

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

TELMA APARECIDA MENEGHETTE DOS SANTOS BASSAN

**PROPOSTA DE EQUAÇÃO PARA DETERMINAR A EFICIÊNCIA APRESENTADA  
POR INVERSORES DE SFVCR PARA AS CONDIÇÕES DE IRRANDIÂNCIA  
ENCONTRADAS NO ESTADO DO PARANÁ.**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2021

TELMA APARECIDA MENEGHETTE DOS SANTOS BASSAN

**PROPOSTA DE EQUAÇÃO PARA DETERMINAR A EFICIÊNCIA APRESENTADA  
POR INVERSORES DE SFVCR PARA AS CONDIÇÕES DE IRRANDIÂNCIA  
ENCONTRADAS NO ESTADO DO PARANÁ.**

**Equation proposal to determine inverter efficiency for photovoltaic systems  
with grid connections for the conditions from Paraná State.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em sistemas de energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de concentração: Automação e Sistemas de energia .  
Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Jr.

CURITIBA

2021



4.0 Internacional

Esta licença permite que que outros façam download dos trabalhos e os compartilhem desde que atribuam crédito aos autores, mas sem que possam alterá-los de nenhuma forma ou utilizá-los para fins comerciais.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Curitiba**



TELMA APARECIDA MENEGHETTE DOS SANTOS

**PROPOSTA DE EQUAÇÃO PARA DETERMINAR A EFICIÊNCIA APRESENTADA POR INVERSORES DE SFVCR PARA AS CONDIÇÕES DE IRRADIÂNCIA ENCONTRADAS NO ESTADO DO PARANÁ**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Automação E Sistemas De Energia.

Data de aprovação: 24 de Fevereiro de 2021

Prof Jair Urbanetz Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Gerson Maximo Tiepolo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Rogers Demonti, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 01/03/2021.

## **AGRADECIMENTOS**

Precisaria de mais de uma página para agradecer a todos os que contribuíram de alguma forma com o desenvolvimento desse trabalho, e com meu desenvolvimento pessoal, para que eu conseguisse chegar até essa etapa da minha carreira. Visto isso, tentarei aqui destacar algumas pessoas que serão representantes desse enorme grupo que sou grata.

Primeiramente meus pais, os quais sempre me apoiaram e me guiaram para que eu conseguisse atingir meus objetivos, permitindo ser quem eu sou hoje. Meus irmãos, meus exemplos de pessoas e profissionais aos quais sempre me espelhei e farei isso por todos os meus dias.

Meu esposo, que abdicou dias de folga para estar ao meu lado no desenvolvimento da minha pesquisa, e sempre me auxilia nas decisões da vida, meu porto seguro.

Agradeço também ao meu professor orientador, Jair Urbanetz, que sempre esteve disposto a compartilhar informação e distribuir sabedoria, sempre me incentivando.

Enfim, a minha Universidade, UTFPR, por ter despertado em mim o interesse em pesquisas e em energia solar, e a minha empresa ecoSolys e equipe de trabalho, os quais fazem eu viver a energia fotovoltaica diariamente.

## RESUMO

**BASSAN, Telma A. M. S. Proposta de equação para determinar a eficiência apresentada por inversores de SFVCR para as condições de irradiância encontradas no estado do Paraná.** 2021. 89 folhas. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

A energia fotovoltaica tem se consolidado como elemento fundamental nas matrizes energéticas renováveis. O avanço mundial da tecnologia se reflete no desenvolvimento no Brasil, com a ampliação contínua na participação na matriz energética nacional. Diante desse cenário, estudar as condições de implantação e principalmente de eficiência desses sistemas, faz-se necessário para a garantia de um rendimento ideal. Um dos pontos principais na análise de eficiência de um sistema fotovoltaico é a de conversão dos inversores, na qual ponderando-se as particularidades da situação brasileira se faz pertinente principalmente no que diz respeito à radiação solar. Tomando-se por base os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFVCR), é aprofundado o assunto em equações de eficiência de inversores utilizadas pelo mundo, como a Equação de eficiência Europeia e também a Equação de eficiência Californiana, ambas geradas através da análise de um ponto específico da região. Após a análise das equações existentes, aborda-se o histórico de 11 anos de radiação no estado do Paraná, situado no Sul do Brasil, considerando essa radiação para levantar o comportamento da irradiância média por hora no estado e propor uma equação de eficiência baseada nas características territoriais. Com essa equação pode-se entender o comportamento dos inversores de mercado na região, e apresentar quais características são desejáveis para maior geração de energia com essa tecnologia. Diferente das equações Europeia e Californiana, a equação proposta faz uma análise média entre toda a extensão territorial, considerando 25 estações solarimétricas do INMET espalhadas pelo estado, trazendo uma análise com menor probabilidade de erros considerando a região como um todo.

Palavras Chaves: Inversor Fotovoltaico. Energia Fotovoltaica. Eficiência de inversores Fotovoltaicos. Eficiência Brasileira de Inversores.

## ABSTRACT

BASSAN, Telma A. M. S. **Equation proposal to determine inverter efficiency for photovoltaic systems with grid connections for the conditions from Paraná State.** 2020. 89 folhas. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) - Federal Technology University - Parana. Curitiba, 2020.

Photovoltaic Energy is considered a fundamental element when it comes to sustainable and clean energy. Developed countries already have solar energy as a considerable part of their energy mix. On the other hand, the actions in Brazil towards this topic are at early stage, but with an outstanding upcoming growth perspective in the next years due to proper solar radiation distribution in the country territory. In this scenario, it is relevant to study implementation conditions and photovoltaic inverter conversion efficiency considering solar radiation for Brazilian particularities. Starting from several efficiency equations were studied, including European and California models, this work ion. Considering Inverter Efficiency Equations for Photovoltaic systems throughout the world, mainly Californian and European models which were originated from data captured from a single location, this study gathers the 11-year database of radiation in the state of Paraná in southern Brazil in several locations in order to raise the irradiance behavior in the state and propose an efficiency equation based on territorial characteristics. This method reveals less variation and more assertive results than the other international equations. With this equation, it is possible to understand the behavior of market inverters in the region and show which characteristics are desirable.

**Keywords:** Photovoltaic Inverter. Photovoltaic Energy. Inverter efficiency. Brazilian inverter efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Projeção da capacidade instalada de micro e mini geração distribuída (MW) por cenário.....	15
Figura 2: Projeção da capacidade instalada de micro e mini geração distribuída (MW). .....	15
Figura 3: PIB no Mundo em bilhões (2019).....	17
Figura 4: Consumo de eletricidade per capita .....	18
Figura 5. Matriz elétrica mundial no ano de 2019.....	19
Figura 6: Matriz elétrica 2017: EUA, China, Alemanha e Brasil (%).....	19
Figura 7: Matriz elétrica Brasileira 2018 e 2019. ....	20
Figura 8: Matriz elétrica no estado do Paraná no ano de 2018.....	21
Figura 9: Mapa do total diário da irradiação global horizontal no Brasil .....	27
Figura 10: Síntese dos níveis de irradiação solar por região .....	28
Figura 11: Mapa do total diário da irradiação global horizontal no Paraná.....	29
Figura 12: Potencial anual médio de energia solar no Estado do Paraná e nas mesorregiões.....	31
Figura 13: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média nacional por faixas.....	38
Figura 14: Localização das Estações Automáticas do INMET no estado do Paraná	40
Figura 15: Comportamento da irradiância durante um dia ensolarado.....	43
Figura 16: Curva de eficiência de um inversor fotovoltaico de mercado .....	44
Figura 17: Máximas irradiâncias médias observadas por estação .....	46
Figura 18: Média de irradiância média, por hora, durante um dia em Curitiba, considerando os 11 anos de estudo.....	47
Figura 19: Média de irradiância média, por hora, durante um dia em Diamantina do Norte, considerando os 11 anos de estudo.....	48
Figura 20: Média de irradiância média, por hora, durante um dia no Paraná, considerando os 11 anos de estudo.....	48
Figura 21: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas em Curitiba. ....	49
Figura 22: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas em Colombo. ....	50
Figura 23: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas na mesorregião metropolitana de Curitiba. ....	50
Figura 24: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas na mesorregião Norte Central. ....	51
Figura 25: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas em Paraná.....	51
Figura 26: Curva de eficiência de um inversor fotovoltaico de mercado – detalhamento carregamento 100% .....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Os 5 estados do Brasil com maior número de instalações em geração distribuída em novembro de 2020 .....	22
Tabela 2: Comparativo dos coeficientes por carregamento por mesorregião .....	52
Tabela 3: Comparativo dos coeficientes por carregamento .....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS

EUA	Estados Unidos
Km	Quilômetros
Kjm <sup>2</sup>	Quilojoule.metro quadrado
MWp	Megawatt-pico
TWp	Terawatt-pico
UV	Ultravioleta
W/m <sup>2</sup>	Densidade de potência média

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEC	Comissão Californiana de Energia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Meteorologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
PIB	Produto Interno Bruto
SFVCR	Sistemas Fotovoltáicos Isolados Conectados à Rede
SFVI	Sistemas Fotovoltáicos Isolados
SIN	Sistema Interligado Nacional
SoDa	Solar Radiation Project
SPMP	Seguimento do Ponto Máximo de Potência
UTC	Coordinated Universal Time

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS .....	13
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 Objetivo Geral.....	14
1.3.2 Objetivos específicos .....	14
1.4 JUSTIFICATIVA.....	14
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
2.1 MATRIZ ELÉTRICA.....	17
2.1.1 Matriz elétrica brasileira .....	20
2.1.2 Matriz elétrica no Estado do Paraná .....	21
2.2 ENERGIA.....	22
2.3 RADIAÇÃO SOLAR.....	23
2.4 POTENCIAL FOTOVOLTAICO NO BRASIL.....	25
2.5 POTENCIAL FOTOVOLTAICO NO PARANÁ.....	29
2.6 SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	31
2.6.1 Componentes.....	32
2.7 EFICIÊNCIA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS .....	34
2.7.1.1 Eficiência Brasileira.....	37
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
<b>5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>61</b>
<b>APÊNDICE II.....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE III.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE IV .....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui como destaque em sua matriz energética o grande percentual de participação de energias renováveis, tendo como principal fonte geradora as usinas hidrelétricas. Dentre os anos de 2014 até o ano de 2018 o Brasil sofreu um grande impacto energético devido à redução de reservatórios nas hidrelétricas no país, essa redução se deu pela falta de chuvas e período de seca ocorridos nesse período, reduzindo a disponibilidade de água para as hidrelétricas poderem ter sua geração ideal. Situações de crise energética como essa trazem a necessidade de desenvolver novas alternativas para suprir a geração de energia elétrica.

Em 2017, percebeu-se um decréscimo de 1,7% em relação ao ano anterior em oferta interna de energia elétrica no país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). Como uma forma de contornar os problemas no setor hídrico, os estudos e investimentos na geração distribuída tiveram um aumento, visível no crescimento no número de instalações, que subiram de 123 conexões no início de 2014 para 346.738 instalações ao final de novembro de 2020 (ANEEL, 2020).

A energia fotovoltaica é considerada uma ótima alternativa para a geração distribuída no Brasil, visto que, segundo o Ministério de Minas e Energia (2017a), a energia solar em todo o território brasileiro tem elevado potencial para sua conversão em energia elétrica, com irradiação global média anual entre 1.200 e 2.400 kWh/m<sup>2</sup>/ano.

Com relação ao potencial do Paraná, segundo o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (2017), ao comparar-se a produtividade estimada total anual média de um sistema fotovoltaico apresentada pelos países europeus em relação ao estado do Paraná, pode-se verificar que a média do Paraná é 43% superior à da Alemanha, 2,22% superior à da Itália, 18,2% superior à da França e 55,1% superior à do Reino Unido, destacando o potencial elevado do estado do Paraná para a geração fotovoltaica.

Até novembro de 2020 o estado do Paraná destacou-se como o quinto estado com mais sistemas fotovoltaicos instalados na geração distribuída do país, ficando atrás dos estados Rio Grande do Sul, São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso (ANEEL, 2020).

Um sistema fotovoltaico pode ser dividido em duas classificações, sistema fotovoltaico isolado da rede elétrica (SFVI) e sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFVCR). As primeiras aplicações terrestres da tecnologia fotovoltaica ocorreram principalmente com sistemas isolados, capazes de abastecer cargas distantes da rede convencional de distribuição de eletricidade (ZILLES, et al., 2012). Os sistemas isolados são caracterizados principalmente pelo armazenamento de energia utilizando baterias. O sistema conectado à rede elétrica injeta sua geração de energia diretamente à rede elétrica, dispensando a necessidade do uso de armazenamento de energia.

Os SFVCR apresentam um novo conceito de geração de energia limpa e renovável, e tem registrado crescimento mundial muito superior ao dos Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI) (TIEPOLO et al., 2013).

Segundo Ruther (2004), um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica é composto por vários elementos, incluindo módulos fotovoltaicos, sistema de fixação ao envoltório da construção, Inversor CC-CA com características de conexão à rede elétrica, cabeamento para transmissão e elementos de proteção do sistema. Desses elementos os que tem maior influência na eficiência de um sistema são os módulos fotovoltaicos e o inversor fotovoltaico. Com isso deve-se atenção maior aos módulos e o inversor no momento do projeto, para que suas características atinjam o melhor rendimento e a melhor geração.

Um módulo fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensão e corrente suficientes para a utilização prática da energia ao passo que o desempenho dos módulos fotovoltaicos é influenciado pela irradiância solar e pela temperatura das células (PINHO, GALDINO, 2014).

O inversor é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada (CA) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (CC). No caso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, a energia CC é proveniente dos módulos fotovoltaicos. A tensão CA de saída possui amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado e sincronizado com a tensão da rede. O desempenho do inversor tem como influência externa a temperatura e a irradiância local e, segundo Urbanetz (2010), dependendo do nível de tensão aplicado pelo arranjo fotovoltaico, o inversor apresenta um comportamento diferente em relação ao seu rendimento.

Visto que a irradiância apresenta influência na geração tanto dos módulos quanto dos inversores, e ela possui uma variação considerável em diferentes localidades, levanta-se a necessidade do estudo aprofundado da irradiância dos locais de instalações fotovoltaicas.

Este trabalho tem como proposta analisar dados de irradiância do estado do Paraná, devido sua participação significativa no crescimento da geração distribuída no país, e aplicar a análise de irradiância na eficiência de inversores, levantando uma equação base para o cálculo da mesma nessa localidade.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O Brasil é reconhecido internacionalmente pela sua capacidade de gerir recursos energéticos renováveis, demonstrando que decisões estratégicas de política energética são essenciais para a obtenção de resultados no longo prazo. De modo a suprir o crescimento da demanda por energéticos e ao mesmo tempo manter o caráter renovável da nossa matriz, são esperados investimentos da ordem de R\$ 1,4 trilhões no período 2017–2026. Desse montante, destaca-se a expansão esperada de 11,8 GW para a fonte eólica e de 7 GW para a fonte solar-fotovoltaica (MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2017b).

Segundo Tiepolo (2017), no Brasil o estado do Paraná é um dos maiores produtores de energia elétrica através das hidroelétricas, devido à grande bacia hidrográfica existente no estado. Mas apesar deste grande potencial hídrico, a sua expansão na matriz elétrica encontra-se em declínio devido à dificuldade de explorar o potencial ainda não utilizado, e também devido às pressões da sociedade e entidades públicas e ambientais. Com isto, o estado do Paraná tem apresentado uma pré-disposição para análise e aplicação de outras fontes de energia para geração de energia elétrica. Em se tratando de geração distribuída, os SFVCR são ótimas opções e possuem boas perspectivas de crescimento para suprir o aumento da demanda energética no país.

Um dos elementos de maior importância dentro de um SFVCR é o inversor. Neste contexto, de acordo com Bassan (2017), a eficiência de conversão CC-CA de inversores não possui um valor constante, pois apresenta uma dependência em relação ao nível de carregamento. O nível de carregamento varia de acordo com a

variação de irradiância solar e temperatura as quais o gerador fotovoltaico está submetido.

Segundo a Norma brasileira ABNT NBR 10899, irradiância solar é a taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ).

Como a irradiância é um fator com grande peso para definir a eficiência de um inversor, e cada localidade no globo possui uma característica específica, caracterizar uma única equação de eficiência de inversores para o mundo todo seria aceitar erros notáveis aos resultados (BASSAN, 2017).

As chamadas equações de eficiência Europeia e Californiana, normalmente são utilizadas para avaliar os inversores do mercado.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

É comum em folhas de dados dos equipamentos encontrar a eficiência máxima do inversor, mas na verdade, o pico de eficiência de um inversor não é tão importante do ponto de vista do rendimento de um SFVCR. Decisivo para a eficiência do SFVCR é a eficiência média sobre o ano inteiro (MERTENS, 2014).

A eficiência de conversão CC-CA de inversores não possui um valor constante, pois apresenta uma dependência em relação ao nível de carregamento. O nível de carregamento varia de acordo com a variação de irradiância solar e temperatura as quais o gerador fotovoltaico está submetido. Com isto encontra-se a necessidade de uma análise do comportamento da irradiância local para poder estimar de forma mais assertiva qual o rendimento do inversor.

Utiliza-se para análise de eficiência de inversores Equações internacionais como a Equação Europeia e a Equação Californiana, as quais não refletem a realidade brasileira com relação à análise de irradiância. Existe também uma proposta de Equação brasileira, apresentada por um estudo da USP, a qual considera o Brasil como um todo, podendo apresentar grandes distorções nos resultados, visto a variação de irradiância por todo o país.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Propor uma equação de eficiência de inversores para o estado do Paraná, com base em dados de irradiação de 11 anos, obtidos através de 25 estações solarimétricas do INMET, localizadas pelo estado.

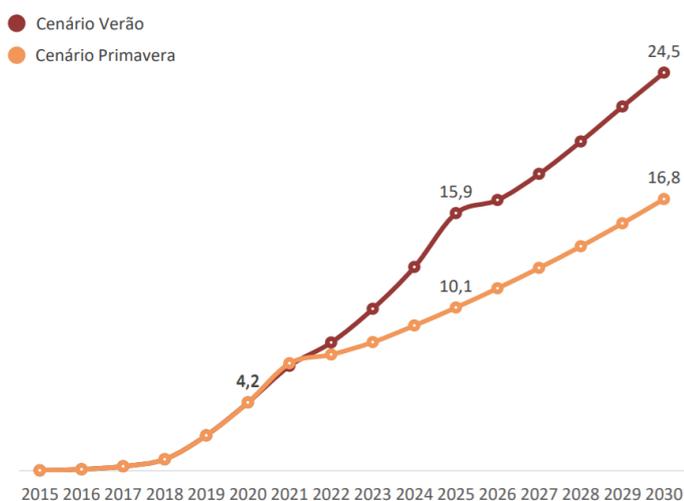
#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Fazer um estudo das Equações de eficiência de inversores existentes;
- Fazer um levantamento de estações solarimétricas presentes no estado do Paraná, com dados de radiação;
- Fazer um levantamento do comportamento da irradiância solar no estado do Paraná, analisando dias médios e frequência de geração;
- Apresentar um histograma com a frequência de radiação média diária de 11 anos de dados, iniciados em janeiro de 2009 até dezembro de 2019;
- Propor uma equação de eficiência de inversores para o estado do Paraná e para a cidade de Curitiba;

### 1.4 JUSTIFICATIVA

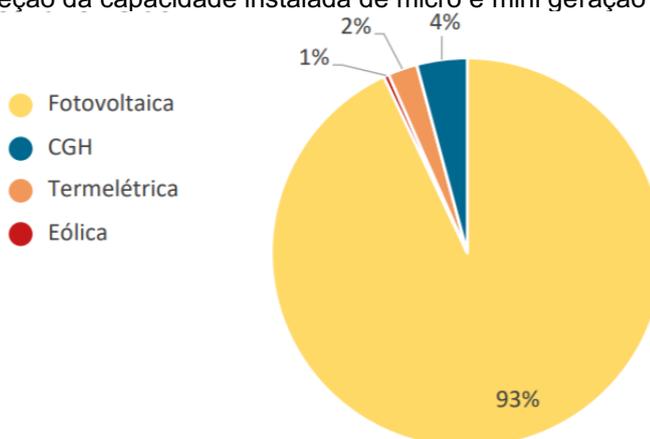
Segundo o Ministério de Minas e Energia (2020), a projeção de capacidade instalada de energia fotovoltaica demonstra que o Brasil atingirá 24,5 GWp até o ano de 2030, no cenário verão, que apresenta uma visão otimista, de geração distribuída instalada, como observado na Figura 1. A fonte de energia fotovoltaica prevê uma participação de 93% nesse aumento, como observado na Figura 2.

Figura 1: Projeção da capacidade instalada de micro e mini geração distribuída (MW) por cenário



Fonte: Ministério de Minas e Energia (2020).

Figura 2: Projeção da capacidade instalada de micro e mini geração distribuída (MW).



Fonte: Ministério de Minas e Energia (2020).

Com o crescimento da utilização da tecnologia fotovoltaica surge também a preocupação do aumento do rendimento do sistema para obter o melhor aproveitamento possível. Segundo Ruther (2004), um diferencial de 1% na eficiência do inversor pode resultar em 10% a mais em energia gerada ao longo de um ano.

Esse impacto pode ser evitado com aprofundamento e estudos para aproximar o máximo possível o projeto da realidade quanto ao rendimento do sistema.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será composto por 5 capítulos, contando a Introdução, que representará o Capítulo 1. No capítulo 2 será apresentada uma revisão da literatura, podendo dessa forma destacar o crescimento da demanda de energia, a nível mundial, nacional e regional, tendo um detalhamento no estado do Paraná. Além disso, apresentar possíveis soluções de geração para o aumento de demanda que vem ocorrendo e que está previsto para os anos seguintes. Após isso, obter um aprofundamento em energia solar fotovoltaica, entendendo seus elementos e também entender sobre irradiação no Brasil e no Estado do Paraná. A partir disso apresentar um aprofundamento em equações de eficiência de inversores, tanto média quanto equações internacionais existentes, para servirem de base para a equação obtida no final do estudo.

O Capítulo 3 apresentará metodologia de estudo, especificando o método utilizado para análise de dados obtidos de estações solarimétricas pelo estado do Paraná, evidenciando os dados que serão analisados, os processos que serão aplicados para a análise final e determinando a sequência do estudo.

No Capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos na pesquisa, com base na metodologia do capítulo anterior. Esse capítulo irá apresentar os histogramas de irradiação da cidade de Curitiba e do estado do Paraná, finalizando com a proposta de equação de inversores para esses locais. O Capítulo 4 tem como suporte de dados 4 Apêndices, responsáveis pelo detalhamento dos resultados.

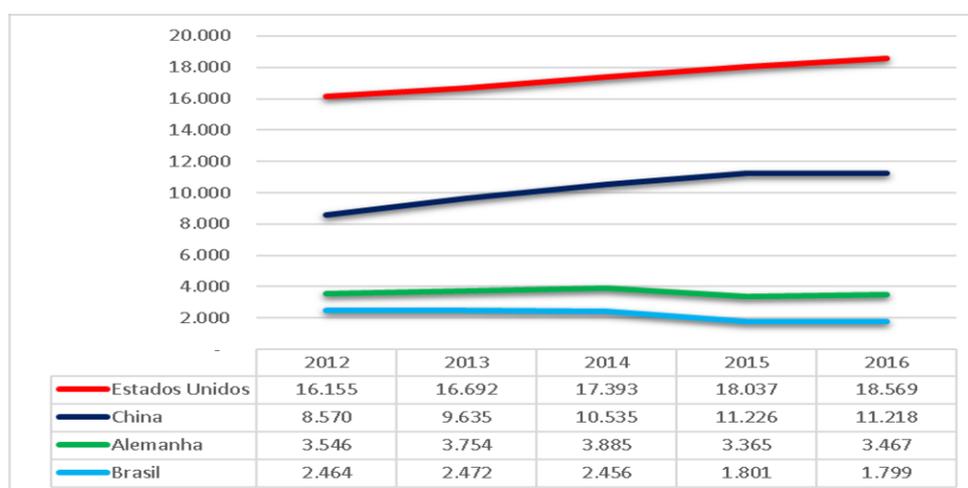
No capítulo 5 serão discutidos os resultados e apresentará a conclusão da pesquisa, fazendo a análise dos dados obtidos e apresentando os desvios possíveis com a utilização da equação proposta em todo o estado do Paraná, além de demonstrar a característica de um inversor que teria bom rendimento, seguindo a equação proposta pelo trabalho.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 MATRIZ ELÉTRICA

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2020), a projeção de capacidade instalada de energia fotovoltaica demonstra que o Brasil atingirá 24,5GWp de geração distribuída instalada até 2030, como observado na Figura 3.

Figura 3: PIB no Mundo em bilhões (2019)



Fonte: Adaptado de IPRI (2019).

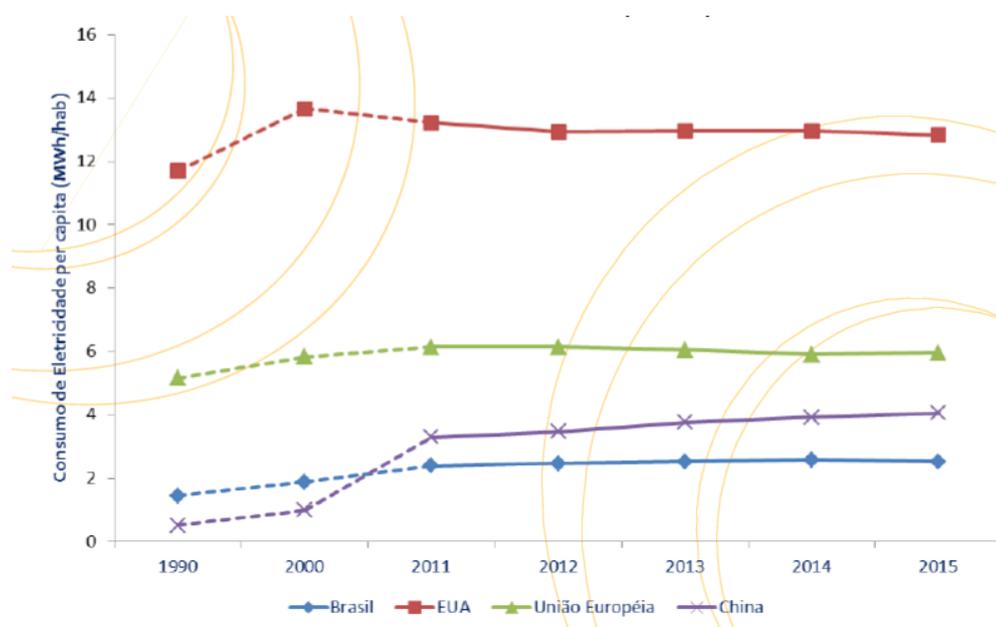
Segundo Pereira et.al, (2017), o crescimento econômico de um país influencia diretamente no crescimento da demanda energética do mesmo. Esse fenômeno se deve ao fato de que o acesso à infraestrutura básica se difunde com a evolução, permitindo que maior parte da população tenha em seu dia a dia moradia, saneamento e transporte. Visto isso, a tendência mundial é de que em países em desenvolvimento e crescimento econômico seja acompanhado por um crescimento de demanda energética.

Uma pesquisa feita anualmente pelo Instituto de Pesquisa de Relações Internacionais (2019), órgão do Governo Federal do Brasil, apresenta as 15 maiores economias do mundo. Em 2018, Os Estados Unidos se destacava como a maior economia do mundo, seguido da China, Japão e Alemanha. O Brasil é o mais bem colocado da América do Sul, possuindo a 9ª posição. Pode ser observado na Figura 3, a qual apresenta o PIB em bilhões até o ano de 2016 de 4 (quatro) países, que

entre EUA, China, Alemanha e Brasil o país que mais cresceu no período avaliado foi a China, apresentando um crescimento de 131% em 2016 com relação ao ano de 2012. (IPRI, 2019). Ainda na Figura 3 nota-se que a Alemanha e o Brasil tiveram uma retração no PIB no mesmo período.

Após seu crescimento, países desenvolvidos tendem a manter uma demanda média energética. Pode-se observar esse fenômeno através da Figura 4, a qual apresenta um comparativo do consumo de eletricidade per capita entre os mesmos 4 (quatro) países. Vê-se que o país que teve o maior crescimento do consumo per capita foi a China, país que apresentou o maior crescimento econômico na Figura 3.

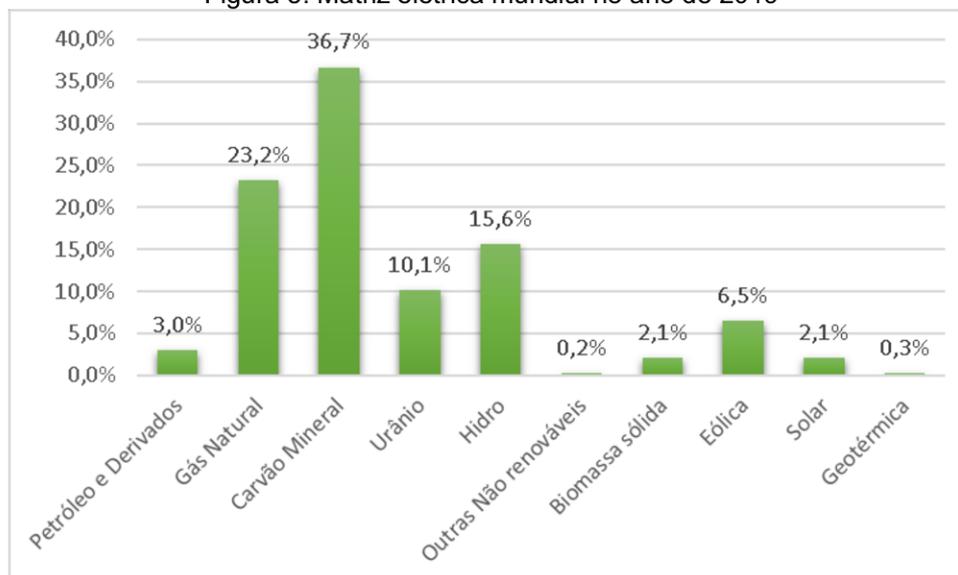
Figura 4: Consumo de eletricidade per capita



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2018)

O aumento do consumo de energia elétrica é acompanhado com a preocupação com as fontes que satisfarão essa nova demanda. A matriz elétrica mundial possui como fonte principal o carvão, sendo este responsável por 38,5% da energia gerada no mundo (MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2020), conforme apresentado na Figura 5. As fontes renováveis somaram 24,1%, dos quais, 3,9% de eólica e 1,4% de solar

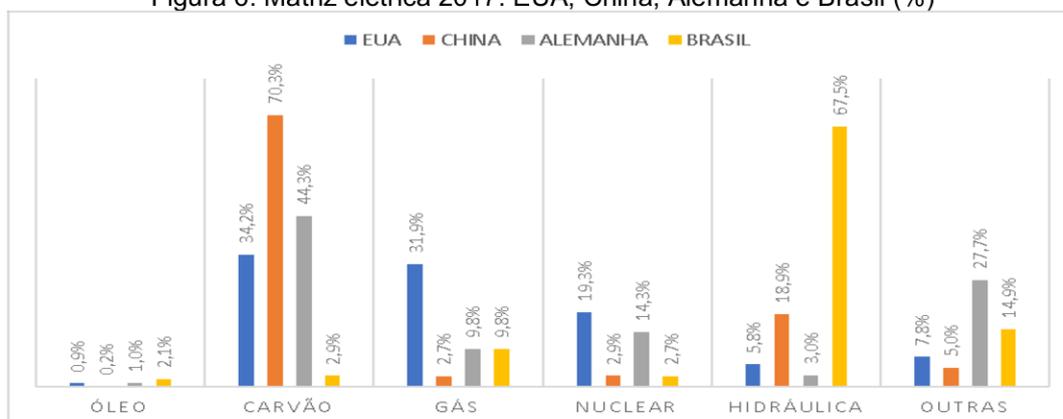
Figura 5. Matriz elétrica mundial no ano de 2019



Fonte: Adaptado de Ministério de Minas e Energia (2020b).

Ainda fazendo um comparativo entre países, observa-se a matriz elétrica dos Estados Unidos, China, Alemanha e Brasil, na Figura 6. Desconsiderando o Brasil, nos outros 3 países avaliados a geração por carvão é a predominante, chegando a ter mais de 70% da geração total como na China. O Brasil, no ano de 2017, controverso aos outros países analisados, possui 67,5% de sua geração advinda da hidráulica, fonte essa considerada renovável. O Brasil possui 80% de sua geração advinda de fontes renováveis, enquanto EUA, China e Alemanha possuem 13,2%, 23,8% e 29,2% respectivamente.

Figura 6: Matriz elétrica 2017: EUA, China, Alemanha e Brasil (%)



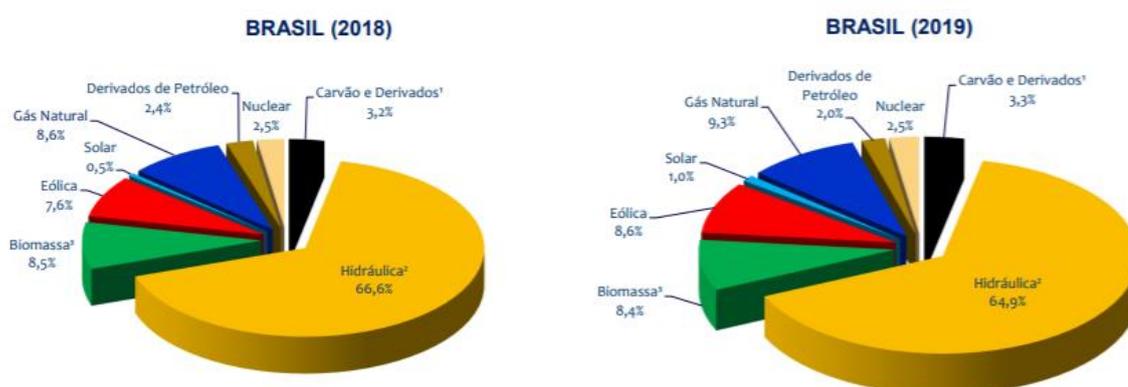
Fonte: Adaptado de Ministério de Minas e Energia (2017 a).

### 2.1.1 Matriz elétrica brasileira

O Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, sendo liderada pela geração hidroelétrica. No entanto, a hidroeletricidade, assim como todas as fontes renováveis de energia, está sujeita à influência de fatores climáticos, de modo que a energia armazenada em períodos de seca pode atingir valores críticos sob o ponto de vista de segurança energética (PEREIRA, et al., 2017). Com o risco de escassez desse recurso natural, a oferta de energia pode diminuir acarretando a elevação dos preços da energia do país.

No ano de 2019, o Brasil teve como destaque uma maior participação de energias renováveis em sua matriz elétrica e redução da participação de fontes não renováveis. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2019), do ano de 2017 para o ano de 2018 a oferta de energia elétrica subiu de 625,7 TWh para 636,4 TWh. Analisando a diferença do ano de 2018 para o ano de 2019, a geração hidráulica, teve um decréscimo de 1,7% de participação na matriz, conforme apresenta a Figura 7. As fontes não renováveis cresceram sua participação em 0,3%. O restante da demanda foi atendida pelo crescimento das gerações eólica e solar, sendo um acréscimo de 1,0% e 0,5%, respectivamente.

Figura 7: Matriz elétrica Brasileira 2018 e 2019.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2020)

Hidroelétricas e termoelétricas são consideradas fontes firmes, capazes de garantir o atendimento da demanda de carga típica do sistema, e fontes renováveis como a eólica e a solar fotovoltaica são consideradas fontes intermitentes de energia devido à variabilidade temporal elevada associada às condições meteorológicas do

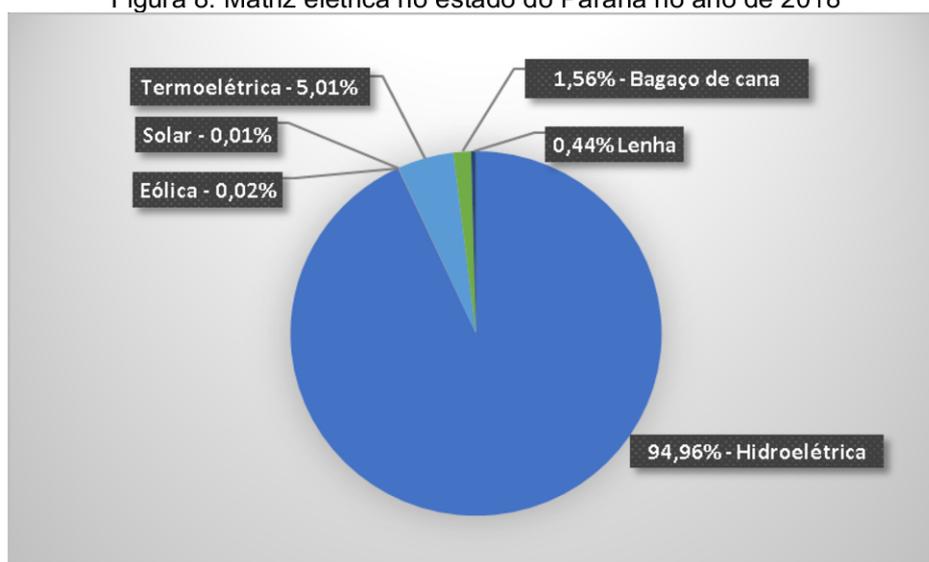
local. Visto isso, é indicado que a fonte eólica e solar sejam complementares, isto é, sejam fontes capazes de auxiliar na geração, mas não fontes predominantes.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2018), no final do ano de 2016, o Brasil possuía 56,9 MW de geração por fonte solar fotovoltaica instalada, isso apenas em geração distribuída. Em novembro de 2020 o Brasil já havia atingido 4.190 MW instalados na mesma condição (ANEEL, 2020), o que representa um crescimento de mais que 70 vezes o que foi instalado em 2016.

### 2.1.2 Matriz elétrica no Estado do Paraná

O Estado do Paraná é responsável pela geração de 16% de energia gerada no Brasil. É o estado que mais contribui com eletricidade seguido de São Paulo, com 12% (Instituto de Pesquisa Energética, 2018). Essa participação é representativa devido estar situada no estado do Paraná a maior usina hidrelétrica do país, e a segunda maior do mundo, a ITAIPU Binacional. Além da ITAIPU o estado do Paraná possui outras usinas por fonte hidroelétrica, sendo esse tipo de geração responsável por 94,96% da geração total do estado, conforme apresentado na Figura 8. Termoelétrica é a segunda fonte geração do estado com 5,01%. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018).

Figura 8: Matriz elétrica no estado do Paraná no ano de 2018



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2018)

Com relação à geração distribuída, em novembro de 2020, o Paraná ocupa a quinta posição em potência instalada, conforme apresentado na Tabela 1, ficando atrás de Minas Gerais, Rio Grande do Sul, São Paulo e Mato Grosso. (ANEEL, 2020)

Tabela 1: Os 5 estados do Brasil com maior número de instalações em geração distribuída em novembro de 2020

	<b>UF</b>	<b>Potência Instalada (MW)</b>
<b>1</b>	MG	790,7
<b>2</b>	RS	509,7
<b>3</b>	SP	503,7
<b>4</b>	MT	291,0
<b>5</b>	PR	277,1

Fonte: Adaptado da ANEEL (2020)

## 2.2 ENERGIA

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2020), a projeção de capacidade instalada de energia fotovoltaica demonstra que o Brasil atingirá 22,78 GWp de geração distribuída instalada tendo como fonte energia fotovoltaica, como observado nas Figuras 1 e 2.

A energia elétrica é utilizada de forma contínua na sociedade atual, sendo necessária para o funcionamento dos eletrodomésticos e iluminação nas residências, alimentando as indústrias em geral, movendo carros entre outros tantos exemplos que fazem com que a moderna comunidade funcione. Muitas das fontes de energias atuais são reconhecidas como prejudiciais ao meio ambiente, ou até mesmo limitadas (MERTENS, 2014).

Segundo Tiepolo (2012), energia é um conceito fundamental utilizado nas mais diversas áreas da Ciência, amplamente utilizado na descrição e na explicação de fatos do dia a dia. Energia é considerado a capacidade que um corpo ou uma substância têm de realizar trabalho (WISZFLOG, 2015).

Entretanto, uma definição mais completa é a que considera a energia uma propriedade da matéria que pode ser convertida em trabalho, calor ou radiação (RADOVIC, 2014).

Segundo Mertens (2014), várias são as unidades utilizadas para descrever energia, entre as principais podem ser citadas:

$$1 \text{ J(Joule)}=1 \text{ Ws}=1 \text{ Nm}=1 \text{ kg.m}^2/\text{ s}^2 \quad (1)$$

Na Engenharia Elétrica, a unidade de Quilowatt hora (kWh) é comumente utilizada e pode apresentar os seguintes formatos:

$$1 \text{ kWh}=1000 \text{ Wh}=1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s}=3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws}=3,6 \text{ MWh}=3,6 \text{ MJ} \quad (2)$$

Analisando o conceito da energia, pode-se observar que a energia é a potência transferida multiplicada por um determinado tempo, com isso conclui-se que potência é a velocidade com que se consome ou se absorve energia, isto é, é a energia por um determinado tempo (ALEXANDER; SADIKU; 2008).

$$E = \frac{P}{t} \quad (3)$$

Segundo o INMETRO (2014), as unidades utilizadas para potência apresentam os seguintes formatos:

$$1 \text{ J/s(Joule)}=1 \text{ W} \quad (4)$$

### 2.3 RADIAÇÃO SOLAR

O Sol representa um gigantesco reator de fusão natural, onde a principal fusão é a de átomos de hidrogênio em átomos de hélio. Esta fusão atômica ocorre em temperaturas próximas de 15 milhões de graus Celsius e a energia é liberada no espaço em forma de radiação (MERTENS, 2014).

Segundo a ABNT NBR 10899:2013, radiação solar é a forma de transferência de energia advinda do sol, por meio da propagação de ondas eletromagnéticas (ou fótons). Todo corpo quente libera radiação ao seu redor. De acordo com a Lei de Radiação de Planck, a temperatura da superfície determina o espectro da radiação.

O Sol irradia continuamente uma quantidade de  $3,845 \cdot 10^{26}$  W em todas as direções e a Terra recebe apenas uma pequena fração dessa quantidade. Ainda

segundo Mertens (2014), para calcular a quantidade de energia que a Terra recebe assume-se que existe uma esfera ao redor do Sol que tem um raio de  $r = r_{SE}$ . A essa distância a quantidade de radiação do sol já se espalhou por toda a área da esfera. Tomando  $r_{SE}$  como a distância entre o Sol e a Terra, na posição da Terra obtém-se a seguinte irradiância:

$$E_S = \frac{\text{Potência de Radiação}}{\text{Área da esfera}} = \frac{P_{sol}}{4 \cdot \pi \cdot r_{SE}^2} = \frac{3.845 \cdot 10^{26} W}{4 \cdot \pi \cdot (1.496 \cdot 10^{11} m)^2} = 1.367 W/m^2 \quad (5)$$

O resultado de 1.366 W/m<sup>2</sup> é chamado de constante solar e simboliza a irradiância fora da atmosfera terrestre. O Sol não é renovável, mas uma fonte inesgotável levando em consideração a escala de tempo da vida no planeta Terra (NREL, 2021)

Segundo a ABNT NBR 10899: 2013, irradiância solar é a taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watts por metro quadrado (W/m<sup>2</sup>).

Quando a luz solar passa pela atmosfera o espectro dela muda, enfraquecendo, isso ocorre devido vários fatores como reflexão da luz, absorção de luz por certas moléculas e/ou dispersão. Segundo Tiepolo et.al, (2017), as moléculas de gases atmosféricos e particulados em suspensão são responsáveis pelos processos físicos de espalhamento da radiação solar. Moléculas de ozônio, vapor de água, oxigênio e dióxido de carbono são responsáveis pelos processos físicos de absorção. Esses processos físicos que ocorrem na atmosfera terrestre reduzem a irradiância solar incidente na superfície. A superfície terrestre recebe aproximadamente 1.000 W/m<sup>2</sup>.

Assim, dos originalmente disponíveis 1.366 W/m<sup>2</sup>, a Terra recebe apenas 61% de radiação direta. No entanto, devido à dispersão da luz na atmosfera, existe uma outra porção: a radiação difusa. Porções de radiação fracas chegam de todas as direções do céu e são adicionadas para difundir radiação. A soma dos dois tipos de radiação, direta e difusa, é chamada de radiação global (MERTENS, 2014).

Segundo Ruther et al (2017), valores de irradiância global horizontal de até 1.822 W/m<sup>2</sup> foram observados no território brasileiro, isso se deve ao espalhamento por bordas de nuvens ou efeito lente causados pela geometria Sol / Nuvens / Terra (DGS, 2013)

A terminologia adotada neste trabalho será a mesma do Atlas Brasileiro de Energia Solar, conforme apresentado a seguir:

- Irradiância extraterrestre: é a taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. É também conhecido como irradiância no topo da atmosfera;
- Irradiância direta normal: é a taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície;
- Irradiância difusa horizontal: é a taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos;
- Irradiância direta horizontal: é a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto em uma superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre a irradiância direta normal e o cosseno do ângulo zenital solar;
- Irradiância global horizontal: é a taxa de energia total por unidade de área incidente em uma superfície horizontal. Ela é dada pela soma da difusa horizontal com a direta horizontal;
- Irradiância no plano inclinado: é a taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra.

## 2.4 POTENCIAL FOTOVOLTAICO NO BRASIL

O clima no Brasil é diversificado em consequência de fatores variados, como a extensão territorial, o relevo e a dinâmica das massas de ar. Pontos mais elevados tendem a ser mais frios, além de criarem condições propícias para a formação de nebulosidade através da condensação por levantamento nas encostas. A dinâmica atmosférica é de suma importância porque atua diretamente tanto na temperatura quanto na precipitação, provocando as diferenças climáticas regionais (PEREIRA et. al; 2017).

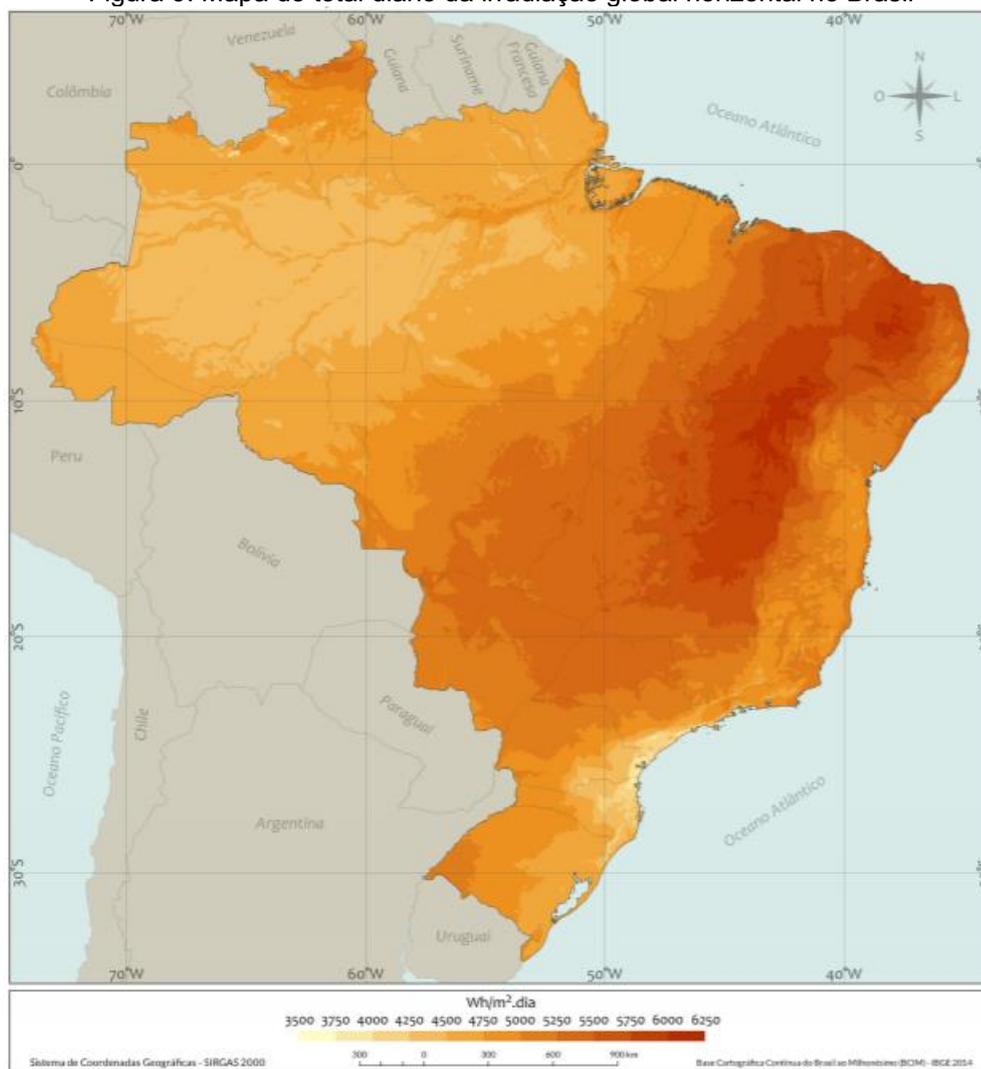
Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o Brasil possui um grande potencial para geração fotovoltaica, e esse formato de geração pode ter uma grande

contribuição para a redução dos picos de demanda dos sistemas de demanda dos sistemas de transmissão de Sistema Interligado Nacional – SIN. O Brasil sofre atualmente uma tendência de aumento da penetração da geração solar fotovoltaica, principalmente com a geração próxima ao consumo.

A Figura 9 apresenta o mapa que demonstra a média anual do total diário de irradiação global horizontal no Brasil. Esse mapa foi apresentado pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar e pode ser observado que a região com maior potencial é a nordeste e um pedaço da região norte, mais especificamente o estado de Tocantins.

A Figura 10 apresenta o valor médio anual do total diário de irradiação solar para as cinco regiões brasileiras, confirmando que a região nordeste é a que possui o maior potencial solar, com valor médio do total anual da irradiação global horizontal de 2.003 kWh/m<sup>2</sup>. As regiões Sudeste e Centro-Oeste apresentam totais diários próximos para a irradiação global horizontal em torno de 1.850 kWh/m<sup>2</sup>. Os valores relativamente baixos na região Sul se justificam pelas características climáticas desta região, com nebulosidade e precipitações frequentes que incidem na superfície.

Figura 9: Mapa do total diário da irradiação global horizontal no Brasil



Fonte: Pereira et. al, (2017)

Figura 10: Síntese dos níveis de irradiação solar por região



Fonte: Adaptado de Pereira et.al, (2017)

## 2.5 POTENCIAL FOTOVOLTAICO NO PARANÁ

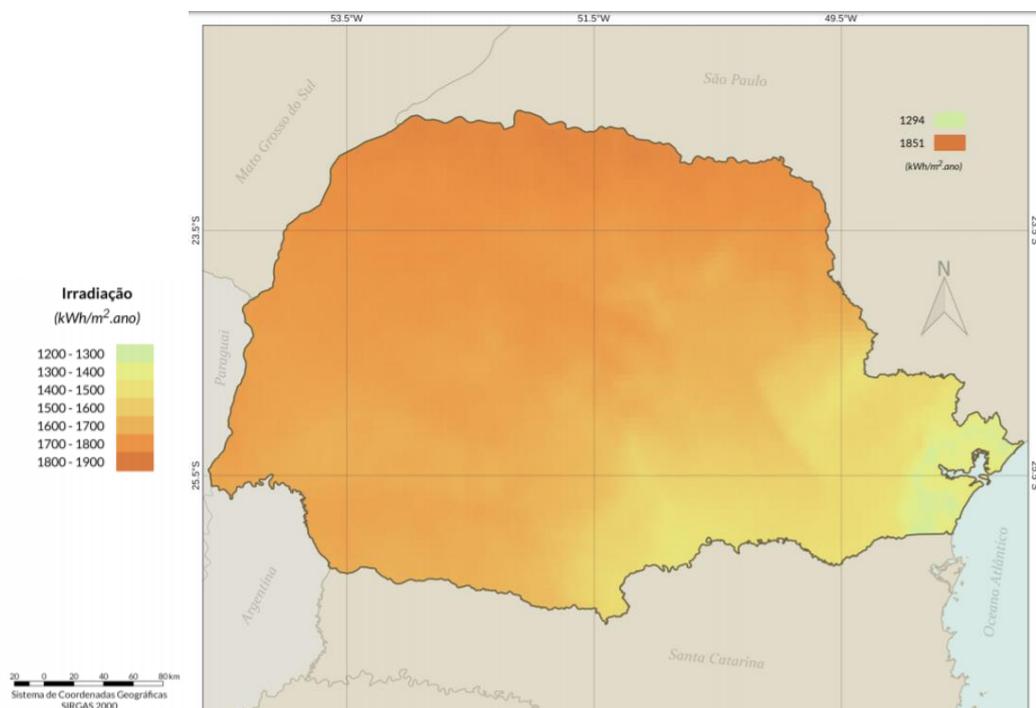
O estado do Paraná destaca-se em pesquisas como um excelente potencial para geração fotovoltaica, isso se deve ao fato de possuir radiação solar superior a maioria dos países europeus, onde está concentrada uma grande capacidade instalada mundial.

Pertencente à região sul do Brasil, com área de 199.880 km<sup>2</sup>, o Paraná apresenta um consumo em torno de 28,9 TWh (TIEPOLO et al., 2017). Segundo o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, o clima do Paraná apresenta contrastes nos regimes de precipitação e temperatura sendo a maior parte deles resultado do relevo e da localização geográfica do estado. A localização geográfica também garante uma das maiores amplitudes do ciclo anual de temperatura no Brasil, com maior contraste entre o inverno e o verão. Além disso, o planalto meridional e as serras produzem diferenças relevantes na distribuição das temperaturas, fazendo com que o Paraná esteja incluído na única região do Brasil com precipitação em forma de neve.

O estado do Paraná é atualmente o maior gerador de eletricidade do país, gerando aproximadamente 16,4% de toda a energia produzida no país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). Essa geração é advinda de hidroelétricas, visto que o Paraná apresenta recursos hídricos abundantes, oriundos das diversas bacias hidrográficas, conforme já citado. A Figura 11 apresenta o total diário da irradiação global horizontal no estado do Paraná, destacando o potencial de geração fotovoltaico da região.

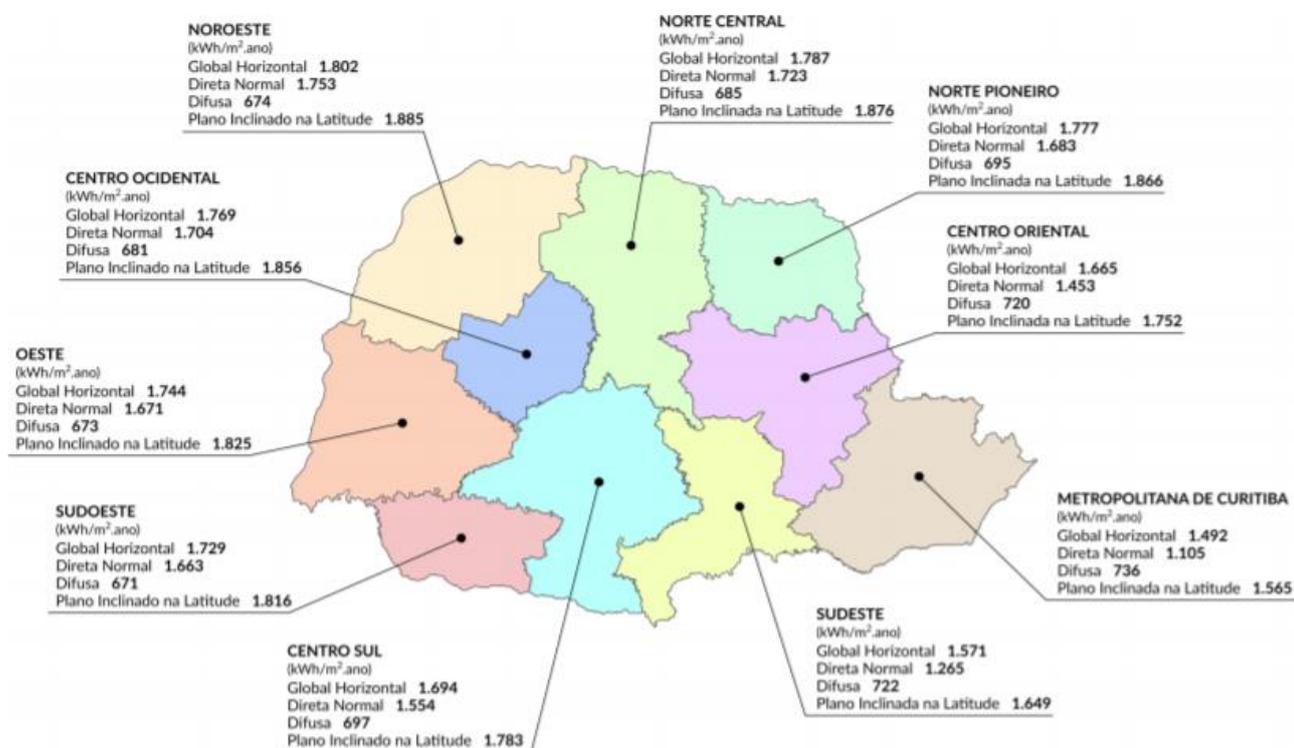
O estado do Paraná possui uma irradiação média total anual de 1.705 kWh/m<sup>2</sup> (TIEPOLO et al., 2017). A Figura 12 apresenta o potencial anual médio de energia solar dividindo o estado em mesorregiões, podendo observar que a mesorregião com maior irradiação média anual global horizontal é de 1.802 kWh/m<sup>2</sup> na mesorregião Noroeste e com menor potencial a região metropolitana de Curitiba com 1.492 kWh/m<sup>2</sup>.

Figura 11: Mapa do total diário da irradiação global horizontal no Paraná



Fonte: Tiepolo et.al, (2017)

Figura 12: Potencial anual médio de energia solar no Estado do Paraná e nas mesorregiões



Fonte: Tiepolo et.al, (2017)

## 2.6 SISTEMA FOTOVOLTAICO

De acordo com Ruther (2004), a superfície da terra recebe diariamente uma energia vinda do sol que poderia satisfazer a demanda de todos os habitantes do planeta durante um ano, ao passo que uma das fontes de reaproveitamento ocorre através de energia fotovoltaica. O aproveitamento da energia fotovoltaica pode ser feito através de dois diferentes sistemas, o SFVI ou o SFVCR.

A principal característica dos sistemas isolados é o armazenamento de energia. Segundo Pinho e Galdino (2014), a utilização de dispositivos de armazenamento de energia faz-se necessário como forma de atender a demanda em períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente. Desta forma, parte da energia solar convertida em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada para ser utilizada em outros momentos para atender a demanda. Esse sistema capta a radiação solar, transformando em corrente contínua e armazena essa energia para utilizar em equipamentos ou até uma rede específica.

Em um SFVI o módulo fotovoltaico capta a radiação solar e através do efeito fotovoltaico transforma essa radiação em energia elétrica, fazendo a transferência dessa energia elétrica para um controlador de carga. Esse controlador de carga recebe a corrente contínua vinda do módulo e a armazena em baterias pré-dimensionadas. Por outro lado, a corrente contínua armazenada nas baterias pode ser utilizada tanto em equipamentos que suportam corrente contínua quanto em equipamentos em corrente alternada, desde que essa energia passe por um inversor antes de ser entregue.

Outra forma de utilização da energia fotovoltaica seria através de um SFVCR. Esse tipo de sistema possui o mesmo princípio de funcionamento do SFVI, mas ele não possui armazenamento nem controlador de carga, isto é, toda a geração é imediatamente injetada na rede elétrica da unidade consumidora. Nesse formato há apenas a utilização da energia na forma de corrente alternada.

### 2.6.1 Componentes

Um gerador fotovoltaico pode ser representado pela junção de elementos chave para seu funcionamento divididos em três grupos diferentes: gerador, cabeamento e conversão/controle. O grupo gerador é formado pelos módulos fotovoltaicos, suas caixas de conexão e suas proteções.

Segundo Pinho e Galdino (2014), o módulo fotovoltaico é a unidade básica do gerador fotovoltaico e é formado por um conjunto de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, com objetivo de gerar energia elétrica.

Edmond Becquerel relatou o efeito fotovoltaico em 1839, quando nos extremos de uma estrutura de matéria semicondutora surge o aparecimento de uma diferença de potencial elétrico, devido à incidência de luz. No processo de conversão da energia radiante em energia elétrica a célula é a unidade fundamental (NASCIMENTO, 2004).

De acordo com Nascimento (2004), o silício é o segundo elemento mais abundante no globo terrestre. Em 1993 a produção de células fotovoltaicas atingiu a marca de 60 MWp, já em 2016, esta produção chegou a cerca de 70 GWp. O silício é explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo. Outros materiais alternativos estão sendo testados para essa aplicação, como exemplo as

células de filmes finos, em que seu processo de fabricação requer menor custo, porém sua eficiência energética é baixa se comparada com as de silício convencional. Mas sua aplicação é melhor em equipamentos de baixo consumo.

A eficiência de uma célula fotovoltaica comum no mercado pode variar de 1% a 17%, mas existem atualmente células em estudo que podem ultrapassar os 27% de eficiência, essas possuem ainda um elevado custo para produção.

O grupo de cabeamento é composto basicamente pelos condutores elétricos da instalação. A importância desse bloco está no seu correto dimensionamento, visto que pode apresentar uma redução importante das perdas de energia do sistema, assim como se sobre dimensionados podem apresentar uma elevação no custo do sistema.

Um gerador fotovoltaico recebe diariamente a variação de temperatura e intempéries. Os cabos indicados para a instalação de um sistema fotovoltaico precisam ter a proteção a esses fatores, evitando sua degradação antes dos outros elementos. Atualmente no mercado utilizam tanto canaletas para proteger esses cabos quanto cabos que já vem com proteção ultravioleta - UV.

O módulo fotovoltaico gera energia em corrente contínua, visto que a energia elétrica da rede elétrica é em corrente alternada precisa-se de um equipamento que faça essa conversão, e essa é a função principal de um inversor fotovoltaico. Logo o inversor é um conversor CC-CA que deve sincronizar a corrente alternada gerada com a rede elétrica em que ele está conectado.

Segundo a norma internacional IEC/TS 61836, a eficiência de conversão CC-CA do inversor é definida como a razão entre a energia elétrica na saída do inversor e a energia na entrada do inversor, isto é, a razão entre a energia entregue à rede elétrica e a energia vinda dos módulos fotovoltaicos para o inversor, conforme apresentado na Equação 6.

$$\eta_{inv} = \frac{E_{CA}}{E_{CC}} = \frac{\int P_{CA} dt}{\int P_{CC} dt} = \frac{\int P_{CA} dt}{\int P_{CA} dt + \int P_P dt} \quad (6)$$

Em que:

$E_{CA}$  = Energia elétrica em corrente alternada na saída do inversor;

$E_{CC}$  = Energia elétrica em corrente contínua na entrada do inversor;

$P_{CA}$  = Potência elétrica na saída do inversor;

$P_{CC}$  = Potência elétrica na entrada do inversor;

$P_P$  = Perda no processo de conversão.

## 2.7 EFICIÊNCIA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS

A eficiência do inversor é uma das características mais importantes a ser analisada, visto que através dela pode haver a comparação de equipamentos com mesmas características elétricas definindo assim qual é o melhor equipamento para seu local de instalação. Tem influência na eficiência a topologia do inversor, a temperatura e a radiação do local, assim como seu método de busca do ponto de máxima potência. Segundo Urbanetz (2010) dependendo da topologia adotada na concepção do inversor do SFVCR, tem-se um comportamento diferente em relação ao seu rendimento, dependendo do nível de tensão aplicado pelo arranjo FV.

Além da eficiência de operação, devem ser consideradas também as perdas quando em *standby*. Visto isso, a curva de eficiência de conversão CC-CA do inversor é um dos fatores mais importantes a serem observados, pois ela permite visualizar onde se encontra a faixa de operação do inversor na qual ele trabalha no melhor desempenho (ZILLES, 2012).

Assim como a utilização de transformadores isoladores influenciam na eficiência do inversor, a tensão de operação também tem uma grande participação nesse fator, pois a eficiência de um inversor não é igual em toda a faixa de operação de tensão de entrada. O nível de tensão de entrada influencia o rendimento do inversor, pois é necessária uma adaptação de tensão entre a sua entrada e a sua saída.

Segundo Rampinelli (2010), as perdas em inversores podem ser divididas em duas categorias principais: perdas por chaveamento e perdas por condução. Ambas são dependentes das características dos dispositivos semicondutores utilizados pelos inversores como elementos de chaveamento e, também, da topologia do conversor, da frequência de operação e do tipo de carga. A diminuição de perdas e o aumento da eficiência dos inversores estão diretamente ligadas ao desenvolvimento de dispositivos semicondutores com novos materiais e novas tecnologias de fabricação.

Atualmente, tem-se como padrão para análise da eficiência de inversores fotovoltaicos três opções: a máxima eficiência, a eficiência europeia e a eficiência Californiana. Para efetuar essa comparação os inversores apresentam curvas de eficiência por carregamento para três tensões de entrada diferentes, uma é utilizada para a eficiência máxima e as outras duas nas tensões limites de operação do seguidor do ponto de máxima potência (SPMP) (ALMEIDA, 2011).

Inicialmente, era utilizado apenas o ponto de máxima eficiência para análise dos inversores, mas como o inversor não funciona o tempo todo em suas características nominais, foi necessário fazer a comparação da eficiência em outros pontos para comprovar a boa eficiência do equipamento em diversas situações e não apenas na nominal. Com isso, na década de 90 foi introduzido o conceito de eficiência Europeia, a qual apresenta a eficiência do inversor em carregamentos diferentes e um perfil de radiação solar específico de uma região da Alemanha, na cidade de Trier (ALMEIDA, 2011).

Essa forma de análise da eficiência independe da tensão de entrada, leva em consideração a eficiência em seis carregamentos diferentes, representados por:  $\eta_{5\%}$  (carregamento de 5%);  $\eta_{10\%}$  (carregamento de 10%);  $\eta_{20\%}$  (carregamento de 20%);  $\eta_{30\%}$  (carregamento de 30%);  $\eta_{50\%}$  (carregamento de 50%) e  $\eta_{100\%}$  (carregamento de 100%). Os coeficientes europeus obtidos são apresentados na Equação 7.

$$\eta_{EURO} = 0,03_{\eta_{5\%}} + 0,06_{\eta_{10\%}} + 0,13_{\eta_{20\%}} + 0,10_{\eta_{30\%}} + 0,48_{\eta_{50\%}} + 0,20_{\eta_{100\%}} \quad (7)$$

A composição da equação de eficiência europeia é feita por 6 eficiências, as quais são as que possuem maior representatividade de geração em um inversor. A representatividade de cada eficiência é apresentada pelo coeficiente que a antecede. Por exemplo, pode-se observar na Equação 8 que a letra A corresponde ao coeficiente do carregamento de 5%, isto é, o A corresponde ao peso desse carregamento nessa região específica. A soma dos coeficientes será sempre igual a 1 ( $A+B+C+D+E+F = 1$ ), e os maiores coeficientes são nos carregamentos de maior importância, e que possuem maior geração, para a localidade.

$$\eta_{LOCAL} = A_{\eta 5\%} + B_{\eta 10\%} + C_{\eta 20\%} + D_{\eta 30\%} + E_{\eta 50\%} + F_{\eta 100\%} \quad (8)$$

Segundo Bletterie (2008), na obtenção do coeficiente de cada carregamento levam-se em consideração os seguintes fatores: irradiância, temperatura do módulo, temperatura ambiente mínima, temperatura ambiente máxima, a temperatura normalizada de teste e o coeficiente modular de temperatura.

A curva de eficiência de um inversor possui uma inclinação muito maior em seu início, com carregamentos maiores a inclinação tende a obter menores variações, fazendo com que sejam necessárias maiores análises no início do carregamento do que no final, esse é o motivo de ter mais carregamentos levados em consideração até 50% do que entre 50% e 100% do carregamento na eficiência Europeia.

Devido todos esses fatores que formam os coeficientes de carregamento, Bletterie (2008) demonstra em seu estudo que a temperatura tem uma grande influência no coeficiente de carregamento, e apresentando análises computacionais com dados de diferentes localidades na Europa encontrou-se um erro de até 2% de um sistema fotovoltaico para outro levando em conta o conceito de eficiência Europeia.

Visto que o conceito é confiável apenas na localidade em que foi obtido, a Comissão de Energia da Califórnia (CEC – Califórnia Energy Commission) verificou a necessidade de levantar um conceito que tivessem as características de alta irradiância e temperatura da Califórnia, com isso criaram a eficiência Californiana. Esse conceito também é uma média ponderada das eficiências do inversor em alguns carregamentos, ela leva em consideração carregamentos diferentes do conceito europeu conforme é apresentado na Equação 9.

$$\eta_{CEC} = 0,04_{\eta 10\%} + 0,05_{\eta 20\%} + 0,12_{\eta 30\%} + 0,21_{\eta 50\%} + 0,53_{\eta 75\%} + 0,05_{\eta 100\%} \quad (9)$$

Na eficiência Californiana, pode-se observar que o carregamento que tem o maior peso na análise é o de 75%, seguido do de 50%, destacando assim que essa é a faixa de irradiância que mais tem influência nessa região, as faixas predominantes.

Tem-se que nenhum dos dois conceitos, nem o europeu nem o CEC, consideram a dependência da tensão de entrada e a eficiência de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP).

#### 2.7.1.1 Eficiência Brasileira

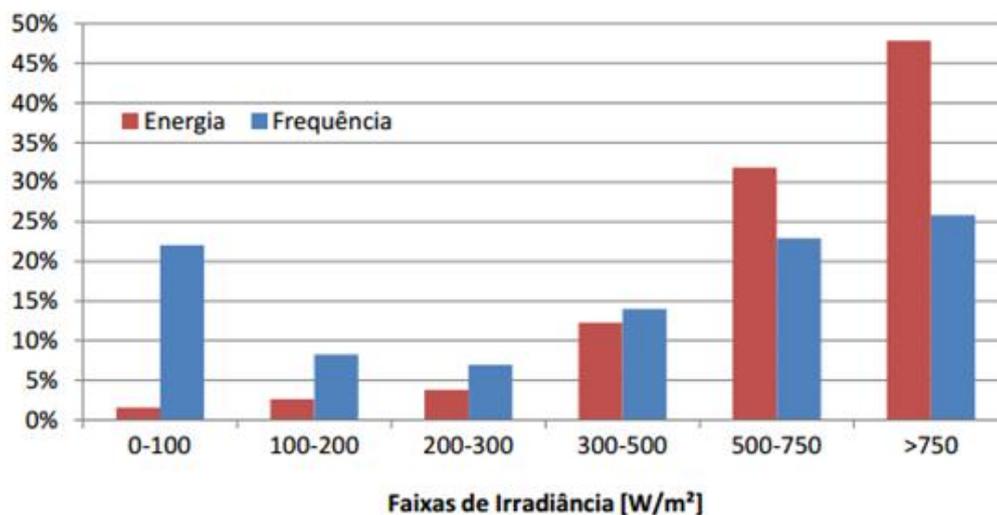
Existe um projeto a nível mundial criado para integrar e explorar o banco de dados de radiação solar pelo mundo, chamado de projeto SoDa – Solar Radiation Project. Esse projeto é um consórcio que, em 2017, une informações de 68 institutos. Esses institutos são privados e públicos e unem informações sobre irradiação solar pelo mundo. Todas as estações do projeto passam por uma validação de dados, pois devem atender a características de precisão e confiabilidade exigidas pelas regras do projeto. No Brasil tem-se como contribuintes dados obtidos através de uma parceria com estações do INPE e do INMET, sendo 11 estações do INPE e 31 estações do INMET.

Para fazer uma análise da eficiência brasileira foi necessário adquirir dados de radiação solar, com resolução de minutos, para que através deles fossem obtidos os coeficientes referentes ao índice de irradiação brasileiro. Para isso foram utilizados dados fornecidos pelo Projeto SoDa. Foram obtidos dados referentes ao ano de 2005 para todas as capitais brasileiras. Segundo Neto (2012), com esses dados foram calculadas as irradiâncias média regional e nacional para cada minuto do ano. A partir disso foi avaliada a importância de cada carregamento e escolhidos como principais a serem utilizados os seguintes: 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100%.

Fazendo uma análise da Figura 13, pode-se observar que mais de 40% da irradiação anual é proveniente de irradiâncias maiores que  $750 \text{ W/m}^2$  e mais de 70% da irradiação provêm de irradiâncias superiores a  $500 \text{ W/m}^2$  (NETO, 2012). Com isso chega-se à conclusão de que as fórmulas de eficiência Europeia e Californiana não se enquadram ao perfil brasileiro de irradiância, visto que essas fórmulas levam mais em consideração as faixas de baixa irradiância. A partir dessa distribuição de irradiância que são obtidos os coeficientes utilizados na equação de eficiência do local em questão. A energia apresentada na Figura 13 corresponde a energia gerada por aquela faixa de irradiância durante um dia. Por exemplo, a faixa de

irradiância que mais gera energia nesse histograma é para carregamentos superiores à 750W/m<sup>2</sup>, simbolizado na cor vermelha no gráfico.

Figura 13: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média nacional por faixas.



Fonte: Neto (2012)

Um estudo realizado por Almeida (2011), mostrou uma eficiência brasileira de inversores para SFVCR. A proposta do trabalho era apresentar uma nova maneira de calcular a eficiência ponderada considerando características ignoradas nos conceitos Europeu e Californiano e adaptando às características brasileiras de incidência solar.

Cada carregamento necessita de 10 medidas em diferentes tensões, isto é, o inversor é ensaiado com 10 tensões entre seu limite de tensão em cada um dos 6 carregamentos, obtendo 60 medidas diferentes. Para calcular a eficiência total deve-se calcular a eficiência total média de cada carregamento, conforme é apresentado na Equação 10.

$$\eta_{TMEDk\%} = \frac{\sum_{i=V_{PMPmin}}^{V_{PMPmax}} \eta_{k\%i}}{10} \quad (10)$$

Sendo:

$\eta_{TMEDk\%}$  = eficiência total média para o carregamento escolhido

k% = carregamento

$\eta_{k\%i}$  = eficiência total a k% de carregamento e a uma dada tensão de entrada i.

Com isso, Almeida (2011) obteve como cálculo da Eficiência Brasileira a Equação 11:

$$\eta_{BR} = 0,02\eta_{TMED10\%} + 0,02\eta_{TMED20\%} + 0,04\eta_{TMED30\%} + 0,12\eta_{TMED50\%} + 0,32\eta_{TMED75\%} + 0,48\eta_{TMED100\%} \quad (11)$$

### 3 METODOLOGIA

O Estado do Paraná possui em sua extensão 25 estações meteorológicas automáticas de superfície operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o local dessas estações pode ser observado através da Figura 14.

Segundo Tiepolo et.al, (2017), as estações meteorológicas automáticas do INMET operam com a transmissão dos seus dados via satélite ou telefonia e estão distribuídas por todo o território nacional. Uma estação meteorológica ou ambiental automática é composta de uma unidade de memória central (*datalogger*) ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, entre outras).

Figura 14: Localização das Estações Automáticas do INMET no estado do Paraná



Fonte: INMET (2020)

Cada estação meteorológica registra dados de temperatura, umidade, pressão, velocidade do vento, radiação e chuva. Os dados são registrados por hora e data, isto é, tem-se 24 registros de cada item por dia, por estação.

Para a pesquisa em questão foram utilizados os dados de data, hora e radiação. A base de dados utilizada se compreende entre janeiro de 2009 até dezembro de 2019, sendo que cada estação fornece dados de hora em hora.

O INMET utiliza em sua base de horas o sistema UTC, do inglês *Coordinated Universal Time*, ou português Coordenada de Tempo Universal. Esse sistema possui com referência ao Meridiano de Greenwich (Inglaterra), equivalente ao horário de Londres, que corresponde a 3 horas a mais em relação ao horário de Brasília (INMET, 2020).

Visto isso, é necessário considerar essa diferença de 3 horas em todas as tabelas analisadas. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, a hora média de um ano do nascer do sol no Estado do Paraná é as 06:50, e a hora média do pôr do sol no estado do Paraná é as 18:58. Sabendo o horário de nascer e pôr do sol e o deslocamento de horas no banco de dados devido ao sistema UTC, dados de radiação antes das 6:00 horas e após as 20:00 horas foram descartados por se tratarem de valores nulos ou negativos, devido à ausência de radiação solar. Esse filtro será chamado de filtro de nascer e pôr do sol.

Após o ajuste dos horários inicia a análise dos dados de radiação fornecidos. Cada estação fornece um dado de irradiação em  $\text{kJ/m}^2$  por hora, o qual corresponde a irradiação da hora em análise. Para o estudo é necessário encontrar a irradiância de cada instante, como os dados fornecidos são de irradiação horária é possível encontrar a irradiância média daquela hora, para isso é feito um tratamento nos dados fornecidos para que da radiação durante uma hora obtenha-se a irradiância média em cada hora, em  $\text{W/m}^2$ , utilizando a Equação 2.

Com os dados de irradiância média durante a hora disponíveis é necessário avaliar se ainda possuem dados incoerentes. Dados que apresentam alta irradiância em horários inesperados, por exemplo, dados acima de  $1.000 \text{ W/m}^2$  logo ao nascer do sol ou próximo ao pôr do sol levantam suspeitas. Conforme citado no Capítulo 2.3 RADIAÇÃO SOLAR, a Constante Solar possui um valor de  $1.367 \text{ W/m}^2$ , esta seria a irradiância recebida pela terra em horários de alta irradiância, sem considerar outros influentes que podem aumentar a irradiância recebida, como o albedo. Períodos de alta irradiância são considerados entre as 10:00 horas até as 14:00 horas, fora desse intervalo dificilmente existiria tão altas irradiâncias. Visto isso, dados fora do

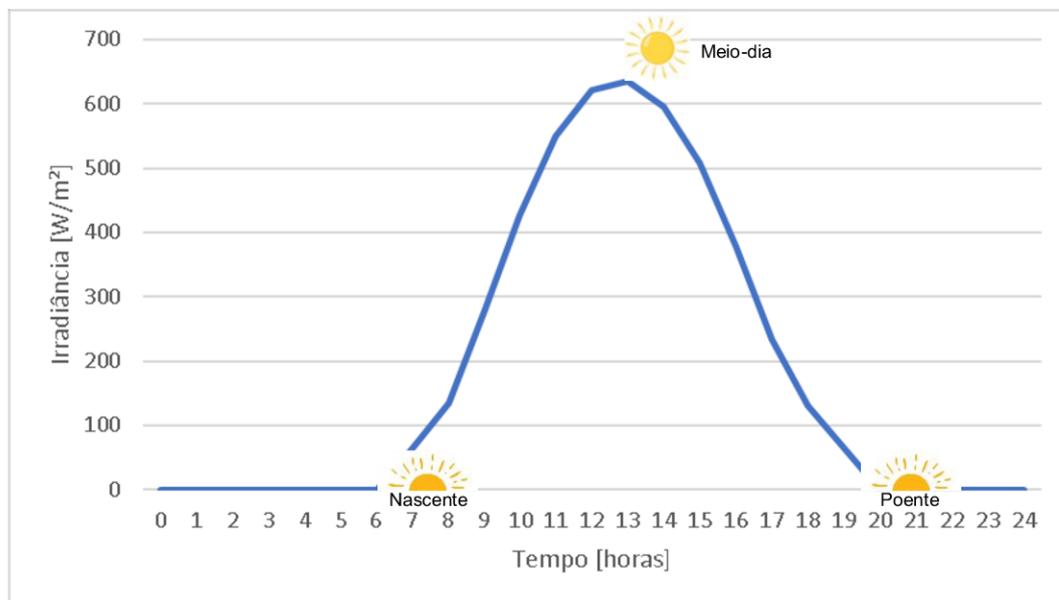
intervalo citado como de maior irradiância e com valor acima de  $1.000 \text{ W/m}^2$  merecem a atenção e necessitam de reavaliação.

Em análise às tabelas fornecidas pelo INMET observou-se que alguns dados não apresentavam conversão de unidade direta, por exemplo, um número que o INMET avaliava como 1,263 (um virgula duzentos e sessenta e três) era considerado 1.263 (mil duzentos e sessenta e três) pela tabela exportada de análise, e essa questão distorcia de forma considerável o resultados, visto que esse fenômeno acontecia em 2% dos dados. Desta forma, houve a necessidade de reanálise dos dados que compreendiam em horários fora de pico para correção da unidade.

Após obter a irradiância média a cada hora e fazer a análise inicial dos dados, ignorando os pontos desnecessários e corrigindo os dados incoerentes, é possível obter a maior irradiância de cada estação nesse período, e também o gráfico de irradiância média por hora, por estação. Esses dados correspondem ao dia típico do período de análise, ele tende a apresentar a curva de irradiância média do local, iniciando o dia com uma irradiância baixa ao nascer do sol, aumentando a irradiância próximo ao meio-dia, e reduzindo novamente até o sol se por. O comportamento da irradiância durante um dia ensolarado é apresentado na Figura 15. A média de irradiância em cada estação deve seguir a característica da curva de um dia ensolarado. A média de irradiância em cada estação deve seguir a característica da curva de um dia ensolarado.

O próximo passo é obter a frequência que cada irradiância aparece por estação do INMET. Para melhorar a análise foram definidas faixas de frequência de dados, e essa divisão foi baseada no estudo realizado por Almeida (2011), apresentado na Equação 11.

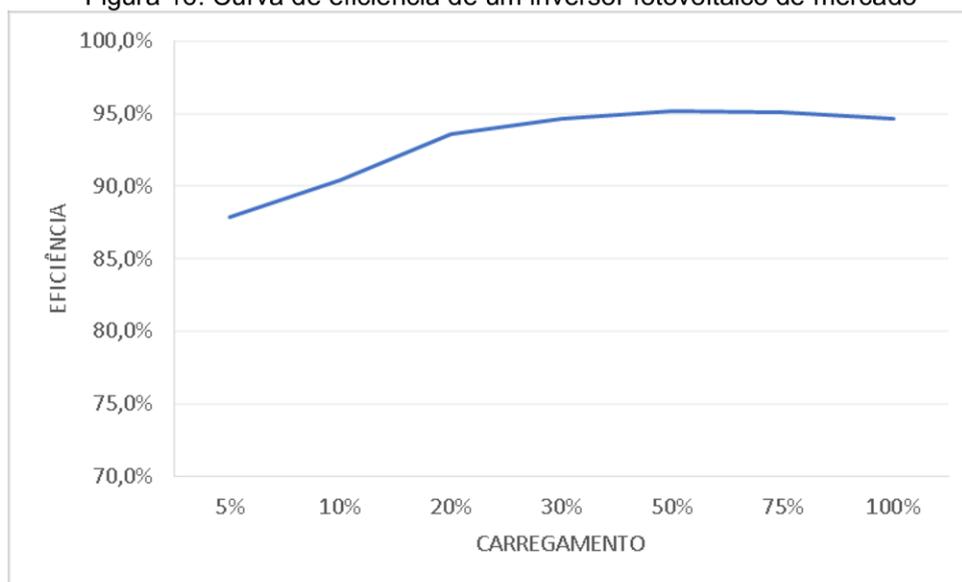
Figura 15: Comportamento da irradiância durante um dia ensolarado



Fonte: INMET (2020)

O estudo divide seus dados em faixas de: 0-100, 100-200, 200-300, 300-500, 500-750 e > 750 W/m<sup>2</sup>. As faixas contemplam o valor maior exato, por exemplo, 0-100 contém o 100, já a faixa 100-200 não contém o 100 mas contém o 200, e assim por diante. Valores de horários noturnos ou menores e iguais a zero foram desconsiderados no estudo. As faixas de irradiância foram escolhidas porque a curva da eficiência do inversor necessita um detalhamento maior no início da curva do que no meio e no final, visto que tem uma inclinação no início muito maior do que após os 20 % de carregamento, ou seja, as variações na eficiência no início da curva são maiores e ela mantém-se mais constante após os 20% de carregamento. Para exemplificar essa característica de funcionamento da curva de eficiência de um inversor, têm se na Figura 16 a curva de eficiência de um inversor de mercado.

Figura 16: Curva de eficiência de um inversor fotovoltaico de mercado



Fonte: Bassan (2017)

Tendo definido as faixas de irradiância que serão utilizadas, levanta-se a frequência de aparecimento de cada irradiância. A finalidade é saber, em percentual, qual a participação de cada faixa de irradiância durante o dia. Depois de levantar a frequência também será levantado qual a geração de energia de cada faixa de frequência, assim ficará evidente quanto cada faixa contribui na geração total do dia. Essa geração corresponde a quanto de energia foi gerador por cada faixa de carregamento em um dia. Esses dados serão analisados por estação, por mesorregião e também do total.

Um dos propósitos é obter a frequência de irradiância no estado do Paraná, podendo assim entender qual o padrão do estado e poder comparar com uma frequência europeia, e também, com uma frequência do Brasil sugerida por uma pesquisa já realizada.

## 4 RESULTADOS

O site do INMET oferece de forma aberta os dados dos 365 dias anteriores ao da pesquisa. Em agosto de 2020, o INMET mudou seu formato de apresentar os dados, fornecendo dados desde o início da operação das estações, o que permitiu que o estudo fosse realizado para 11 anos.

Durante o período do estudo, foram obtidos dados de janeiro de 2009 até dezembro de 2019, completando assim 11 anos de dados para a análise. Esses 11 anos de dados totalizaram 2.218.087 dados de radiação em todas as estações do estado do Paraná.

Considerando que foi analisado um total de 4.015 dias de análise no estudo, e que obtendo um valor de radiação em cada estação por hora, pode-se dizer que o total dos dados totais deveria ser 2.409.000, apresentando uma falta de dados de aproximadamente 14%.

Essa falta de dados se deve ao fato de que 05 (cinco) estações iniciaram suas operações durante o período de estudo, sendo elas São Mateus do Sul e Ventania, com início de operação em 2011, e Campina da Lagoa, Colombo e Laranjeiras do Sul com início de operação em 2016, além de problemas em equipamentos não detalhados pelo INMET. Os dados perdidos não conseguem ser recuperados.

Após todo o tratamento desses dados, aplicando os filtros necessários conforme citado na metodologia, obteve-se inicialmente a maior irradiância de cada estação, apresentada na Figura 17.

Figura 17: Máximas irradiâncias médias observadas por estação



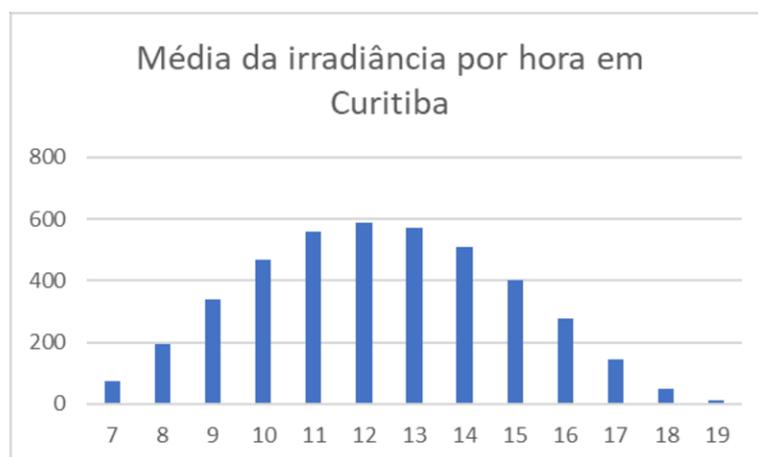
Fonte: Autoria própria

A estação que apresentou a maior irradiância média durante uma hora é a de Morretes, junto com a estação de Nova Fátima, ambas com  $1.463\text{W/m}^2$ . A maior irradiância por estação chega a ter uma variação de até 24%, considerando que a estação de São Mateus do Sul obteve como maior irradiância  $1.102\text{W/m}^2$  no período analisado.

Após análise da maior irradiância por estação, obtém-se o dia médio por estação, utilizando a irradiância média por hora por estação e considerando os 11 anos analisados no estudo. O Apêndice I apresenta os 25 gráficos correspondentes às médias de irradiância por hora durante um dia de cada estação analisada.

Destacando o dia médio na estação de Curitiba, demonstrado na Figura 21, temos a correspondência ao comportamento da irradiância durante um dia médio ensolarado, apresentado na metodologia,

Figura 18: Média de irradiância média, por hora, durante um dia em Curitiba, considerando os 11 anos de estudo.



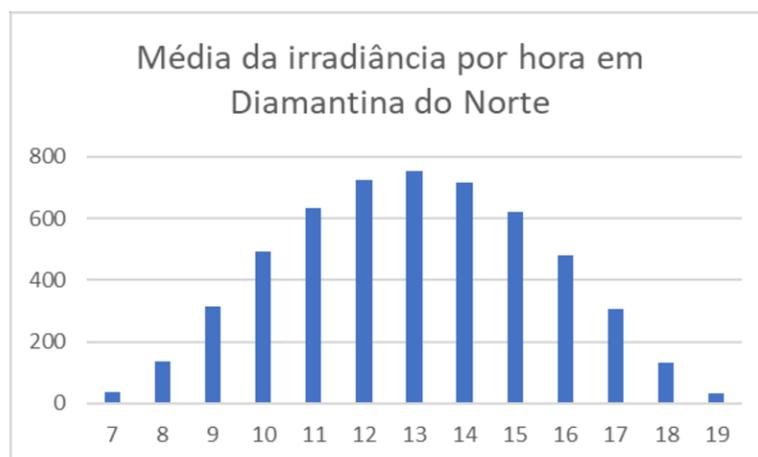
Fonte: Autoria própria

A cidade de Curitiba não se encontra na região de melhor irradiância do estado do Paraná, segundo o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Comparado à uma estação no norte do Paraná, percebe-se que Curitiba atinge níveis relativamente baixos de irradiância. A estação com a curva de irradiância média por hora com maiores níveis do Paraná é a de Diamantina do Norte, apresentada na Figura 19.

Comparando a curva de Diamantina do Norte com a de Curitiba, percebe-se que Diamantina do Norte possui um dia melhor distribuído de irradiância, iniciando sua irradiância média por hora as 7 horas e ainda possuindo irradiância considerável as 18 horas, tendo seu término apenas as 19 horas, diferente de Curitiba e que possui uma redução alta de sua irradiância média por hora já às 18 horas. Curitiba próximo ao meio dia atinge irradiâncias médias por hora de  $600\text{W/m}^2$ , sendo que Diamantina do Norte quase alcança níveis de  $750\text{W/m}^2$ .

Essa diferença de curva de dia médio pode ter interferência no resultado final do projeto, visto que o propósito é encontrar uma equação média para todo o estado do Paraná, e mesmo dentro do estado do Paraná possui uma diferença considerável de irradiância entre as cidades.

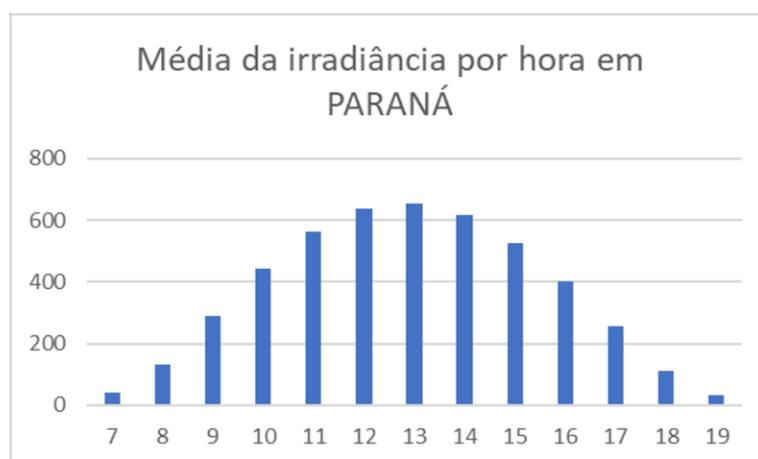
Figura 19: Média de irradiância média, por hora, durante um dia em Diamantina do Norte, considerando os 11 anos de estudo.



Fonte: Autoria própria

A média da irradiância por hora do estado do Paraná é apresentada na Figura 20. Observa-se que essa curva fica entre a curva de Curitiba e a curva de Diamantina do Norte, fazendo uma média entre todas as estações do estado.

Figura 20: Média de irradiância média, por hora, durante um dia no Paraná, considerando os 11 anos de estudo.



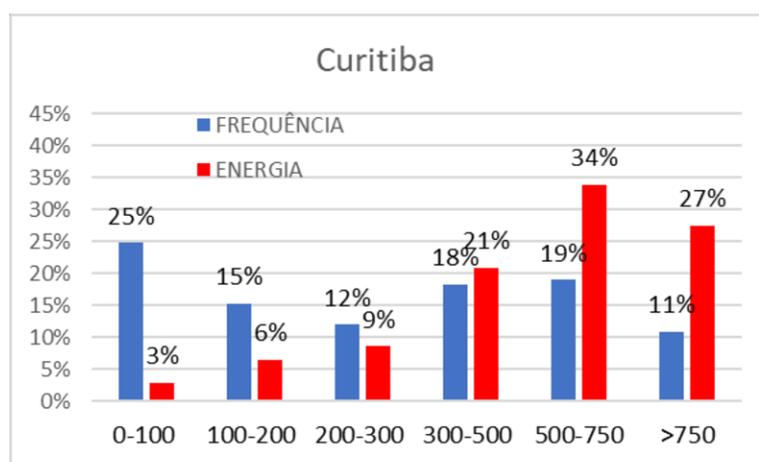
Fonte: Autoria própria

Na sequência, faz-se o levantamento da frequência e geração das faixas pré definidas em cada estação, isto é, em cada estação formou-se um histograma conforme Figura 21, apresentando a frequência que cada faixa de irradiância aparece, e também a geração que cada faixa é responsável, ambos em percentual. O Apêndice III apresenta os 25 gráficos correspondentes a distribuição de

frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas de cada estação analisada.

A Figura 21 representa o gráfico da distribuição de frequência da irradiância obtido no estudo para a estação de Curitiba.

Figura 21: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas em Curitiba.



Fonte: Autoria própria

A Figura 21 demonstra que Curitiba possui uma frequência maior de irradiâncias baixas. Pode-se observar que a maior frequência é de irradiâncias abaixo de  $100\text{W/m}^2$ , com 25%. Irradiâncias acima de  $750\text{W/m}^2$  tem a menor frequência, com 11% de aparições.

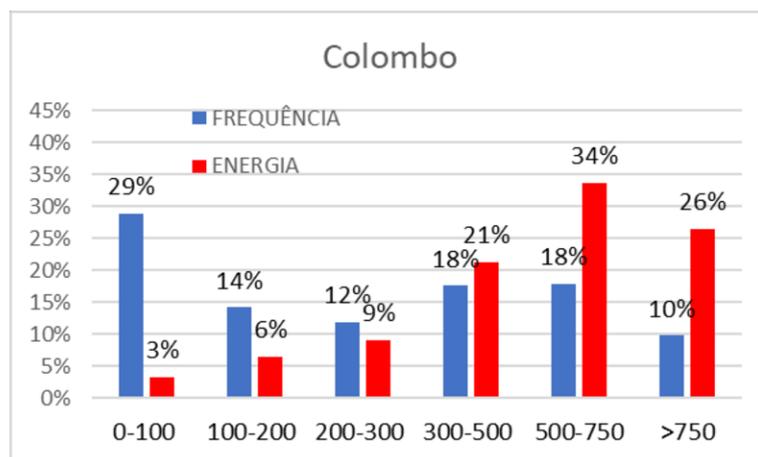
Diferente da frequência de ocorrências, a geração de energia é maior nos maiores irradiâncias, mesmo com menor frequência. Observa-se que a maior geração ocorre na faixa de irradiância de  $500\text{-}750\text{W/m}^2$ , com 34% da geração centralizada nessa faixa de irradiância. A menor contribuição em geração é da faixa que possui maior frequência de aparecimento, até  $100\text{W/m}^2$ , com apenas 3% de geração.

Ainda para a estação de Curitiba, foi feito um estudo complementar comparando as características por ano da estação, destacando anos atípicos, os quais o desvio de valores fica muito maior que outros. Detalhes desse estudo encontram-se no Apêndice II.

Considerando que a Estação de Curitiba está situada a 18 Km de distância da estação de Colombo, apresenta-se na Figura 22 o gráfico da distribuição de frequência da irradiância obtido no estudo para a estação de Colombo, para servir

como base de comparação. Observa-se que a estação de Colombo apresenta uma distribuição muito próxima da estação de Curitiba, tendo uma variação menor que 1%.

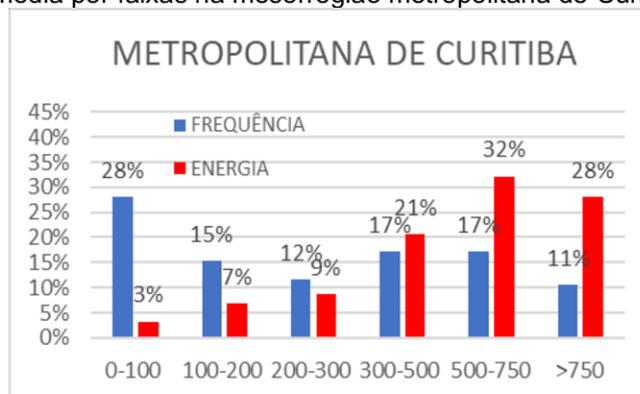
Figura 22: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas em Colombo.



Fonte: Autoria própria

O Apêndice III apresenta 7 gráficos correspondentes à distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas dividida por mesorregião. Utilizando o formato de análise por mesorregião, percebe-se que a distribuição de frequência da irradiância com índices de irradiância mais baixos predominantes é a mesorregião Metropolitana de Curitiba, apresentadas na Figura 23, a qual engloba as estações de Curitiba, Colombo e Morretes. Fator coerente visto que, segundo a Figura 11 apresentada na pesquisa, essa é a região com menores índices de radiação.

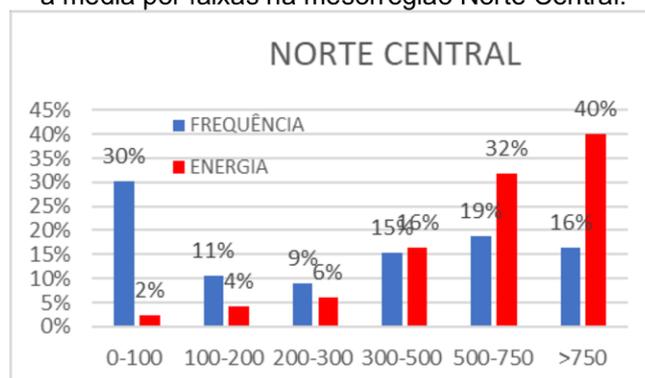
Figura 23: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas na mesorregião metropolitana de Curitiba.



Fonte: Autoria própria

A Mesorregião com a distribuição de frequência com índices mais altos é a Norte Central, representada pela Figura 24. Percebe-se que irradiâncias médias por hora acima de  $750\text{W/m}^2$  possuem 40% da geração na região Oeste, enquanto na região Metropolitana de Curitiba esse mesmo índice possui geração de 28%.

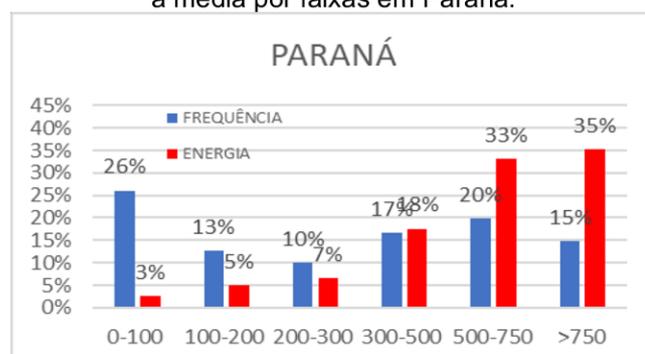
Figura 24: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas na mesorregião Norte Central.



Fonte: Autoria própria

Apresentando a média de irradiância por hora do estado do Paraná, considerando todas as 25 estações existentes no estado, tem-se a Figura 25. Observa-se valores médios considerando os dados de cada estação, alcançando o equilíbrio entre todas as estações. Enquanto irradiâncias médias por hora acima de  $750\text{W/m}^2$  possuem 39% de participação na região Oeste, na região Metropolitana de Curitiba esse mesmo índice possui participação de 29%, no estado do Paraná, englobando todas as estações, irradiâncias médias por hora acima de  $750\text{W/m}^2$  possuem uma participação de 35%.

Figura 25: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas em Paraná.



Fonte: Autoria própria

Utilizando os dados obtidos na Figura 21, obtém-se a Equação de eficiência de inversores fotovoltaicos para a região de Curitiba:

$$\eta_{CWB} = 0,03_{n10\%} + 0,06_{n20\%} + 0,09_{n30\%} + 0,21_{n50\%} + 0,34_{n75\%} + 0,27_{n100\%} \quad (12)$$

Utilizando os dados do Apêndice IV, o qual descreve os gráficos de distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas por estação, consegue-se obter os índices das equações de eficiência de inversores fotovoltaicos para cada mesorregião do estado do Paraná, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Comparativo dos coeficientes por carregamento por mesorregião

	<b>10%</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
Sudeste	0,03	0,06	0,08	0,2	0,33	0,3
Metropolitana de Curitiba	0,03	0,07	0,09	0,21	0,32	0,28
Centro Oriental	0,02	0,04	0,06	0,17	0,35	0,36
Norte Pioneiro	0,02	0,04	0,06	0,17	0,35	0,36
Norte Central	0,02	0,04	0,06	0,16	0,32	0,4
Centro Sul	0,03	0,05	0,07	0,18	0,32	0,35
Sudoeste	0,02	0,05	0,06	0,17	0,33	0,37
Oeste	0,02	0,04	0,06	0,16	0,33	0,39
Centro Ocidental	0,02	0,04	0,06	0,17	0,33	0,38
Noroeste	0,02	0,04	0,06	0,16	0,34	0,38

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que as maiores diferenças nos coeficientes são entre a mesorregião Metropolitana de Curitiba e o Norte Central. Essa diferença chega a 75% no coeficiente de 20% de carregamento, e 43% no coeficiente de 100% de carregamento. Considerando que os carregamentos mais altos possuem maior impacto na geração de energia, conforme demonstrados nos gráficos de distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas, pode-se aceitar que a diferença no carregamento de 20% não impacta tanto quanto a diferença no carregamento de 100%. Considerando também que a proposta do estudo é apresentar uma equação média para o estado do Paraná, esse

desvio obtido entre as mesorregiões é reduzido quando feito a média de todos para obtenção da equação.

A Equação 13 apresenta a proposta de equação de eficiência de inversores fotovoltaicos para o Estado do Paraná, segundo a distribuição de frequência de irradiância obtida através da Figura 25. Sendo essa a equação elaborada pela média das 25 estações solarimétricas, com os dados dos 11 anos estudados.

$$\eta_{PR} = 0,03_{n10\%} + 0,05_{n20\%} + 0,07_{n30\%} + 0,17_{n50\%} + 0,33_{n75\%} + 0,35_{n100\%} \quad (13)$$

Observa-se nesta equação que o estado do Paraná possui os maiores índices nos carregamentos de 75% e 100%, concentrando 68% dos índices nesses dois carregamentos, sendo esses os com maior participação na geração de energia do estado. Os baixos carregamentos possuem participação baixa comparados a esses dois carregamentos, sendo 10%, 20% e 30% responsáveis por apenas 15% dos índices.

Comparando a proposta de equação para o Paraná, representada pela Equação 12, com a proposta de equação para o Brasil, representada pela Equação 11, pode-se observar que a equação do Paraná segue características similares à do Brasil, possuindo baixos coeficientes nos carregamentos menores e altos coeficientes nos carregamentos maiores. A maior diferença é que na Equação do Brasil, o carregamento de 100% possui um coeficiente maior, de 0,48, e na equação do Paraná esse mesmo coeficiente é de 0,35. Visto isso percebe-se que essa diferença é distribuída no Paraná nos carregamentos menores, possuindo um impacto menor para carregamento de 100%.

A Tabela 3 apresenta um comparativo dos coeficientes por carregamento entre a Equação Europeia, a Equação Californiana, a Proposta de Equação Brasileira e a Proposta de Equação do Paraná. Observa-se na Tabela 3 que a Proposta de Equação do Paraná possui coeficiente mais próximos aos da Proposta de Equação Brasileira do que da europeia e californiana. As equações Europeia e Californiana possuem coeficientes baixos para o carregamento de 100%, e coeficientes mais altos em 50% e 75% de carregamento, consecutivamente. As propostas de equações Brasileira e do Paraná apresentam como coeficiente mais alto 100% de carregamento.

Tabela 3: Comparativo dos coeficientes por carregamento

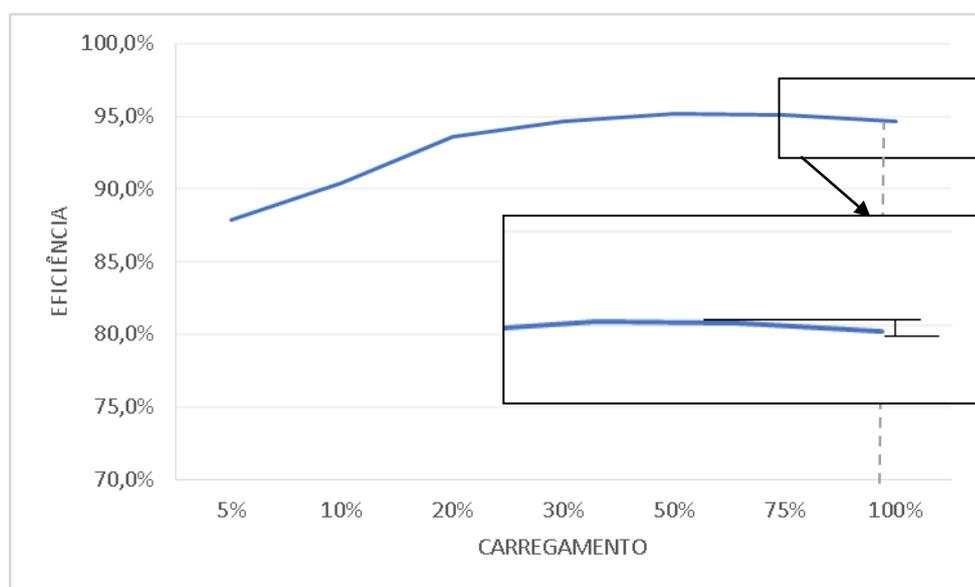
	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
Eficiência Europeia	0,03	0,06	0,13	0,10	0,48	-	0,20
Eficiência Californiana	-	0,04	0,05	0,12	0,21	0,53	0,05
Proposta Eficiência Brasileira	-	0,02	0,02	0,04	0,12	0,32	0,48
Proposta Eficiência Paraná	-	0,03	0,05	0,07	0,17	0,33	0,35

Fonte: Elaboração própria

Conforme apresentado na Figura 15, a curva de eficiência de um inversor fotovoltaico conectado à rede elétrica possui uma inclinação no início muito maior, essa inclinação maior vai até 20% do carregamento, apresentando que o inversor possui eficiência menor abaixo de 20% de carregamento. Acima de 20% de carregamento a eficiência dos inversores possui uma estabilidade maior. Pode-se dizer que essa característica da curva de eficiência dos inversores faz com que eles possuam uma menor eficácia em locais em que os coeficientes abaixo de 20% de carregamento são mais altos, no caso os inversores apresentariam menor eficiência de geração na Europa do que nos outros locais comparados.

Outra característica comum na curva de eficiência dos inversores é que eles apresentem uma pequena queda quando o carregamento está próximo de 100%, essa queda pode chegar a ser 1% de diferença de eficiência, dependendo do inversor analisado. Essa característica, demonstrada pela Figura 26, a qual detalha a Figura 15 no carregamento de 100%, demonstra que altos coeficientes no carregamento de 100% podem gerar uma perda de geração. Comparando novamente as propostas de equações Brasileira e do Paraná, percebe-se que o alto coeficiente na proposta brasileira pode trazer uma geração menor, quando comparado à equação paranaense.

Figura 26: Curva de eficiência de um inversor fotovoltaico de mercado – detalhamento carregamento 100%



Fonte: Adaptado de Bassan (2017)

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

O Estado do Paraná, mesmo não estando entre os maiores estados do Brasil em extensão, ocupa uma área de 199.298 km<sup>2</sup> (IGBE, 2020). O estado possui 25 estações solarimétricas do INMET para coleta de dados de irradiância, e entre essas estações encontra-se uma variação significativa de resultados, destacando que, considerar para todo o estado uma equação apenas de eficiência de inversores, assumirá um possível desvio entre uma cidade e outra. Isso é demonstrado nos Apêndices I e IV, os quais apresentam os gráficos de cada estação e destacam a diferença de irradiância entre um ponto e outro dentro do estado.

Diferente da Equação Europeia, a qual foram utilizados dados de irradiância de uma cidade específica para obter a equação de todo um continente, a Proposta de equação do Paraná utilizou em seu estudo 25 pontos do estado do Paraná, fazendo uma média entre todos os pontos de coleta analisados e reduzindo o desvio possível em seu resultado. Essa forma de obtenção da equação faz com que o desvio seja menor quando considerado a variação de localização da análise. Caso fosse considerado a equação de Curitiba como sendo a do Paraná, por exemplo, quando fosse utilizar essa equação na cidade de Diamantina do Norte o desvio seria muito maior do que utilizando a média geral do estado. A opção mais exata seria utilizar uma equação para cada estação analisada, mas como isso deixa de ser prático e dificulta a operação do usuário, é feito a média de todas as estações.

Conforme apresentado nos resultados, a Proposta de Equação do Paraná ficou com características similares à Proposta de Equação Brasileira, e diferentes das equações Europeia e Californiana, o que demonstra que quando utilizadas as duas propostas externas, o rendimento do inversor será divergente, apresentando perdas que na realidade não existirão.

As maiores diferenças nos coeficientes foram apresentados entre a mesorregião Metropolitana de Curitiba e o Norte Central. Essa diferença chega a 75% no coeficiente de 20% de carregamento, e 43% no coeficiente de 100% de carregamento.

Considerando que os carregamentos mais altos possuem maior impacto na geração de energia, conforme demonstrados nos gráficos de distribuição de

frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas, pode-se aceitar que a diferença no carregamento de 20% não impacta tanto quanto a diferença no carregamento de 100%. Considerando também que a proposta do estudo é apresentar uma equação média para o estado do Paraná.

Outra característica comum na curva de eficiência dos inversores é que eles apresentem uma pequena queda quando o carregamento está próximo de 100%, essa queda pode chegar a ser 1% de diferença de eficiência, dependendo do inversor analisado no carregamento de 100%, demonstrou que altos coeficientes no carregamento de 100% podem gerar uma perda de geração. Comparando novamente as propostas de equações Brasileira e do Paraná, percebeu-se que o alto coeficiente na proposta brasileira pode trazer uma geração menor, quando comparado à equação paranaense.

Por fim, entende-se que os inversores de mercado teriam uma melhor geração no estado do Paraná, utilizando a Proposta de Equação do Paraná, do que quando analisados através das equações Europeia ou Californiana. Estudos compatíveis em outros estados do Brasil poderiam demonstrar uma maior assertividade na análise de eficiência de inversores, e poderia ser sugestões para trabalhos futuros, junto a análise da eficácia de uma equação para o Brasil todo, devido sua alta extensão.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10899. **Energia Solar Fotovoltaica Terminologia**. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**, 3. ed, São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

ALMEIDA, M.; ZILLES, R.; PINTO, A. **Eficiência Brasileira de Inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente Vol 15, Argentina, 2011.

ANEEL, **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Geração Distribuída por fonte: Unidades consumidoras com geração distribuída. 2020. Disponível em [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp), Acessado em setembro de 2020.

BASSAN, T. A. M. S. **Análise das equações de eficiência de inversores fotovoltaicos através de comparativos teóricos e práticos**. Trabalho de conclusão de curso de Especialização. UTFPR, Especialização em Energias Renováveis, Paraná, 2017.

BLETTERIE, Benoit; BRUNDLINGER, Roland; HABERLIN, Heinrich; BAUMGARTNER, Franz; SCHMIDT, Heribert; BURGER, Bruno; KLEIN, Gerald; ABELLA, Miguel Alonso. **Redefinition of the European efficiency – finding the compromise between simplicity and accuracy**. EU PVSEC, 2735-2742. Alemanha, 2008.

DGS – **Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie**. Planning & Installing Photovoltaic Systems – A guide for installers, architects and engineers. Earth-scan, UK, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; **Balço Energético Nacional 2018: Ano base 2017**”. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; **Balço Energético Nacional 2019: Ano base 2018**”. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; **Balço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

IBGE; **Panorama geral do estado do Paraná, 2020**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/panorama>>, Acessado em setembro de 2020

INMETRO; **Sistema Internacional de unidades de medidas – Atualização da primeira edição brasileira**; 1 ed, rio de Janeiro, 2014.

INMET. **Glossário do Instituto Nacional de Meteorologia 2020**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=glossario#U>> Acessado em: março 2020.

IPRI - INSTITUTO DE PESQUISA DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS; **As 15 maiores economias do mundo 2019**. disponível em: <<http://www.funag.gov.br/ipri/index.php/o-ipri/47-estatisticas/94-as-15-maiores-economias-do-mundo-em-pib-e-pib-ppp>> Acessado em: março de 2019.

MERTENS, Konrad; **Photovoltaics: fundamentals, technology and practice**. John Wil ey & Sons Ltd, United Kingdom, 2014.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA; **Energia no Mundo 2015/2016**: Matrizes energéticas e matrizes elétricas. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: dezembro de 2017a.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA; EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2026**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2017b.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA; EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2030**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA; EPE. **Resenha energética brasileira**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020b.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio e funcionamento da célula fotovoltaica**. Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia). UFJ, Lavras, MG. 2004.

NETO, Aimé F. de Carvalho P. **Qualificação e etiquetagem de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). USP 2012.

NREL. "Glossary of Solar Radiation Resource Terms: National Renewable Energy Laboratory", 2017. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solar-glossary.html>> Acesso em março 2021.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, F. J. Lopes de.; RUTHER, Ricardo; ABREU, Samuel L. de.; TIEPOLO, Gerson Maximo; PEREIRA, Sílvia V.; SOUZA, Jefferson G.; **Atlas Brasileiro de energia solar**, 2.ed. – São José dos Campos: INPE. 2017.

PRIEB, Cesar Wilhelm Massen; **Determinação da eficiência de seguimento de máxima potência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFRS 2011.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESB. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Tese (Doutorado em Engenharia). UFRS, 2010.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**. Editor UFSC / LABSOLAR. Florianópolis, SC, 2004.

RUTHER, R., NASCIMENTO, L. R., CAMPOS, R. A. Extreme overirradiance events in Brazil: consequences on PV power plant output performance, submitted to Solar Energy, 2017.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JR, J.; PEREIRA, S. V.; GONCALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S., ALVES, A. R. **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. Curitiba: UTFPR, 2017.

TIEPOLO, G.; URBANETZ, J.; CANGIOLIERI, O. Inserção da Energia Fotovoltaica na Matriz Elétrica do Estado do Paraná: Análise do Potencial Produtivo, **Revista SODEBRAS**, Volume 8, nº 87, Edição Março, ISSN 1809-3957, 2013.

TIEPOLO, Gerson Máximo. **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná**, Tese de doutorado – PUCPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Curitiba, 2015.

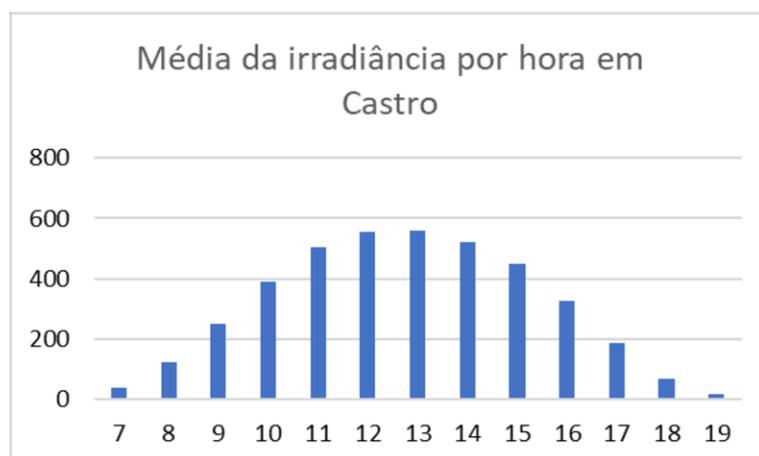
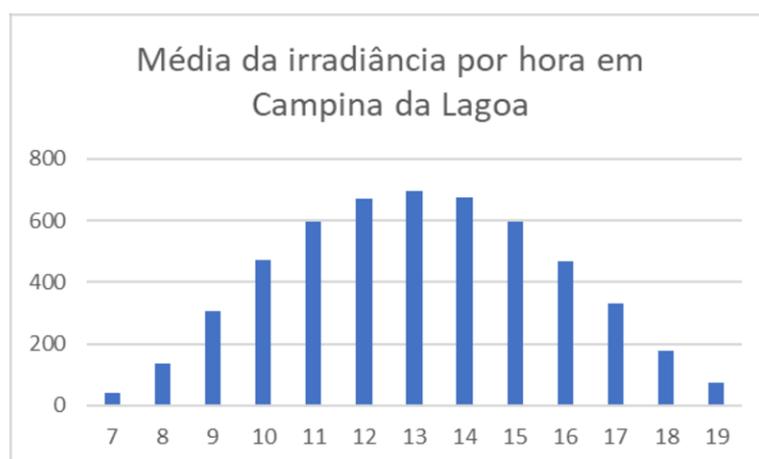
URBANETZ JR, Jair. **Sistemas Fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: Sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. Tese de Doutorado. UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, SC, 2010.

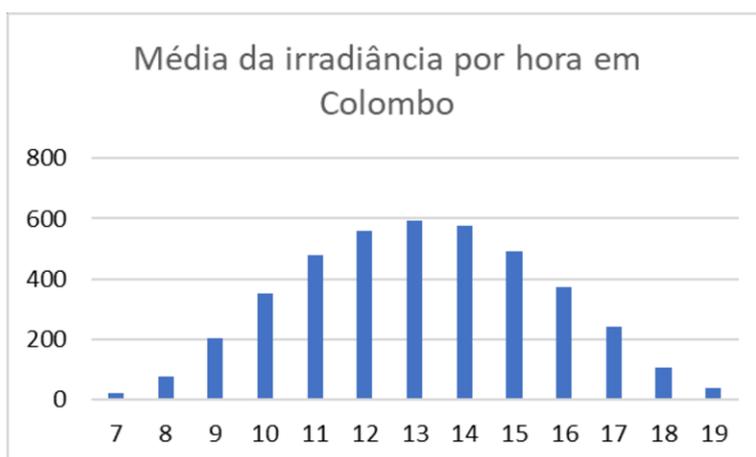
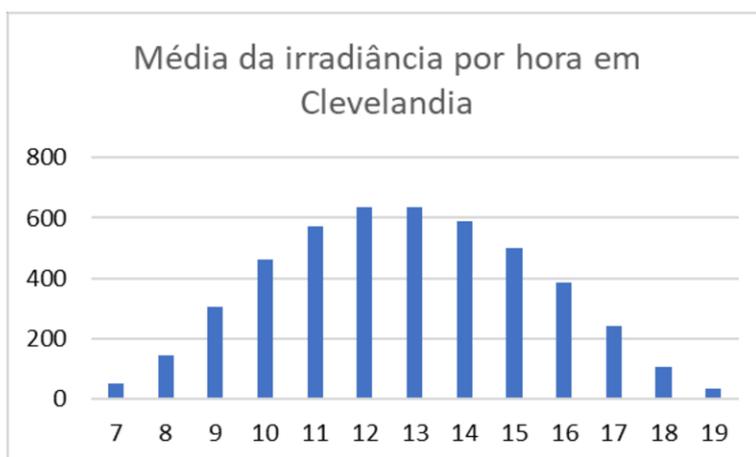
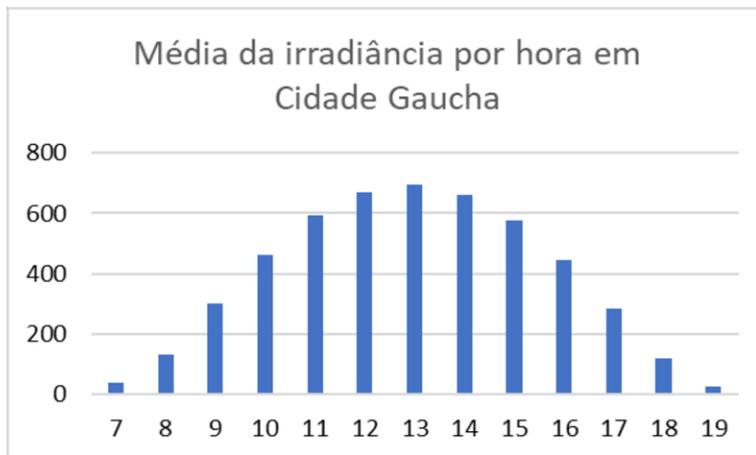
WISZFLOG, Walter; **Michaelis, Dicionário da Língua Portuguesa**, Editora Melhoramentos Ltda, 2015.

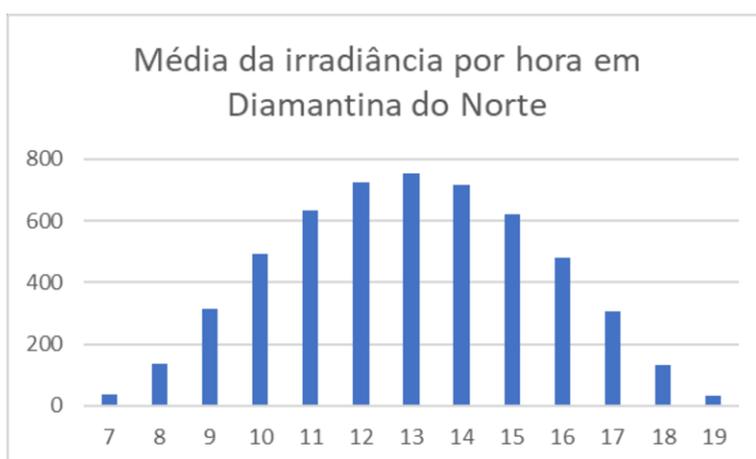
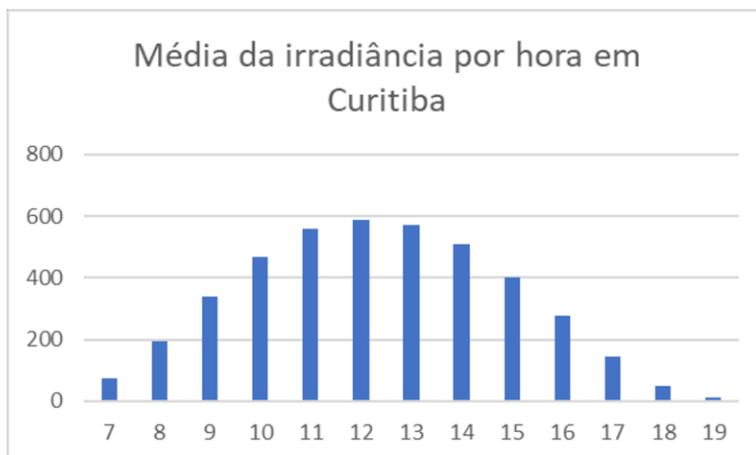
ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica**, Oficina de textos, São Paulo, 2012.

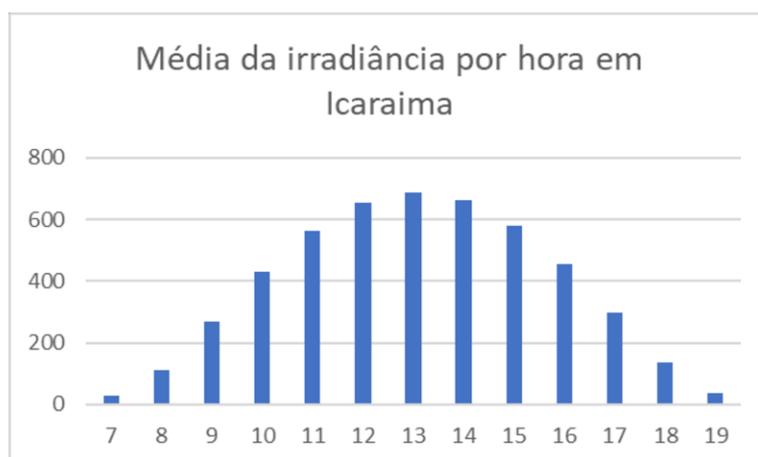
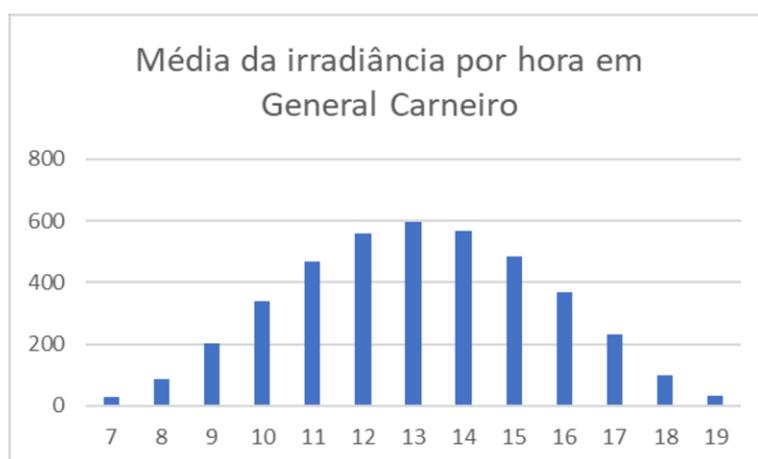
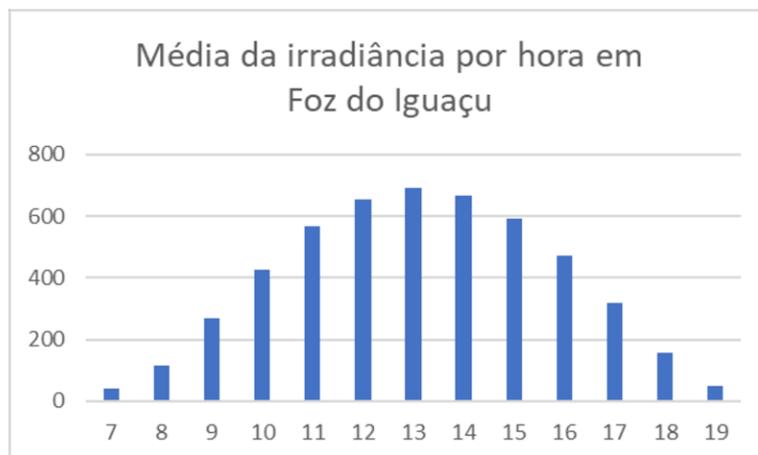
## APÊNDICE I - MÉDIAS DE IRRADIÂNCIA POR HORA DURANTE UM DIA DE CADA ESTAÇÃO

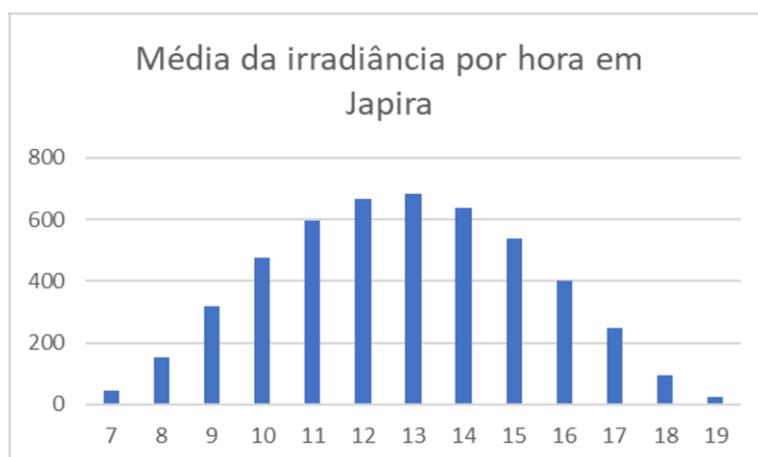
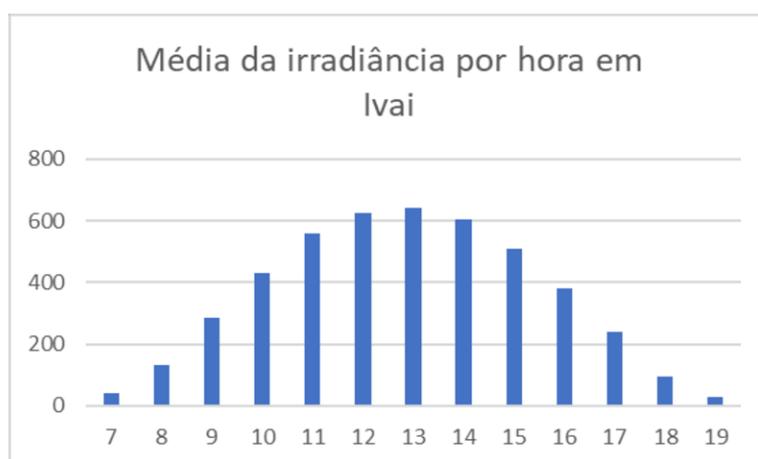
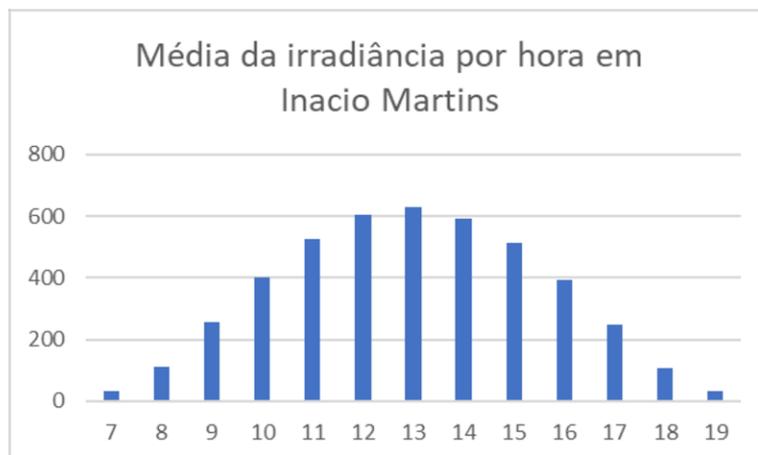
As estações estudadas ofereceram dados que possibilitaram a obtenção dos dados de irradiância média por hora. O dado de irradiância média por hora pode ser utilizado para demonstrar qual seria a média da irradiância média por hora de cada estação, considerando os 11 anos do estudo. Isso faz com que possa ser representado o dia médio de cada estação no período de análise. Esse dia médio de cada estação é demonstrado pelos gráficos a seguir, em ordem alfabética pelo nome da estação.

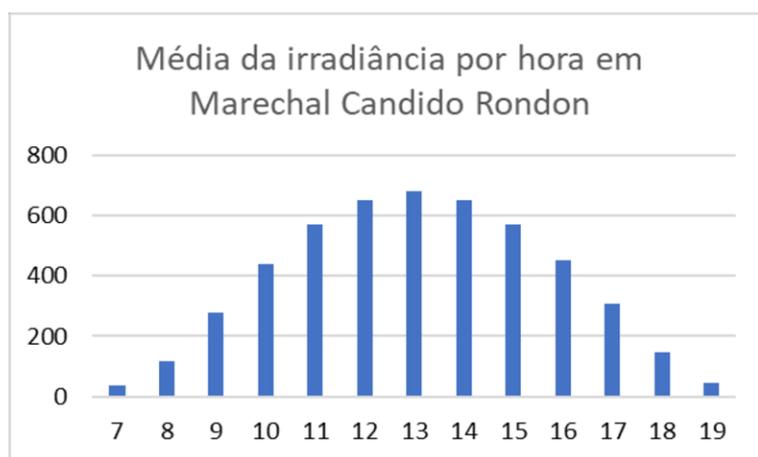
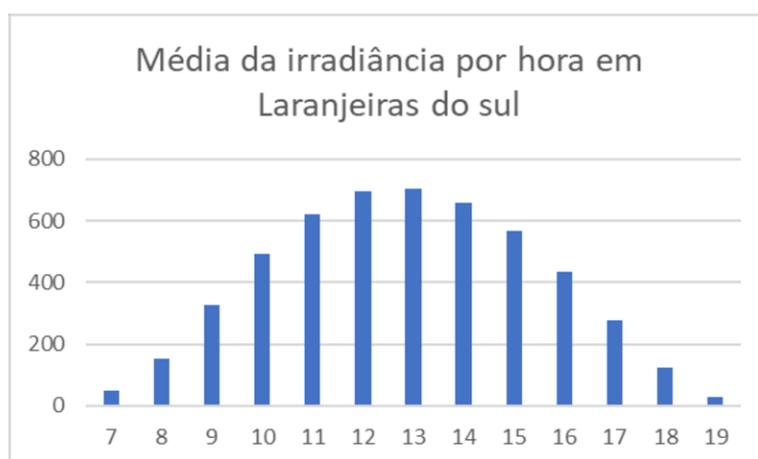
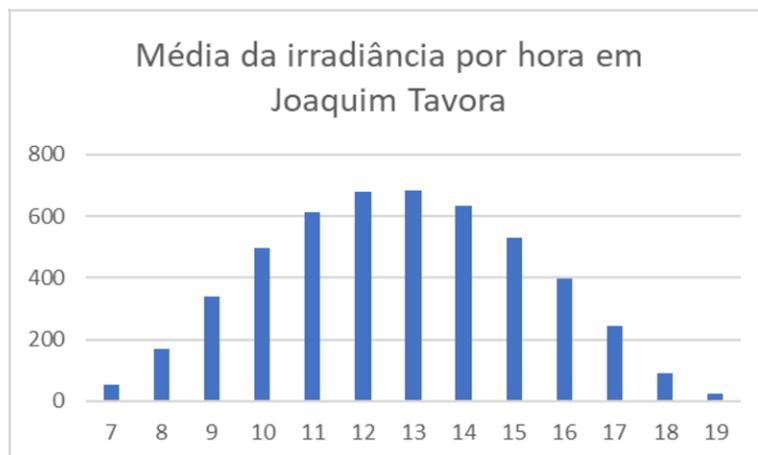


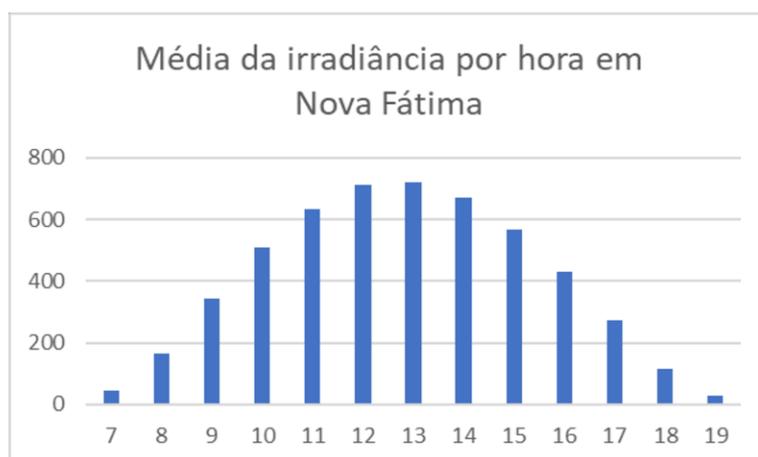
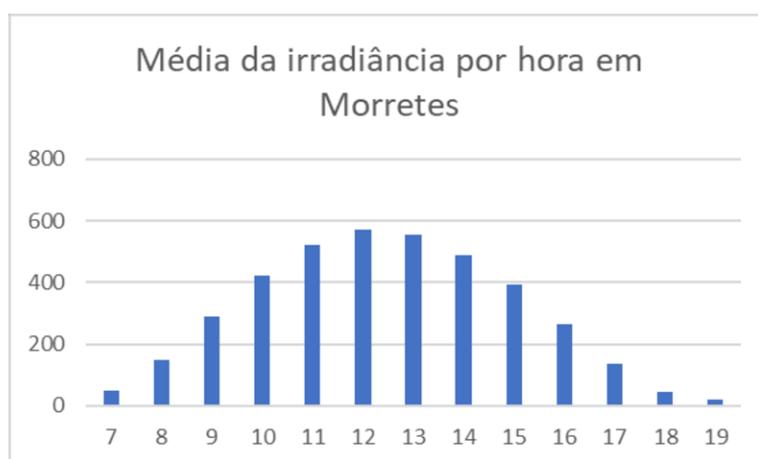
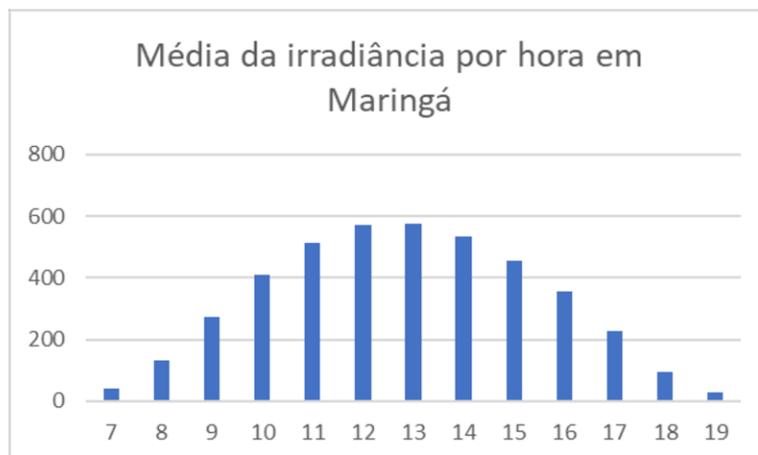


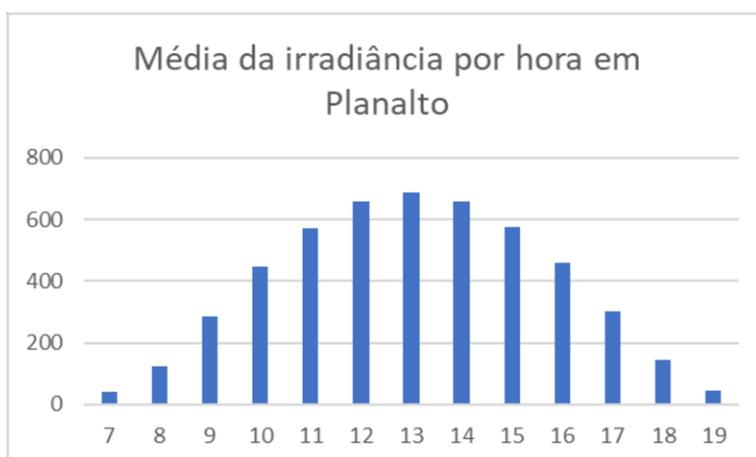
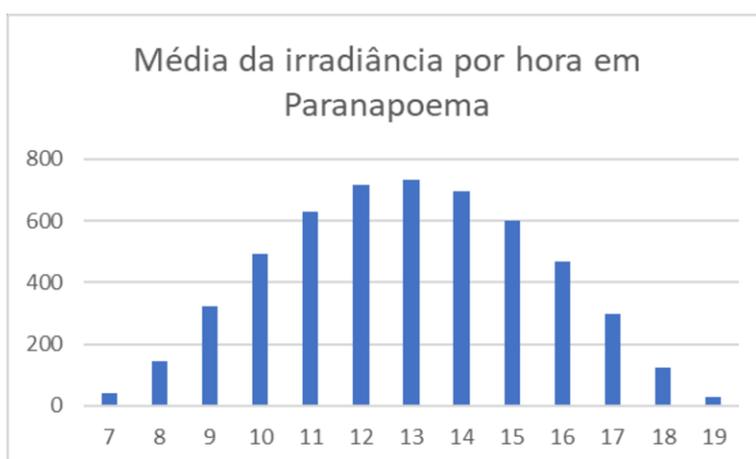
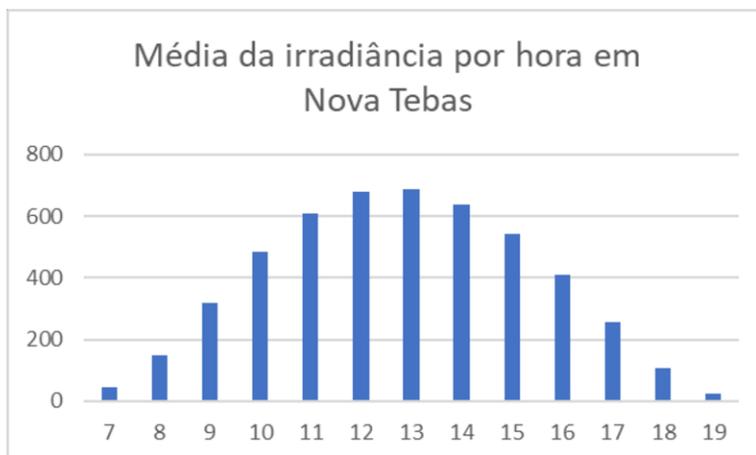


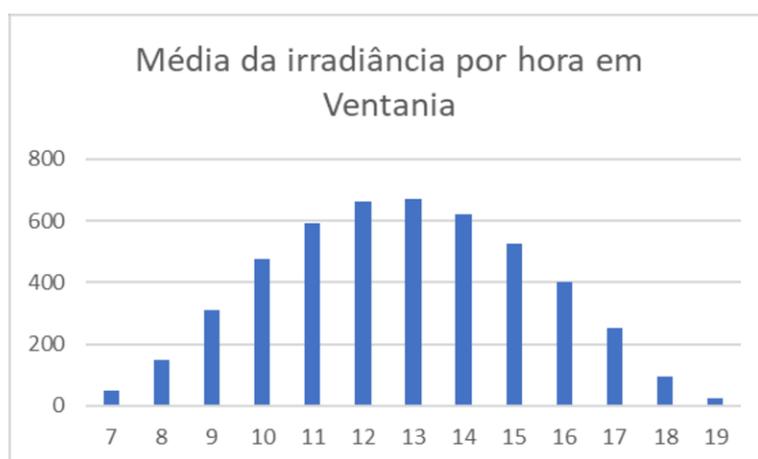
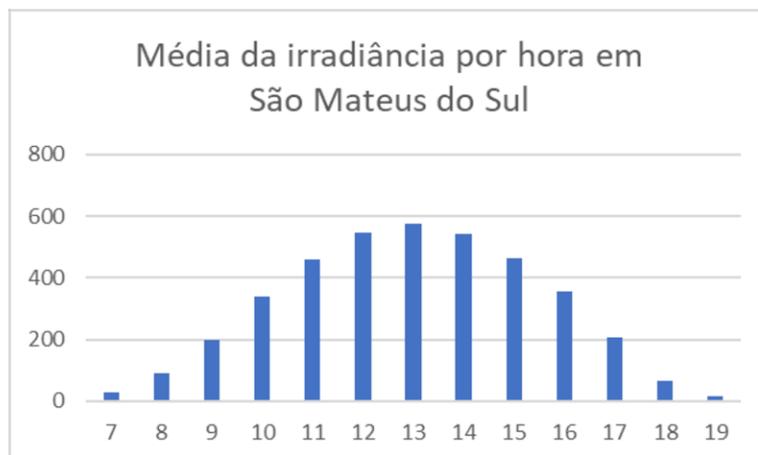








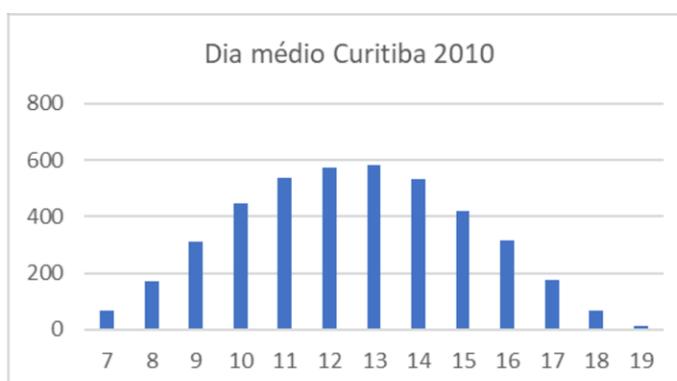
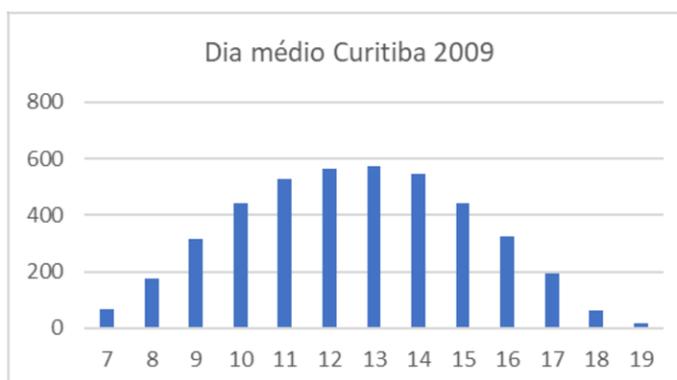


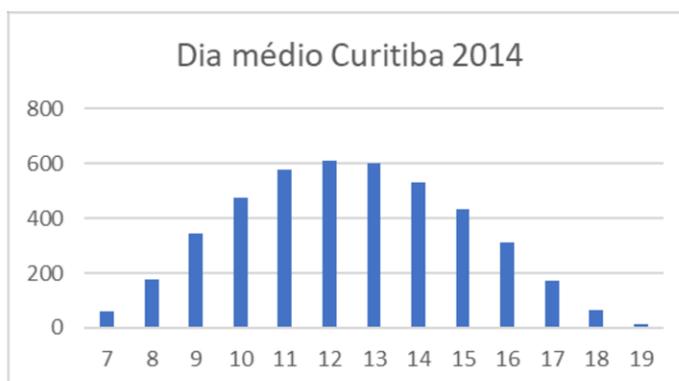


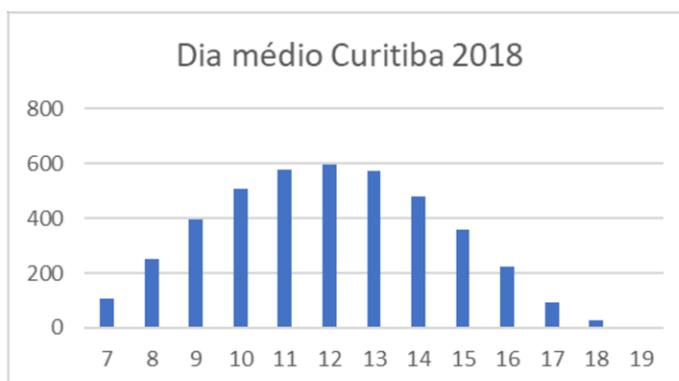
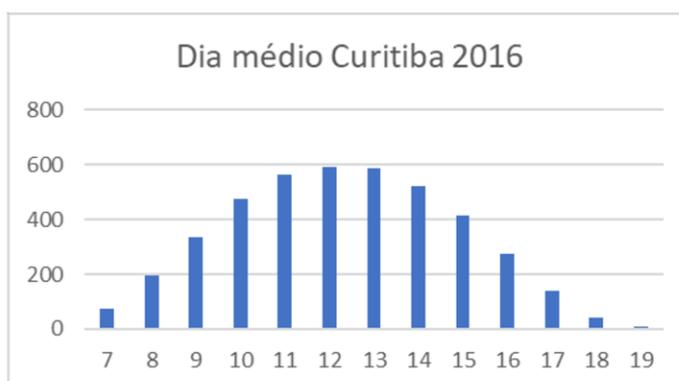
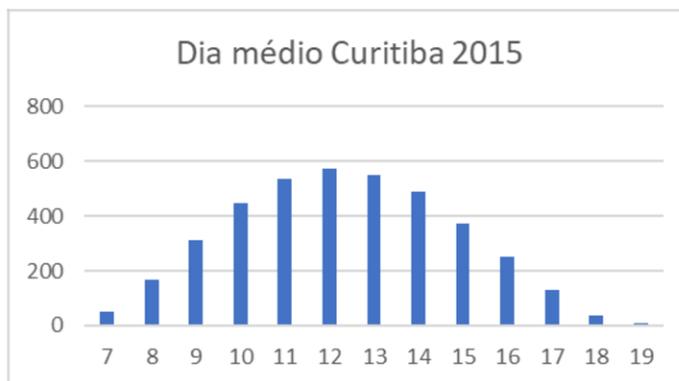
## APÊNDICE II - ANÁLISE DE 11 ANOS DE DADOS DA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA DE CURITIBA, ANO A ANO.

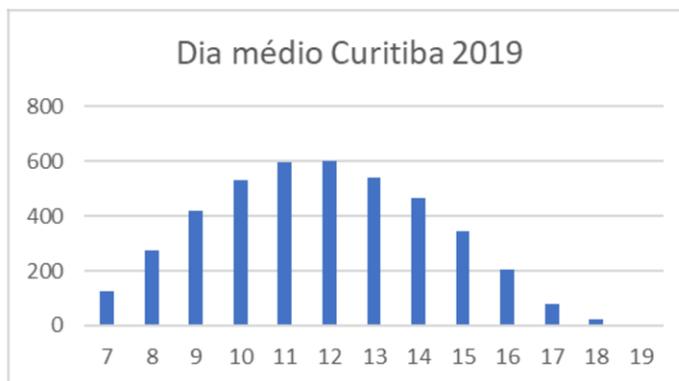
A estação solarimétrica localizada na capital do Paraná, Curitiba, teve uma análise detalhada, para comparar ano a ano da estação e demonstrar as características da irradiância no decorrer dos anos, demonstrando anos atípicos e anos típicos, comparados com a média dos 11 anos da própria estação.

Os primeiros dados obtidos foram da irradiância média por hora, por ano, podendo dessa forma demonstrar um dia médio por ano e podendo compará-los entre os anos do estudo. Dos 11 anos analisados, 4 anos tiveram médias mais altas que  $600 \text{ W/m}^2$ , sendo 2012 o ano com dia médio com melhores índices de irradiância, atingindo  $617 \text{ W/m}^2$ , esse pode ser considerado o ano com melhor geração. O ano anterior, 2011, foi o ano que apresentou as menores irradiância, tendo média máxima de  $560 \text{ W/m}^2$ . Os dois anos citados foram os extremos comparando os dias médios. A seguir os gráficos dos dias médios de cada ano.



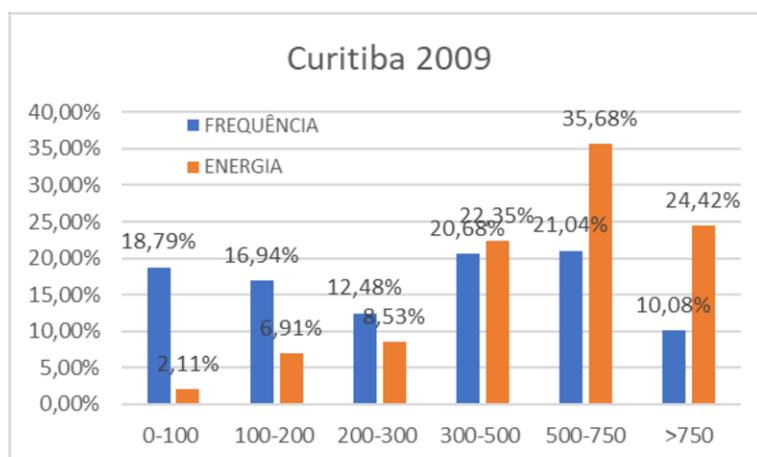


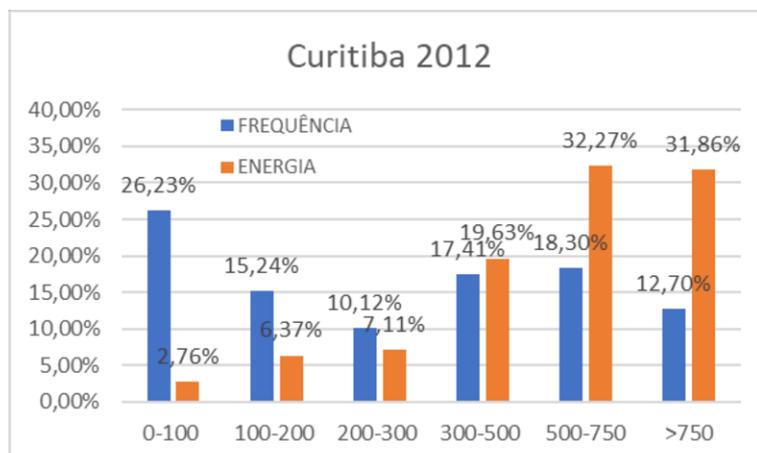
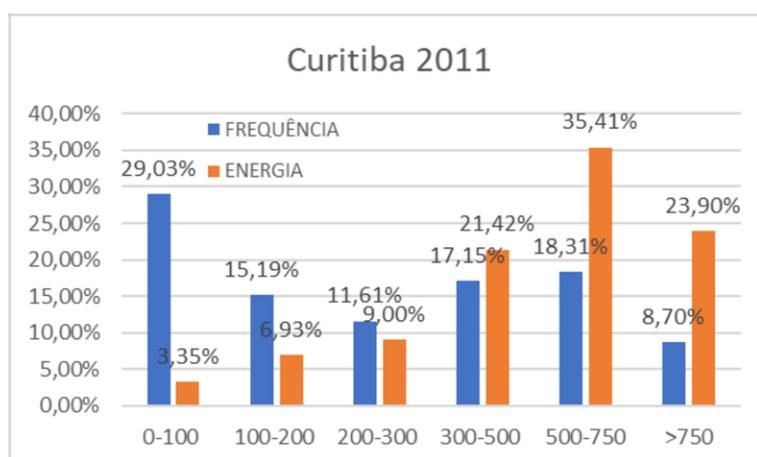
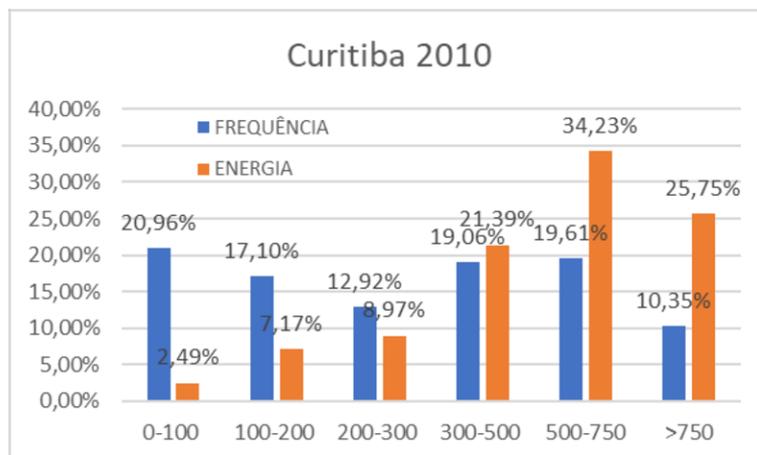


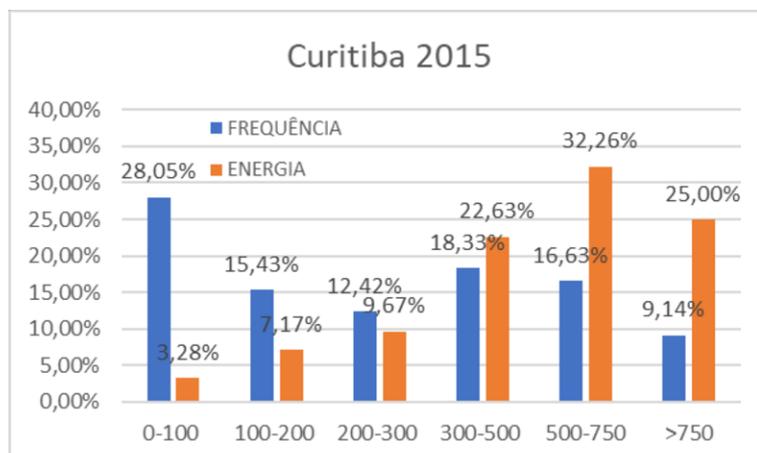
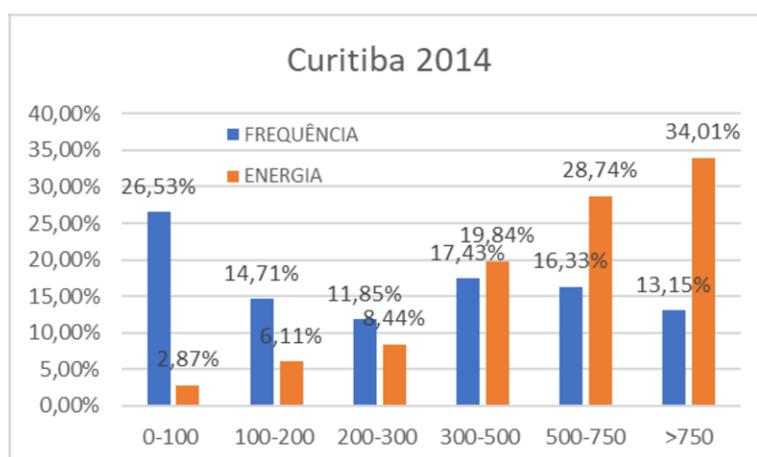
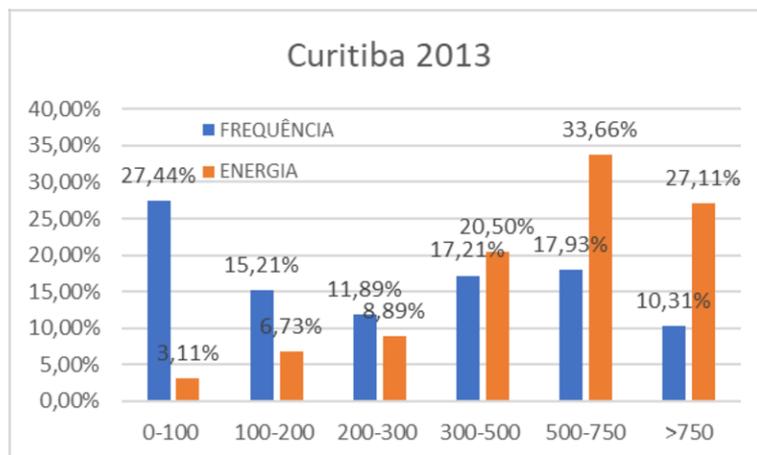


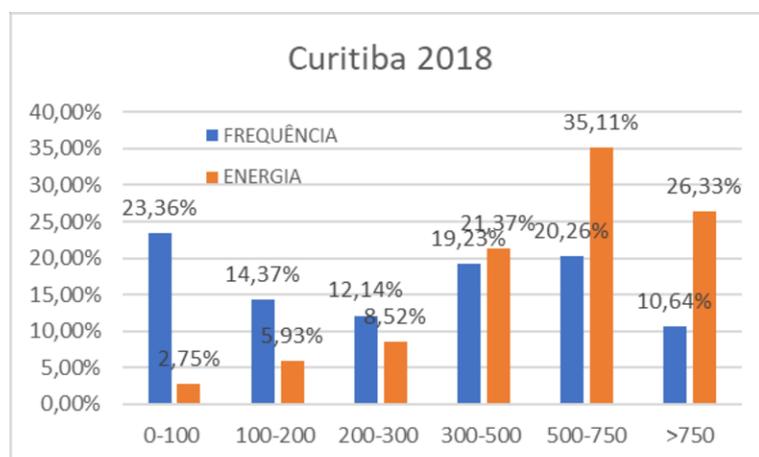
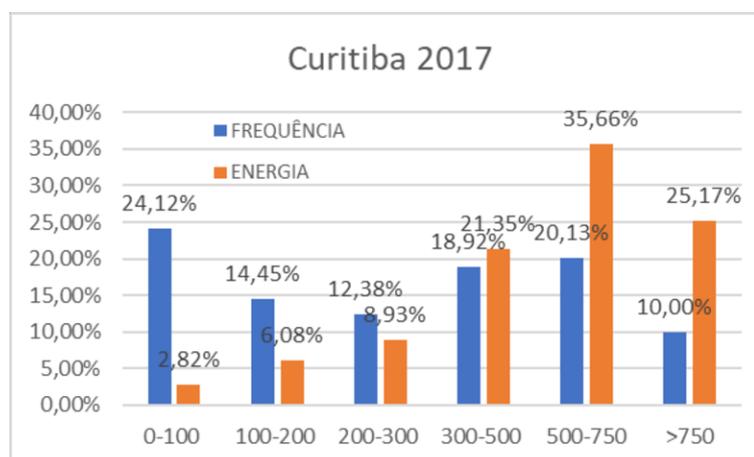
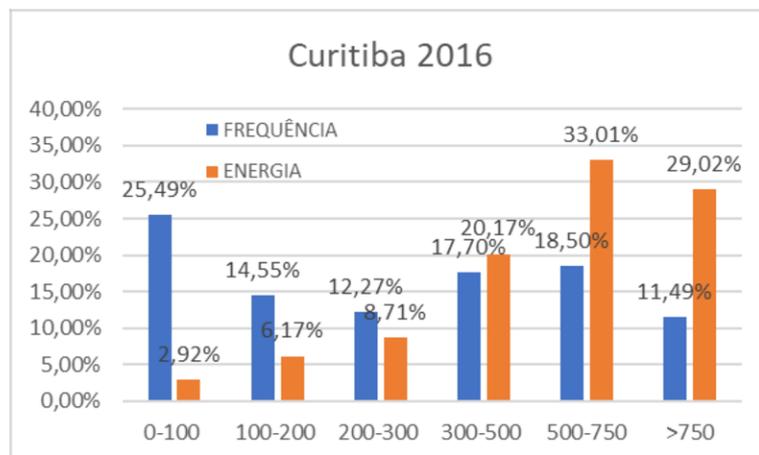
Após análise dos dias médios por ano, levantou-se a frequência e energia gerada por faixas, conforme apresentada no estudo. Analisando ano a ano a geração de energia por faixas chegou a ter uma variação de 9%, comparando a energia gerada acima de 750 W/m<sup>2</sup>, dos anos de 2011 e 2014, os quais tiveram maior variação nessa faixa. Esse foi o maior desvio obtidos na energia gerada, e comparado á média de Curitiba o desvio pode chegar a 6% nessa faixa.

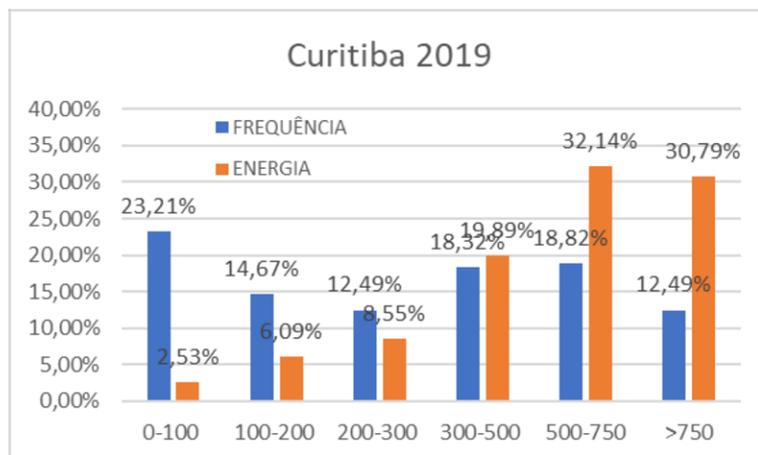
A seguir, os gráficos distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas na estação de Curitiba.





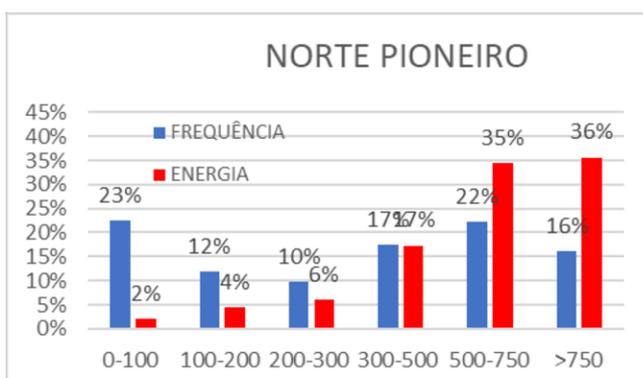
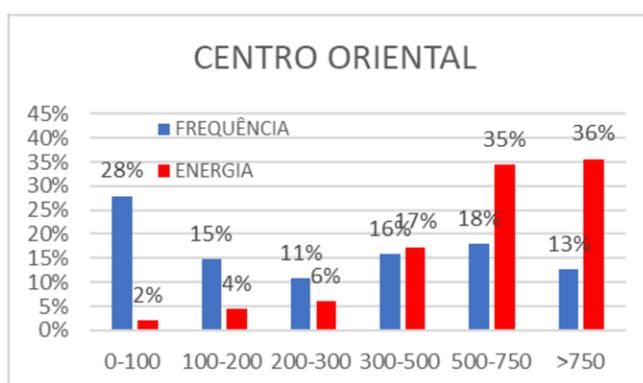
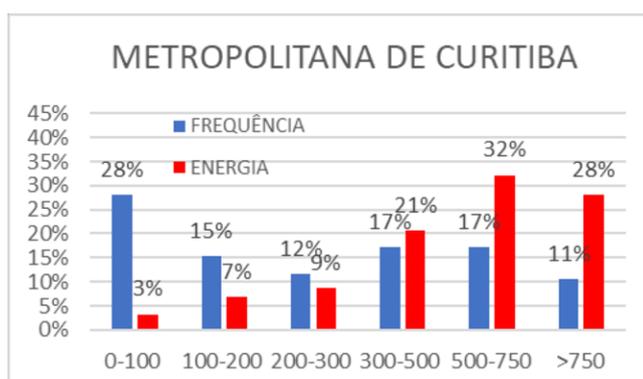
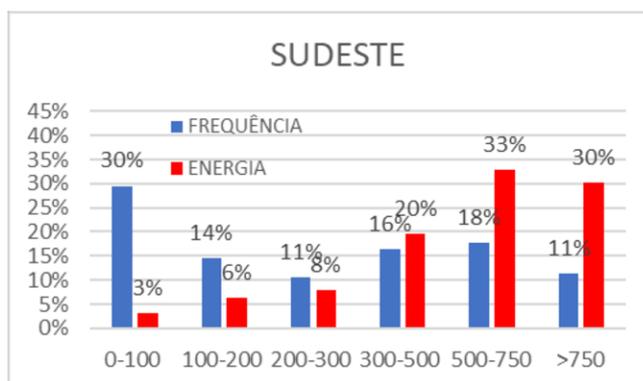


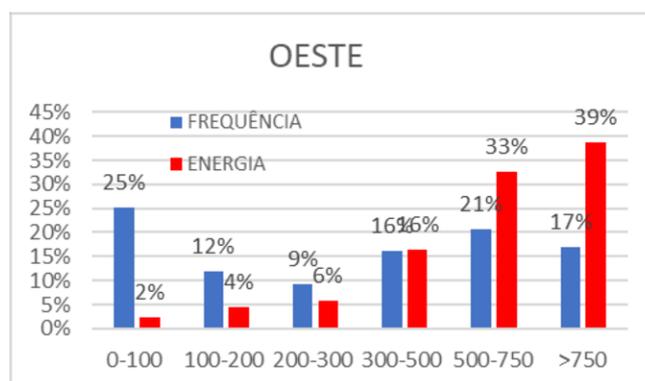
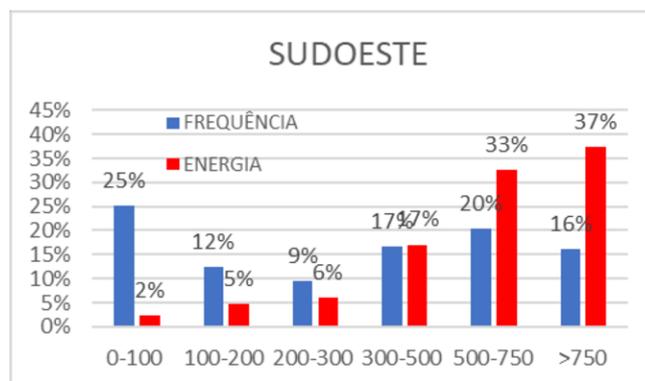
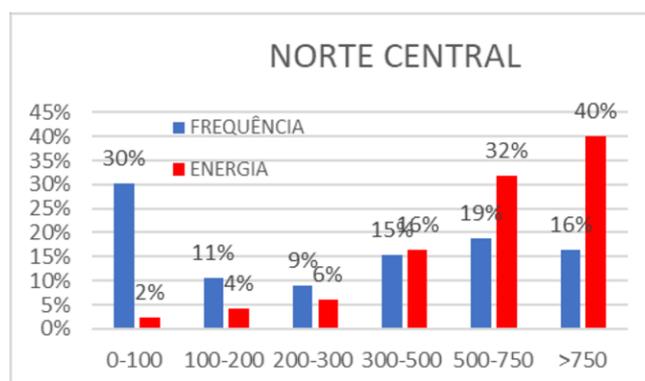
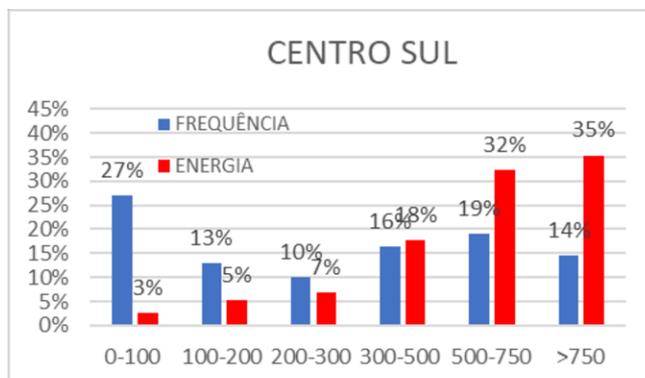


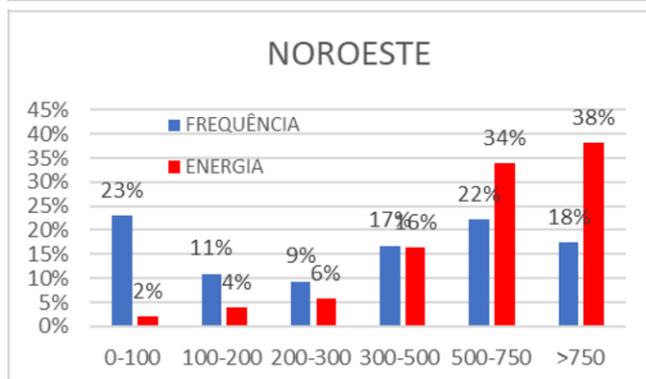
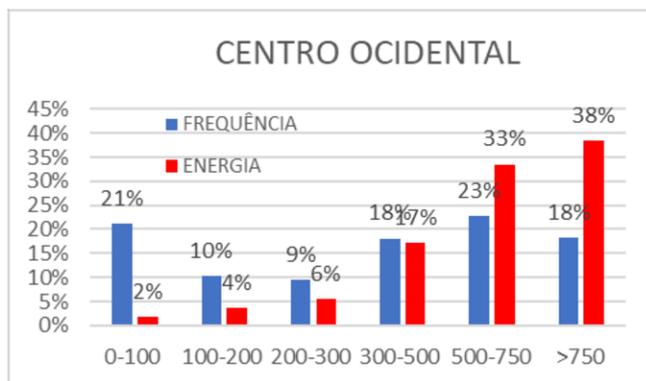


### APÊNDICE III - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA IRRADIÂNCIA E PARTICIPAÇÃO NA IRRADIÂNCIA ANUAL PARA A MÉDIA POR FAIXAS DE CADA ESTAÇÃO

Gráficos correspondentes à distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas dividida por mesorregião.







## APÊNDICE IV - GRÁFICOS DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA IRRADIÂNCIA E PARTICIPAÇÃO NA IRRADIÂNCIA ANUAL PARA A MÉDIA POR FAIXAS POR ESTAÇÃO

Gráficos correspondentes à distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiância anual para a média por faixas dividida por estação.

