalino. Este tipo de célula está consolidado no mercado e atualmente é o mais produzido.

A segunda geração refere-se às células de filmes finos. Estas possuem espessura cerca de 100 vezes menor que uma célula de silício cristalino, possuem um processo de fabricação mais simples e com isso um menor custo, porém, a eficiência ainda é inferior quando comparada com o silício cristalino (ALMEIDA, 2012). O terceiro agrupamento é formado pelas tecnologias mais recentes chamadas de emergentes.

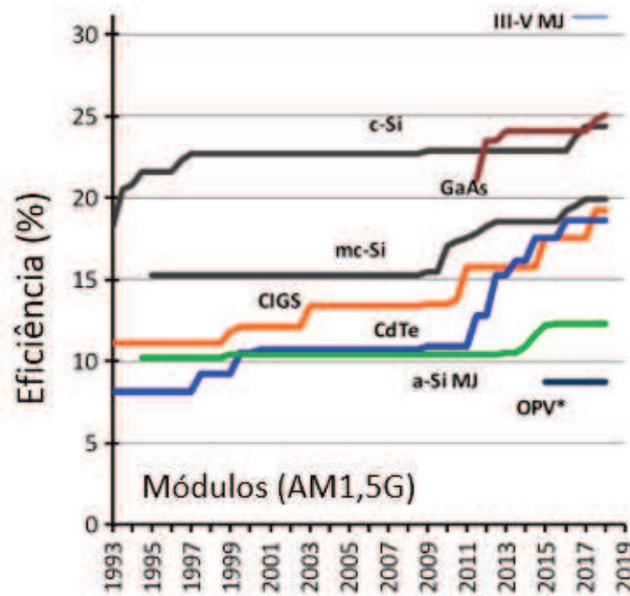
Um módulo fotovoltaico é composto por células associadas em série. Conforme acompanhamento da eficiência de módulos fotovoltaicos desde 1993 (GREEN, *et al.*, 2018), estes apresentam a máxima eficiência observada em diversos módulos e tecnologias na conversão fotovoltaica. Em sua última publicação foram mostrados os últimos avanços de eficiência em diversos tipos de tecnologia conforme ilustra a Tabela 2.3 assim como a evolução destas ao longo dos últimos 25 anos conforme a Figura 2.9.

Tabela 2.3 - Eficiências confirmadas do módulo terrestre medidas no espectro global AM1.5 (1000 W / m<sup>2</sup>) a uma temperatura de célula de 25 ° C

Tecnologia	Eficiência (%)	Área (cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	Isc (A)	FF (%)	Centro de Teste (data)	Descrição
c-Si (cristalino)	24,4 ± 0,5	13177	79,5	5,04	80,1	AIST (9/16)	Kaneka (108 células)
mc-Si (multicristalino)	19,9 ± 0,4	15143	78,9	4,80	79,5	FhG-ISE (10/2016)	Trina solar (120 células)
CIGS	19,2 ± 0,5	841	48,0	0,46	73,7	AIST (01/17)	Solar frontier (70 células)
CdTe	18,6 ± 0,5	7039	110,6	1,53	74,2	NREL (5/15)	First solar (monolítico)
a-Si/nc-Si	12,3 ± 0,3	14322	280,1	0,90	69,9	ESTI (9/14)	TEL Solar
Orgânica	8,7 ± 0,3	802	17,5	0,57	70,4	AIST (5/14)	Toshiba

Fonte: Adaptado de (GREEN, *et al.*, 2018)

Figura 2.9 - Evolução da eficiência dos módulos fotovoltaicos para diferentes tecnologias



Fonte: Adaptado de (GREEN, *et al.*, 2017)

### 2.3.2.1 Silício Monocristalino (c-Si)

Os módulos de silício monocristalino possuem uniformidade decorrente de um cristal único que permite um efeito fotovoltaico próximo ao ideal. É considerado a vanguarda da energia solar fotovoltaica. A eficiência desta tecnologia continua sendo umas das maiores

dentre todas tecnologias, chegando a valores hoje em torno de 24% sob as condições de teste conforme a Tabela 2.3 (GREEN, *et al.*, 2018). Salvo módulos com características especiais, dispositivos baseados em células de silício monocristalino possuem eficiências na faixa de 13 a 18%.

#### 2.3.2.2 Silício Multicristalino (mc-Si)

Assim como os módulos de silício cristalino, esta tecnologia é constituída por silício, porém o processo de fabricação é mais simples, pois são utilizados inúmeros cristais de silício como semicondutores, fabricados mediante um processo de fundição do silício em estado bruto e depois esfriado, formando vários cristais, sendo denominado de multicristalino. Este processo simplificado e de descontinuidade da estrutura molecular proporciona uma redução de custo de produção, porém apresenta uma eficiência menor quando comparado com o módulo monocristalino, podendo chegar à eficiência de aproximadamente 20% (GREEN, *et al.*, 2018). A eficiência de módulos com células policristalinas normalmente está na faixa de 12% a 16%.

#### 2.3.2.3 Silício Amorfo (a-Si)

O silício amorfo é uma tecnologia que surgiu como uma alternativa na geração de energia fotovoltaica. As células de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) são fabricadas dispendo finas camadas de silício em um substrato. As células de silício amorfo possuem uma estrutura com uma rede cristalina não uniforme apresentando muitas ligações pendentes e formação de lacunas, que tendem a prejudicar o fluxo de corrente através delas. A hidrogenação do silício amorfo traz um benefício na eficiência da célula com a ocupação de parte dos buracos pelos hidrogênios.

Comparada às demais tecnologias que utilizam o silício como matéria prima, seu custo de produção é menor pois possui sua estrutura atômica desorganizada e ligações saturadas devido ao acréscimo de hidrogênio. Possui atualmente uma faixa de eficiência atingindo o patamar de 12%, é apresentado na Tabela 2.3 sendo que os valores normalmente praticados no mercado estão na faixa de 6 a 9% (GREEN, *et al.*, 2018).

Uma vantagem do silício amorfo em relação ao silício cristalino é a taxa de redução da potência em função do aumento da temperatura da célula, que ocorre em menores níveis.

A concepção de filme fino possibilita a utilização desta tecnologia em diversos tipos de materiais, como vidro, janelas, metais e plásticos, podendo ser flexíveis permitindo deformações. Outra vantagem do silício amorfo é obtida pela sua elevada absorção ótica na faixa do espectro da radiação visível, com uma eficiência 40 vezes maior que o silício monocristalino, o que permite que uma lâmina de apenas 1  $\mu\text{m}$  seja capaz de absorver 90% da energia solar útil (LASNIER e ANG, 1990). Além disso, essa tecnologia tem a sua resposta espectral mais voltada para a região do azul do espectro de frequência, levando a um aumento de eficiência sob a radiação difusa.

#### 2.3.2.4 Telureto de Cádmio (CdTe)

As células de Telureto de Cádmio possuem junções múltiplas que têm por função aumentar a eficiência da célula, com base na absorção de uma porção maior do espectro solar. As diferenças das sensibilidades espectrais entre os tipos de materiais podem ser exploradas sobrepondo-os em camadas, formando assim várias junções p-n dispostas de tal forma a absorver uma amplitude maior do espectro de frequência.

Estas células podem possuir eficiências próximas as das tecnologias de silício multicristalino, em função de seu alto grau de absorvidade ótica. A diferença está no custo de materiais aplicados em cada tecnologia, sendo que para produzir a célula de CdTe é necessário o correspondente a 1 % ou 2 % do material requerido para a tecnologia mc-Si (NAKANO, 2017).

As células de telureto de cádmio foram consideradas como uma tecnologia promissora em aplicações para a geração de energia solar, porém vêm enfrentando as dificuldades em relação aos impactos ambientais destes elementos, o que fez com que não se investisse em grande escala como nas células de silício. Ao longo dos últimos anos, esta tecnologia vem evoluindo sua eficiência conforme a Figura 2.9 apresentando uma eficiência superior a 18% (GREEN, *et al.*, 2017).

### 2.3.2.5 Disseleneto de Cobre-Índio e Cobre-Índio-gálio (CIS e CIGS)

Atualmente uma das tecnologias mais estudadas para aplicações fotovoltaicas é a tecnologia CIS. Esta tecnologia tem como material base o disseleneto de cobre e índio e, quando esta base possui também o elemento gálio é conhecida como CIGS. Esta tecnologia torna-se interessante, pois comparada ao silício amorfo, possui uma eficiência maior, que atualmente supera os 19%, conforme Figura 2.9. O CIGS também apresenta melhor estabilidade quando exposta à radiação solar. Além disto quando se compara com o CdTe, o CIS/CIGS não possui em sua estrutura elementos tóxicos como o cádmio (GREEN, *et al.*, 2017).

### 2.3.3 Inversores

Os módulos fotovoltaicos (FV) produzem energia em corrente contínua (c.c), porém a grande maioria das cargas opera com corrente alternada (c.a) assim é necessário o uso de conversores c.c/c.a., conhecidos como inversores. Sua função é de converter a tensão contínua proveniente dos módulos e/ou baterias em tensão alternada senoidal, com a mesma frequência e amplitude da rede elétrica, fornecendo energia com a qualidade exigida pelas normas.

Os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos podem ser caracterizados de duas formas gerais, primeiro como inversores isolados quando atuam em sistemas fotovoltaicos isolados (SFI), sendo que neste caso são alimentados pelo banco de baterias e fornecem energia diretamente para as cargas em uma rede isolada. Já a segunda forma como inversores conectados à rede, quando atuam em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR), neste caso são alimentados diretamente pelos módulos fotovoltaicos, e injetam a energia gerada em uma rede, para que através desta alimentem as cargas. Ambos os tipos têm o mesmo princípio de funcionamento, porém os inversores conectados à rede precisam atender algumas normas das distribuidoras, necessitando de uma rede elétrica para se conectar, não podendo funcionar sem a presença da rede da concessionária, sendo providos de proteção anti-ilhamento desconectando-se de forma automática na ausência da rede externa.

### 2.3.4 Sistemas Fotovoltaicos

Os Sistemas Fotovoltaicos (SF) podem ser classificados basicamente em duas categorias principais: isolados ou conectados à rede. A utilização de cada uma dessas opções dependerá da aplicação e/ou da disponibilidade de recursos energéticos.

Sistemas autônomos ou isolados e híbridos, em geral, necessitam de algum tipo de armazenamento para que se possam utilizar os equipamentos elétricos nos períodos onde não há geração fotovoltaica, como por exemplo à noite. Este armazenamento normalmente é realizado através de baterias.

Sistemas híbridos são aqueles nos quais existe mais de uma forma de geração de energia, como por exemplo, um gerador diesel, turbinas eólicas e módulos fotovoltaicos.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são aqueles em que a energia gerada pode ser entregue diretamente à rede elétrica da concessionária. O sistema de distribuição recebe a energia e por meio de compensação o consumidor pode utilizar esta energia em horários onde não há geração suficiente para suprir sua demanda energética. Nesta configuração é indispensável que se utilize um inversor, o qual deve satisfazer as exigências de segurança e qualidade para que não degrade a rede elétrica na qual o mesmo está interligado.

Um sistema fotovoltaico conectado à rede clássico é ilustrado na Figura 2.10, onde o conjunto de módulos fotovoltaicos (1) geralmente instalado sobre o telhado da edificação, capta a radiação solar e a converte em eletricidade, a qual é disponibilizada pelos módulos em corrente contínua. Então a corrente passa pelo inversor (2), que é um dispositivo que converte a corrente contínua em corrente alternada, compatível com a rede elétrica local e com a maioria dos equipamentos que são utilizados nas residências. O inversor também possui dispositivos internos de proteção ao sistema e às pessoas que fazem manutenção na rede, pois quando a rede é desligada por algum motivo, este equipamento detecta e se desconecta da mesma. A energia entregue pelo inversor passa pelo quadro geral da instalação e caso a demanda da carga seja inferior à geração, esta energia é entregue para rede através de um medidor bidirecional (3) que registra este balanço de entrada e saída de geração para que no final do mês a concessionária faça o balanço e realize o faturamento conforme o consumo e geração. No sistema também pode ter uma unidade de monitoramento (4), conforme instalação.

Figura 2.10 - Ilustração de um sistema de geração fotovoltaica conectada à rede



Fonte: (PRATIL, 2016)

### 2.3.5 Geração Distribuída

A possibilidade de um consumidor brasileiro ter um sistema fotovoltaico para poder gerar a própria energia elétrica e, inclusive, fornecer o excedente para a rede de distribuição local foi iniciada com a Resolução Normativa (RN) 482 de 2012 da ANEEL. Esta resolução estabelece as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e ao sistema de compensação de energia elétrica. A energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 36 meses. O consumo de energia elétrica ativa a ser faturado é a diferença entre a energia consumida e a injetada, por posto tarifário, devendo a distribuidora utilizar o excedente que não tenha sido compensado no ciclo de faturamento corrente para abater o consumo medido em meses subsequentes. A potência do sistema fotovoltaico fica limitada à carga instalada no caso de unidade consumidora do grupo de baixa tensão ou à demanda contratada, no caso de unidade do grupo de alta tensão. Caso o consumidor deseje instalar um sistema com potência superior ao limite, deve solicitar aumento de carga instalada ou aumento da demanda contratada.

Em 2015, com o objetivo de reduzir os custos e tempo do processo de aprovação de projetos para a geração distribuída, foi publicada a Resolução Normativa 687 revisando a RN

482 de 2012. De acordo com as novas regras, o prazo de validade dos créditos passou de 36 para 60 meses. Também existe a possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios (empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras). Nessa configuração, a energia gerada pode ser compartilhada entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores.

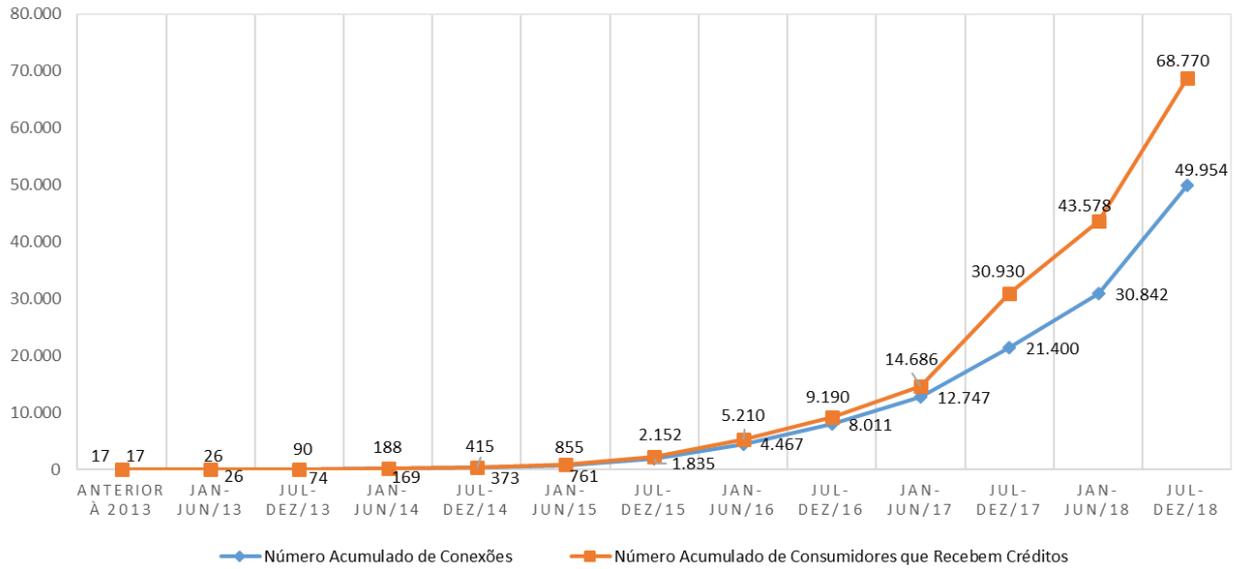
Um dos principais entraves para a popularização da energia solar é o seu custo, que atualmente vem caindo devido ao ganho de escala dos módulos fotovoltaicos no mundo. Na última década, o preço dos equipamentos caiu significativamente e de acordo com uma pesquisa realizada pela IRENA (IRENA, 2016), o custo médio da eletricidade gerada por um sistema fotovoltaico deverá cair até 59% por volta de 2025, o que fará com que a geração solar seja uma das formas mais baratas de produzir energia e, as instalações que possuem esta forma de geração independente será em número cada vez maior.

De acordo com dados fornecidos pela distribuidora RGE Sul, o custo da tarifa elétrica para o grupo de baixa tensão residencial apresentou um aumento de 87,30% de 2014 para o início de 2016. Este valor conta com o reajuste anual de 2014 e 2015 e um reajuste extraordinário em 2015 que, sozinho, representou 54,44% de aumento tarifário. Em 2018, para esta mesma concessão o reajuste 2017/2018 apresentou um aumento médio de 22,47%. Com este cenário, onde a tarifa de energia elétrica quase dobrou no período e apresenta constantes aumentos, a geração distribuída com energia solar ganhou atenção dos consumidores e competitividade econômica (RGE SUL, 2018).

Outro fator que impulsionou o mercado fotovoltaico no Brasil foi a adesão ao Convênio Confaz 16/2015 dos estados brasileiros, onde ficam autorizados a conceder isenção do Imposto Sobre Circulação de Mercadoria e Prestação de Serviços (ICMS) incidente sobre a energia elétrica fornecida pela distribuidora à unidade consumidora, na quantidade correspondente à soma da energia elétrica injetada na rede de distribuição pela mesma unidade consumidora, sendo assim um incentivo por parte de alguns estados para a geração distribuída de energia elétrica, que no Rio Grande do Sul, por exemplo, corresponde a 30% do valor total da fatura de energia elétrica.

A Figura 2.11 mostra o crescimento das conexões acumuladas de geração distribuída (GD) no Brasil desde a resolução normativa 482 de 2012 da ANEEL em 2012 até dezembro de 2018 (ANEEL, 2018).

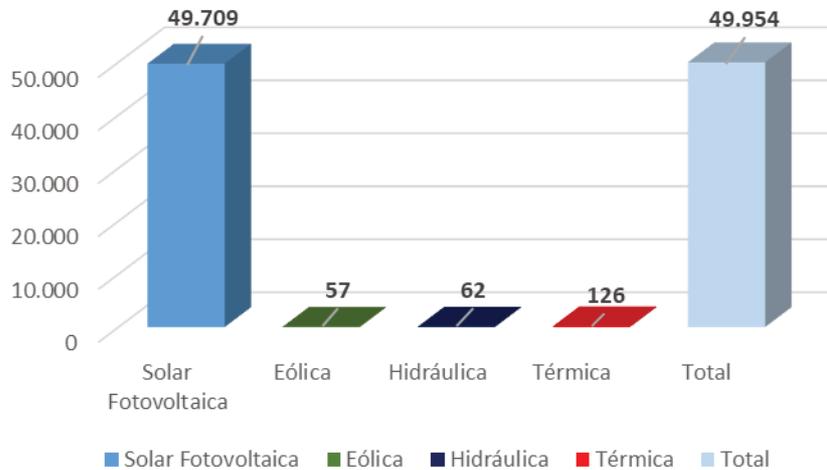
Figura 2.11 - Número de conexões de unidades consumidoras com geração distribuída e beneficiários dos créditos acumulado de 2012 a dezembro de 2018 no Brasil



Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2018)

O crescimento das conexões está relacionado com os incentivos à micro e minigeração e à popularização dos sistemas fotovoltaicos como pode ser visto na Figura 2.12, as conexões de geração distribuída com fonte solar fotovoltaica representam 99,5% do total no Brasil. Conforme informação da ANEEL, ao final de 2018, no Brasil há 49.954 unidades consumidoras com geração distribuída, sendo destas 49.709 a partir da energia solar fotovoltaica (ANEEL, 2018).

Figura 2.12 - Número de conexões de geração distribuída por fonte de energia no Brasil



Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2018)

### 2.3.6 Energia Solar Aplicada em Edificações

Os sistemas fotovoltaicos são modulares e podem ser inseridos facilmente em centros urbanos com diversos formatos e potências dependendo do projeto. Este sistema modular faz com que a tecnologia fotovoltaica seja interessante para reduzir a grande demanda de eletricidade em centros urbanos.

Os módulos fotovoltaicos podem ser aplicados na cobertura ou envoltória das edificações de diferentes maneiras. Quando integrados ao edifício (*Building-Integrated Photovoltaic – BIPV*), os módulos fotovoltaicos substituem ou complementam a estrutura da edificação, substituindo elementos tradicionais da envoltória. A integração fotovoltaica na edificação pode ser também adicionada/anexada ao edifício (*Building Added/Attached Photovoltaic – BAPV*), nestes casos, é comum haver algum suporte adicional de montagem e são os mais utilizados na instalação dos sistemas usuais e em *retrofit* (SANTOS e RÜTHER, 2012).

Sorgato, Schneider e Rüter (2017) realizaram um estudo onde comprovaram através de simulações que uma edificação comercial pode ter seu consumo de energia elétrica totalmente suprido através da integração de energia solar fotovoltaica de módulos de filmes finos de CdTe nas fachadas e cobertura para diversas cidades do Brasil.

Didoné, Wagner e Pereira (2014), em seu estudo de uma edificação comercial energeticamente autossustentável, utilizaram o *software EnergyPlus* para avaliar o consumo e para estimar a produção anual de energia fotovoltaica através da eficiência corrigida a partir da temperatura operativa de diferentes tecnologias. Os autores investigaram, através de simulações, três edificações comerciais, uma sendo um edifício protótipo que representa as edificações atuais, outro sendo o caso otimizado aplicando soluções de eficiência energética e por último a integração de energia fotovoltaica a fim de tornar a edificação com balanço de energia zero ou negativo. Os autores concluíram que após a aplicação de todas as ações de eficiência, a edificação apresentou uma redução de 50% do consumo anual, sendo necessária e suficiente a integração da geração fotovoltaica para o fim de balanço de energia zero.

A aplicação ou integração da energia solar em edificações é dividida em cerca de 80% em coberturas e 20% em fachadas. Apesar da participação em fachadas ser inferior, estas superfícies apresentam um grande potencial ainda não explorado. Com a evolução dos módulos translúcidos de filmes finos, há possibilidade de aplicação em paredes do tipo pele de vidro para edificações comerciais (TRIPARHY, SADHU e PANDA, 2016).

Foi investigado em uma pesquisa os métodos e recursos disponíveis pelo *EnergyPlus* para simulações de BIPV. Os autores, avaliaram os 3 métodos disponíveis de estimativa de produção fotovoltaica do *software* e ainda compararam os cinco métodos de cálculo de temperatura operacional da célula fotovoltaica. Os autores identificaram que o foco destes modelos está em estimar a produção de energia por meio da temperatura de funcionamento da célula fotovoltaica, porém os modelos do *software* não consideraram a influência da superfície do módulo sobre o ambiente interno da edificação, o que pode afetar a temperatura interna e o consumo de energia (RODRIGUES e CARLO, 2017).

Sorgato, Schneider e Rütther (2017) em seu estudo avaliaram a integração de módulos fotovoltaicos de filme fino CdTe na fachada e cobertura de uma edificação comercial para seis cidades brasileiras. Os autores utilizaram o *EnergyPlus* para fazer a avaliação termo energética da edificação e utilizaram o *software* PVSyst como ferramenta para estimar a produção de energia e apresentaram que para todas as cidades a demanda da edificação foi suprida pela geração na fachada através da integração da tecnologia de CdTe nas fachadas e cobertura do prédio.

Ordenes *et al* (2006) analisaram a geração de BIPV em edificações residenciais para diferentes tecnologias de módulos integradas em todas superfícies opacas da envoltória em cidades com baixa latitude. Para realizar a avaliação termo energética e estimativa de produção foi utilizado o *software* *EnergyPlus*. Para a estimativa de energia, as diferentes tecnologias foram diferenciadas através de suas propriedades térmica de eficiência, e como parâmetro de entrada no *software* foi calculado uma eficiência operativa para cada tecnologia e comprovaram que em aproximadamente 30% do ano o sistema fotovoltaico gerou mais energia que a demanda do prédio, e mostraram que apesar de ser em baixa latitude e em posição vertical, a edificação produziu uma quantidade razoável de sua demanda.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para alcançar os resultados esperados no trabalho. A metodologia prevê cinco etapas distintas para atingir os objetivos propostos:

- Caracterização da edificação de referência;
- Definição das localidades (municípios) a serem aplicadas nas simulações;
- Programa de simulação computacional a ser utilizado;
- Definição das tecnologias e dos sistemas fotovoltaicos estudados;
- Aplicação dos sistemas fotovoltaicos na edificação.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO DE REFERÊNCIA

A fim de realizar o primeiro objetivo específico de caracterizar e simular uma edificação residencial, foram consultados dados estatísticos de institutos nacionais e o portfólio de algumas construtoras referências e os seus últimos projetos residenciais na região metropolitana de Porto Alegre. Foram considerados os edifícios de diversas classes econômicas a fim de criar um modelo genérico representativo. Com isso foi estimado uma média de 10 pavimentos, em média 4 apartamentos por andar residencial, e a caracterização das áreas comuns.

##### 3.1.1 Caracterização da edificação

Em sua pesquisa, Tavares (2006) reuniu informações disponíveis da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) juntamente com os dados do SINPHA do PROCEL. O autor elaborou modelos de edificações residenciais para analisar seu consumo e análise do ciclo de vida energético. Com base nestes dados, Tavares segregou as principais características das edificações residenciais em relação à ocorrência das mesmas conforme mostrado na Tabela 3.1.

Com base na caracterização de uma edificação tipicamente residencial, foram elaboradas as plantas baixas dos apartamentos e dos andares para a construção do edifício da

simulação base. Conforme a Tabela 3.1, a maior ocorrência de quantidade de quartos por residência é de dois quartos. Estes dados foram considerados para elaboração do modelo.

Tabela 3.1 – Ocorrência das principais características das edificações residenciais brasileiras

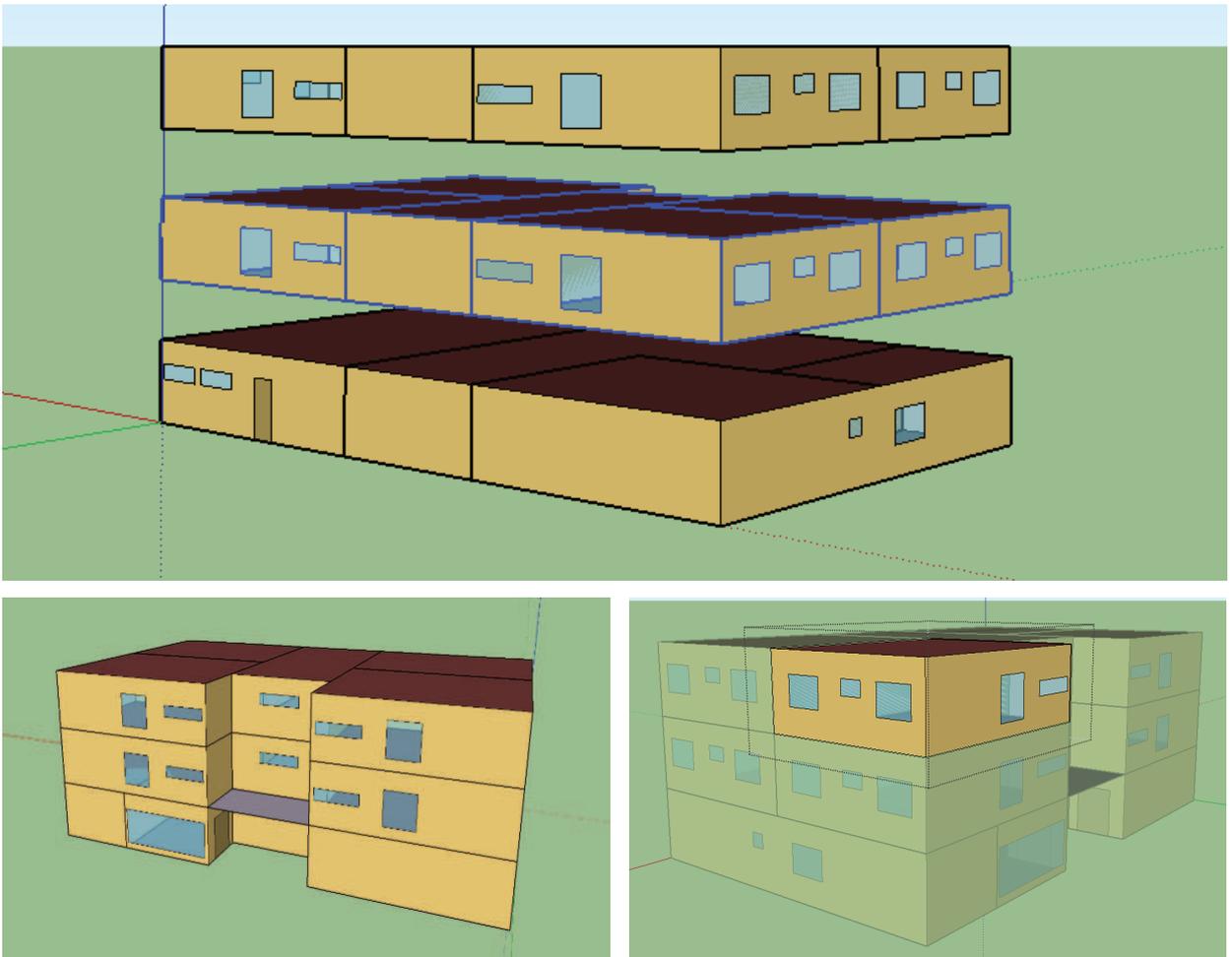
CARACTERÍSTICA	OCORRÊNCIAS (%)				
	Casas (90)			Apartamento (10)	
Tipologia					
Área da unidade (m <sup>2</sup> )	Até 60 (60)	de 60 a 100 (25)	de 100 a 150 (10)	Acima de 150 (5)	
Número de quartos	1 (15)	2 (45)	3 (23)	4 (16)	Acima de 4 (5)
Número de habitantes	1 (7)	2 (26)	3 (20)	4 (27)	5 ou acima de 5 (20)
Consumo de energia (kWh/mês)	150 (62)	150 a 200 (21)	200 a 300 (10)	300 a 500 (5)	Acima de 500 (2)

Fonte: Adaptado de (TAVARES, 2006)

A área da edificação em estudo possui um total de 4.713,92 m<sup>2</sup>. Para a simulação foram construídas 13 zonas térmicas no *EnergyPlus*, que são os ambientes definidos para a parametrização e simulação dividido em três pavimentos, sendo a base do edifício que faz contato com o solo, onde se encontram ambientes de áreas comuns e de serviço, como o *hall* de entrada, sala de serviço e manutenção e salão de festas. No segundo pavimento foi construído um pavimento tipo, onde há quatro apartamentos iguais e um corredor com elevador. Cada apartamento foi separado e nomeado com base na orientação de exposição das paredes externas. Este pavimento tipo foi repetido 8 vezes na simulação e por fim no terceiro pavimento da simulação, foi desenhado os mesmos ambientes do pavimento tipo, porém estes sendo a cobertura da edificação, apresentando o contato com as condições exteriores da simulação, como mostra a Tabela 3.2. A partir destas definições da edificação e com o auxílio do *software SketchUp*, foi elaborada a maquete da edificação, ilustrada na Figura 3.1 com diferentes perspectivas. As plantas baixas criadas para o modelo do andar residencial e da área térrea onde estão os ambientes comuns, estão detalhados no Apêndice A.

Tabela 3.2 - Zonas térmicas da edificação residencial

Zona	Área da Zona (m <sup>2</sup> )
TIPO APT N L	95,26
TIPO APT S L	95,26
TIPO APT N O	95,26
TIPO APT S O	95,26
TIPO CORREDOR	90,35
COBERTURA APT N L	95,26
COBERTURA APT S L	95,26
COBERTURA APT N O	95,26
COBERTURA APT S O	95,26
COBERTURA CORREDOR	90,35
HALL	142,98
SERVICO MANUTENCAO	137,9
FESTAS	190,53
Total Edificação	4.713,92

Figura 3.1 – Vista da edificação utilizada na simulação com o *EnergyPlus*

### 3.1.1.1 Materiais Construtivos

Em sua pesquisa, Tavares (2006) elaborou modelos de edificações residenciais para analisar seu consumo e a análise do ciclo de vida energético em simulações com a utilização do *EnergyPlus*. Em seus modelos, Taveres observou que apesar de uma pequena parcela da população residir em edifícios, este percentual vem crescendo com a urbanização do país, enfatizando a importância de estudos relativos às edificações com uso residencial. O autor caracterizou as residências em cinco modelos padrões e a que mais se aproxima do estudo aqui apresentado é o modelo 3, com uma edificação de 8 pavimentos com 32 apartamentos de 100 m<sup>2</sup>. Para a elaboração do arquivo da simulação foram utilizados os materiais construtivos e especificações técnicas estudadas no modelo conforme detalhados no Anexo I.

Os modelos construtivos e as características dos materiais simulados são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Característica construtiva e parâmetros dos materiais do edifício residencial

Superfície	Material	Espessura (mm)	Condutividade Térmica (W/mK)	Calor específico (J/kgK)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> K/W)
Parede Externa	Reboco Branco	25	1,15	1000	-
	Bloco de concreto	200	0,90	920	-
	Argamassa reboco	25	1,15	1000	-
Parede Interna	Argamassa reboco	25	1,15	1000	-
	Bloco de concreto	140	0,90	920	-
	Argamassa reboco	25	1,15	1000	-
Cobertura	Telha fibrocimento	5	0,95	840	-
	Espaço de ar	-	-	-	0,18
	Laje de concreto	120	0,53	840	-
	Espaço de ar	-	-	-	0,18
Teto interior	Gesso	15	0,90	920	-
	Laje de concreto	60	0,53	840	-
	Espaço de ar	-	-	-	0,18
Piso Interno	Gesso	15	0,90	920	-
	Porcelanato	25			
Piso	Laje de concreto	60			
	Porcelanato	25	0,90	920	-
Piso	Laje de concreto	120	0,53	840	-
	Porcelanato	25	0,90	920	-
Janela	Vidro Transparente	3	0,90	880	-

Portanto, o modelo construtivo e materiais utilizados para a composição das superfícies como paredes, tetos e pisos foram definidos de acordo com a pesquisa de Tavares (2006) para edificações residenciais. Os parâmetros térmicos destes materiais, para inserção

no *software* de simulação termo energética foram obtidos através da NBR 15220, que estabelece o desempenho térmico de edificações, zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares (ABNT, 2005).

### 3.2 DEFINIÇÃO DAS LOCALIDADES A SEREM APLICADAS NA SIMULAÇÃO

Para atingir o objetivo de analisar o desempenho energético sobre a geração em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras foi realizada a simulação para duas cidades. A primeira é Porto Alegre/RS, localizada nas coordenadas 30° 01' 59" S e 51° 13' 48" W. A cidade de Porto Alegre foi escolhida devido ao estudo da envoltória da edificação estar baseado na tipologia construtiva desta região. A segunda cidade escolhida para realizar as simulações é Recife/PE, localizada nas coordenadas 08° 03' 14" S e 34° 52' 52" W. A escolha desta cidade é devido a ser uma cidade com características de clima e temperaturas bastante divergentes de Porto Alegre e com isso se tem como objetivo comparar as diferenças locais de latitude e clima no desempenho da geração fotovoltaica e no balanço de energia da edificação em estudo.

#### 3.2.1 Arquivo Climático

Segundo a ASHARE, existe dois tipos de arquivos climáticos desenvolvidos para os cálculos de simulação energética: o TRY (*Test Reference Year*), que foi desenvolvido pelo *National Climatic Center* e o TMY (*Typical Meteorological Year*), pelo *Sandia Laboratories*. Estes arquivos contêm todos os dados meteorológicos necessários para que programas como, por exemplo, o *EnergyPlus* possa realizar o complexo processo de simulação anual. O arquivo climático deve ser em formato horário, com 8760 horas (ASHARE, 2010).

O Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina fornece estes arquivos climáticos para diversas cidades do Brasil, através de dados medidos em aeroportos de capitais brasileiras. Estes arquivos climáticos estão disponíveis nos formatos CSV, SWERA e EPW (*EnergyPlus Weather*). O formato “epw” contém todos os dados meteorológicos necessários para a simulação termoenergética das 8760 horas de um ano através do programa específico *EnergyPlus*. Os arquivos CSV (*Comma Separated Values*) são compostos de dados obtidos de arquivos TRY e são utilizados para exportar dados do Excel e de outros programas. Os arquivos SWERA (*Solar and Wind*

*Energy Resource Assessment*) também são utilizados para estudos de análise de simulação energética.

O tipo formato escolhido e obtido do LabEEE foi o “epw” pois é criado com o objetivo de ser especificamente para o *software* utilizado neste trabalho, os dados são disponibilizados no tipo TRY. O arquivo climático TRY consiste em uma base de dados meteorológicos horários disponibilizados em formato padronizado, adequados para simulações computacionais que analisam o desempenho energético em edificações, da irradiação incidente na envoltória e das temperaturas externas das superfícies que terá valor importante para conhecimento da temperatura de operação dos módulos e das eficiências que estes módulos irão apresentar quando integrados na edificação.

### 3.3 PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZADO

O programa de simulação computacional utilizado para gerar todos os dados necessários para as análises e discussões dos resultados e considerações finais da edificação é o *EnergyPlus*. Este *software* foi selecionado por possibilitar a avaliação horária da geração fotovoltaica, consumo e utilização da energia na edificação, possibilidade de incluir os dados de geração fotovoltaica já aplicadas na edificação e sua influência nos demais indicadores de consumo da edificação. Também possibilita a análise da influência das diferentes regiões geográficas do território brasileiro de acordo com as localidades selecionadas através dos arquivos climáticos.

#### 3.3.1 Simulações termoenergéticas

Para que o programa gere as simulações termoenergéticas, se faz necessária a representação do edifício de maneira tridimensional e para isso, foi utilizado o programa *Google SketchUP*, com o apoio do *plug-in Open Studio*, que permite exportar o modelo em uma extensão compatível ao programa de simulação. Para simulação e avaliação do desempenho da edificação no modelo proposto foi utilizado o programa de simulação computacional *EnergyPlus*, versão 8.8. Este programa calcula a carga térmica necessária para manter a temperatura dos ambientes no *setpoint* desejado conforme o número de moradores, perfil de consumo e equipamentos previamente informados. Este cálculo é feito através dos comportamentos energético e térmico da edificação, do clima em que está inserida, das características arquitetônicas e do modo de utilização dos usuários.

O *EnergyPlus* dispõe de três modelos para estimar a geração de energia de sistemas fotovoltaicos, chamados de: "*Simple*", "*Equivalent One-Diode*" e "*Sandia*". A diferença entre eles está relacionada aos algoritmos e aos dados de entrada usados para calcular a energia elétrica produzida. Todos os três compartilham os mesmos modelos para prever a radiação solar incidente, que também são utilizados para os cálculos térmicos (ENERGYPLUS, 2018a).

Os dados de radiação solar incidente são obtidos a partir de arquivos climáticos, como descrito no item 3.2.1. O *software* associa os modelos fotovoltaicos às superfícies especificadas no arquivo de entrada a fim de definir a área, a localização, a inclinação e a orientação dos módulos. A radiação solar incidente é calculada para incluir os efeitos de sombreamento e reflexão de outras superfícies declaradas no arquivo de entrada (como edifícios e árvores próximas e outros módulos fotovoltaicos). Para isso, o modelo geométrico completo é utilizado (ENERGYPLUS, 2018b).

As três modelagens de sistemas fotovoltaicos (FV) do *EnergyPlus* são descritos a seguir:

- *Simple Model*: é o modelo simplificado para a previsão da geração de energia fotovoltaica no *EnergPlus* e é utilizado para análise de projetos a fim de obter uma estimativa dos níveis de produção anual e da potência de pico, sem ter que especificar (ou determinar) os coeficientes de desempenho detalhados de um módulo FV reais obtidos através de medições em laboratórios particular (ENERGYPLUS, 2018a). Neste modelo, o usuário especifica uma eficiência com que as superfícies convertem a radiação solar incidente em eletricidade, podendo ser fixa ou variando segundo um padrão de uso pré-estabelecido (ENERGYPLUS, 2018a);

- *Equivalent One-Diode Model*: é um modelo empírico criado para prever o desempenho elétrico de módulos FV de silício (monocristalino e amorfo), também é conhecido como modelo "TRNSYS PV". Este modelo emprega equações de circuito equivalente prevendo as características de corrente e tensão de um único módulo, e os resultados são extrapolados para obter o desempenho total do arranjo fotovoltaico (ENERGYPLUS, 2018a). O desempenho do sistema FV sob condições operacionais é determinado tanto pela radiação quanto pela temperatura operacional da célula FV. Este modelo contempla apenas os módulos de silício monocristalino e amorfo, pois é necessário a escolha de uma destas tecnologias, e esta escolha influenciará nos resultados, o que impossibilita a análise de outras tecnologias como CIS, CIGS e CdTe. (ENERGYPLUS, 2018a);

- *Sandia Photovoltaic Performance Model*: o terceiro modelo disponível no *EnergyPlus* é o modelo *Sandia*, que é baseado em pesquisas do *Sandia National Laboratory*. O modelo consiste em uma série de relações empíricas com coeficientes que são derivados de medições reais e ensaios experimentais (ENERGYPLUS, 2018a) que estão disponíveis na base de dados do *EnergyPlus*. A análise com este modelo fica restrito aos módulos previamente cadastrados.

Assim como no modelo *Equivalent One-Diode*, o núcleo do modelo *Sandia* prediz o desempenho de um único módulo FV, que é extrapolado para obter o desempenho do sistema (ENERGYPLUS, 2018a).

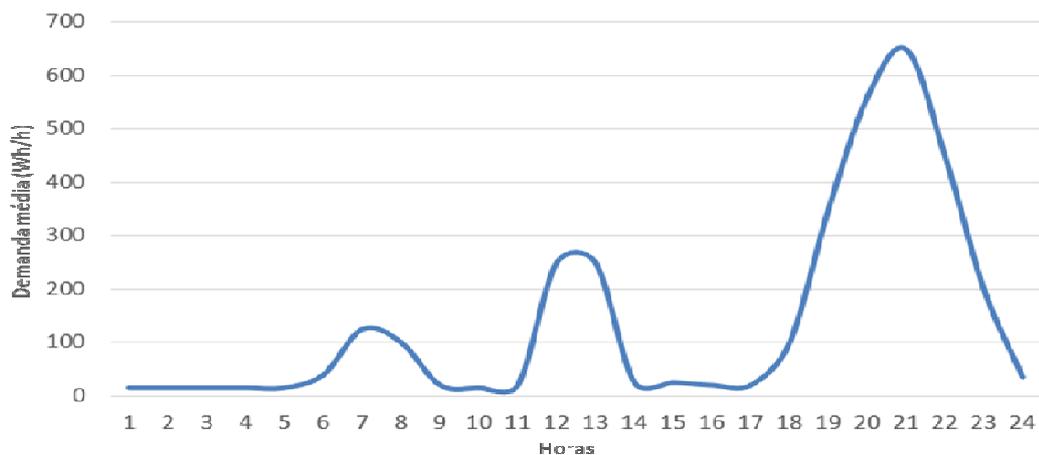
Para realizar as análises da simulação com a aplicação da geração de energia elétrica e atender aos objetivos específicos do trabalho, o método escolhido para a simulação dos sistemas fotovoltaicos aplicados na edificação foi o *simple model*, uma vez que os outros métodos apresentam limitações nas opções de tecnologias e no caso do *Sandia*, é possível apenas em uma biblioteca defasada fornecida pelo *Sandia National Laboratory* onde a última atualização foi em 2004.

### 3.3.2 Padrões de Uso e Ocupação

Conforme o último censo demográfico dos domicílios brasileiro (IBGE, 2011), o Brasil apresenta uma média de 3,3 habitantes por domicílio em área urbana. Com base nisso foi escolhido para o modelo, apartamentos com três habitantes para a simulação da edificação. Para fins de definição dos padrões de entrada no programa de simulação, já foram considerados hábitos e equipamentos mais eficientes, uma vez que a análise será a integração de geração na edificação. Foi considerado que ações e equipamentos eficientes já são uma realidade, por exemplo, a iluminação é considerada sendo por LED, equipamentos de condicionamento de ar são *inverters* com coeficiente de performance (COP) de fábrica igual a 3,3, presença de controle de termostato das temperaturas para aquecimento e refrigeração além da não utilização do chuveiro elétrico. Como já observado na curva de carga residencial na Figura 2.6, a utilização do chuveiro elétrico se destaca na curva, porém sem a utilização deste equipamento, a curva de carga de um apartamento residencial se apresenta com um comportamento diferente. A curva de carga dos equipamentos elétricos inserida na edificação estudada, sem os equipamentos específicos de climatização ambiental é mostrada na Figura 3.2. O perfil de ocupação do apartamento foi considerado com maior frequência à noite, com picos menores de utilização na parte da manhã e ao meio dia. Os equipamentos de

condicionamento de ar foram programados para funcionar através do perfil de ocupação e do *setpoint*, portanto, variando conforme as condições das zonas térmicas ao longo do ano. A iluminação foi acionada com base na ocupação e nos períodos da noite. O perfil de utilização foi definido como uma carga média e assim foi aplicado para todos os dias do ano, com isso, o consumo de energia elétrica para fins de iluminação e equipamentos se mantém constante.

Figura 3.2 - Curva de carga diária dos equipamentos elétricos na simulação de um apartamento.



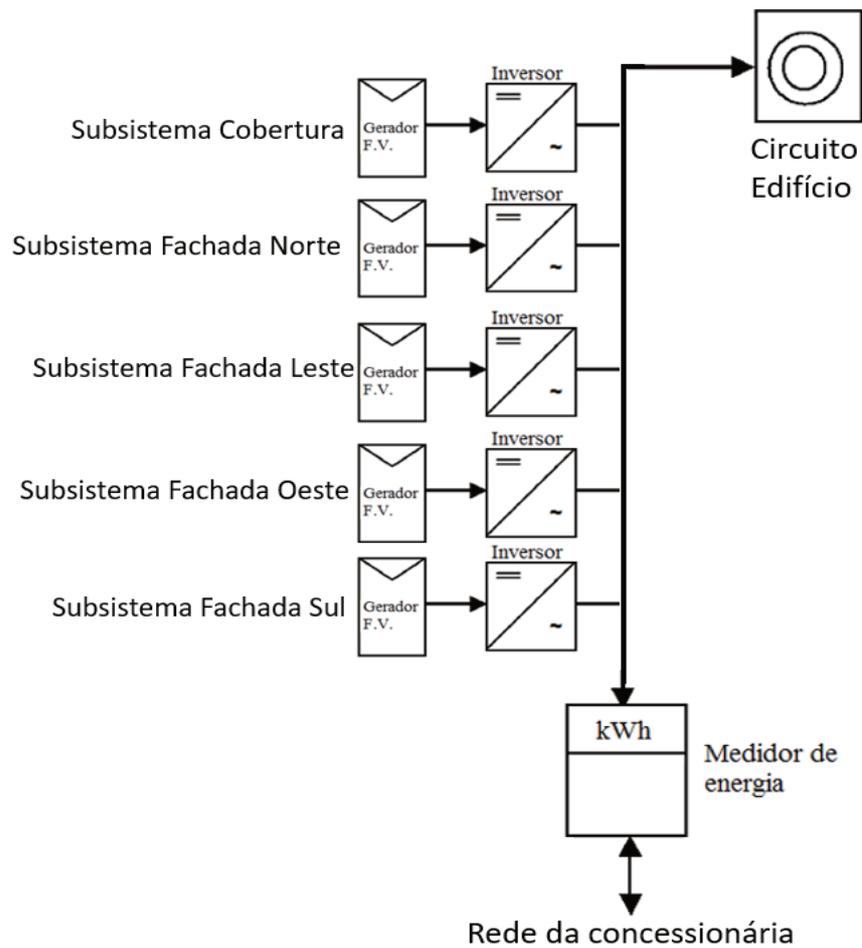
### 3.4 DEFINIÇÃO DAS TECNOLOGIAS E DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ESTUDADOS

Neste subcapítulo são abordadas as definições e composição do sistema fotovoltaico utilizado na simulação a fim de cumprir os objetivos e análises para as referidas cidades, tecnologias e orientações.

O sistema fotovoltaico a ser aplicado no edifício de estudo é um sistema conectado à rede. O sistema foi dividido em cinco subsistemas a fim de analisar seu comportamento por tipo de superfície: cobertura, fachadas norte, sul, leste e oeste. Apesar de se ter conhecimento que a fachada Sul não tem um bom desempenho para geração solar, foi analisada no estudo apenas para quantificá-la, sem considerar a viabilidade financeira.

O diagrama do sistema é mostrado na Figura 3.3. Cada subsistema está conectado em um inversor independente, e após a conversão do inversor, a energia gerada é disponibilizada para o consumo próprio da edificação. Quando a geração é superior à demanda, a energia é enviada para a rede da concessionária em forma de crédito para futura utilização em períodos sem geração.

Figura 3.3 - Diagrama do sistema fotovoltaico da edificação



Os subsistemas fotovoltaicos estão dispostos conforme a Tabela 3.4. Nas fachadas, os módulos são instalados conforme a orientação da superfície e com inclinação de 90°, em relação ao plano horizontal. Já para a cobertura, a orientação e inclinação estão em sua orientação de referência, conforme cada localidade analisada.

Tabela 3.4 – Características de instalação dos subsistemas FV

Sistema	Orientação	Inclinação (°)	Área Superfície (m <sup>2</sup> )	Área Instalada (m <sup>2</sup> )
Subsistema Cobertura	Norte	30 <sup>1</sup> / 10 <sup>2</sup>	471	255
Subsistema Fachada Norte	Norte	90	733	468
Subsistema Fachada Leste	Leste	90	411	301
Subsistema Fachada Oeste	Oeste	90	411	301
Subsistema Fachada Sul	Sul	90	546	280

<sup>1</sup> Porto Alegre, <sup>2</sup> Recife

As tecnologias fotovoltaicas escolhidas para simulação foram o silício cristalino (c-Si), silício multicristalino (mc-Si), silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de Cobre-Índio-Gálio (CIGS). Através de uma pesquisa de módulos comerciais existentes foram escolhidos um fabricante e modelo para cada tecnologia. Foram observados módulos mais novos com alto desempenho dentro de sua faixa de eficiência máxima. Com base no catálogo de cada módulo foi montada a Tabela 3.5, onde são apresentados os dados básicos das diferentes tecnologias.

Tabela 3.5 - Características dos módulos fotovoltaicos utilizados na simulação

Tecnologia	Fabricante / Modelo	Área do módulo (m <sup>2</sup> )	Eficiência $\eta_{STC}$ (%)	Potência STC Módulo (W)	Potência Instalada Sistema (kW)	$\gamma_{PM}$ (%/°C)	T <sub>NOCT</sub> (°C)	Eficiência $\eta_{NOCT}$ (%)
Silício Cristalino	TallMax TSM-DD14A	1,94	19,3	375	310,29	0,39	45	17,8
Silício multicristalino	Jinko Solar JKM295PP	1,65	17,9	295	287,00	0,37	45	16,6
Silício Amorfo	Schott Solar ASI 107	1,45	7,4	130	143,92	0,2	49	7,1
CdTe	First Solar FS-6445	2,47	18,0	445	289,20	0,32	45	16,8
CIGS	Eterbright Cigs 3600A2	2,36	15,2	360	245,28	0,28	46	14,3

Os dados de eficiência, apresentados pelos fabricantes, levam em conta a condição padrão de teste (STC). Nesta condição, o módulo é testado com uma irradiância em uma temperatura controlada, normalmente 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C e AM 1,5, respectivamente. Porém, esta condição raramente é encontrada em operação. Os módulos fotovoltaicos, quando submetidos a tal irradiância, normalmente apresentam temperaturas elevadas. Com o objetivo de se obter dados mais reais em relação as características operativas e da geração de energia de um módulo fotovoltaico, os fabricantes apresentam também características para condição normal de operação (NOCT), onde é considerado uma irradiância de 800 W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente de 25°C e uma temperatura de célula em torno de 45 °C. Uma destas características operativas é o coeficiente de perda de potência máxima em relação ao aumento de temperatura, usualmente apresentado em %/°C. Este parâmetro é bastante utilizado para realizar o ajuste da eficiência de um módulo, pois apresenta a eficiência mais próxima do real para determinada temperatura operativa, pois são dados específicos do módulo que incluem a

diferença de cada tecnologia por ser um coeficiente relacionado ao desempenho do tipo de módulo e da resposta espectral que cada tipo de tecnologia possui em sua construção. A Equação 3.1 apresenta este cálculo de correção e na Tabela 3.5 é apresentada a eficiência corrigida para cada módulo selecionado conforme dados fornecidos pelo fabricante.

$$\eta_{NOCT} = \eta_{STC} \left[ \frac{100 - (\gamma_{PM} \Delta T)}{100} \right] \quad (3.1)$$

onde  $\eta_{NOCT}$  é a eficiência corrigida para cada temperatura de operação,  $\eta_{STC}$  é a eficiência na condição padrão de teste do módulo,  $\gamma_{PM}$  é o coeficiente de perda de potência em relação a temperatura e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a condição padrão STC e a temperatura de operação do módulo, ou temperatura da célula fotovoltaica.

Para a realização da simulação e das análises das tecnologias, se fez necessário obter um modelo que apresente resultados mais precisos que a eficiência fixa ao longo do ano, pois sabe-se que o desempenho do módulo fotovoltaico é prejudicado conforme a temperatura da superfície aumenta, além de cada tecnologia apresentar uma variação específica.

A partir do arquivo climático e da simulação base, foi realizada uma simulação prévia e obtidos os dados de irradiância e de temperatura que incidem nas superfícies edificação, e então, foi estimada a temperatura da célula, com base na Equação 3.2. Com a temperatura da célula para cada valor de temperatura ambiente e de irradiância incidente, foi calculada a eficiência operativa conforme a Equação 3.1

$$T_C = T_{amb} + G \left[ \frac{(T_{NOCT} - 20)}{800} \right] \quad (3.2)$$

onde,  $T_C$  é a temperatura da célula,  $T_{amb}$  é a temperatura de bulbo seco no ambiente externo a edificação,  $G$  é a irradiância global incidente,  $T_{NOCT}$  é a temperatura para condição nominal de operação, fornecida pelo fabricante.

Conforme o modelo técnico de referência fotovoltaica *System Advisor Model* (SAM) da *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (NREL, 2015) para módulos integrados ou aplicados em montagens próximas à edificação, recomenda-se considerar +2°C na temperatura de operação  $T_{NOCT}$ . A partir destas equações, foram criados os parâmetros de eficiência para inserir na simulação, considerando as variáveis de temperatura e radiação das

idades, as características dos módulos e suas tecnologias fotovoltaicas para as 8760 horas do arquivo climático.

### 3.5 APLICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NA EDIFICAÇÃO

A fim de atender os objetivos específicos é necessário obter os dados da geração de energia solar fotovoltaica para as superfícies especificadas como sendo áreas com módulos fotovoltaicos. Para incluir este parâmetro no modelo foram consultadas as delimitações e as opções que o *software EnergyPlus* oferece, e também como que outros autores utilizam esta ferramenta de simulação para este fim.

Conforme descrito no item 3.3.1, para realizar a aplicação da geração de energia elétrica, o método escolhido para a simulação dos sistemas fotovoltaicos foi o *simple model*, uma vez que os outros métodos apresentam limitações nas opções de tecnologias e dados defasados em relação à eficiência das tecnologias atuais.

Para o cálculo da potência, o *simple model* do *EnergyPlus* utiliza a Equação 3.3 para realizar a estimativa horária.

$$P = A_{surf} f_{activ} G \eta_{NOCT} \eta_{sistema} \quad (3.3)$$

onde P é a potência elétrica entregue à rede,  $A_{surf}$  é a área da superfície dos módulos determinada no modelo tridimensional com o *SketchUp* e *OpenStudio*,  $f_{activ}$  é o fator da área com células solares que é igual a um,  $\eta_{NOCT}$  é a eficiência operativa calculada e  $\eta_{sistema}$  é a eficiência global do sistema após a geração em módulo até a entrega à rede de distribuição ou consumo em corrente alternada.

Para este modelo, foi utilizado como dado de entrada, a eficiência corrigida conforme apresentado na metodologia no subcapítulo 3.4 nas Equações 1 e 2. Foi criado um *schedule* de eficiência horária conforme a temperatura ambiente, a radiação incidente e parâmetros técnicos dos módulos fotovoltaicos.

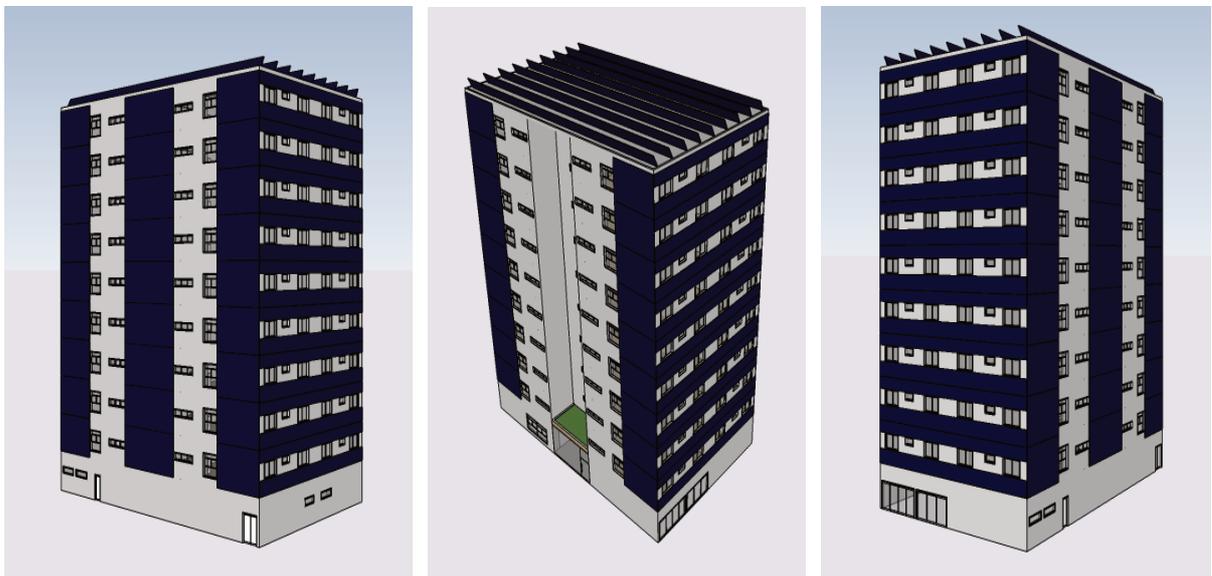
Neste modelo também é necessário informar o desempenho do sistema, que inclui a eficiência do inversor e perdas em cabos e demais equipamentos entre o módulo e o medidor de energia. Neste estudo foi utilizado um desempenho de conversão total de 0,85 por estar entre os valores recomendados e utilizados em estudo similares a este. (ZOMER, *et al.*, 2011) (DIDONÉ, WAGNER e PEREIRA, 2014).

Conforme especificado na Tabela 3.4, o sistema fotovoltaico projetado para integrar a edificação foi dividido em 5 subsistemas, um para cada orientação de fachada e um para a cobertura. A Figura 3.4 mostra o modelo tridimensional projetado e as superfícies, sendo que nas superfícies sinalizadas em cor roxa estão representadas as áreas consideradas com geração. Na cobertura foi considerado um espaçamento entre as fileiras de módulos de dois metros entre os arranjos, e cada arranjo possui altura de um metro. Na Figura 3.5 é ilustrado o modelo do prédio, criado *no software SketchUp*, contendo as placas de energia solar fotovoltaica nas fachadas e cobertura.

Figura 3.4 - Modelo tridimensional da edificação com sistema fotovoltaico integrado



Figura 3.5 – Imagens da edificação típica residencial com BIPV



## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e comentados os resultados obtidos nas simulações realizadas de acordo com os objetivos propostos.

### 4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO EDIFÍCIO BASE

Este trabalho apresenta comparações de consumo e da geração de energia elétrica a partir da fonte energia solar fotovoltaica para duas cidades brasileiras, Porto Alegre e Recife. A comparação é possível através do arquivo climático de cada cidade com as condições climáticas registrada ao longo dos últimos anos. Dentre os dados compostos nestes arquivos, destacam-se como mais importantes nos resultados apresentados a temperatura externa ambiente e a radiação solar incidente. O resultado horário destes dados está apresentado nas Figuras 4.1 e 4.2, sendo uma comparação dos dados dos arquivos das cidades de Porto Alegre e Recife, respectivamente.

Figura 4.1 - Temperatura média diária ao longo de um ano(mudar os tipos de linhas)

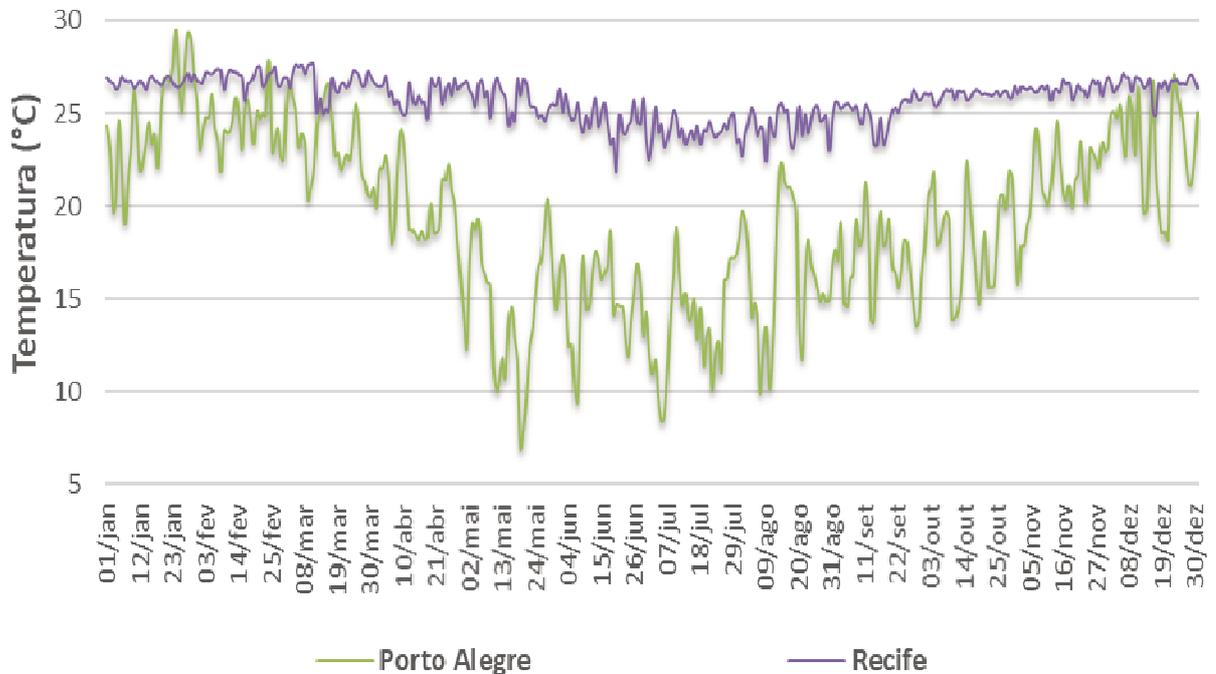
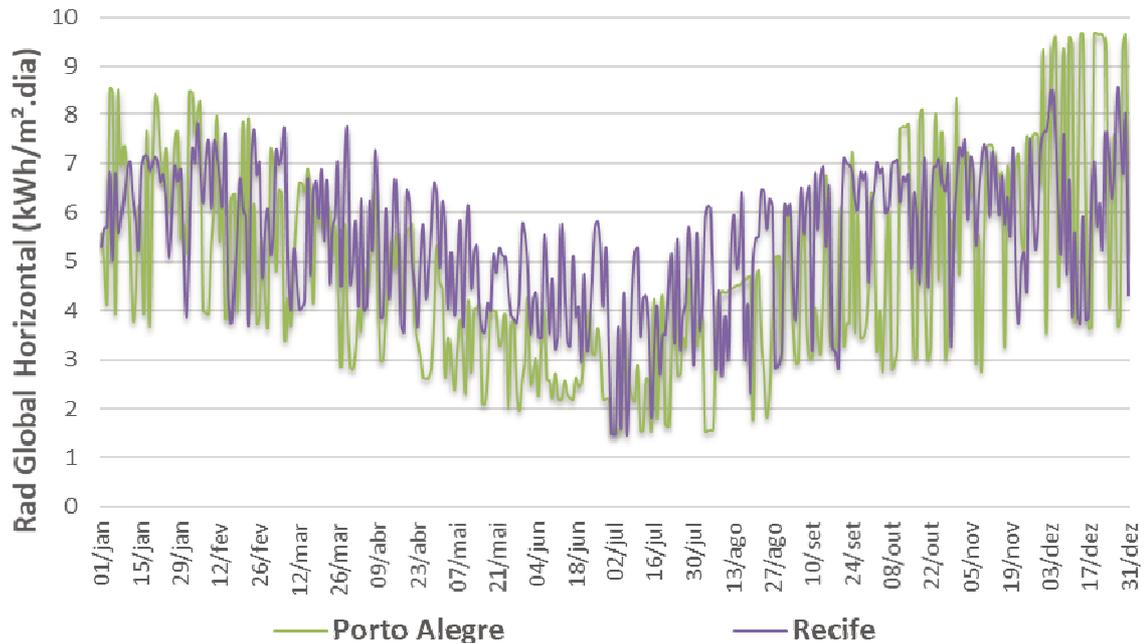


Figura 4.2 - Irradiação média diária ao longo de um ano

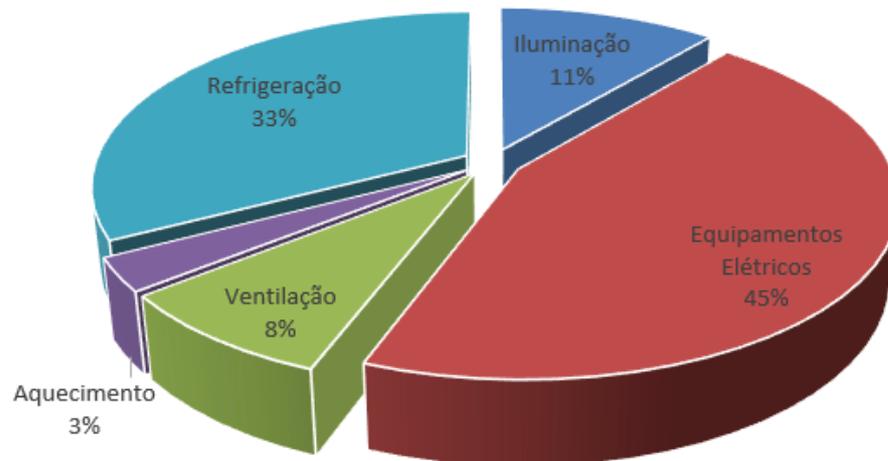


Com o objetivo específico de caracterizar uma edificação típica residencial, foi criado o modelo da edificação, conforme especificado no item 3.1 da metodologia e ilustrado nas Figuras 3.1, 3.4 e 3.5. Com base nos perfis de utilização e equipamentos utilizados pela classe residencial, foram realizadas as simulações para as cidades de Porto Alegre e Recife através do *Software EnergyPlus*.

A distribuição do consumo anual por uso final dos apartamentos simulados de Porto Alegre é apresentada na Figura 4.3. O consumo médio mensal das áreas comuns da edificação simulada é de 345 kWh e a média mensal do consumo nos apartamentos simulados foi de 174,1 kWh. Tanto o perfil de utilização quanto o de consumo estão coerentes com os dados de referência apresentados na Figura 2.5(b) e na Tabela 2.2 para o estado do Rio Grande do Sul apesar da edificação não utilizar chuveiro elétrico, a utilização de equipamentos para condicionamento de ar equilibraram a utilização de energia média das residências nesta região do país.

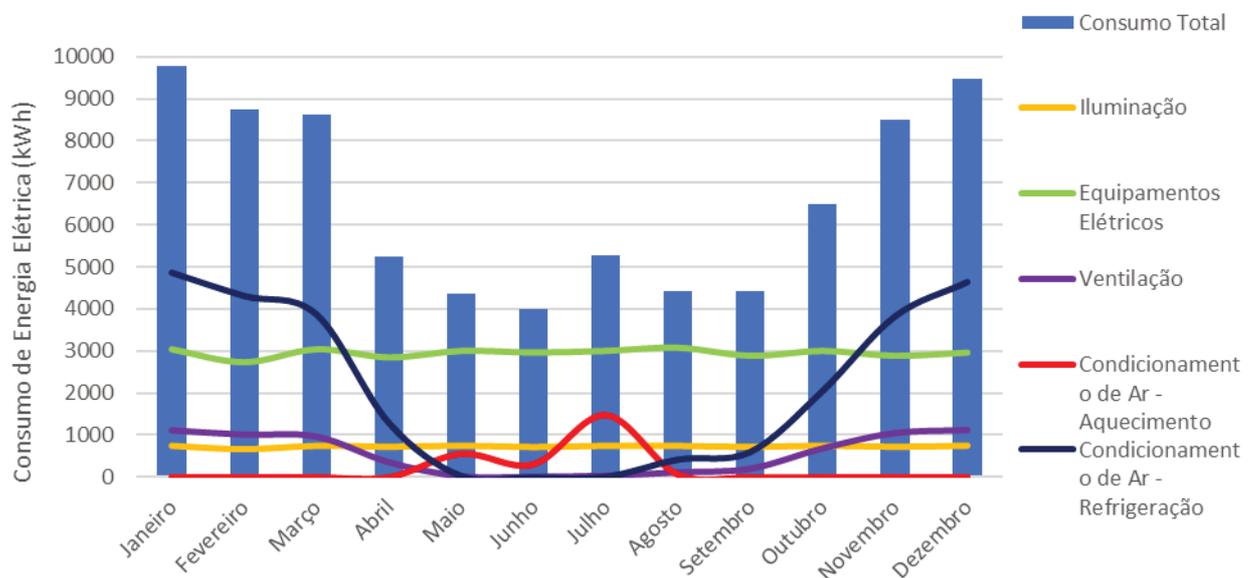
A edificação simulada, apresentou um consumo médio anual por apartamento de 21,93 kWh/m<sup>2</sup>. Este indicador é comumente utilizado na literatura por facilitar a comparação entre o consumo anual de edificações e ambientes com diferentes áreas.

Figura 4.3 – Distribuição do consumo médio anual em um apartamento em Porto Alegre



O consumo médio anual da edificação em estudo para a cidade de Porto Alegre é de 79.352 kWh, estando detalhado na Figura 4.4 o consumo mensal e por tipo de uso final do mesmo.

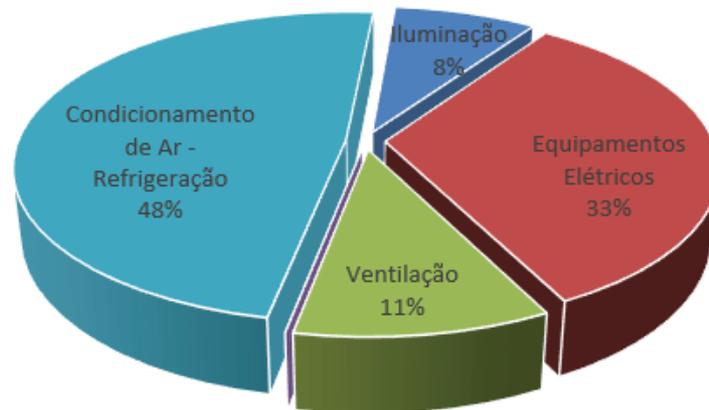
Figura 4.4 - Consumo de energia na edificação por mês e por tipo de uso final para Porto Alegre



Para Recife, a distribuição do consumo anual por uso final dos apartamentos é apresentada na Figura 4.5. O consumo médio mensal das áreas comuns da edificação simulada é de 420 kWh e a média mensal do consumo nos apartamentos simulados foi de 237 kWh. O motivo para uma maior diferença em relação à média de Pernambuco é a utilização

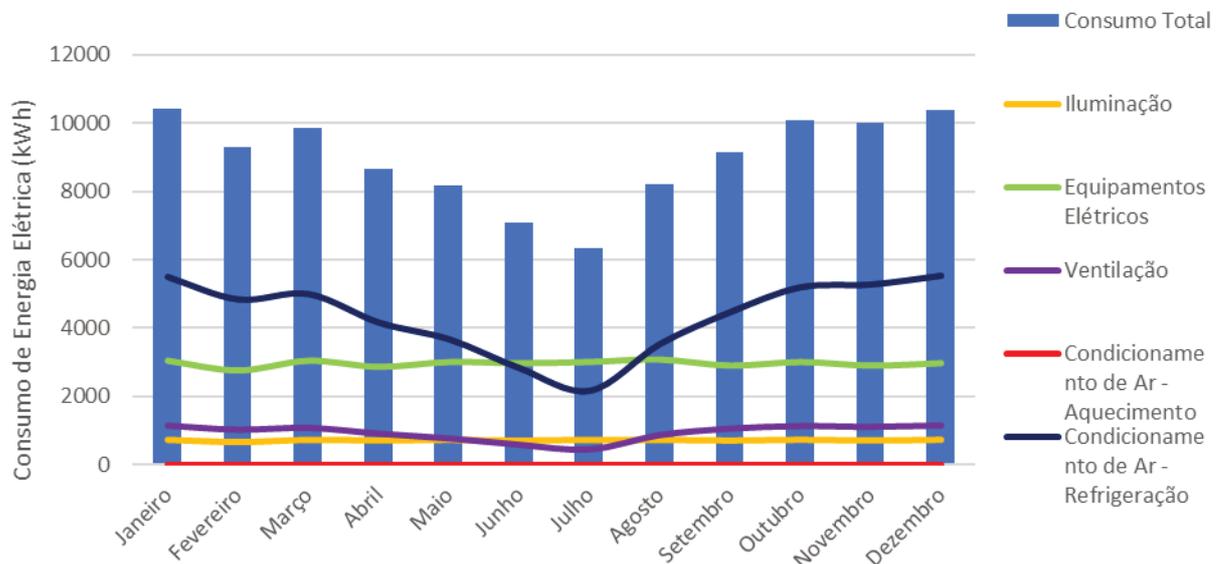
dos equipamentos de condicionamento de ar durante o ano para atingir as temperaturas de *setpoint* estabelecidas. O consumo médio anual por área de apartamento é de 31,46 kWh/m<sup>2</sup> e é superior ao mesmo indicador quanto comparado à Porto Alegre.

Figura 4.5 - Distribuição do consumo anual em um apartamento em Recife



O consumo anual da edificação em estudo para a cidade de Recife é de 107.606 kWh, que representa um aumento de 26,26% em relação a Porto Alegre e está detalhado nos dados mensais e por tipo de uso final na Figura 4.6. O principal aumento em relação à Porto Alegre se deve ao maior uso de equipamentos de condicionamento de ar para refrigeração para manter as mesmas condições de temperatura no interior da edificação em relação à edificação simulada em Porto Alegre.

Figura 4.6 Consumo de energia na edificação por mês e por tipo de uso final para Recife



A maior utilização e consumo de energia elétrica para o uso de ar condicionado em Recife se deve às condições climáticas da região. Recife encontra-se próximo à linha do Equador e possui em maior parte do ano temperaturas médias superiores à Porto Alegre.

#### 4.2 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA APLICADA NA ENVOLTÓRIA DA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL

Conforme apresentado na Tabela 3.4, o sistema foi subdividido em cinco, de acordo com a orientação da fachada e um na cobertura, sendo o último mais próximo ao ideal de geração. Ao total a edificação apresenta uma área instalada de módulos de aproximadamente 1.605 m<sup>2</sup>. Para os dados de geração fotovoltaica apresentados neste trabalho, é considerado o resultado de energia elétrica entregue à rede em corrente alternada, já considerando todas perdas e a eficiência dos equipamentos de conversão conforme descrito na metodologia.

As Tabela 4.1 e 4.2 apresentam o resumo de consumo e geração mensal por tipo de tecnologias, considerando a geração em todos os subsistemas para Porto Alegre e Recife, respectivamente. Para Porto Alegre, todas tecnologias supriram a demanda da edificação no acumulado do ano.

Tabela 4.1 – Resumo do consumo e geração mensal de energia por tecnologia em Porto Alegre

Mês	Consumo	Geração total por tecnologia - Porto Alegre				
	Consumo Edificação (kWh)	c-Si (kWh)	mc-Si (kWh)	CIGS (kWh)	CdTe (kWh)	a-Si (kWh)
Jan	9.766	21.776	20.246	17.557	20.693	8.671
Fev	8.748	19.583	18.174	15.743	18.497	7.769
Mar	8.628	22.118	20.554	17.787	20.833	8.770
Abr	5.238	18.956	17.589	15.123	17.359	7.417
Mai	4.368	15.709	14.552	12.426	13.952	6.059
Jun	4.002	12.768	11.822	10.075	11.237	4.905
Jul	5.281	13.133	12.159	10.361	11.555	5.043
Ago	4.420	17.636	16.351	14.011	15.912	6.852
Set	4.424	18.456	17.111	14.663	16.661	7.171
Out	6.500	20.332	18.870	16.240	18.716	7.969
Nov	8.499	22.145	20.574	17.784	20.765	8.760
Dez	9.478	23.276	21.651	18.809	22.311	9.301
<b>Total</b>	<b>79.352</b>	<b>225.888</b>	<b>209.653</b>	<b>180.577</b>	<b>208.491</b>	<b>88.686</b>

Já Recife, apesar de apresentar uma geração de energia maior, também apresenta um consumo maior. A geração de energia proveniente das tecnologias de silício monocristalino, multicristalino, CdTe e CIGS supriram a demanda, porém quando a envoltória foi coberta por módulos de silício amorfo não foi suficiente para deixar a edificação autossuficiente no acumulado do ano.

Tabela 4.2 - Resumo do consumo e geração mensal de energia por tecnologia em Recife

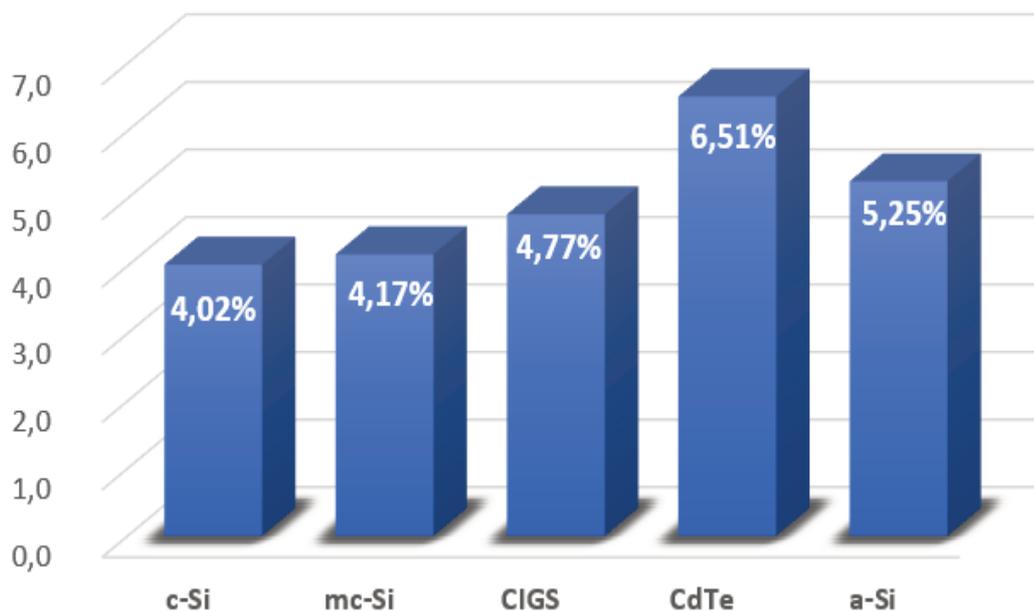
Mês	Consumo	Geração total por tecnologia - Recife				
	Consumo Edificação (kWh)	c-Si (kWh)	mc-Si (kWh)	CIGS (kWh)	CdTe (kWh)	a-Si (kWh)
Jan	10.421	21.253	19.769	17.174	20.179	8.494
Fev	9.279	18.737	17.431	15.150	17.798	7.496
Mar	9.853	20.509	19.070	16.544	19.450	8.174
Abr	8.645	19.854	18.454	15.986	18.805	7.889
Mai	8.185	19.988	18.570	16.059	18.903	7.915
Jun	7.089	17.965	16.682	14.395	16.959	7.082
Jul	6.344	15.742	14.615	12.601	14.850	6.196
Ago	8.207	19.090	17.736	15.333	18.051	7.554
Set	9.130	20.148	18.729	16.231	19.091	8.011
Out	10.070	20.684	19.238	16.706	19.634	8.259
Nov	9.995	20.395	18.969	16.472	19.359	8.144
Dez	10.389	20.982	19.519	16.961	19.928	8.390
<b>Total</b>	<b>107.606</b>	<b>235.346</b>	<b>218.782</b>	<b>189.613</b>	<b>223.006</b>	<b>93.603</b>

Com base nas Tabelas 4.1 e 4.2, pode-se perceber que para todas tecnologias, a geração foi maior em Recife, porém, em diferentes proporções. Para as tecnologias de mc-Si e CdTe, que possuem uma eficiência STC próxima, para Porto Alegre os módulos de mc-Si foi a tecnologia com a segunda maior produção, porém para Recife, a segunda maior geração foi devido ao CdTe. Essa variação ocorre devido às propriedades de cada tecnologia, como foi descrito na Tabela 3.5 que apresentam os coeficientes de perda de potência máxima em relação ao aumento de temperatura. Pode-se notar as diferenças entre o acumulado anual das cidades na Figura 4.7.

É importante ressaltar que a geração média anual dos sistemas instalados é maior que o consumo médio anual do edifício para todas as tecnologias estudadas, exceto para o silício amorfo. Isto significa que a energia excedente será entregue à rede, e compensada, no ponto de vista de negócio, a geração superior à demanda não é viável, pois de acordo com a

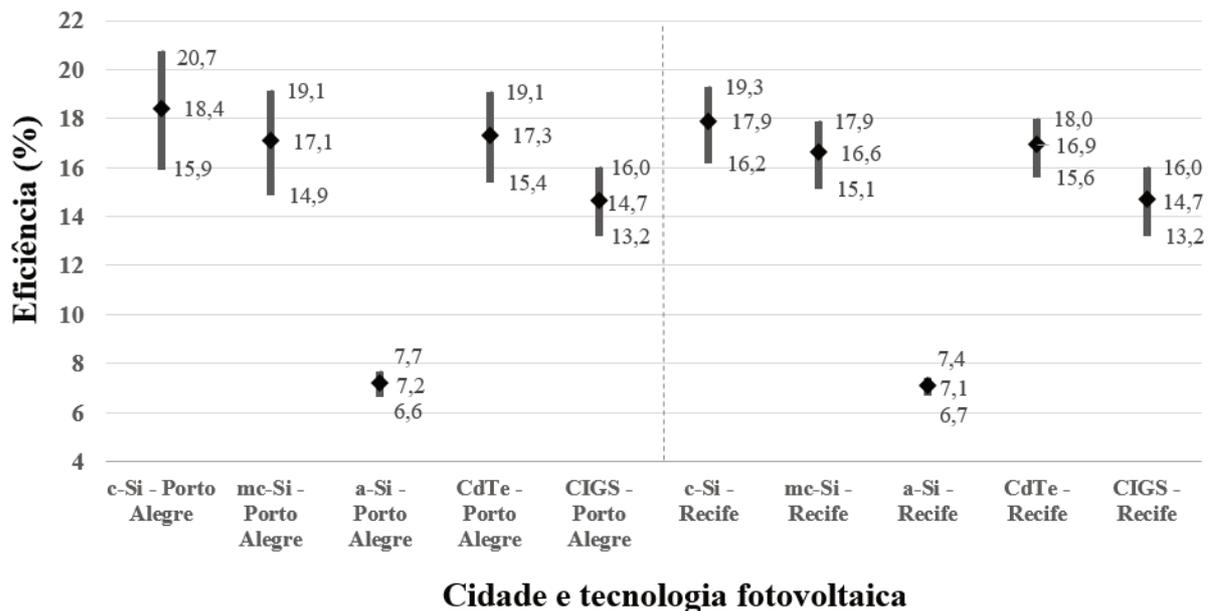
resolução da ANEEL se o excesso continuar a cada ano este perderá a validade em até 5 anos. No entanto, a abordagem aqui realizada foi para verificar o potencial de geração de cada fachada de um edifício com características semelhantes. Em um caso real de instalação devem ser analisadas as condições de entorno, fachada disponível, fachada sombreada e diversos fatores específicos de cada caso em particular, e então dimensionar o sistema fotovoltaico para obter uma geração média anual de energia igual ou menor que o consumo da edificação.

Figura 4.7 – Variação de geração por tecnologia entre Porto Alegre e Recife



A Figura 4.8 apresenta a variação entre o mínimo, máximo e a média da eficiência operativa das diferentes tecnologias ao longo do ano. Com o objetivo de obter a eficiência durante a operação real do sistema, foi considerado o mínimo de uma incidência solar horária de  $100 \text{ W/m}^2$ , desconsiderando os períodos da noite, início e fim do dia, onde as células apresentam temperaturas operativas baixa, com isso obtendo uma eficiência maior, porém sem fins de geração. Conforme mostrado na Figura 4.8, a variação é maior em Porto Alegre, pois nessa região, há dias com alta incidência solar e com temperaturas baixas, que aumentam a eficiência dos módulos. O mesmo ocorre nos dias com temperatura ambiente elevadas, que além da temperatura, a incidência solar aquece os módulos que atingem temperaturas operativas maiores, e com isso perdem mais eficiência.

Figura 4.8 – Eficiência operativa mínima, máxima e média de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos ao longo do ano por cidade



As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentaram o comportamento de consumo e da geração de energia por tecnologia. A fim de analisar o comportamento também em relação a orientação são apresentadas a Tabela 4.3 e as Figuras 4.9 e 4.10. Para esta análise foi escolhida a tecnologia de silício monocristalino, por ser uma tecnologia com grande participação no mercado, consolidada e com maior eficiência atualmente.

Em Porto Alegre, nota-se que o subsistema que mais gerou energia foi a fachada norte com o equivalente a 28,1% da energia produzida, isto devido à área instalada deste subsistema ser a maior, representando 29,2% da área instalada na envoltória. Em seguida vem a geração da cobertura, com uma participação de 26,7%, a fachada leste representou 18,3 e a fachada sul, com a menor participação e área instalada representou 8,9% do total gerado.

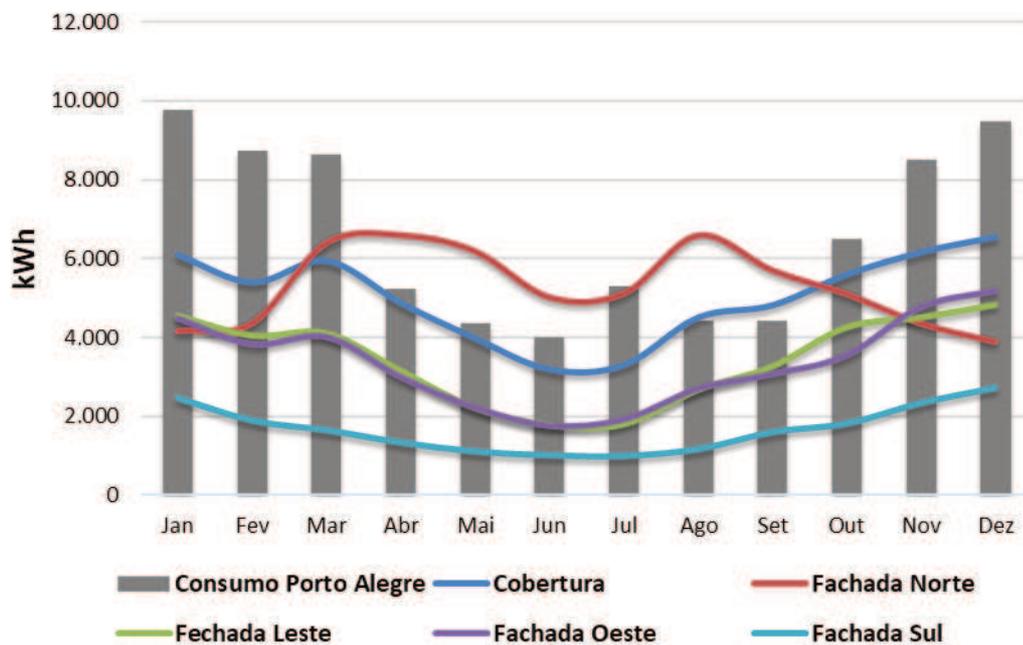
Para Recife, há diferenças nas participações do total gerado, o subsistema que mais entregou energia à rede foi a cobertura com o equivalente a 27,9% da energia produzida com uma área instalada que representa 15,9% da área instalada na envoltória. Em seguida vem a geração da fachada oeste, com uma participação de 23,7% com uma participação de 18,8% na área instalada, com isso, a fachada oeste apresentou um ótimo desempenho em relação às demais fachadas na vertical para Recife, pois com menos área produziu mais que a fachada norte. Em seguida, vem a fachada norte, com uma produção de 21,9% do total, a fachada leste apresentou uma participação de 15,1% e por fim, a fachada sul, com a menor participação representou 11,4% do total gerado.

Tabela 4.3 – Geração de energia por subsistema para os módulos de silício monocristalino

Tecnologia / Cidade	Subsistema	Área (m <sup>2</sup> )	Participação na área total	Geração (kWh)	Participação na geração
Tecnologia Monocristalino - Porto Alegre	Cobertura	255	15,9%	60.337	26,7%
	Fachada Norte	468	29,2%	63.555	28,1%
	Fachada Leste	301	18,8%	41.297	18,3%
	Fachada Oeste	301	18,8%	40.519	17,9%
	Fachada Sul	280	17,4%	20.149	8,9%
	<b>Total c-Si</b>	<b>1.605</b>	<b>100,0%</b>	<b>225.857</b>	<b>100,0%</b>
Tecnologia Monocristalino - Recife	Cobertura	255	15,9%	65.684	27,9%
	Fachada Norte	468	29,2%	51.515	21,9%
	Fachada Leste	301	18,8%	35.447	15,1%
	Fachada Oeste	301	18,8%	55.817	23,7%
	Fachada Sul	280	17,4%	26.884	11,4%
	<b>Total c-Si</b>	<b>1.605</b>	<b>100,0%</b>	<b>235.346</b>	<b>100,0%</b>

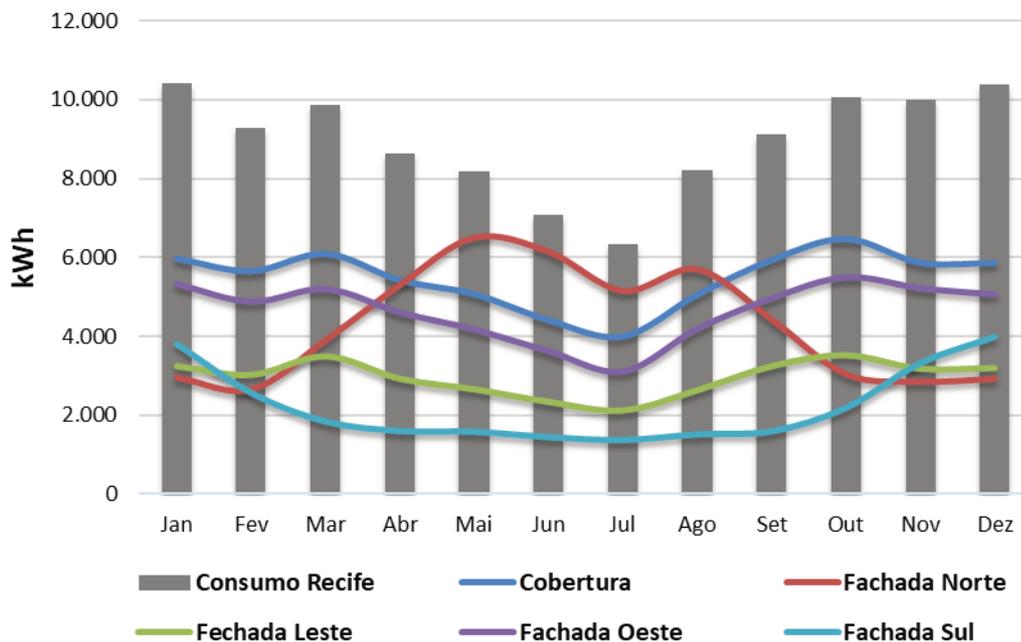
Como observado, para Porto Alegre, o subsistema que apresentou a maior geração foi o da fachada norte. Nota-se que este sistema apresenta um bom aproveitamento no período de inverno entre os meses de março a setembro. Para todos os demais sistemas é invertido a maior geração, sendo eles todos com melhor desempenho no verão, mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Geração de energia mensal dos subsistemas com módulos de silício monocristalino para Porto Alegre



Em Recife, o subsistema que produziu mais energia ao longo do ano foi a cobertura, que apresentou um bom desempenho durante os meses de verão e foi mais constante que por exemplo a fachada norte, que apesar de possuir uma maior produção nos meses de inverno, nos meses de verão perdeu muito desempenho. Destaca-se em Recife o desempenho da fachada oeste, que apresentou um comportamento semelhante à cobertura durante todos meses do ano, mostrado na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Geração de energia mensal dos subsistemas com módulos de silício monocristalino para Recife



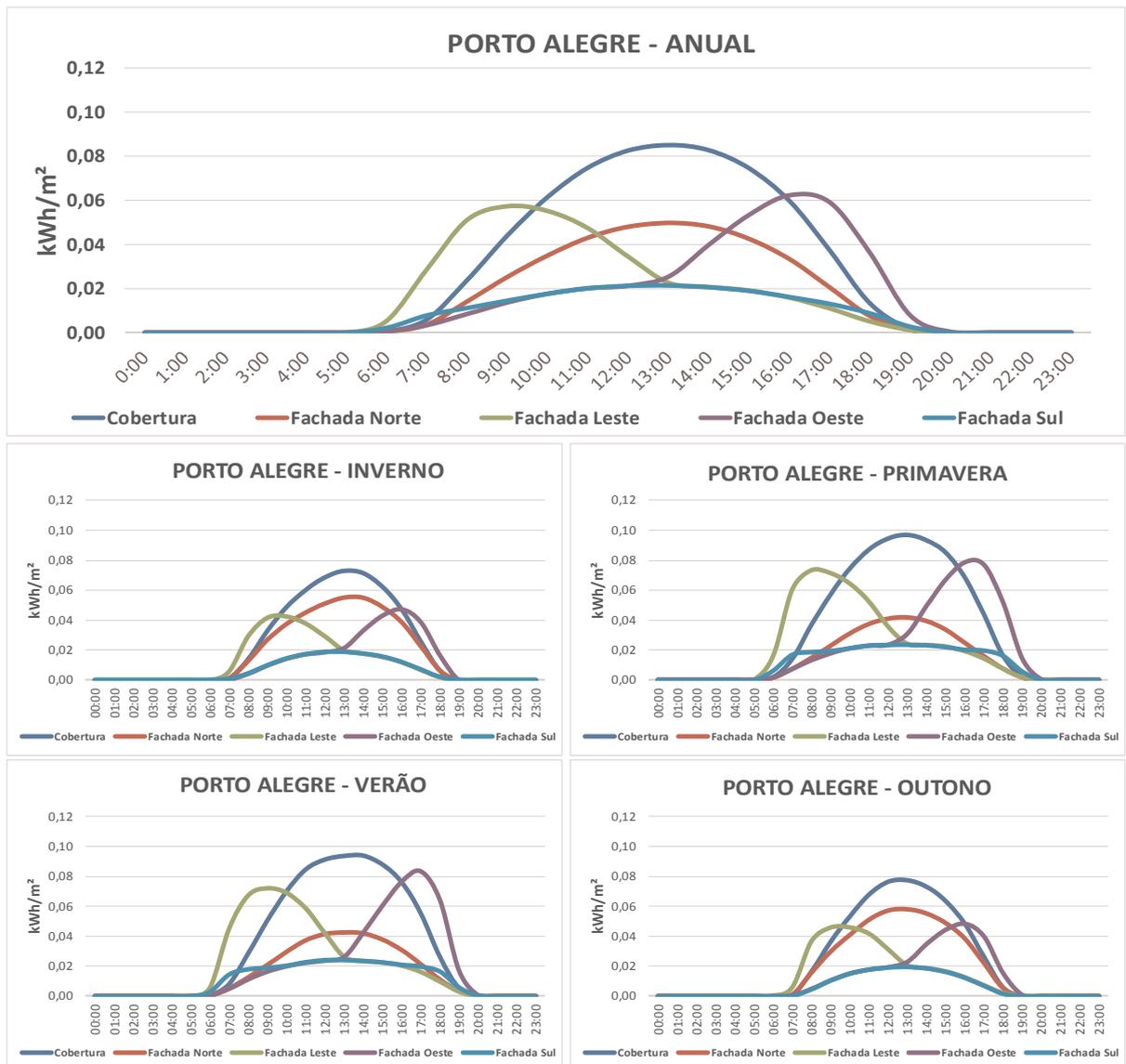
Com objetivo de detalhar o comportamento da geração fotovoltaica nas diferentes superfícies da edificação, os dados foram proporcionalizados para mesma área e realizadas análises da geração horária anual e nas estações. Assim apresentando o comportamento anual e com uma representatividade de diferentes períodos e oscilações da trajetória solar dentro do ano.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam comparativos entre a geração de energia por área em cada superfície, em kWh/m<sup>2</sup>, para a elaboração dos gráficos dos dias médios, foram consideradas as médias de geração em um metro quadrado para cada horário do dia de acordo com o referente período escolhido, assim criando um dia médio para o ano e para cada estação.

Em Porto Alegre, mostrado na Figura 4.11, a geração na cobertura apresenta o melhor desempenho ao longo de todo o ano, porém no inverno e outono, a fachada norte, apesar de

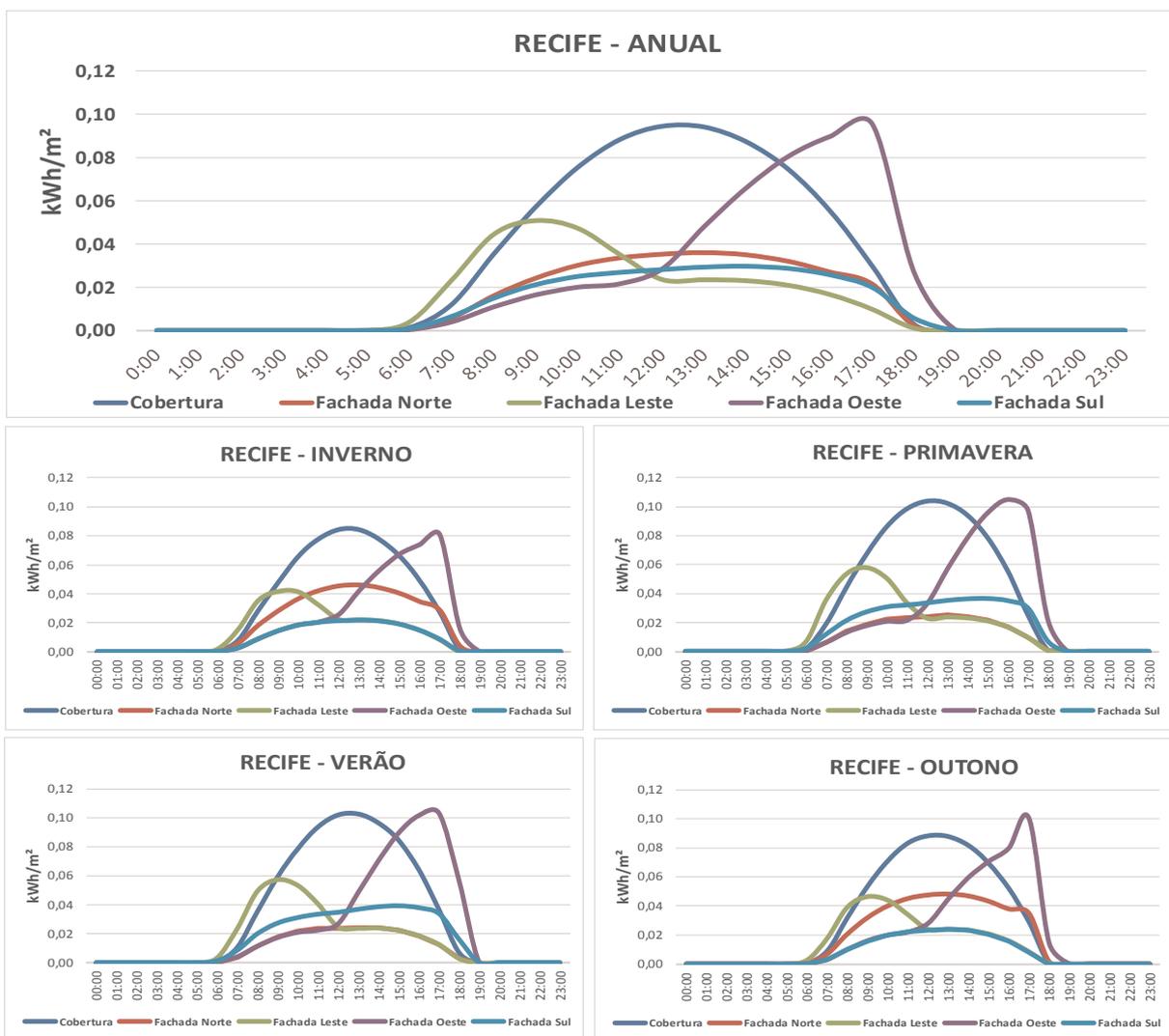
estar na vertical, apresentou um desempenho semelhante à cobertura. Já as fachadas leste e oeste tem sua variação bastante acentuada dentro do próprio dia, sendo que a fachada leste tem um desempenho melhor no período da manhã e a fachada oeste no período da tarde conforme a trajetória solar ao longo do dia. Ao longo do ano, estas fachadas possuem um desempenho equivalente ao instalado na fachada norte. Pode se notar também as diferenças devido a trajetória solar ao longo do ano, onde cada fachada tem um comportamento distinto ao longo das estações, sendo que no verão e na primavera, a geração na fachada sul se aproxima da norte e as fachadas leste e oeste possuem um desempenho superior ao restante do ano.

Figura 4.11 - Geração de energia fotovoltaica em um metro quadrado por subsistema ao longo do dia médio para Porto Alegre



A Geração fotovoltaica em um metro quadrado por subsistema ao longo do dia para Recife é mostrada na Figura 4.12. Além da cobertura que é esperado ter um bom desempenho, destaque-se a fachada oeste, como melhor fachada vertical para instalação, com um desempenho 69% superior a fachada norte ao longo do ano. Devido à latitude local e a trajetória solar, para Recife, a fachada sul obteve um desempenho superior a norte no verão e na primavera, com isso, obtendo um desempenho anual próximo a esta fachada, que para Porto Alegre representou a maior diferença entre fachadas.

Figura 4.12 - Geração fotovoltaica em um metro quadrado por subsistema ao longo do dia médio para Recife



A geração mensal por área em ( $\text{kWh m\acute{e}s/m}^2$ ) está detalhada no Apêndice B, onde é possível analisar a geração ao longo dos meses, e comparar as tecnologias e o desempenho das diferentes orientações de fachadas. Também é apresentado os meses com maior e menor produção e a variação entre os meses com maior e menor produção. A variação atingiu o

máximo para a fachada oeste, com a tecnologia CdTe em Porto Alegre, onde variou de uma produção de 5,19 kWh mês/m<sup>2</sup> em julho para 16,28 kWh mês/m<sup>2</sup> em dezembro, representando uma variação de 68,08% entre os meses. Já a menor variação foi encontrada no total da geração da tecnologia c-Si em Recife, onde a variação foi de 25,93% ocorrendo o maior desempenho em janeiro com 13,24 kWh mês/m<sup>2</sup> e o menor em julho com 9,81 kWh mês/m<sup>2</sup>.

Nota-se que a variação na geração total em Porto Alegre é em média 46% entre a maior em dezembro e a menor em junho.

Para Recife, a variação entre os meses é inferior, sendo em média 26% de diferença entre o mês de melhor desempenho em janeiro e o de pior desempenho em julho. Tanto para Porto Alegre, quanto para Recife, estas informações estão de acordo com a Figura 4.2 que apresenta a radiação incidente.

O Apêndice C apresenta uma análise semelhante ao Apêndice B no que se refere a uma análise temporal, porém neste, a análise foi realizada por estações do ano. O Apêndice C apresenta a geração em kWh/m<sup>2</sup> acumulado nas quatro estações do ano e também apresenta qual a participação de cada estação na geração total da edificação, por tipo de fachada, tecnologia e cidade. Neste Apêndice, pode-se notar que a estação com melhor desempenho em média é o Verão, e a que apresenta o pior desempenho em geral é o inverno.

Com o objetivo de facilitar as análises e comparações de geração fotovoltaica na envoltória de edificações e criar relações de desempenho por área e orientações dos subsistemas, foram criadas as Tabelas 4.4 e 4.5 para Porto Alegre e Recife respectivamente. Nestas tabelas são apresentados os principais resultados relacionados a proporção de área *versus* geração para as diferentes cidades, tecnologias e fachadas. Sabe-se que em projetos reais, e principalmente em edificações já existentes, onde se planeja o acoplamento de energia fotovoltaica na envoltória, não se dispõem de muita superfície útil para este fim, tanto nas fachadas quanto principalmente na cobertura. Com a relação de kWh/m<sup>2</sup> produzido por ano em cada caso, é criado uma relação entre a orientação da fachada *versus* a geração máxima, que neste caso foi considerada a geração na cobertura com inclinação indicada para sistemas fotovoltaicos, com valor próximo da latitude. Por fim, apresenta-se uma estimativa de área necessária para suprir a demanda de energia do edifício residencial proposto em cada subsistema. Também é apresentada a produtividade dos sistemas fotovoltaicos, para cada tecnologia e fachada. A produtividade é calculada com base na geração anual e a potência instalada. Assim como a relação de área, é um indicador comparativo de sistemas fotovoltaicos para avaliação de desempenho, tanto das tecnologias, quanto da orientação e inclinação nas fachadas.

Estas relações podem ser utilizadas como estudos rápidos e preliminares, com base na área disponível nas fachadas e no consumo do edifício para avaliar a geração potencial de uma edificação. Porém, deve-se levar em conta módulos eficientes com eficiências próximas aos apresentados neste estudo para uma melhor comparação. Estas relações podem ser utilizadas também como índices de adaptação de projeções de geração já estimadas para um caso em cobertura para a geração em uma das fachadas.

Tabela 4.4 – Relações de geração anual de energia por área nos subsistemas e tecnologias para Porto Alegre

Tecnologia	Fachada	Área (m <sup>2</sup> )	Geração anual de energia (kWh)	Geração por área (kWh ano/m <sup>2</sup> )	Produtividade da geração por potência instalada	Relação geração na fachada x cobertura	Área necessária para suprir o consumo (m <sup>2</sup> )
c-Si	Cobertura	255	60.337	236,62	1,22	1,00	335
	Fachada Norte	468	63.555	135,80	0,70	1,74	584
	Fachada Leste	301	41.297	137,20	0,71	1,72	578
	Fachada Oeste	301	40.519	134,61	0,70	1,76	589
	Fachada Sul	280	20.149	71,96	0,37	3,29	1.103
	<b>Total c-Si</b>	<b>1.605</b>	<b>225.857</b>	<b>140,72</b>	<b>0,73</b>	<b>1,68</b>	<b>564</b>
mc-Si	Cobertura	255	56.037	219,75	1,23	1,00	361
	Fachada Norte	468	58.988	126,04	0,70	1,74	630
	Fachada Leste	301	38.322	127,32	0,71	1,73	623
	Fachada Oeste	301	37.608	124,94	0,70	1,76	635
	Fachada Sul	280	18.699	66,78	0,37	3,29	1.188
	<b>Total mc-Si</b>	<b>1.605</b>	<b>209.653</b>	<b>130,63</b>	<b>0,73</b>	<b>1,68</b>	<b>607</b>
CIGS	Cobertura	255	48.367	189,67	1,24	1,00	418
	Fachada Norte	468	50.778	108,50	0,71	1,75	731
	Fachada Leste	301	32.961	109,51	0,72	1,73	725
	Fachada Oeste	301	32.383	107,58	0,70	1,76	738
	Fachada Sul	280	16.089	57,46	0,38	3,30	1.381
	<b>Total CIGS</b>	<b>1.605</b>	<b>180.577</b>	<b>112,51</b>	<b>0,74</b>	<b>1,69</b>	<b>705</b>
CdTe	Cobertura	255	56.230	220,51	1,22	1,00	360
	Fachada Norte	468	58.532	125,07	0,69	1,76	634
	Fachada Leste	301	37.899	125,91	0,70	1,75	630
	Fachada Oeste	301	37.321	123,99	0,69	1,78	640
	Fachada Sul	280	18.509	66,11	0,37	3,34	1.200
	<b>Total CdTe</b>	<b>1.605</b>	<b>208.491</b>	<b>129,90</b>	<b>0,72</b>	<b>1,70</b>	<b>611</b>
a-Si	Cobertura	255	23.793	93,30	1,04	1,00	850
	Fachada Norte	468	24.925	53,26	0,59	1,75	1.490
	Fachada Leste	301	16.168	53,72	0,60	1,74	1.477
	Fachada Oeste	301	15.904	52,84	0,59	1,77	1.502
	Fachada Sul	280	7.896	28,20	0,31	3,31	2.814
	<b>Total a-Si</b>	<b>1.605</b>	<b>88.686</b>	<b>55,26</b>	<b>0,62</b>	<b>1,69</b>	<b>1.436</b>

Tabela 4.5 - Relações de geração anual de energia por área nos subsistema e tecnologias para Recife

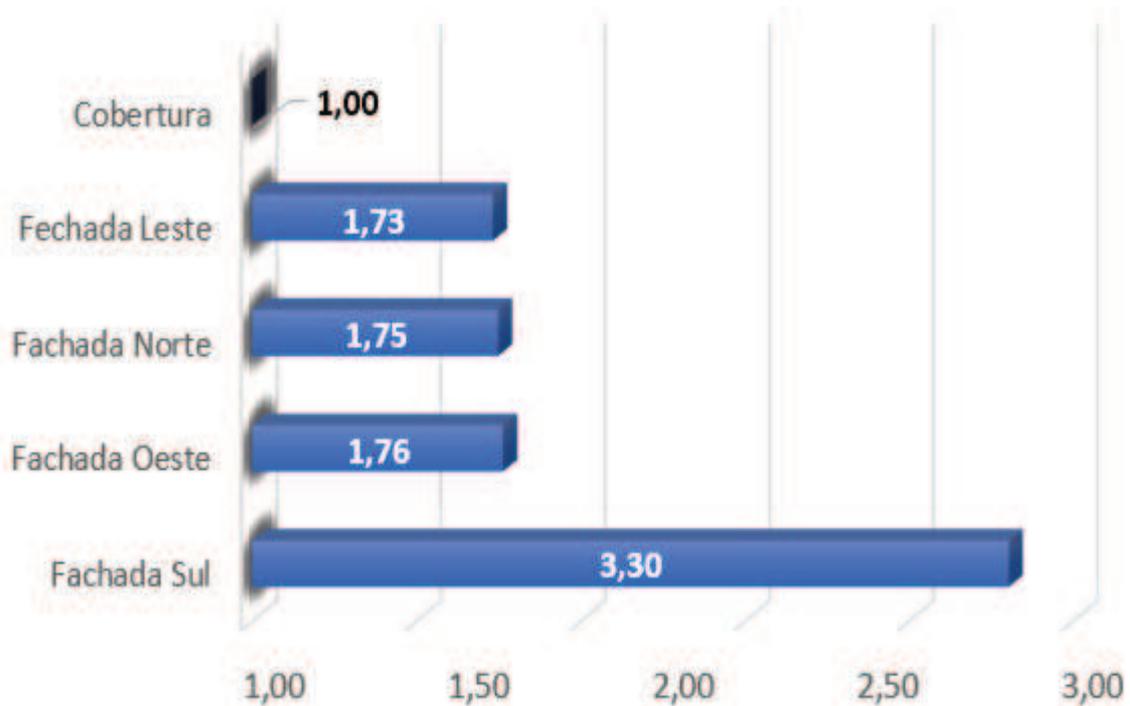
Tecnologia	Fachada	Área (m <sup>2</sup> )	Geração anual de energia (kWh)	Geração por área (kWh ano/m <sup>2</sup> )	Produtividade da geração por potência instalada	Relação geração na fachada x cobertura	Área necessária para suprir o consumo (m <sup>2</sup> )
<b>c-Si</b>	Cobertura	255	65.684	257,58	1,33	1,00	418
	Fachada Norte	468	51.515	110,07	0,57	2,34	978
	Fachada Leste	301	35.447	117,76	0,61	2,19	914
	Fachada Oeste	301	55.817	185,44	0,96	1,39	580
	Fachada Sul	280	26.884	96,01	0,50	2,68	1.121
	<b>Total c-Si</b>	<b>1.605</b>	<b>235.346</b>	<b>146,63</b>	<b>0,76</b>	<b>1,76</b>	<b>734</b>
<b>mc-Si</b>	Cobertura	255	61.088	239,56	1,34	1,00	449
	Fachada Norte	468	47.882	102,31	0,57	2,34	1.052
	Fachada Leste	301	32.932	109,41	0,61	2,19	984
	Fachada Oeste	301	51.886	172,38	0,96	1,39	624
	Fachada Sul	280	24.994	89,26	0,50	2,68	1.205
	<b>Total mc-Si</b>	<b>1.605</b>	<b>218.782</b>	<b>136,31</b>	<b>0,76</b>	<b>1,76</b>	<b>789</b>
<b>CIGS</b>	Cobertura	255	53.038	207,99	1,36	1,00	517
	Fachada Norte	468	41.475	88,62	0,58	2,35	1.214
	Fachada Leste	301	28.472	94,59	0,62	2,20	1.138
	Fachada Oeste	301	44.961	149,37	0,98	1,39	720
	Fachada Sul	280	21.669	77,39	0,51	2,69	1.390
	<b>Total CIGS</b>	<b>1.605</b>	<b>189.613</b>	<b>118,14</b>	<b>0,77</b>	<b>1,76</b>	<b>911</b>
<b>CdTe</b>	Cobertura	255	62.337	244,46	1,36	1,00	440
	Fachada Norte	468	48.790	104,25	0,58	2,34	1.032
	Fachada Leste	301	33.517	111,35	0,62	2,20	966
	Fachada Oeste	301	52.881	175,68	0,98	1,39	612
	Fachada Sul	280	25.481	91,00	0,51	2,69	1.182
	<b>Total CdTe</b>	<b>1.605</b>	<b>223.006</b>	<b>138,94</b>	<b>0,77</b>	<b>1,76</b>	<b>774</b>
<b>a-Si</b>	Cobertura	255	26.217	102,81	1,15	1,00	1.047
	Fachada Norte	468	20.465	43,73	0,49	2,35	2.461
	Fachada Leste	301	14.029	46,61	0,52	2,21	2.309
	Fachada Oeste	301	22.193	73,73	0,82	1,39	1.459
	Fachada Sul	280	10.700	38,21	0,43	2,69	2.816
	<b>Total a-Si</b>	<b>1.605</b>	<b>93.603</b>	<b>58,32</b>	<b>0,65</b>	<b>1,76</b>	<b>1.845</b>

Analisando os dados das Tabelas 4.4 e 4.5, nota-se que as proporções da geração anual de energia elétrica por área nas fachadas *versus* cobertura, considerando instalação na inclinação próxima da latitude local, entre as diferentes tecnologias fotovoltaicas para a mesma cidade variam pouco, com isso, é possível criar uma relação média entre as fachadas e determinar o comportamento médio de todas as tecnologias estudadas neste trabalho, pois ambas possuem uma semelhança entre os resultados quando analisadas nas mesmas condições. Com

o objetivo de simplificar os resultados, foi realizada uma relação média das gerações das tecnologias para cada cidade, mostrado nas Figuras 4.13 e 4.14, por fachada e considerando a geração em todos subsistemas. Para o cálculo é comparado a geração na fachada sobre a geração na cobertura, considerada o local com a geração máxima de energia em sistemas fotovoltaicos. Com isso, a relação se comporta de forma decrescente de desempenho, quanto menor for o índice de relação, mais próximo da geração máxima a fachada irá estar, portanto, quanto menor o índice, melhor o desempenho, e menor será a área necessária para a mesma geração de energia elétrica. O desempenho máximo será quando atingir o valor de um.

Para Porto Alegre, as fachadas norte, leste e oeste possuem relações semelhante ao longo do ano, portanto podem ser levadas em conta de forma igual em projetos, dando preferência para instalações na cobertura. A fachada sul apresenta uma relação de 3,30, assim necessita de uma área 3,30 vezes maior para gerar a mesma energia que na cobertura, confirmando que para locais no hemisfério sul tal orientação não é recomendada pois levaria o projeto possuir um custo muito maior.

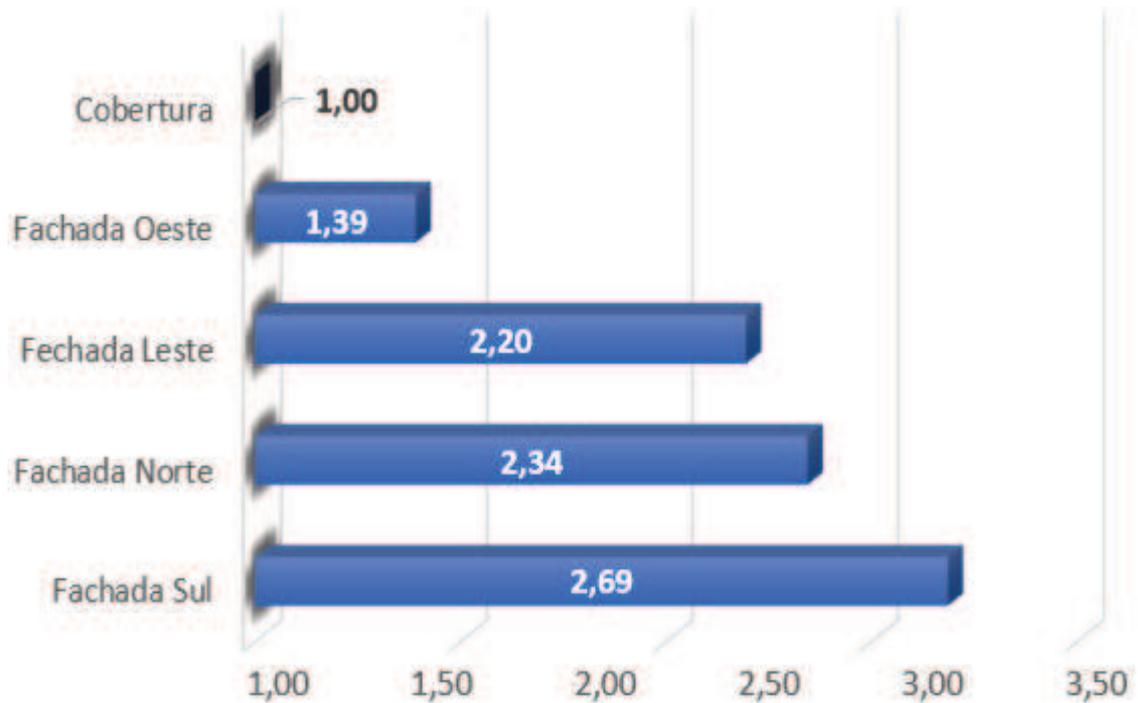
Figura 4.13 – Relações de geração anual de energia por área nos subsistemas localizados em Porto Alegre



Para Recife, a fachada oeste apresentou uma relação de 1,39, o que torna esta alternativa interessante quando uma edificação não possuir área em cobertura suficiente ou desejar complementar a geração com a utilização de uma fachada vertical que dispore de área

útil para instalação dos módulos. Já as fachadas norte, leste e sul possuem relações superiores a 2, o que dobra a área necessária instalada de módulos quando comparado a cobertura e que significaria um custo muito mais elevado por energia produzida, o que provavelmente implicaria em uma inviabilidade financeira.

Figura 4.14 – Relações de geração anual de energia por área nos subsistemas localizados em Recife



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a crescente demanda de moradias em apartamentos no setor residencial ao longo dos anos, principalmente nos centros urbanos, alternativas de aplicação das tecnologias fotovoltaicas vêm surgindo como alternativa para reduzir o consumo per capita dos condôminos.

Em função da forma de instalação dos módulos fotovoltaicos no edifício são definidos dois conceitos de sistema: o BIPV - *Building Integrated Photovoltaic* (fotovoltaico integrado à edificação) que é geralmente, na fase de projeto ou de construção do empreendimento, substituindo elementos estruturais ou arquitetônicos do envelopamento do edifício. Apesar de apresentar maior interação com a arquitetura da fachada, suas propriedades funcionais devem atender às exigências normativas do setor de construção civil de cada país, fato que dificulta uma maior disseminação dessa medida.

O outro sistema de aplicação fotovoltaica é conhecido como BAPV - *Building Attached Photovoltaic* (fotovoltaico anexado ou aplicado à edificação). Neste, as tecnologias são dispostas de forma não integrada funcionalmente ao envelopamento do edifício, podendo ser aplicadas tanto em edifícios novos como serem adaptadas aos existentes. Essa flexibilidade permite a aplicação de tecnologias fotovoltaicas mais maduras, como a de módulos rígidos de silício cristalino.

Este trabalho apresentou análises do desempenho de uma edificação típica residencial, através de dados obtidos em simulações utilizando o *software EnergyPlus*. Foi desenvolvido uma edificação e padrões de uso típico residencial a fim de criar uma edificação e quantificar ao longo do ano seu consumo. No trabalho, foram comparados os resultados para duas cidades, Porto Alegre e Recife.

A cidade de Recife apresentou um consumo de energia elétrica superior quando comparado a Porto Alegre, principalmente devido ao uso de condicionamento de ar, isto devido as características climáticas de Recife. Estas mesmas condições foram responsáveis por Recife apresentar um melhor desempenho na produção de energia elétrica através dos mesmos módulos fotovoltaicos de todas tecnologias aplicados em Porto Alegre.

Com o modelo de edificação simulado, foi proposto um sistema conectado à rede, dividido em cinco subsistemas, cada um para uma orientação de fachada vertical e um para a cobertura. No total, a edificação apresentou um sistema com 1605 m<sup>2</sup> de área instalada de módulos fotovoltaicos, e foram simuladas as tecnologias c-Si, mc-Si, a-Si, CdTe e CIGS. Para a cidade de Porto Alegre, todas tecnologias estudadas apresentaram uma produção de energia

elétrica suficiente para suprir a demanda da edificação, enquanto para a cidade de Recife, apenas a tecnologia a-Si não produziu energia suficiente para suprir a demanda. Portanto, levando-se em conta as tecnologias já consolidadas no mercado e com a atual eficiência de mercado, é possível uma edificação residencial se tornar autossuficiente com a geração fornecida por suas fachadas, dependendo da área disponível para este fim.

A tecnologia que apresentou a maior geração de energia em Porto Alegre foi a de silício cristalino, cuja produção média anual foi de 140,7 kWh/m<sup>2</sup>. A tecnologia que apresentou a segunda maior geração foi a de silício multicristalino com 130,6 kWh/m<sup>2</sup>, em seguida a CdTe com 129,9 kWh/m<sup>2</sup>, em quarto a CIGS com 112,5 kWh/m<sup>2</sup> e por último os módulos da tecnologia de silício amorfo com 55,2 kWh/m<sup>2</sup>.

Para Recife, a maior geração de energia também foi a de silício cristalino, cuja produção média anual foi de 146,6 kWh/m<sup>2</sup>. A tecnologia que apresentou a segunda melhor geração foi a CdTe com 138,9 kWh/m<sup>2</sup>, em seguida a mc-Si com 136,6 kWh/m<sup>2</sup>, em quarto a CIGS com 118,1 kWh/m<sup>2</sup> e por último os módulos de silício amorfo com 58,3 kWh/m<sup>2</sup>. Apesar da tecnologia CdTe apresentar uma eficiência inferior de catálogo em STC em relação à silício multicristalino, quando analisada a geração em modo operativo, esta tecnologia supera em geração de energia devido ao seu coeficiente de perda por temperatura ser inferior em relação a multicristalina.

Para as análises referente às orientações, cada cidade obteve particularidades devido à latitude local. Para ambas, foi considerada como geração máxima a geração na cobertura com inclinação sugerida a partir da latitude. A partir desta geração, foi apresentada uma relação de área necessária para que cada fachada produzisse a mesma energia que a cobertura.

Para Porto Alegre, as fachadas verticais apresentam relações muito semelhante, sendo a fachada vertical com melhor relação foi a leste com 1,73, seguida da fachada norte com 1,75 e da fachada oeste com 1,76, com exceção da fachada sul que apresentou uma relação ruim de 3,30. Já em Recife, a melhor fachada vertical para geração fotovoltaica é a fachada oeste, que apresentou uma relação de 1,39 vezes a área necessária para gerar a mesma quantidade de energia elétrica que a cobertura, seguida das fachadas leste com relação de 2,20, norte com 2,34 e por último a fachada sul com 2,69.

A fachada oeste para Recife apresentou o melhor desempenho em uma fachada vertical para as simulações. com uma relação de área de 1,39 vezes a área da cobertura. Apesar do maior dimensionamento e da complexidade de instalação vertical, é uma alternativa para as edificações onde não há cobertura suficiente disponível para geração.

Para o desenvolvimento de futuros trabalhos sugere-se a análise da viabilidade econômica da instalação vertical de módulos fotovoltaicos na envoltória da edificação. A partir da diferença de custo de instalação da estrutura e módulos necessários por área, aplicados em cobertura *versus* área de estruturas aplicadas na fachada na vertical. Com isso, comparar com as relações de geração apresentadas neste trabalho e criar uma estimativa de custo e indicadores financeiros de viabilidade econômica de instalações na vertical para edifícios residenciais para uma melhor análise sobre os BAPV e os desafios para que estas edificações se tornem mais comum no futuro.

## REFERÊNCIAS

ABESCO. **A grande contribuição dos green buildings para contornarmos com sucesso os desafios energéticos do país.** Associação Brasileira das Empresas de Serviço de Conservação de Energia. São Paulo. 2015.

ABNT. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** Universidade de São Paulo. São Paulo. 2012.

ANEEL. **Resolução Normativa N. 482 - Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 13. 2012.

ANEEL. **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL - Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2014.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2017.

ANEEL. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA - ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica,** 2018. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp)>. Acesso em: 01 Julho 2018.

ASHARE. **90.1-2010 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.** Atlanta, EUA. 2010.

BURGER, B.; RÜTHER, R. **Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature.** Solar Energy, v. 80, Issue 1, p. 32-45, 2006.

CGEE. **Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica: Evolução tecnológica nacional no segmento de eficiência energética.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, DF. 2017.

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F. O. R. **Estratégias para edifícios de escritório energia zero no Brasil com ênfase em BIPV.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, p. 27-42, 2014.

ELETROBRÁS. **Eficiência Energética - Teoria & Prática.** 1. ed. Itajubá: FUPAI, 2007.

ENERGYPLUS. **Engineering Reference.** U.S. Department of Energy. [S.l.], p. 1-1716. 2018a.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference**. U.S. Department of Energy. [S.l.], p. 1-2690. 2018b.

EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. 2007.

EPE. **Estudo de Demanda - Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2015-2024)**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 80. 2016a.

EPE. **NOTA TÉCNICA DEA 13/15 - Demanda de Energia 2050**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 257. 2016b.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. 2017a.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica - ano base 2016**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 1-232. 2017b.

EPE. **Balço Energético Nacional 2018 : Ano base 2017**. Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Rio de Janeiro. 2018.

GREEN, M. A. et al. **Solar Cell Efficiency Tables (Version 51)**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, p. 1-10, 2017.

GREEN, M. A. et al. **Solar cell efficiency tables (Version 52)**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, p. 427-436, Jun 2018.

GUNTHER, M. Are Glowing Reports of New Solar Cell Material Mostly Hype? **Chemistry World**, 02 March 2015.

IBGE. **Censo Demográfico 2010 - Características da população e dos domicílios**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. 2011.

IEA. **Solar Photovoltaic Energy: Technology Roadmap 2014 Edition**. International Energy Agency. Paris. 2014.

IEA. **Key World Energy Statistics**. International Energy Agency. Paris. 2017.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **IRENA**, 2016. Disponível em: <<http://www.irena.org/>>. Acesso em: 01 out. 2016.

LASNIER, F.; ANG, T. G. **Photovoltaic engineering handbook**. IOP Publishing. New York, p. 548. 1990.

MISZEWSKI, C. C. **Benefícios da utilização de sistemas de aquecimento solar em condomínios verticais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.

NAKANO, A. **Simulação de desempenho energético de tecnologias fotovoltaicas em fachadas de edifício no município de São Paulo**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (Mestrado). São Paulo, p. 143. 2017.

NREL. **SAM Photovoltaic Model Technical Reference**. National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO, p. 63. 2015.

ORDENES, M. et al. **The Impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil**. Energy and Buildings, p. 629-642, 2006.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. Instituto Nacional de Pesquisas espaciais - INPE. São José dos Campos, p. 60. 2006.

PRATIL. **Tudo Sobre Energia Solar: Tipos de Sistema (On Grid e Off Grid)**. PRATIL, 2016. Disponível em: <<http://pratil.com.br/site/energia-solar/>>. Acesso em: 01 Outubro 2016.

PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**. Eletrobrás. Rio de Janeiro, p. 187. 2005.

PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - ano base 2005 - Classe residencial relatório sul**. Rio de Janeiro, p. 160. 2007.

PROCEL. **PROCEL EDIFICA**. Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – PROCEL EDIFICA. Brasília. 2015.

RGE SUL, 2018. Disponível em: <<https://www.rge-rs.com.br/>>. Acesso em: 14 Julho 2018.

RODRIGUES, T. T.; CARLO, J. C. **Simulação térmica de sistemas bipv por meio do energyplus**. X ELACAC, Balneário Camboriu, Setembro 2017. 808-817.

SANTOS, Í. P.; RÜTHER, R. **The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil**. Energy and Buildings, p. 290-297, 2012.

SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. **Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office building in a warm and sunny climate**. Renewable Energy, p. 84-98, 2017.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. UFSC. Florianópolis. 2006.

TRIPARHY, P. K.; SADHU, S. K.; PANDA, A. A critical review on building integrated photovoltaic products and their application. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 451-465, 2016.

ZOMER, C. D. et al. **Compromissos entre forma e função de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações e conectados à rede em baixas latitudes**. VII ELACAC, Búzios , RJ, Jan 2011. 1-10.

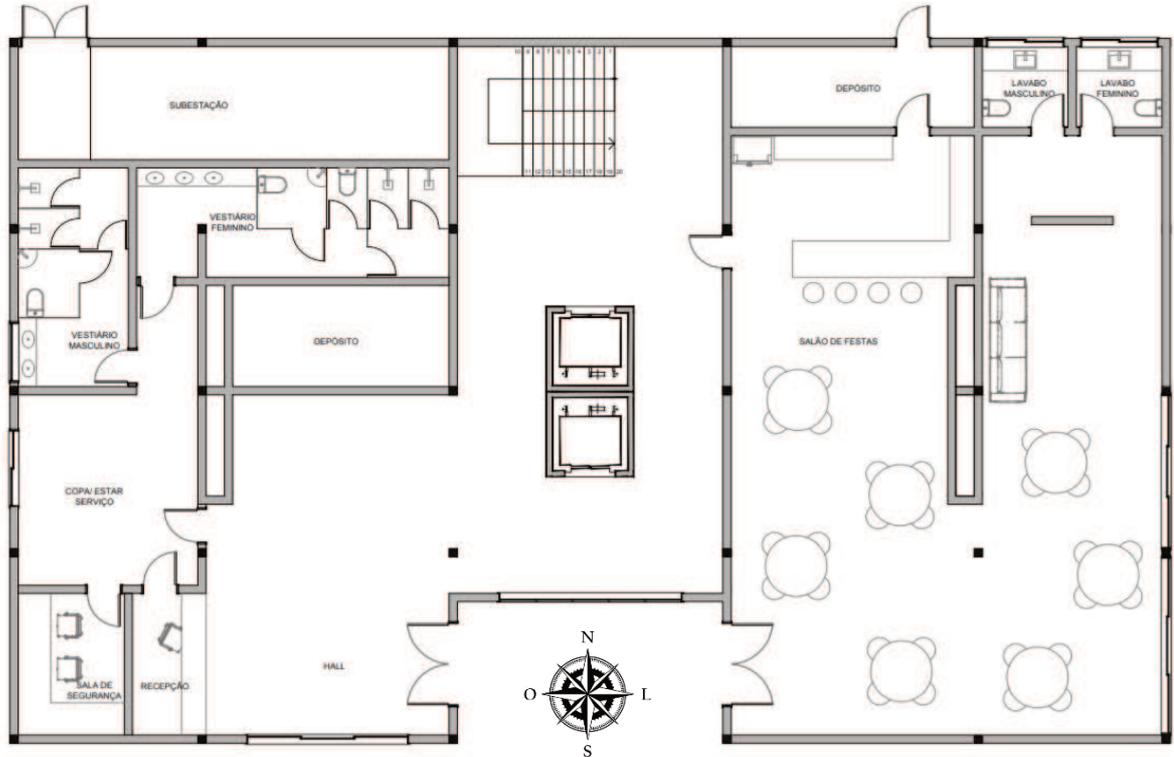
## ANEXO I – PROPRIEDADES DE OCUPAÇÃO, EQUIPAMENTOS E CONSTRUTIVAS DE UMA EDIFICAÇÃO TÍPICA RESIDENCIAL

**Tabela 4.10: Características físicas e ocupacionais do modelo 3**

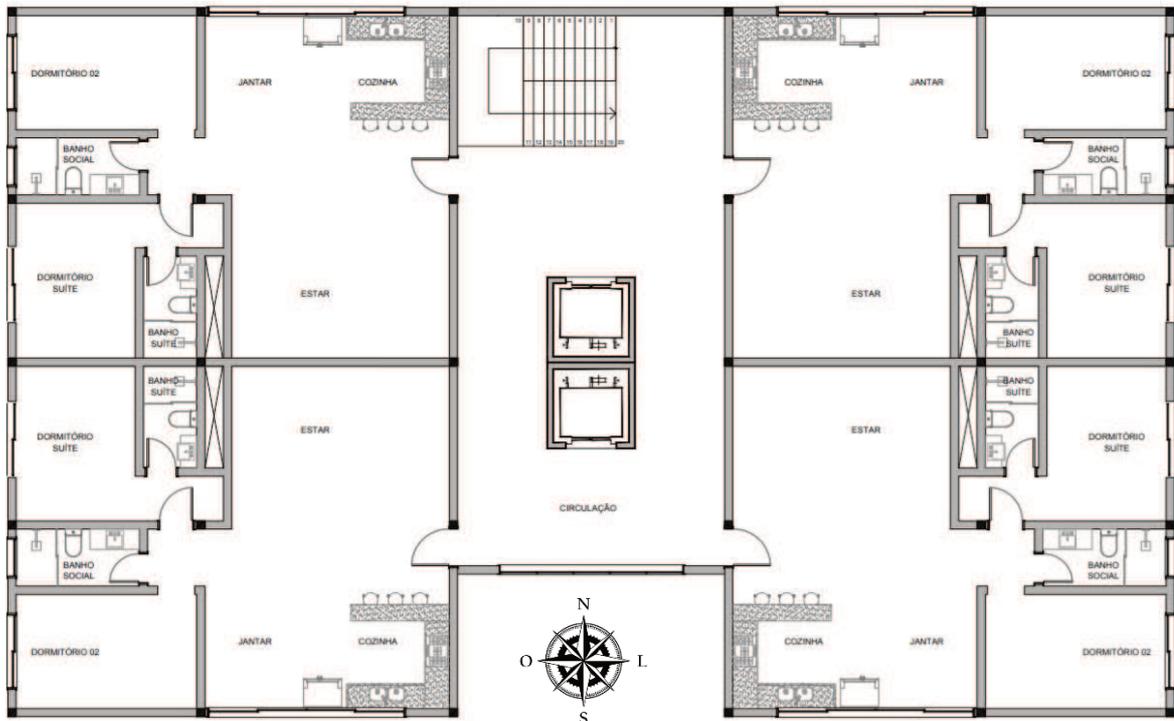
<b>Ocupacionais (por unidade)</b>		
Nº Habitantes	3	
Renda Familiar	10 Salários Mínimos	
Consumo Energia Elétrica	240,00 kWh/mês	
Consumo Energia p/ cocção	240,00 kWh/mês	
Equipamentos básicos	Aparelho de som, Ar condicionado, Aspirador de pó, Batedeira, Bomba d'água, Cafeteira elétrica, Chuveiro Elétrico, Computador, Enceradeira, Exaustor, Ferro de passar, Fogão, Forno de Microondas, Forno elétrico, Freezer, Geladeira, Impressora, Lava louças, Lavadora de roupa, Liquidificador, Máquina de costura elétrica, Microcomputador, Secadora de roupa, Televisão, Torneira elétrica, Ventilador/Circulador de Ar, Videocassete, Videogame	
<b>Físicas</b>		
Área da unidade	100 m <sup>2</sup>	
Dimensões Totais	8 Pavimentos	32 unidades
	Área Total	4340 m <sup>2</sup>
	Área do Pav. Tipo	475 m <sup>2</sup>
	Área do terreno	650 m <sup>2</sup>
	Externas	18 x 29 m
Divisões internas por unidade	Pé direito	2,8 m
	Salas	32,0 m <sup>2</sup>
	3 Quartos	35,6 m <sup>2</sup>
	Cozinha	10,5 m <sup>2</sup>
	2 Banheiros	7,0 m <sup>2</sup>
	Quarto de empregada	3,8 m <sup>2</sup>
	Banheiro de empregada	1,4 m <sup>2</sup>
	Área de serviço	3,0 m <sup>2</sup>
	Circulações	6,7 m <sup>2</sup>
Estrutura	Concreto armado	
Paredes internas	Blocos cerâmicos 8 furos (9 x 20 x 20), Dim. totais = 14 cm ( 9 bloco, 2,5 reb. Int., 2,5 reb. Ext.)	
Paredes externas	Blocos cerâmicos (9 x 20 x 20), Dim. totais = 25 cm ( 20 bloco, 2,5 reb. Int., 2,5 reb. Ext.)	
Acabamentos das Paredes	Reboco interno e externo, pintura em branco. Azulejos até o teto na cozinha e banheiro.	
Lajes	Laje armada em blocos cerâmicos, vigotas em concreto armado. Espessura total 12 cm, rebocada.	
Cobertura	Telhas de fibrocimento sobre estrutura de madeira.	
Janelas	Esquadrias de alumínio, vidros planos simples esp. 3mm. Área de esquadrias = 1/6 da área do piso	
Portas	Portas em madeira: Ext. 0,9 x 2,10; int. 0,7 x 2,10	
Pisos	Banheiros e cozinha em cerâmica comum; nos demais cômodos em cerâmica esmaltada.	

Fonte: (TAVARES, 2006)

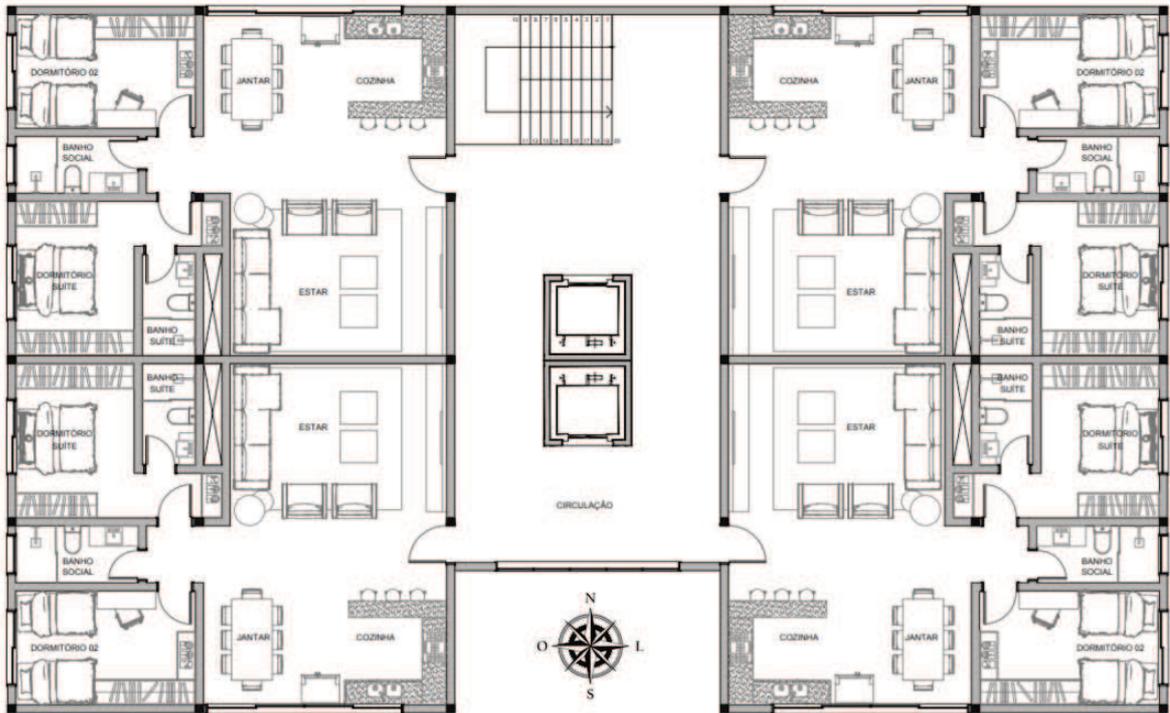
## APÊNDICE A – PLANTAS BAIXAS DA EDIFICAÇÃO TIPO RESIDENCIAL



(a) Primeiro pavimento com as zonas HALL, FESTAS e SERVIÇO E MANUTENCAO



(b) Andar residencial, com os quatro apartamentos e a área de corredor.



(c) Andar residencial, com os quatro apartamentos e a área de corredor detalhado.

**APÊNDICE B – GERAÇÃO MENSAL POR ÁREA (KWH MÊS/M<sup>2</sup>) NAS  
DIFERENTES FACHADAS E TECNOLOGIA PARA A CIDADE DE PORTO  
ALEGRE E RECIFE**

Tecnologia	Fachada	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Redução máxima de Geração para o pior mês
c-Si	Cobertura	23,87	21,16	23,29	19,09	15,58	12,49	12,90	17,65	18,87	21,92	24,15	25,65	51,32%
	Fachada Norte	8,93	9,35	13,68	14,09	13,22	10,74	10,94	14,08	12,19	10,92	9,33	8,34	40,82%
	Fachada Leste	15,16	13,49	13,68	10,51	7,37	5,92	6,00	8,90	10,87	14,19	15,02	16,08	63,17%
	Fachada Oeste	14,88	12,71	13,33	9,96	7,41	5,90	6,42	8,99	10,22	11,79	15,83	17,19	65,67%
	Fachada Sul	8,83	6,78	5,90	4,78	3,96	3,61	3,55	4,17	5,73	6,51	8,38	9,75	63,54%
	Total	13,57	12,20	13,78	11,81	9,79	7,96	8,18	10,99	11,50	12,67	13,80	14,50	45,14%
mc-Si	Cobertura	22,19	19,66	21,64	17,70	14,40	11,53	11,91	16,34	17,45	20,32	22,42	24,20	52,38%
	Fachada Norte	8,31	8,69	12,71	13,08	12,25	9,94	10,13	13,06	11,31	10,14	8,67	7,76	40,67%
	Fachada Leste	14,09	12,53	12,70	9,74	6,82	5,48	5,55	8,25	10,07	13,17	13,95	14,96	63,35%
	Fachada Oeste	13,83	11,81	12,38	9,24	6,86	5,46	5,94	8,34	9,47	10,93	14,69	15,98	65,81%
	Fachada Sul	8,20	6,30	5,48	4,44	3,67	3,34	3,29	3,87	5,31	6,04	7,78	9,06	63,69%
	Total	12,61	11,32	12,81	10,96	9,07	7,37	7,58	10,19	10,66	11,76	12,82	13,49	45,40%
CIGS	Cobertura	19,29	17,07	18,76	15,23	12,31	9,83	10,16	14,01	14,97	17,52	19,43	21,10	53,43%
	Fachada Norte	7,21	7,54	11,02	11,25	10,47	8,48	8,64	11,20	9,70	8,74	7,51	6,75	40,06%
	Fachada Leste	12,21	10,84	10,95	8,35	5,80	4,66	4,72	7,04	8,61	11,31	12,05	12,98	64,09%
	Fachada Oeste	11,97	10,22	10,71	7,94	5,86	4,66	5,06	7,15	8,12	9,39	12,67	13,85	66,37%
	Fachada Sul	7,10	5,45	4,74	3,81	3,13	2,85	2,80	3,31	4,54	5,19	6,71	7,84	64,31%
	Total	10,94	9,81	11,08	9,42	7,74	6,28	6,46	8,73	9,14	10,12	11,08	11,72	46,44%
CdTe	Cobertura	22,91	20,19	22,09	17,56	13,85	10,98	11,35	15,97	17,08	20,33	22,87	25,33	56,65%
	Fachada Norte	8,52	8,90	12,98	12,96	11,78	9,47	9,67	12,76	11,07	10,13	8,82	8,02	38,18%
	Fachada Leste	14,37	12,67	12,66	9,49	6,45	5,16	5,21	7,89	9,68	12,94	14,02	15,37	66,41%
	Fachada Oeste	14,01	11,93	12,52	9,10	6,59	5,19	5,64	8,12	9,22	10,76	14,64	16,28	68,08%
	Fachada Sul	8,29	6,35	5,52	4,37	3,51	3,17	3,10	3,75	5,14	5,93	7,78	9,18	66,23%
	Total	12,89	11,52	12,98	10,82	8,69	7,00	7,20	9,91	10,38	11,66	12,94	13,90	49,64%
a-Si	Cobertura	9,55	8,44	9,26	7,48	6,00	4,79	4,95	6,86	7,33	8,61	9,59	10,46	54,26%
	Fachada Norte	3,56	3,72	5,44	5,52	5,11	4,13	4,21	5,48	4,75	4,29	3,70	3,34	39,56%
	Fachada Leste	6,03	5,34	5,38	4,08	2,82	2,27	2,29	3,43	4,20	5,54	5,93	6,41	64,67%
	Fachada Oeste	5,90	5,04	5,28	3,89	2,86	2,27	2,46	3,50	3,97	4,60	6,23	6,84	66,83%
	Fachada Sul	3,50	2,68	2,33	1,87	1,53	1,38	1,36	1,62	2,22	2,54	3,30	3,87	64,81%
	Total	5,40	4,84	5,46	4,62	3,77	3,06	3,14	4,27	4,47	4,96	5,46	5,79	47,26%

(a) Porto Alegre

Tecnologia	Fachada	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Redução máxima de Geração para o pior mês
c-Si	Cobertura	23,38	22,13	23,86	21,23	19,85	17,25	15,63	19,78	23,23	25,33	22,96	22,95	38,30%
	Fachada Norte	6,29	5,64	8,32	11,34	13,92	13,15	11,02	12,19	9,46	6,47	6,06	6,22	59,52%
	Fachada Leste	10,74	10,01	11,56	9,68	8,80	7,75	7,03	8,72	10,73	11,65	10,52	10,57	39,67%
	Fachada Oeste	17,69	16,20	17,27	15,30	13,85	12,02	10,29	13,90	16,48	18,27	17,34	16,82	43,64%
	Fachada Sul	13,54	9,17	6,61	5,76	5,69	5,21	4,95	5,46	5,73	7,83	11,84	14,19	65,10%
	Total	13,24	11,67	12,78	12,37	12,45	11,19	9,81	11,89	12,55	12,89	12,71	13,07	25,93%
mc-Si	Cobertura	21,75	20,60	22,20	19,74	18,45	16,03	14,51	18,38	21,60	23,57	21,37	21,36	38,42%
	Fachada Norte	5,85	5,24	7,74	10,54	12,93	12,21	10,23	11,33	8,80	6,02	5,64	5,78	59,47%
	Fachada Leste	9,98	9,30	10,74	8,99	8,17	7,19	6,52	8,10	9,97	10,82	9,78	9,83	39,76%
	Fachada Oeste	16,45	15,07	16,06	14,22	12,86	11,16	9,56	12,92	15,32	16,99	16,13	15,64	43,74%
	Fachada Sul	12,60	8,53	6,15	5,36	5,29	4,84	4,60	5,07	5,33	7,28	11,01	13,20	65,17%
	Total	12,32	10,86	11,88	11,50	11,57	10,39	9,11	11,05	11,67	11,99	11,82	12,16	26,07%
CIGS	Cobertura	18,93	17,94	19,30	17,13	15,97	13,84	12,52	15,91	18,75	20,51	18,59	18,60	38,93%
	Fachada Norte	5,08	4,56	6,72	9,14	11,19	10,54	8,82	9,80	7,63	5,23	4,89	5,02	59,29%
	Fachada Leste	8,65	8,06	9,29	7,77	7,06	6,20	5,61	6,98	8,61	9,37	8,47	8,52	40,11%
	Fachada Oeste	14,29	13,10	13,92	12,31	11,12	9,62	8,24	11,17	13,27	14,75	14,01	13,59	44,14%
	Fachada Sul	10,94	7,41	5,33	4,64	4,57	4,18	3,96	4,38	4,62	6,32	9,56	11,47	65,48%
	Total	10,70	9,44	10,31	9,96	10,01	8,97	7,85	9,55	10,11	10,41	10,26	10,57	26,63%
CdTe	Cobertura	22,23	21,06	22,67	20,13	18,79	16,30	14,76	18,72	22,04	24,09	21,83	21,84	38,74%
	Fachada Norte	5,97	5,35	7,90	10,75	13,17	12,42	10,40	11,53	8,97	6,14	5,75	5,90	59,36%
	Fachada Leste	10,17	9,48	10,93	9,15	8,31	7,31	6,62	8,23	10,14	11,03	9,96	10,02	39,97%
	Fachada Oeste	16,79	15,39	16,37	14,48	13,09	11,34	9,71	13,15	15,61	17,33	16,46	15,97	43,99%
	Fachada Sul	12,86	8,71	6,27	5,46	5,38	4,92	4,67	5,16	5,43	7,43	11,23	13,48	65,36%
	Total	12,57	11,09	12,12	11,72	11,78	10,57	9,25	11,25	11,89	12,23	12,06	12,42	26,41%
a-Si	Cobertura	9,38	8,89	9,55	8,46	7,88	6,81	6,16	7,85	9,27	10,15	9,20	9,21	39,32%
	Fachada Norte	2,51	2,25	3,32	4,51	5,52	5,19	4,34	4,83	3,77	2,59	2,42	2,48	59,15%
	Fachada Leste	4,27	3,98	4,58	3,83	3,47	3,05	2,76	3,43	4,24	4,62	4,18	4,21	40,37%
	Fachada Oeste	7,07	6,48	6,87	6,07	5,48	4,73	4,05	5,50	6,55	7,29	6,93	6,72	44,44%
	Fachada Sul	5,45	3,67	2,63	2,29	2,25	2,05	1,95	2,16	2,28	3,12	4,72	5,68	65,71%
	Total	5,29	4,67	5,09	4,92	4,93	4,41	3,86	4,71	4,99	5,15	5,07	5,23	27,06%

(b) Recife

**APÊNDICE C – GERAÇÃO POR ÁREA NAS DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO (KWH/M<sup>2</sup>) E PARTICIPAÇÃO NA GERAÇÃO ANUAL PARA PORTO ALEGRE (A) E RECIFE (B)**

Tecnologia	Fachada	Área (m <sup>2</sup> )	Geração (kWh/m <sup>2</sup> )					Participação Percentual no ano por estação			
			Verão	Outono	Inverno	Primavera	Ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera
c-Si	Cobertura	255	69	51	48	69	237	29,1%	21,5%	20,4%	29,0%
	Fachada Norte	468	30	40	38	29	136	21,9%	29,2%	27,8%	21,1%
	Fachada Leste	301	43	26	25	43	137	31,4%	19,3%	17,9%	31,4%
	Fachada Oeste	301	42	25	25	42	135	31,2%	18,9%	18,5%	31,4%
	Fachada Sul	280	23	13	13	23	72	31,9%	18,4%	18,0%	31,8%
	Total	1.605	39	32	30	39	141	28,1%	22,5%	21,5%	27,9%
mc-Si	Cobertura	255	64	47	45	64	220	29,1%	21,4%	20,4%	29,1%
	Fachada Norte	468	28	37	35	27	126	22,0%	29,1%	27,7%	21,1%
	Fachada Leste	301	40	25	23	40	127	31,4%	19,3%	17,9%	31,4%
	Fachada Oeste	301	39	24	23	39	125	31,2%	18,9%	18,5%	31,4%
	Fachada Sul	280	21	12	12	21	67	31,4%	18,5%	18,0%	32,0%
	Total	1.605	37	29	28	37	131	28,1%	22,5%	21,5%	28,0%
CIGS	Cobertura	255	56	40	38	55	190	29,3%	21,3%	20,2%	29,1%
	Fachada Norte	468	24	32	30	23	108	22,1%	29,0%	27,6%	21,2%
	Fachada Leste	301	35	21	19	35	110	31,6%	19,2%	17,7%	31,5%
	Fachada Oeste	301	34	20	20	34	108	31,4%	18,8%	18,4%	31,5%
	Fachada Sul	280	18	11	10	18	57	31,6%	18,4%	17,9%	32,0%
	Total	1.605	32	25	24	32	113	28,3%	22,4%	21,3%	28,0%
CdTe	Cobertura	255	66	46	43	65	221	29,9%	20,9%	19,7%	29,5%
	Fachada Norte	468	28	36	34	27	125	22,7%	28,7%	27,1%	21,5%
	Fachada Leste	301	41	24	22	40	126	32,2%	18,8%	17,3%	31,8%
	Fachada Oeste	301	40	23	22	39	124	31,9%	18,5%	18,0%	31,6%
	Fachada Sul	280	21	12	12	21	66	32,1%	18,2%	17,5%	32,2%
	Total	1.605	37	29	27	37	130	28,8%	22,0%	20,8%	28,3%
a-Si	Cobertura	255	27	20	19	27	93	29,5%	21,2%	20,1%	29,2%
	Fachada Norte	468	12	15	15	11	53	22,3%	28,9%	27,5%	21,3%
	Fachada Leste	301	17	10	9	17	54	31,7%	19,1%	17,6%	31,6%
	Fachada Oeste	301	17	10	10	17	53	31,5%	18,7%	18,3%	31,5%
	Fachada Sul	280	9	5	5	9	28	31,7%	18,4%	17,8%	32,1%
	Total	1.605	16	12	12	16	55	28,4%	22,3%	21,2%	28,1%

(a) Porto Alegre

Tecnologia	Fachada	Área (m <sup>2</sup> )	Geração (kWh/m <sup>2</sup> )					Participação Percentual no ano por estação			
			Verão	Outono	Inverno	Primavera	Ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera
c-Si	Cobertura	255	69	62	58	69	258	26,6%	23,9%	22,6%	26,9%
	Fachada Norte	468	19	38	35	19	110	16,9%	34,3%	31,8%	16,9%
	Fachada Leste	301	32	28	26	32	118	27,0%	23,9%	22,2%	27,0%
	Fachada Oeste	301	51	44	40	51	185	27,4%	23,5%	21,6%	27,4%
	Fachada Sul	280	32	17	16	30	96	33,5%	18,1%	17,0%	31,5%
	Total	1.605	37	37	35	37	147	25,5%	25,4%	23,7%	25,4%
mc-Si	Cobertura	255	64	57	54	64	240	26,6%	23,9%	22,6%	26,9%
	Fachada Norte	468	17	35	33	17	102	16,9%	34,3%	31,8%	17,0%
	Fachada Leste	301	30	26	24	29	109	27,0%	23,8%	22,2%	27,0%
	Fachada Oeste	301	47	41	37	47	172	27,4%	23,5%	21,6%	27,4%
	Fachada Sul	280	30	16	15	28	89	33,5%	18,1%	17,0%	31,5%
	Total	1.605	35	35	32	35	136	25,5%	25,4%	23,7%	25,4%
CIGS	Cobertura	255	56	50	47	56	208	26,7%	23,8%	22,5%	26,9%
	Fachada Norte	468	15	30	28	15	89	16,9%	34,3%	31,8%	17,0%
	Fachada Leste	301	26	23	21	26	95	27,1%	23,8%	22,1%	27,0%
	Fachada Oeste	301	41	35	32	41	149	27,5%	23,5%	21,6%	27,5%
	Fachada Sul	280	26	14	13	24	77	33,5%	18,1%	16,9%	31,5%
	Total	1.605	30	30	28	30	118	25,6%	25,4%	23,6%	25,4%
CdTe	Cobertura	255	65	58	55	66	244	26,7%	23,8%	22,6%	26,9%
	Fachada Norte	468	18	36	33	18	104	16,9%	34,3%	31,8%	17,0%
	Fachada Leste	301	30	27	25	30	111	27,1%	23,8%	22,1%	27,0%
	Fachada Oeste	301	48	41	38	48	176	27,5%	23,5%	21,6%	27,5%
	Fachada Sul	280	30	16	15	29	91	33,5%	18,1%	16,9%	31,5%
	Total	1.605	36	35	33	35	139	25,6%	25,4%	23,6%	25,4%
a-Si	Cobertura	255	28	24	23	28	103	26,8%	23,8%	22,5%	27,0%
	Fachada Norte	468	7	15	14	7	44	17,0%	34,3%	31,7%	17,0%
	Fachada Leste	301	13	11	10	13	47	27,1%	23,8%	22,1%	27,0%
	Fachada Oeste	301	20	17	16	20	74	27,5%	23,4%	21,5%	27,5%
	Fachada Sul	280	13	7	6	12	38	33,6%	18,0%	16,8%	31,5%
	Total	1.605	15	15	14	15	58	25,6%	25,3%	23,6%	25,5%

(b) Recife