



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS ARARANGUÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLÓGICAS E SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE  
CURSO ENGENHARIA DE ENERGIA

EDUARDO DA SILVA ALMERÃO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO  
CONECTADO À REDE E ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA  
RADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE ARARANGUÁ/SC**

Araranguá, SC

2023

EDUARDO DA SILVA ALMERÃO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO  
CONECTADO À REDE E ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA  
RADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE ARARANGUÁ/SC**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia,

Orientador: Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli.

Araranguá, SC

2023

Almerão, Eduardo da Silva

ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO  
CONECTADO À REDE E ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO  
SOLAR NA CIDADE DE ARARANGUÁ/SC / Eduardo da Silva Almerão ;  
orientador, Giuliano Arns Rampinelli, 2023.

59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade  
Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em  
Engenharia de Energia, Araranguá, 2023.

Inclui referências.

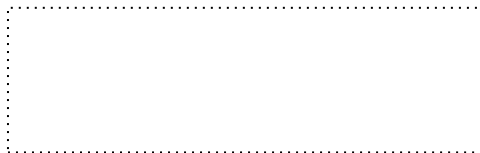
1. Engenharia de Energia. 2. Engenharia de Energia. 3.  
Sistema Fotovoltaico. 4. Espectro da Radiação. 5. Geração de  
Energia. I. Rampinelli, Giuliano Arns. II. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III.  
Título.

EDUARDO DA SILVA ALMERÃO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO  
CONECTADO À REDE E ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA  
RADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE ARARANGUÁ/SC**

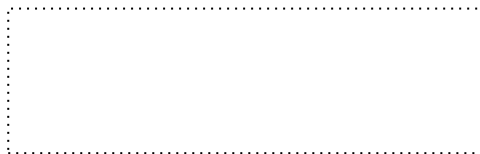
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Energia.

Araranguá 29 de junho de 2023.



Carla Abreu D'Aquino  
Coordenação do Curso

**Banca examinadora**



Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli  
Orientador



Prof. Dr. Leonardo Elizeire Bremermann  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC



Prof. Me. André Possamai Rosso  
Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais Paulo e Zulma e minha avó Danila que estiveram ao meu lado durante esse ciclo e me deram suporte para a conclusão de mais uma etapa. Agradeço também ao professor e orientador Giuliano Arns Rampinelli por me acompanhar e fazer possível o desenvolvimento desse trabalho.

Gostaria de expressar minha gratidão também à Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC e a todos os professores do curso de Engenharia de Energia, assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por me proporcionarem a oportunidade de participar do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e contribuírem para o meu desenvolvimento científico.

Além disso, agradeço aos projetos que fizeram parte do meu desenvolvimento, em especial a ENEjr e o CAENE, aos amigos que fiz ao longo dessa caminhada.

## RESUMO

A energia renovável é definida como aquela obtida através de fontes de origem natural e que são naturalmente abastecidas, no Brasil a energia solar destaca-se devido à abundância desse recurso em todo o território nacional. Atualmente, o Brasil possui legislação para a geração distribuída e centralizada dessa tecnologia, devido à difusão da instalação de sistemas fotovoltaicos para a geração de energia em todo o país. Destaca-se então a importância de compreender e analisar a qualidade do recurso solar utilizado, previamente ao avanço de projetos para a geração de energia elétrica que utilizem a tecnologia fotovoltaica. Este trabalho apresenta a análise dos dados de uma planta piloto bioclimática localizada no município de Araranguá/SC, nas dependências da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que conta com um sistema fotovoltaico de 0,99 kWp de potência instalada. Utilizando os dados coletados da plataforma do inversor durante o período de 2021 e 2022, foi possível compreender e analisar, por meio de indicadores de desempenho, os meses mais e menos influentes em relação à geração de energia elétrica. Dentre esses meses, destaca-se fevereiro, com uma média de geração de 154,05 kWh, e junho, com uma média de geração de 75,85 kWh. Além disso, este trabalho incluiu a análise do espectro da radiação solar para a cidade de Araranguá/SC. Os dados foram gerados por meio do software SMARTS 2 e posteriormente comparados com o espectro da norma ASTM G-173. Embora o comportamento do espectro para a cidade de Araranguá/SC apresente certa discrepância nos meses de inverno em comparação com a ASTM-G173, a regressão linear indicou um  $R^2$  que varia de 0,98 a 0,99 para os doze meses do ano, indicando assim a boa qualidade dos dados gerados. Com base nos resultados obtidos, discutem-se as implicações teóricas e práticas, bem como os desafios encontrados durante a pesquisa. O estudo busca fornecer *insights* valiosos para beneficiar organizações, profissionais e pesquisadores, visando o aprimoramento das práticas de análise de dados e o desenvolvimento contínuo nessa área.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica; índice de Desempenho; Espectro da Radiação.

## ABSTRACT

Renewable energy is defined as that obtained from naturally replenishing sources of natural origin. In Brazil, solar energy stands out due to the abundance of this resource throughout the national territory. Currently, Brazil has legislation for both distributed and centralized generation of this technology, thanks to the widespread installation of photovoltaic systems for energy generation across the country. It is important to understand and analyze the quality of the solar resource prior to advancing projects for electricity generation using photovoltaic technology. This study presents an analysis of data from a bioclimatic pilot plant located in Araranguá/SC, within the premises of the Federal University of Santa Catarina (UFSC), which features a 0,99 kWp installed photovoltaic system. Using data collected from the inverter platform during the period of 2021 and 2022, it was possible to understand and analyze, through performance indicators, the months with the greatest and least influence on electricity generation. Among these months, February stood out with an average generation of 154,05 kWh, and June with an average generation of 75,85 kWh. Additionally, this study included an analysis of the solar radiation spectrum for the city of Araranguá/SC. The data was generated using the SMARTS 2 software and subsequently compared with the spectrum of the ASTM G-173 standard. Although the spectrum behavior for the city of Araranguá/SC shows some discrepancy during the winter months compared to ASTM-G173, the linear regression indicated an  $R^2$  ranging from 0,98 to 0,99 for all twelve months of the year, indicating the good quality of the generated data. Based on the obtained results, theoretical and practical implications are discussed, as well as the challenges encountered during the research. The study aims to provide valuable insights to benefit organizations, professionals, and researchers, with the goal of improving data analysis practices and fostering ongoing development in this field.

**Keywords:** Solar Energy; Performance Indicators; Radiation Spectrum

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução da Taxa Fio B de Distribuição de Energia Elétrica. ....	16
Figura 2. Nova Modalidade Para os Créditos de Energia. ....	17
Figura 3. Potencial de Geração Solar no Território Brasileiro – Rendimento médio anual. ....	21
Figura 4. Espectro Eletromagnético da Radiação. ....	22
Figura 5. Radiação solar na superfície da Terra ....	23
Figura 6. Geração Centralizada vs Geração Distribuída. ....	25
Figura 7. Geração Distribuída Residencial. ....	26
Figura 8. Principais Tecnologias de Módulos Fotovoltaicos. ....	29
Figura 9. Sistema Fotovoltaico da Edificação Bioclimática. ....	32
Figura 10. Média da geração mensal de energia elétrica do período analisado .....	36
Figura 11. Produtividade média do período analisado. ....	38
Figura 12. Comparação da média da produtividade do sistema com a produtividade de referência. ....	40
Figura 13. Fator de capacidade médio e dos anos de 2021 e 2022. ....	41
Figura 14. Espectro da radiação solar para o mês de janeiro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173. ....	43
Figura 15. Espectro da radiação solar para o mês de fevereiro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173. ....	43
Figura 16. Espectro da radiação solar para o mês de março em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173. ....	44
Figura 17. Espectro da radiação solar para o mês de outubro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173. ....	44
Figura 18. Espectro da radiação solar para o mês de novembro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173. ....	45
Figura 19. Espectro da radiação solar para o mês de dezembro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173. ....	45
Figura 20. Espectro da radiação solar para o mês de abril em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173. ....	47
Figura 21. Espectro da radiação solar para o mês de maio em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173. ....	47

Figura 22. Espectro da radiação solar para o mês de junho em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.....	48
Figura 23. Espectro da radiação solar para o mês de julho em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.....	48
Figura 24. Espectro da radiação solar para o mês de agosto em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.....	49
Figura 25. Espectro da radiação solar para o mês de setembro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.....	49
Figura 26. Regressão linear para o mês de janeiro.....	51
Figura 27. Regressão linear para o mês de fevereiro. ....	51
Figura 28. Regressão linear para o mês de março. ....	51
Figura 29. Regressão linear para o mês de abril.....	52
Figura 30. Regressão linear para o mês de maio.....	52
Figura 31. Regressão linear para o mês de junho.....	52
Figura 32. Regressão linear para o mês de julho.....	52
Figura 33. Regressão linear para o mês de agosto.....	53
Figura 34. Regressão linear para o mês de setembro. ....	53
Figura 35. Regressão linear para o mês de outubro. ....	53
Figura 36. Regressão linear para o mês de novembro. ....	53
Figura 37. Regressão linear para o mês de dezembro. ....	54
Figura 38. Box plot dos dados normalizados do espectro da radiação. ....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Revisão Lei 14.300.....	15
Tabela 2. Características do Sistema Fotovoltaico da Edificação Bioclimática. ....	32
Tabela 3. Dados atmosféricos para Araranguá/SC. ....	33
Tabela 4. Geração mensal de energia elétrica – Período de análise e média geral. ....	36
Tabela 5. Produtividade do sistema no período analisado.....	38
Tabela 6. Produtividade do sistema, Produtividade de referência.....	39
Tabela 7. Fator de capacidade do período analisado. ....	41
Tabela 8: Análise descritiva dos dados normalizados de box plot. ....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR – Associação Brasileiro de Energia Solar  
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
ASTM – Sociedade Americana de Testes E Materiais  
CA – Corrente Alternada  
CC – Corrente Contínua  
CELESC – Centrais Elétricas De Santa Catarina  
CTS – Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde  
ECA –Energia Injetada Na Rede Elétrica  
EE – Eficiência Energética  
ESTD –Energia Produzida Sob Condições de Teste Padronizado  
FC – Fator de Capacidade  
GD – Geração Distribuída  
GC – Geração Centralizada  
GSTD – Irradiação De Teste Padrão  
ICMS – IMPOSTO SOBRE CIRCULAÇÃO DE MERCADORIAS E PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS  
NREL – Laboratório Nacional De Energias Renováveis  
NTEEL – Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica  
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico  
PCA – Potência Injetada Na Rede Elétrica  
PCH's – Pequenas Centrais Hidrelétricas  
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento  
PSTD –Potência Nas Condições de Teste Padrão  
REN – Resolução Normativa  
CRESESB –Centro de Referência para Energias Solar e Eólico Sérgio de S. Brito  
SIN – Sistema Interligado Nacional  
SMARTS – Modelo Simples Para A Transferência Da Radiação Solar  
SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede  
TFSEE – Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica  
UC – Unidade Consumidora  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
YF – Índice de Produtividade de Referência  
YR – Índice de Produtividade do Sistema

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>20</b>
3.1	PANORAMA DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL .....	20
3.2	ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR.....	21
3.3	RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE DA TERRA.....	22
3.4	GERAÇÃO CENTRALIZADA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....	24
3.5	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....	25
3.6	ÍNDICES DE DESEMPENHO UTILIZADOS PARA AVALIAR UM SFCR ..	27
3.7	ESTADO DA ARTE.....	28
<b>3.7.1</b>	<b>ESTADO DA ARTE: ÍNDICES DE DESEMPENHO</b> .....	<b>28</b>
<b>3.7.2</b>	<b>ESTADO DA ARTE: DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO</b> .....	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
4.1	ÍNDICES DE DESEMPENHO .....	29
<b>4.1.1</b>	<b>FATOR DE CAPACIDADE</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1.2</b>	<b>PRODUTIVIDADE DO SISTEMA</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1.3</b>	<b>PRODUTIVIDADE DE REFERÊNCIA</b> .....	<b>31</b>
4.2	SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	31
4.3	COLETA DE DADOS .....	33
<b>4.3.1</b>	<b>DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA</b> .....	<b>33</b>
<b>4.3.2</b>	<b>DADOS DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR</b> .....	<b>33</b>
<b>4.3.3</b>	<b>SOFTWARE SMARTS 2</b> .....	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>34</b>
5.1	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	35
5.2	ÍNDICE DE DESEMPENHO.....	37
<b>5.2.1</b>	<b>PRODUTIVIDADE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO</b> .....	<b>37</b>
<b>5.2.2</b>	<b>ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE YF E YR</b> .....	<b>39</b>
<b>5.2.3</b>	<b>FATOR DE CAPACIDADE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO</b> .....	<b>40</b>
5.3	ESPECTRO DA RADIAÇÃO.....	42
5.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR	50

<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>
	<b>ANEXO A – CÓDIGO EM PYTHON PARA A NORMALIZAÇÃO DOS DADOS DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO, REGRESSÃO LINEAR E GRÁFICO BOX PLOT .....</b>	<b>62</b>
	<b>ANEXO B – CÓDIGO EM PYTHON PARA O TRATAMENTO DOS DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O panorama da matriz elétrica brasileira do ano de 2023, traz como potência instalada no SIN aproximadamente 214,7 GW, segundo o infográfico da Associação Brasileira de Energia Solar – ABSOLAR. (ABSOLAR, 2023). Da capacidade total instalada, 51,2% da potência instalada provém de usinas hidrelétricas, entretanto o grande destaque em termos de crescimento deve-se a usinas fotovoltaicas, que já representam 14,3% da matriz brasileira. Ainda de acordo com (ABSOLAR, 2023), os SFCR de GD somam cerca de 21,18 GW de potência instalada com aproximadamente 1,95 milhões de sistemas instalados no território nacional e representam 99,9% dos sistemas de GD no Brasil

Ainda segundo a (ABSOLAR, 2022), no ano de 2021 o setor atraiu mais de R\$ 21,8 bilhões em investimentos, valor este que inclui sistemas de grande porte e pequenos e médios sistemas presentes em residências e propriedades do meio rural, este montante representa um crescimento de 49% em relação aos investimentos acumulados entre o período de 2012 a 2020 no país.

Em termos de potência instalada de sistemas fotovoltaicos de GD, três estados se destacam nacionalmente: São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul. Eles representam, respectivamente, 13,7%, 13,1% e 10,5% da capacidade total instalada no país. (ABSOLAR, 2023). Destes três estados, destacam-se Minas Gerais e Rio Grande do Sul por suas políticas públicas de incentivo a projetos de energias renováveis. Minas Gerais é o único estado da federação que possui isenção do Imposto Sobre Circulação de Mercadorias (ICMS) sobre usinas fotovoltaicas com até 5 MW de potência instalada. Além disso, o estado também se destaca pela isenção do ICMS para qualquer equipamento que faça parte do sistema fotovoltaico de acordo com a lei 22-549 de 30/06/2017. Já o Rio Grande do Sul além das linhas de crédito disponíveis também em outras unidades da federação, isentou a cobrança do ICMS para sistemas de minigeração e microgeração para consumo pessoal a partir do decreto nº 52.964/2018. O estado de Santa Catarina apesar de não aparecer entre os 3 estados destaques em relação a potência instalada atualmente é o 5º colocado no ranking nacional e representa uma parcela de 6,6% do total instalado em geração distribuída no Brasil. De maneira similar aos estados citados anteriormente, possui políticas de incentivo que entraram em vigor a partir do Decreto 233/1019 que isenta

a cobrança do ICMS para GD na modalidade de microgeração e minigeração para sistemas de até 1 MW de potência instalada.

Contabilizando GD e GC a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos no Brasil é de 30,6 GW (ABSOLAR, 2023), superando a potência instalada da usina hidrelétrica de Itaipu, colocando o Brasil como líder no mercado de energia solar da América Latina além do 7º lugar no ranking global (SOLAR POWER EUROPE, 2021). A expectativa é que o país alcance 54 GW de capacidade instalada até 2026, consolidando-se como um dos principais mercados de energia solar. Seguindo esta tendência, o Plano Decenal de Expansão de Energia - PNE 2031, projeta uma expansão de 50 GW em geração centralizada, representando um aumento de 28% em relação ao ano de 2021 e 34 GW em GD, representando um aumento de 162% em relação ao ano de 2021. Acompanhando essa tendência de crescimento, estima-se que a energia solar se tornará a segunda maior fonte em capacidade instalada para GC, com cerca de 45,3 GW, representando aproximadamente 16,5% da capacidade total instalada na matriz energética do país.

A lei federal 14.300/2022 sancionada em 6 de janeiro de 2022 é derivada do projeto de lei 5.829/2019 e visa estabelecer o marco legal da GD e assegurar a completa regulação em termos de geração e distribuição de energia elétrica no Brasil. Antes da sanção da lei 14.300, era atribuído a ANEEL a definição de regras relacionadas a projetos de microgeração e minigeração distribuída. As principais alterações que a Lei 14.300/2022 traz em relação a REN 482/2012 estão listadas na tabela 1 e serão brevemente discutidas.

Tabela 1. Revisão Lei 14.300

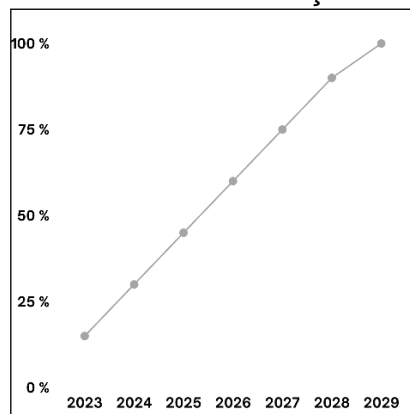
<b>Tema</b>	<b>REN 482/2012</b>	<b>Lei 14.300/2022</b>
Potência Máxima	Limite máximo até 5MW	Limite máximo até 3 MW para solar (não despachável) e 5 MW para fontes despacháveis.
Compensação de Créditos	Não há cobrança	Minigeração < 500 kW – 100% Fio B Minigeração > 500 Kw em autoconsumo remoto ou geração compartilhada – 100% Fio B, 40% Fio A, 100% P&D, EE, TFSEE.
Créditos de Energia	Quantia de kWh definida previamente.	Ordem de prioridade.
Custo de Disponibilidade	Cobrado	Não será cobrado
Prazo de cumprimento	Sem previsão	Todas as concessionárias de energia têm 180 dias a partir da publicação de Lei 14.300 para se adequar.

Fonte: elaborado pelo autor

A modalidade de minigeração, de acordo com a REN 482/2012 possuía limites de até 5 MW de potência instalada, porém a Lei 14.300/2022 que a sobrepõe, limita a minigeração a partir de sistemas fotovoltaicos para 3 MW, enquanto para fontes despacháveis, ou seja, fontes que são controladas pelo Operador Nacional do Sistema – ONS, o limite de 5 MW permanece inalterado.

A nova legislação também altera o cenário de compensação de energia elétrica injetada na rede que passa então a ser taxada visando cobrir despesas ligadas a transmissão e distribuição de energia elétrica, mas não afeta o consumo instantâneo de energia elétrica, em uma residência o fator de simultaneidade tende a ser próxima a 30%, ou seja, 30% da energia gerada está sendo consumida instantaneamente e o restante sendo consumido em horas que não tem geração (BADRA, 2023). Portanto, a partir do ano de 2023 os créditos de energia injetados serão então tarifados. A taxa sobre a compensação de energia será dada através da cobrança do Fio B pela distribuidora de energia para utilizar a rede de transmissão e distribuição e conectar a concessionária ao usuário final. O valor pago pelas linhas de transmissão da concessionária até as residências que em geral é equivalente a 30% da energia injetada na rede. Já para os consumidores de minigeração distribuída acima de 500 kW em autoconsumo remoto ou com geração compartilhada, serão taxados de 100% do Fio B, 40% do Fio A, além de 100% de encargos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), Eficiência Energética (EE) e Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica (TFSEE). É importante ressaltar que estas cobranças serão implementadas de forma escalonada em um período de 6 anos. A figura 1 ilustra a evolução da cobrança em cima dos encargos e componentes tarifários.

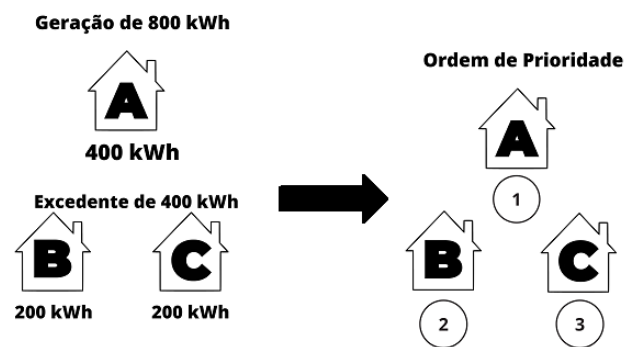
Figura 1. Evolução da Taxa Fio B de Distribuição de Energia Elétrica.



Fonte: elaborado pelo autor

A modalidade de autoconsumo remoto também sofreu alteração no cenário da nova legislação, que ao invés de serem direcionados em quantia de energia (kWh) para duas ou mais unidades consumidoras como definia a REN 482, agora segundo a lei 14.300, o excedente de energia é direcionado com ordem de prioridade, abatendo totalmente o consumo de uma unidade consumidora antes de ser direcionado para outra como ilustra a figura 2.

Figura 2. Nova Modalidade Para os Créditos de Energia.



Fonte: elaborado pelo autor

O custo de disponibilidade é a taxa mínima cobrada pela concessionária sempre que o consumo da Unidade Consumidora (UC) é menor que o valor mínimo estabelecido em determinado mês. Essa taxa visa cobrir os custos de manutenção de uma linha de fornecimento de energia elétrica ativa. O valor mínimo varia de acordo com o tipo de conexão presente na UC, podendo ser monofásica (30 kWh), bifásica (50 kWh) ou trifásica (100 kWh), respectivamente. No caso da geração distribuída o custo de disponibilidade estava sendo aplicado, mas não por falta de consumo, mas motivada pela energia elétrica produzida capaz de suprir a demanda de consumo, nestes casos a taxa mínima funcionava como uma “doação” para a concessionária. A Lei 14.300/2022 altera este cenário, logo, a energia elétrica injetada não é mais descontada do custo de disponibilidade, a partir disso, a taxa mínima que anteriormente funcionava como uma “doação” agora se torna créditos que podem ser usados pelo consumidor.

Após a sanção da Lei 14.300/2022, a ANEEL tem um prazo de 180 dias para atualizar a REN 482 e evitar possíveis conflitos. O mesmo período se aplica às concessionárias para se ajustarem as novas atualizações.

A inserção de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída geralmente dispensa a necessidade de grandes obras para sua instalação. Essa tecnologia pode ser facilmente integrada à estrutura existente, utilizando telhados e fachadas como suporte para os módulos fotovoltaicos, podendo inclusive servir como elemento de sombreamento. Essa abordagem proporciona uma harmoniosa incorporação dos painéis solares à arquitetura, resultando em uma estética valorizada que agrega ainda mais valor visual ao projeto (Pinho; Galdino, 2014).

De acordo com (Pinho e Galdino, 2014) o dimensionamento de um projeto geração de energia através da tecnologia fotovoltaica, envolve a inclinação e orientação do sistema, disponibilidade de irradiação solar, espaço disponível para a inserção do sistema, dentre outros fatores que podem afetar o desempenho final do sistema. Portanto, diante desses aspectos, torna-se essencial avaliar e acompanhar de forma adequada o desempenho energético desses sistemas por meio de índices de desempenho. Esses índices consistem em equações algébricas que, ao sofrerem alterações, maximizam ou minimizam o desempenho final do sistema fotovoltaico. É importante ressaltar que tais equações são recomendadas pela International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS) e são amplamente empregadas na avaliação e monitoramento de sistemas, independentemente da tecnologia utilizada e do local de implantação.

As condições climáticas e geográficas exercem uma influência significativa sobre a capacidade de conversão dos módulos fotovoltaicos. Além disso, o mercado apresenta uma ampla variedade de tecnologias para a conversão da energia solar em eletricidade. Entre as mais populares estão o silício monocristalino (c-Si) e o silício multicristalino (mc-Si). No entanto, existem também outras opções, tais como o silício amorfo (a-Si) e o silício microcristalino ( $\mu$ c-Si), cada uma com uma curva característica de geração de energia distinta, que pode ser afetada pela temperatura e pela disponibilidade do recurso solar no local de instalação. É importante ressaltar que a radiação solar está sujeita a variações sazonais ao longo do ano devido às mudanças nas estações. Essas alterações na distribuição espectral da radiação podem resultar em modificações na corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) gerada pelos módulos fotovoltaicos (Gasparin, et al. 2012). É fundamental compreender e monitorar essas flutuações sazonais, pois elas podem afetar diretamente o desempenho e a eficiência do sistema fotovoltaico, impactando a geração de energia e os resultados esperados.

Visando estabelecer uma padronização na distribuição espectral utilizada na construção de módulos fotovoltaicos comerciais, foi desenvolvida uma norma baseada nas condições atmosféricas e latitude dos Estados Unidos da América (EUA). Essa norma, conhecida como ASTM G-173 (2012), é amplamente utilizada em estudos que abordam a eficiência de diversas tecnologias comercializáveis. Nesse contexto, surge a motivação para a segunda parte deste trabalho, que consiste em analisar as diferenças entre o espectro da norma ASTM G-173 e a distribuição espectral específica da cidade de Araranguá/SC.

Desta forma, considerando a contínua evolução das políticas de apoio às tecnologias renováveis e a crescente adoção de sistemas fotovoltaicos no Brasil, esta pesquisa tem como objetivo realizar uma análise de um Sistema Fotovoltaico de Conexão à Rede durante o período de 2021 e 2022, localizado nas dependências da UFSC – Araranguá. O objetivo principal é investigar o impacto da distribuição espectral na geração de energia, examinando os períodos de sazonalidade coincidentes entre a geração de energia e a distribuição espectral da radiação solar em Araranguá, Santa Catarina. Além disso, busca-se identificar as diferenças em relação à norma ASTM-G173, estabelecendo uma comparação entre o espectro solar padrão e o espectro específico da região em análise.

## **2 OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso (TCC) é monitorar e avaliar o desempenho energético de um sistema fotovoltaico conectado à rede e estudar a distribuição espectral da radiação solar na cidade de Araranguá/SC.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analisar graficamente os dados de geração de energia elétrica do período de 2021 à 2022.
- Analisar mensalmente os seguintes indicadores de desempenho: Produtividade do Sistema (kWh/kWp), Produtividade de Referência (kWh/kWp) e Fator de Capacidade (%).

- Desenvolver análise gráfica da distribuição espectral para a cidade de Araranguá/SC e comparar as diferenças com o espectro da norma ASTM G-173.
- Avaliar estatisticamente a qualidade dos dados gerados através de regressão linear e gráfico *box plot*.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

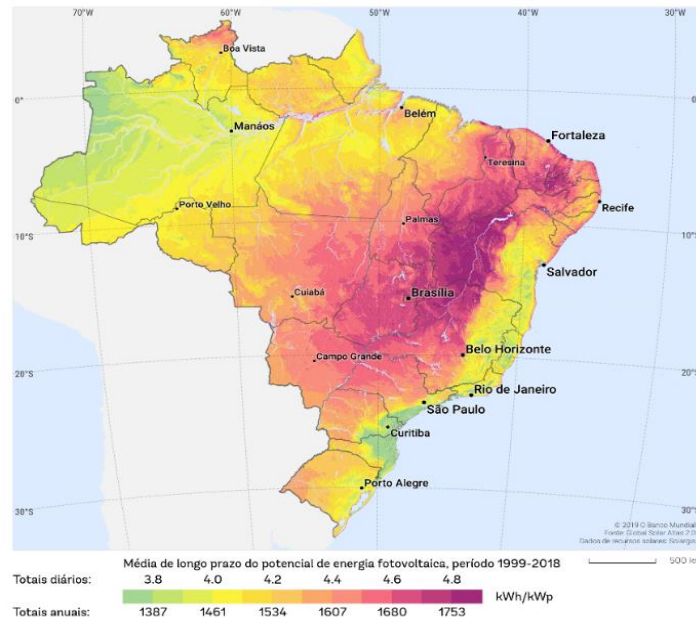
Neste capítulo será apresentado o referencial teórico utilizado para o desenvolvimento dessa pesquisa.

#### 3.1 PANORAMA DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL

A energia solar corresponde a energia proveniente do sol em várias faixas de radiação, esta energia pode então ser utilizada por meio do fenômeno físico chamado de efeito fotovoltaico, causando assim a produção de corrente elétrica em um material semicondutor quando este é exposto a luz, seja ela proveniente do sol ou de fonte artificial.

O índice de irradiação solar sobre o território brasileiro é extremamente elevado quando comparado a países situados no território europeu, a porção norte do litoral de Santa Catarina apresenta a menor irradiação do país, cerca de 1387 kWh/m<sup>2</sup> de irradiação global anual no plano horizontal. Enquanto no estado da Bahia, verifica-se o maior índice de radiação do país, aproximadamente 1753 kWh/m<sup>2</sup> de irradiação global no plano horizontal. Durante o decorrer de um ano, a irradiação global incidente no Brasil varia de 3,8 kWh/m<sup>2</sup> à 4,8 kWh/m<sup>2</sup>. Se comparados aos índices de irradiação presentes na Alemanha, esse que é o país que mais expande a matriz solar no território europeu, perceberemos uma incidência anual média no plano horizontal que varia de 900 kWh/m<sup>2</sup> à 1250 kWh/m<sup>2</sup>, representando uma diferença de aproximadamente 40% em relação aos índices presentes no Brasil. A figura 3 apresenta os índices de irradiação global disponíveis no território brasileiro (Pereira, *et al*; 2017).

Figura 3. Potencial de Geração Solar no Território Brasileiro – Rendimento médio anual.



Fonte: (Solar Gis,2022)

### 3.2 ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR

A atmosfera possui em sua constituição gases atmosféricos e aerossóis, cerca de 99% da atmosfera é composta por nitrogênio ( $N_2$ ) e oxigênio e uma pequena parcela de 1% de argônio (Ar) e outros gases como  $CO_2$  e  $O_3$ , apesar de apresentarem baixa concentração, possuem papel importante nos processos radioativos (Wallace e Hobbs, 2006).

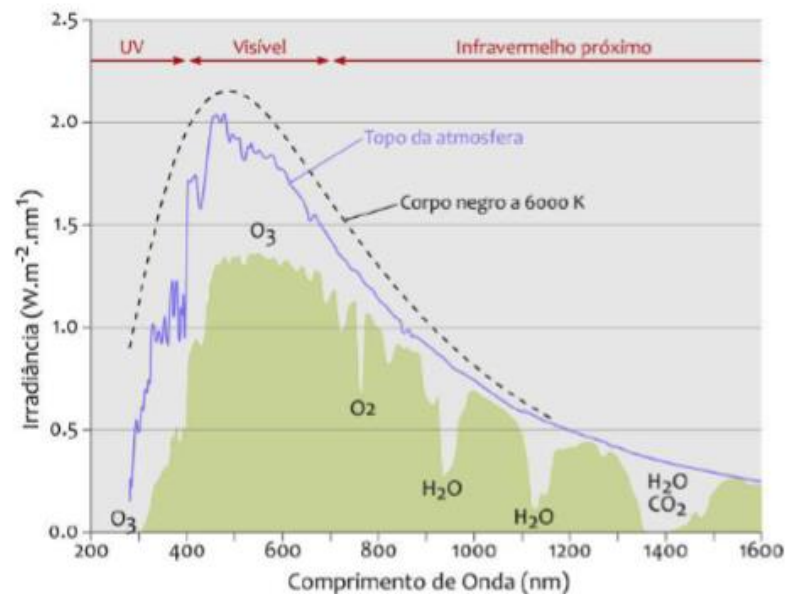
Devido a presença destes gases e aerossóis em suspensão na atmosfera terrestre, a luz solar que chega no planeta sofre processos físicos de espalhamento da radiação solar. O processo de absorção ocorre nas moléculas de ozônio ( $O_3$ ), vapor d'água, oxigênio ( $O_2$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Como principal causa dos processos físicos de espalhamento, percebe-se uma atenuação da radiação solar que incide na superfície da Terra em relação a radiação presente no topo da atmosfera, logo o valor máximo registrado sobre o plano do planeta é de cerca de  $1000 \text{ W/m}^2$ , esse valor é comumente registrado durante o meio dia solar, momento no qual a distância percorrida pela luz solar em direção a superfície da Terra é menor, devido a inclinação da Terra em relação ao sol (Pereira, *et al*; 2017)

Valores que excedem essa máxima já foram registrados, este fenômeno ocorre em um curto período em decorrência do espalhamento da radiação ocasionado

pelos flocos de gelo das nuvens. Em território brasileiro (Ruther et al, 2017) observaram valores de irradiância horizontal de até  $1822 \text{ W/m}^2$ .

Na figura 4, pode-se observar a disparidade entre a radiação solar no topo da atmosfera e a radiação incidente sobre a superfície terrestre. À medida que a radiação atravessa a atmosfera, uma parte é absorvida pelos gases que possuem bandas de absorção específicas, resultando nessa diferença. A radiação adicional é redistribuída por meio do espalhamento, o qual é responsável pela tonalidade azul da atmosfera terrestre. Além disso, é possível constatar que o espectro de distribuição do Sol se assemelha ao de um corpo negro com uma temperatura de  $6000 \text{ K}$ .

Figura 4. Espectro Eletromagnético da Radiação.



Fonte: adaptado de (Ruther et al, 2017)

### 3.3 RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE DA TERRA

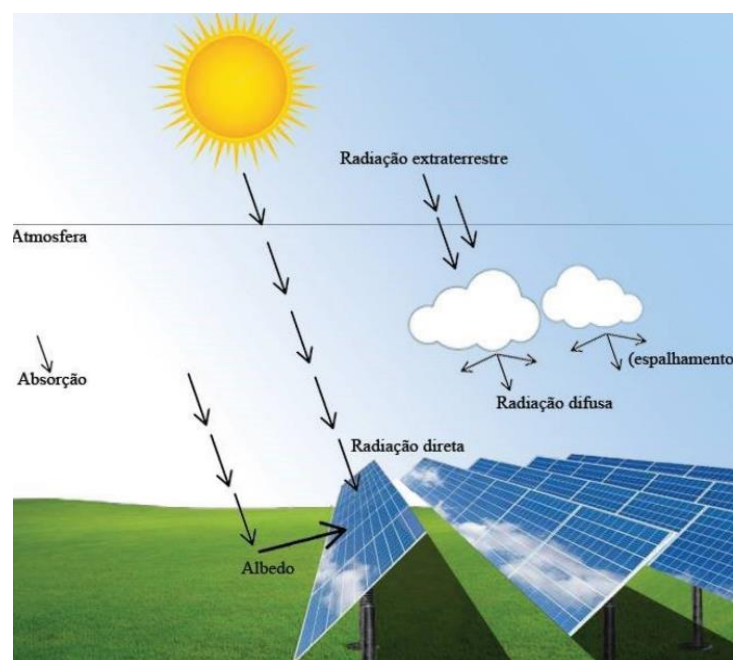
A radiação solar que chega à superfície terrestre é composta por duas componentes distintas. A primeira é a radiação direta, que penetra nas camadas atmosféricas sem sofrer dispersão, alcançando diretamente a superfície. A segunda é a radiação difusa, que se dispersa em todas as direções após interagir com os aerossóis presentes nas camadas anteriores da atmosfera, atingindo assim a superfície do planeta. (LORENZO 2006; PINHO e GALDINO, 2014; MACAGNAN, 2010). Aproximadamente 25% da radiação solar incidente na superfície do planeta é direta, enquanto o restante é absorvido ou disperso em direção ao espaço ou à

superfície da Terra. Esses processos dependem do comprimento de onda da radiação, bem como das propriedades dimensionais e da natureza dos materiais que interagem com a radiação solar (FIORIN et al., 2011).

Além disso, é importante mencionar que na presença de superfícies inclinadas em relação ao solo, uma terceira componente da radiação solar é considerada. Essa componente, ilustrada na figura 5, refere-se à radiação refletida pelo entorno da superfície. (vegetação, solo, obstáculos etc.), o coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de Albedo (LORENZO 2006; PINHO e GALDINO, 2014; MACAGNAN, 2010).

A radiação solar que chega à superfície pode ser decomposta em planos. O plano horizontal com a radiação global sendo a soma das radiações direta e difusa e plano inclinado que além das componentes direta e difusa tem o acréscimo de uma parcela do albedo da superfície. Para o aproveitamento fotovoltaico, a de maior interesse é a Irradiação Global Horizontal, que quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal, composta pela irradiação difusa horizontal e pela Irradiação Direta Normal parcela que atinge a superfície diretamente, sem reflexões. Em dias nublados, a principal parcela é a difusa, enquanto em dias claros prevalece a direta (EPE,2016).

Figura 5. Radiação solar na superfície da Terra



Fonte: adaptado de (ROSSO, 2019)

### 3.4 GERAÇÃO CENTRALIZADA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

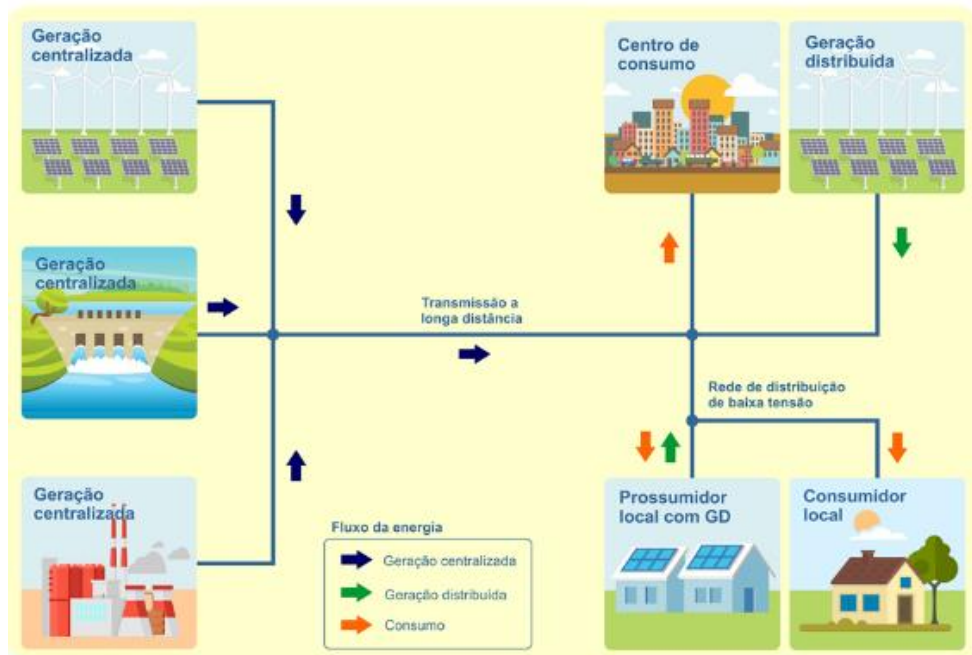
Dentro do contexto do setor elétrico, é comum encontrar a estrutura urbana distante das grandes centrais produtoras de energia, este cenário torna imprescindível a utilização de linhas de transmissão, conectando o gerador ao usuário final. Uma vez que a energia está disponível para a comercializadora de energia, o processo torna-se mais simples devido aos usuários finais estarem concentrados em um espaço pré-determinado e não de forma dispersa.

As usinas centralizadas, como as hidrelétricas e termoelétricas, são responsáveis por uma parcela significativa da energia produzida no país, representando aproximadamente 70%. Devido ao grande volume de energia que produzem, essas usinas requerem uma disposição estratégica e um amplo espaço para sua instalação.

A GC é um modelo de produção de energia em que as usinas de grande porte são responsáveis pela geração em larga escala. Nesse modelo, a energia é produzida em um local central e transmitida através de uma rede de distribuição para os consumidores. Essas usinas são projetadas para atender a uma demanda regional, nacional ou até mesmo internacional, e requerem um planejamento cuidadoso da infraestrutura de transmissão e distribuição. Já a GD é um modelo de produção de energia em que pequenas e médias unidades de geração estão distribuídas em locais próximos aos consumidores. A energia gerada é consumida localmente ou injetada na rede elétrica, reduzindo a dependência das grandes usinas centralizadas e aproveitando melhor os recursos disponíveis em cada local. Esses sistemas podem ser de grande porte, como centrais fotovoltaicas até 5 MW ou de pequeno porte, instaladas em edificações urbanas e independem da potência, fonte ou tecnologia (Souza 2014, Souza 2016).

A figura 6 oferece uma comparação visual entre a geração GC e GD, permitindo uma melhor compreensão das diferenças entre esses dois sistemas.

Figura 6. Geração Centralizada vs Geração Distribuída.



Fonte: Canal Solar (2022)

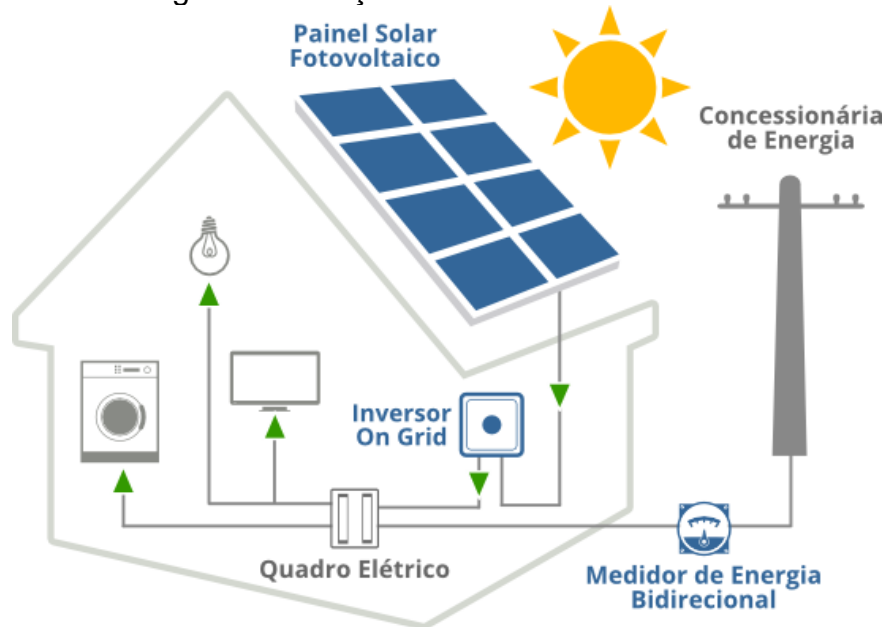
### 3.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O mercado de geração distribuída foi aberto no ano de 2012 por meio da RN 482 da ANEEL, essa regulação definiu os princípios que posteriormente foram atualizados na REN 687, lançada no ano de 2015, até então a potência máxima para sistemas de geração distribuída classificados como microgeração era de 75 kW e um limite de 5 MW para sistemas de minigeração. Em 6 de janeiro de 2022 a lei 14.300 foi sancionada, alterando principalmente as políticas de compensação de créditos, além de alterar os limites de minigeração distribuída, que a partir de 6 de janeiro de 2023 passará a ser de 3 MW para fontes não despacháveis, ou seja, aquelas que não podem ser controladas para a geração de energia elétrica conforme a necessidade do sistema elétrico. Esta mudança, porém, não se aplica a fontes despacháveis, que podem ser controladas e programadas para atingir a necessidade de demanda de energia elétrica da matriz energética, como: PCHs e fontes de biomassa, permanecendo então o limite de 5 MW.

As edificações alimentadas por sistemas fotovoltaicos de geração distribuída, contam com esses sistemas diretamente integrados na construção, como instalações sobre as coberturas ou até mesmo dispostos sobre alguma outra área livre e com baixa influência de sombreamento. A energia uma vez produzida é então convertida

de CC para CA com o auxílio de um inversor de potência. A figura 7 demonstra o layout de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

Figura 7. Geração Distribuída Residencial.



Fonte: Solar Energy (2022)

Os principais componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede são basicamente dois, o gerador fotovoltaico e os inversores de frequência CC/CA. No gerador ou módulo fotovoltaico é onde ocorre a conversão da energia solar em energia elétrica através de um fenômeno físico denominado efeito fotovoltaico. É nesse componente que também se encontram as células de um material semicondutor agrupadas eletricamente em diferentes combinações permitindo chegar ao valor de tensão e corrente desejados (BELISKI, 2017; NASCIMENTO, 2013; RODRÍGUEZ, 2002).

A inserção de um sistema fotovoltaico conectado à rede de energia elétrica, oferece diversas vantagens para o consumidor, dentre as quais pode-se citar:

- Redução quanto a perdas de energia, ocasionadas pelo transporte nas redes de transmissão e distribuição.
- A presença de sistemas fotovoltaicos em edificações oferece suporte KVAR a pontos críticos da rede de distribuição, melhorando assim a qualidade de energia (Barker 1997, Ginn et al, 2003).

- Oferece opção de inserção na arquitetura, substituindo assim outros materiais de revestimento e cobertura.
- O sistema pode ser expandido de acordo com a necessidade e espaço disponível.
- Fonte de energia inesgotável, além de oferecer geração limpa e renovável.

Os SFCR de geração distribuída não utilizam armazenamento de energia elétrica em fontes como baterias, pois a rede elétrica de distribuição já possui a característica acumuladora infinita, onde toda a energia elétrica produzida é entregue para a rede. Quando esses sistemas geradores de energia produzem mais energia do que a unidade consumidora demanda, o excesso é automaticamente injetado na rede, acumulando então créditos de energia para esta edificação, caso contrário, se o sistema não suprir a demanda de energia elétrica necessária, a rede elétrica a qual a UC está conectada irá suprir essa necessidade, nesse caso o consumidor pagará pela diferença, ou na presença de créditos de energia os mesmos podem ser utilizados para o complemento da diferença (RUTHER, 2004, NASCIMENTO, 2013; SOUZA, 2016).

### 3.6 ÍNDICES DE DESEMPENHO UTILIZADOS PARA AVALIAR UM SFCR

Os índices de desempenho, ou também conhecidos como índices de mérito, são equações algébricas que utilizam parâmetros construtivos e de materiais dos módulos fotovoltaicos que quando alterados, irão maximizar ou minimizar o desempenho do sistema.

Neste trabalho serão utilizadas duas equações para definir a eficiência de um sistema fotovoltaico conectado à rede acerca de aproveitamento da radiação solar e produção de energia e uma equação para definir a produção de energia ideal da região de estudo. Estas equações são respectivamente: Fator de Capacidade (FC), Produtividade do Sistema (YF) e Produtividade de Referência (YR).

Além disso, a utilização destas equações permite avaliar e monitorar sistemas fotovoltaicos independente da tecnologia utilizada ou localização, desta maneira é possível avaliar se o sistema opera de maneira eficiente ou se precisa passar por modificações para potencializar a sua eficiência.

### 3.7 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, serão apresentadas pesquisas pertinentes e interconectadas ao tema abordado neste trabalho.

#### 3.7.1 ESTADO DA ARTE: ÍNDICES DE DESEMPENHO

Machado (2019) analisou os indicadores de desempenho para 5 sistemas fotovoltaicos de GD instalados na região sul de Santa Catarina, mais em específico nas cidades de Criciúma, Turvo, Meleiro, Meleiro/Sapiranga e Araranguá, os fatores de capacidade para os sistemas analisados variaram de (12 a 15%) e os índices de produtividade do sistema sofreram com a sazonalidade de geração de energia devido a mudança de estações.

Mello e Rampinelli (2016) analisaram os índices de desempenho para sistemas de GD instalados nas cidades de Bratislava (Eslováquia), Delft (Holanda), Stellenbosch (África do Sul) e Florianópolis (Brasil), visando utilizar as equações para comparar o desempenho de sistemas localizados no hemisfério sul e hemisfério norte do planeta. Constata-se que o fator de capacidade é diretamente proporcional a quantidade de irradiação que o sistema recebe, o fator de capacidade médio para os sistemas analisados foram 13%, 11,4%, 18,3% e 16,4% respectivamente. Além disso a análise dos índices de produtividade do sistema indica que os valores variam de acordo com a estação do ano e conseqüentemente quantidade de recurso solar disponível para a conversão da energia solar em elétrica.

#### 3.7.2 ESTADO DA ARTE: DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO

Dagostim (2021) utiliza o software Smarts 2 para caracterizar a distribuição espectral da radiação de Porto Alegre em relação a norma ASTM G-173, constatando que a distribuição espectral efetiva de Porto Alegre apresenta valores maiores que a referência para os comprimentos menores que 630 nm sugerindo a utilização de tecnologias fotovoltaicas que apresentem resposta espectral mais acentuada nesta faixa de atuação.

Haag e Krezinger (2016) apresentam o estudo de comparação da distribuição espectral da radiação para a cidade de Petrolina/PE em relação a ASTM G-173 no VI

Congresso Brasileiro de Energia Solar. No estudo foram utilizadas séries temporais de ozônio, vapor d'água, aerossóis, CO<sub>2</sub>, massa de ar, ângulo de inclinação além do software Smarts 2 para caracterizar o espectro da cidade de Petrolina. Os autores reforçam que a referência proposta pela norma americana não é representativa para as características da distribuição espectral verificadas no semiárido, mais especificamente na cidade de Petrolina/PE.

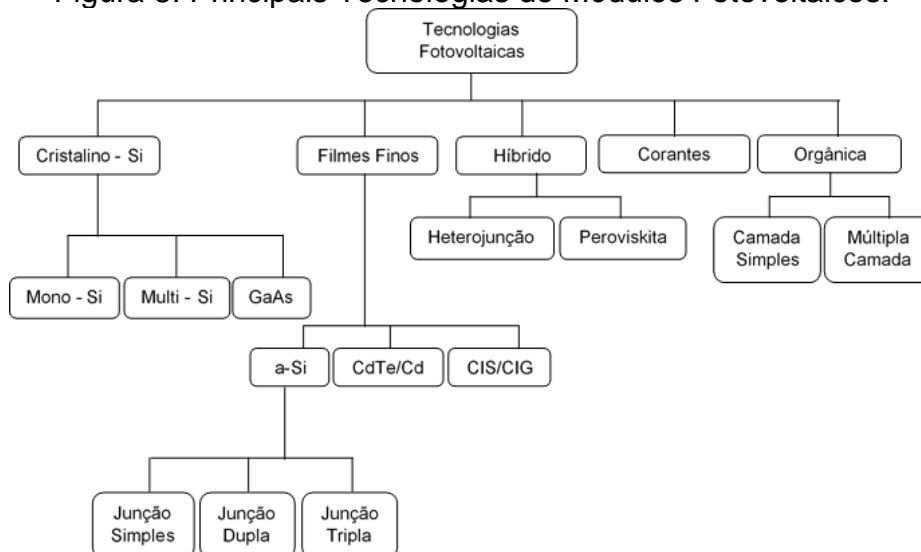
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo a metodologia desenvolvida para o monitoramento e avaliação de desempenho do sistema fotovoltaico no período de 2021 à 2022 e a análise da distribuição espectral da radiação para a cidade de Araranguá/SC serão apresentadas.

### 4.1 ÍNDICES DE DESEMPENHO

A tecnologia fotovoltaica evolui rapidamente ao passar dos anos, de forma geral entre a primeira e terceira geração de módulos fotovoltaicos, existem cerca de 16 tecnologias diferentes como ilustra a figura 8, assim, visando contribuir para com o aprimoramento desse recurso, surge então as metodologias de avaliação, contribuindo para o aumento da credibilidade dos sistemas.

Figura 8. Principais Tecnologias de Módulos Fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de Kumar, M., Kumar, A. (2017).

Os índices de desempenho energético para sistemas fotovoltaicos, são metodologias sugeridas pela International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programm (IEA – PVPS), a utilização destes parâmetros permite a realização do monitoramento e avaliação de sistemas fotovoltaicos independente das tecnologias utilizadas ou localização geográfica, assim torna-se possível distinguir entre sistemas que operam de forma otimizada, daqueles que necessitam modificações para o incremento da eficiência .

Os índices de mérito são equações algébricas que combinam parâmetros de materiais ou equipamentos e que quando maximizados, aperfeiçoam algum aspecto de desempenho. Sua forma algébrica geralmente expressa uma relação entre duas características e/ ou propriedades (FUSANO, 2013).

#### 4.1.1 FATOR DE CAPACIDADE

O FC (%) é um índice expresso em forma de porcentagem e utilizado para diversas fontes de energia, como: gás natural, biomassa, hidroelétricas entre outros. Quando analisado para o caso da energia solar, segundo Kormann et al (2014), os sistemas instalados no Brasil apresentam FC variando entre 13% e 18%.

O FC de um sistema fotovoltaico é definido através da razão entre a energia elétrica produzida pelo sistema e medida em (kWh) e a capacidade total de energia que o sistema poderia produzir caso operasse sob condições de teste padrão de 25°C, 1000 W/m<sup>2</sup> e AM de 1,5.

$$FC = \frac{ECA}{ESTD} = \frac{\int_0^{\tau} PCA(t).dt}{\int_0^{\tau} PSTD(t).dt} \quad (1)$$

Onde, FC é o fator de capacidade, ECA é a energia produzida injetada na rede elétrica, ESTD é a energia produzida sobre a condição de teste padrão em ambiente controlado, PCA é a potência elétrica injetada na rede elétrica e PSTD é a potência produzida sob as condições ideais de teste padrão e  $\tau$  é o período de análise.

#### 4.1.2 PRODUTIVIDADE DO SISTEMA

A YF é definida pela razão entre a energia elétrica convertida pelo sistema fotovoltaico (kWh) e a potência nominal (kWp) do sistema. O índice de produtividade indica a quantia de horas que o sistema deveria operar com a potência nas condições padrões para converter a mesma quantidade de energia convertida no mesmo período considerado (Rampinelli, 2010).

$$YF = \frac{\int_0^{\tau} PCA(t).dt}{PSTD} \left( \frac{kWh}{kWp} \right) \quad (2)$$

Onde, PSTD é a potência produzida sob as condições ideais de teste padrão, PCA é a potência elétrica injetada na rede elétrica e  $\tau$  é o período de análise.

#### 4.1.3 PRODUTIVIDADE DE REFERÊNCIA

A YR é responsável por descrever a incidência do recurso solar no local de instalação do sistema fotovoltaico. A unidade de medida deste indicador se dá em horas de sol na condição padrão de 1000 W/m<sup>2</sup> de acordo com o estudo publicado por (IEC, 1998).

$$YR = \frac{H(\gamma, \beta)}{GSTD} \left( \frac{kWh}{kWp} \right) \quad (3)$$

Onde,  $H(\gamma, \beta)$  é a irradiação no plano inclinado de instalação do sistema fotovoltaico e  $GSTD$  é a irradiância padrão de 1000 W/m<sup>2</sup>.

## 4.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO

O SFCR destacado na figura 9 está situado nas dependências do Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde (CTS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), na unidade do bairro Mato Alto na cidade de Araranguá – SC, que tem por sua vez a energia elétrica suprida pela Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC). O sistema fotovoltaico está instalado sobre o telhado da casa eficiente do

Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica (NTEEL) e seu layout apresenta 3 módulos de 330 Wp, totalizando assim um sistema com a potência nominal de 0,99 kWp.

Figura 9. Sistema Fotovoltaico da Edificação Bioclimática.



Fonte: Adaptado de (NTEEL SOLAR, 2021).

A tabela 2 apresenta as características do SFCR localizado sobre a edificação bioclimática.

Tabela 2. Características do Sistema Fotovoltaico da Edificação Bioclimática.

Potência Instalada	0,99 kWp
Inclinação do Sistema	20°
Arranjo Fotovoltaico	1 string e 3 Módulos
Orientação	0°
Fabricante	BYD
Modelo	330 PHK-36
Inversores	1
Fabricante	PHB Solar
Modelo	PHB 1500 – NS
Potência do Inversor	1,5 kW

Fonte: elaborado pelo autor

### 4.3 COLETA DE DADOS

Neste item serão explicados como foram obtidos os dados necessários para o cálculo dos indicadores de desempenho e espectro da radiação solar.

#### 4.3.1 DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Os dados de geração de energia elétrica foram coletados através da plataforma de monitoramento WiFi do inversor do sistema fotovoltaico em um intervalo de 5 minutos e tratados a partir de um código em Python, para a posterior análise de geração de energia e dos indicadores de desempenho através de análise gráfica utilizando o software Microsoft Excel.

#### 4.3.2 DADOS DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR

O levantamento das séries históricas de dados para a obtenção da distribuição espectral da radiação na cidade de Araranguá foi realizado através das plataformas de livre acesso *Giovanni* da Agência Espacial Americana – NASA e do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Uma vez com os dados referentes às características da atmosfera na cidade de Araranguá- SC e sabendo que a cidade está localizada em uma latitude de 28° Sul, altitude de cerca de 13 m em relação ao nível do mar e apresenta clima subtropical, é possível então produzir gráficos do espectro da radiação solar e compará-los com a norma americana ASTM – G173. Os dados atmosféricos referentes a cidade de Araranguá/SC são apresentados na tabela 3 no formato de média mensal.

Tabela 3. Dados atmosféricos para Araranguá/SC.

Meses do ano	Vapor d'água (cm) Giovanni 2004-2020	Ozônio (atm*cm) Giovanni 2004-2021	Aerossóis Giovanni 2004-2021	Pressão (hPa) INMET 2008-2021	Dióxido de Carbono (ppm) Giovanni 2010-2017
<b>Jan</b>	2,65	0,24	0,013	1015,3	395,5
<b>Fev</b>	2,54	0,23	0,014	1015,3	395,6
<b>Mar</b>	2,02	0,23	0,013	1015,3	394,9
<b>Abr</b>	1,69	0,23	0,013	1015,3	394,9
<b>Mai</b>	1,59	0,24	0,012	1015,3	395
<b>Jun</b>	1,35	0,23	0,01	1015,4	395,3

<b>Jul</b>	1,39	0,25	0,011	1015,4	395,5
<b>Ago</b>	1,33	0,25	0,015	1015,4	395,6
<b>Set</b>	1,42	0,25	0,019	1014,6	395,7
<b>Out</b>	1,65	0,25	0,017	1015,3	395,9
<b>Nov</b>	1,65	0,26	0,013	1015,3	396,3
<b>Dez</b>	2,12	0,24	0,015	1015,3	396,4

Fonte: elaborado pelo autor

### 4.3.3 SOFTWARE SMARTS 2

O software *Simple Model os the Atmospheric Radiative Transfer os Sunshine* (SMARTS 2) é um modelo utilizado principalmente por pesquisadores e engenheiros. Pesquisadores da área da energia solar utilizam o SMARTS para testar a performance de radiômetros, desenvolvimento de espectro de referência, estabelecer condições de referência para materiais de pesquisa e verificar os comprimentos de ondas de radiação. Além disso, o software SMARTS 2 também pode ser utilizado para pesquisas relacionadas a arquitetura, ciências atmosféricas, fotobiologia e ciências da saúde (NREL, 2022).

O modelo SMARTS 2 é a base para a *American Society of Testing and Materials* (ASTM) e os espectros de referência ASTM G-173 e ASTM G-177 são usados para testes de performance e estudos de degradação dos materiais em módulos fotovoltaicos para a geração de energia (NREL, 2022).

Para usar o SMARTS 2, os usuários precisam organizar arquivos de texto no formato *“txt”* de 20 a 30 linhas de texto simples e números para especificar as condições de entrada (NREL, 2022).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo irá apresentar os resultados obtidos da análise dos dados de geração de energia aliado a indicadores de desempenho e relacionar períodos de maior geração de energia com as distribuições espectrais mais acentuadas observadas no decorrer de doze meses.

## 5.1 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A tabela 4 e a figura 10 apresentam as médias mensais de geração de energia elétrica nos anos de 2021 e 2022, respectivamente. É fundamental destacar que esses dados foram obtidos através da plataforma do inversor do sistema fotovoltaico. Por meio dessa integração, os dados foram enviados à rede, tornando-os disponíveis para estudos e análises futuras.

Ao analisar tanto a tabela 4 quanto a figura 10 é possível observar que, durante o intervalo em questão, a média mensal de geração máxima de energia elétrica ocorreu no mês de fevereiro. No ano de 2021, a média do período atingiu aproximadamente 158,90 kWh, enquanto no ano de 2022 foi de 149,25 kWh. Isso resultou em uma média mensal de geração de energia de 154,05 kWh. Por outro lado, a mínima geração mensal de energia elétrica foi registrada no mês de junho, com valores em torno de 78,50 kWh em 2021 e 73,20 kWh em 2022. Esses dados contribuem para uma média histórica, em junho, de geração de energia elétrica de 75,85 kWh. Além disso a tabela 4 destaca também a sazonalidade de geração de energia, tanto no período analisado quanto na média, percebe-se que os maiores valores de geração de energia estão presentes nos meses de verão e primavera devido a maior abundância do recurso solar, no entanto durante o período de outono e inverno devido a menores valores de irradiação solar a eficiência de conversão do sistema é menor, resultando em menor geração de energia.

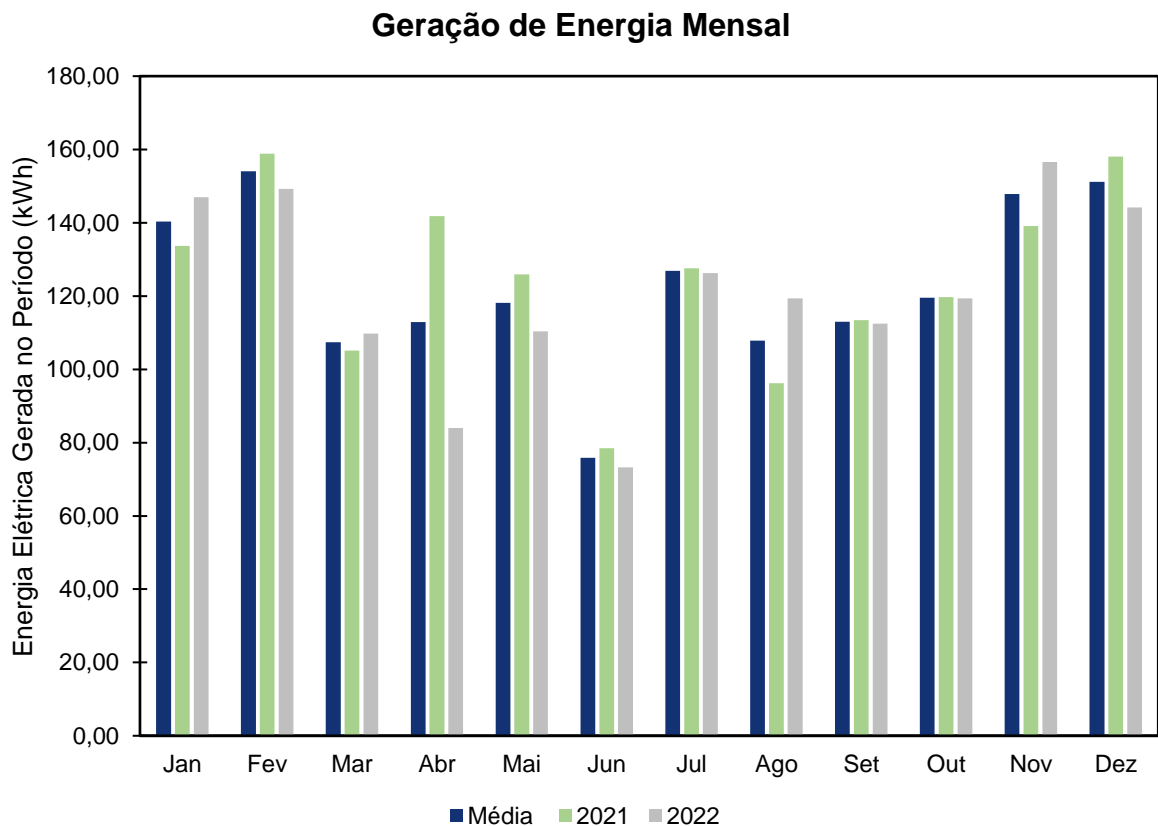
Durante o período de análise, a tabela 4 destaca que as maiores diferenças percentuais entre as bases ocorreram nos meses de abril de 2022 e agosto de 2021, 25,6% e 10,70% respectivamente, resultados de inconsistências meteorológicas durante o período de análise que resulta em menor geração de energia, afetando consequentemente a eficiência do sistema e inclusive o próprio registro de dados da plataforma do inversor, ocasionando lacunas no período de análise. Destaca-se também que períodos com menor geração afetam diretamente o consumidor e a própria rede elétrica, pois para equilibrar a ausência de carga no período o consumidor dependeu da energia elétrica injetada da rede convencional, acarretando então em custos visto que a energia elétrica disponibilizada pela rede tem valor mais elevado. Além disso, em áreas com números elevados de UC's que utilizem SFCR's a redução da geração de energia por influência climática pode resultar em flutuações de tensão e carga excessiva na rede elétrica.

Tabela 4. Geração mensal de energia elétrica – Período de análise e média geral.

Meses do ano	Geração 2021 (kWh)	Geração 2022 (kWh)	Diferença 2021 vs 2022	Média do Período (kWh)
Jan	133,65	146,95	4,75%	140,30
Fev	158,90	149,25	-3,15%	154,05
Mar	105,10	109,75	2,15%	107,40
Abr	141,80	84,00	-25,60%	112,90
Mai	125,90	110,35	-6,60%	118,15
Jun	78,50	73,20	-3,50%	75,85
Jul	127,60	126,25	-0,55%	126,90
Ago	96,25	119,35	10,70%	107,80
Set	113,45	112,50	-0,40%	112,95
Out	119,70	119,35	-0,15%	119,55
Nov	139,10	156,60	5,90%	147,85
Dez	158,10	144,15	-4,60%	151,10

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 10. Média da geração mensal de energia elétrica do período analisado



Fonte: elaborado pelo autor

## 5.2 ÍNDICE DE DESEMPENHO

### 5.2.1 PRODUTIVIDADE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A produtividade do sistema fotovoltaico pode ser quantificada e visualizada por meio de análise numérica na Tabela 5 e na figura 11. É essencial ressaltar que a potência nominal do sistema, avaliada em 0,99 kWp exerce um papel significativo nesse contexto onde observa-se que a produtividade mensal nos anos de 2021 e 2022 se assemelha à geração de energia correspondente a esses períodos, considerando que a produtividade do sistema é calculada como uma razão entre a energia gerada e a potência instalada. Portanto, essas métricas proporcionam uma compreensão objetiva e científica da eficiência e desempenho do sistema analisado.

A análise da produtividade do sistema fotovoltaico, assim como a análise da geração de energia elétrica, revela padrões distintos ao longo do ano. É evidente que os meses de verão se destacam por apresentarem os maiores índices de produtividade, com especial ênfase para o mês de fevereiro, que registra uma média de 160,50 kWh/kWp e 150,75 kWh/kWp nos anos de 2021 e 2022, respectivamente. Esses valores caracterizam uma produtividade média de 155,60 kWh/kWp durante esse período. Por outro lado, a análise dos meses de inverno indica que eles são marcados por menor produtividade, com junho figurando como o mês de menor produtividade. Os dados coletados revelam que a produtividade do sistema nesse mês é de 79,30 kWh/kWp e 73,95 kWh/kWp nos anos de 2021 e 2022, respectivamente, com uma média geral de 76,60 kWh/kWp. Esses resultados corroboram com a tendência observada na geração de energia elétrica, enfatizando a importância de considerar sazonalidades ocasionadas pela maior abundância da irradiação solar nos meses de verão em relação ao inverno e variações climáticas na avaliação do desempenho do sistema.

A Tabela 5 fornece os dados de produtividade do período e as diferenças percentuais observadas nos anos de 2021 e 2022 em relação à produtividade média durante o período de análise. Vale ressaltar que, nesse contexto, o mês de abril se destaca, apresentando diferenças significativas em relação à média. Para o ano de 2021, a diferença percentual em relação à média é de 25,60%, enquanto para o ano de 2022 é de 40,77%. Essas discrepâncias são atribuídas à inconsistência dos dados registrados durante esse período que podem ser atribuídas a variações

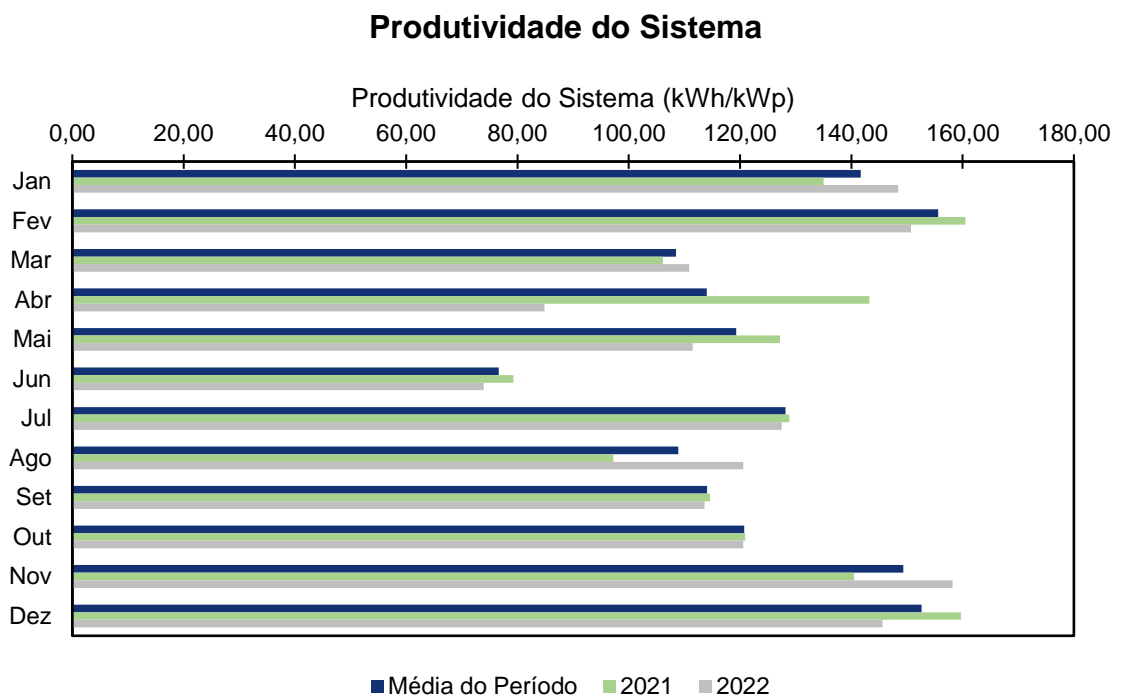
meteorológicas e problemas de registro da própria plataforma do inversor. Além disso, a análise da tabela 5 reforça a tendência sazonal de produtividade observada na figura 10, onde o sistema apresenta resultados mais elevados de produtividade nos meses de maior incidência solar, e menor produtividade no inverno que possui como característica meses com menor abundância da irradiação solar.

Tabela 5. Produtividade do sistema no período analisado

Meses do ano	Produtividade do Sistema 2021 (kWh/kWp)	Produtividade do Sistema 2022 (kWh/kWp)	Produtividade média do Sistema (kWh/kWp)	Diferença 2021	Diferença 2022
Jan	135	148,4	141,7	4,75%	9,95%
Fev	160,5	150,75	155,6	3,15%	6,10%
Mar	106,15	110,85	108,5	2,15%	4,40%
Abr	143,25	84,85	114,05	25,60%	40,80%
Mai	127,2	111,5	119,35	6,60%	12,35%
Jun	79,3	73,95	76,6	3,50%	6,75%
Jul	128,9	127,5	128,2	0,55%	1,10%
Ago	97,2	120,55	108,9	10,70%	24,00%
Set	114,6	113,65	114,1	0,40%	0,80%
Out	120,95	120,55	120,75	0,15%	0,30%
Nov	140,5	158,2	149,35	5,90%	12,60%
Dez	159,7	145,6	152,65	4,60%	8,80%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 11. Produtividade média do período analisado.



Fonte: elaborado pelo autor

### 5.2.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE YF E YR

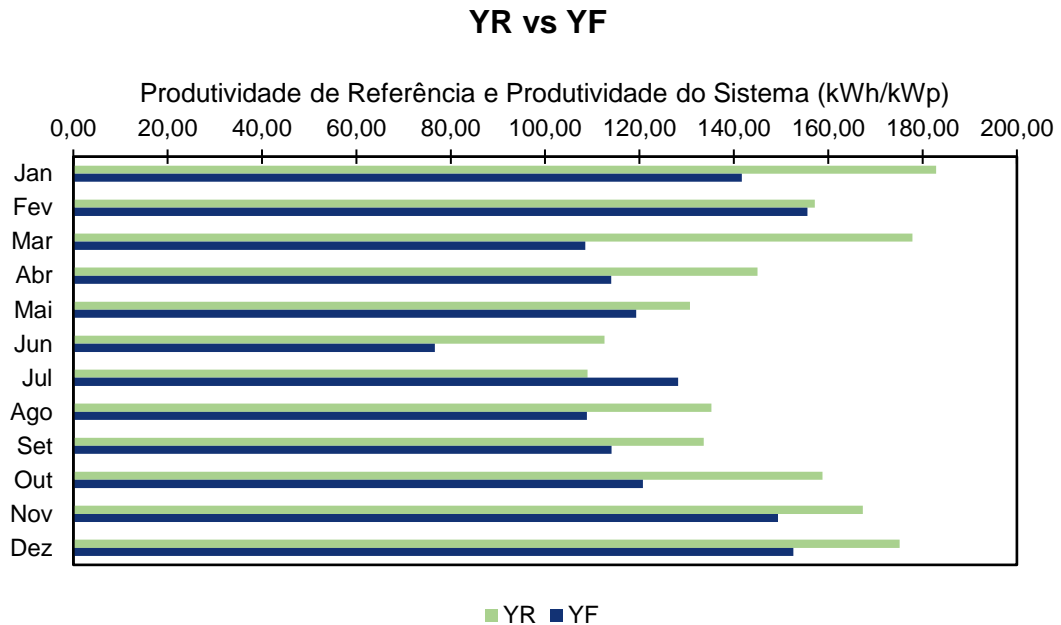
A figura 12 ilustra uma comparação entre os indicadores YF e YR, considerando um cenário ideal de geração de energia. No contexto deste estudo, YR representa a produtividade ideal do sistema caso operasse em condições perfeitas. Para obter essa referência, foram utilizados dados de irradiação mensal sobre a cidade de Araranguá/SC, disponibilizados pelo site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB). O YR calculado é apenas uma estimativa da irradiação solar para a cidade de Araranguá/SC, não se trata do valor exato da radiação na localidade do SFCR de estudo. É relevante destacar que a maior diferença observada ocorre no mês de julho, onde a Tabela 6 indica uma discrepância de -53,15% em relação à produtividade ideal. Essas variações significativas podem ser atribuídas a fatores como condições climáticas, eficiência do sistema e outros elementos operacionais que afetam o desempenho real em relação à ideal.

Tabela 6. Produtividade do sistema, Produtividade de referência

Meses do ano	Produtividade média do Sistema (YF) (kWh/kWp) 2021 - 2022	Produtividade de Referência (YR) (kWh/kWp)	Diferença YF - YR
Jan	141,70	182,90	22,50%
Fev	155,60	153,15	-1,60%
Mar	108,50	144,80	25,05%
Abr	114,05	115,80	1,50%
Mai	119,35	93,60	-27,45%
Jun	76,60	73,80	-3,80%
Jul	128,20	83,70	-53,15%
Ago	108,90	105,40	-3,30%
Set	114,10	106,80	-6,85%
Out	120,75	136,70	11,70%
Nov	149,35	173,70	14,05%
Dez	152,65	191,90	20,45%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 12. Comparação da média da produtividade do sistema com a produtividade de referência.



Fonte: elaborado pelo autor

### 5.2.3 FATOR DE CAPACIDADE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Com base nos dados apresentados na tabela 7 e na figura 13, pode-se observar que o sistema fotovoltaico teve um fator de capacidade médio de 18% em 2021 e 17% em 2022, com uma média geral de 17%. Esses números indicam que, em média, o sistema foi capaz de converter cerca de 17% da energia solar incidente em eletricidade utilizável ao longo desses dois anos. No entanto, houve variações mensais significativas no desempenho do sistema, como os meses de fevereiro e novembro apresentando fatores de capacidade mais elevados, atingindo 25% e 23% respectivamente. Por outro lado, meses como os de junho e abril tiveram os fatores de capacidade menores, com 11% e 12%, respectivamente.

Esses resultados indicam que o desempenho do sistema fotovoltaico foi influenciado por fatores sazonais e variações nas condições climáticas ao longo do ano. A alta performance em fevereiro e novembro pode estar relacionada a períodos de maior incidência solar, enquanto os meses com fatores de capacidade mais baixos podem ter sido afetados por fatores como nebulosidade, disponibilidade da irradiação ou outros elementos que reduzem a eficiência e desempenho do sistema. Essas variações mensais ressaltam a importância de considerar não apenas o fator de

capacidade médio, mas também a análise do desempenho ao longo do tempo para uma avaliação mais precisa do sistema fotovoltaico.

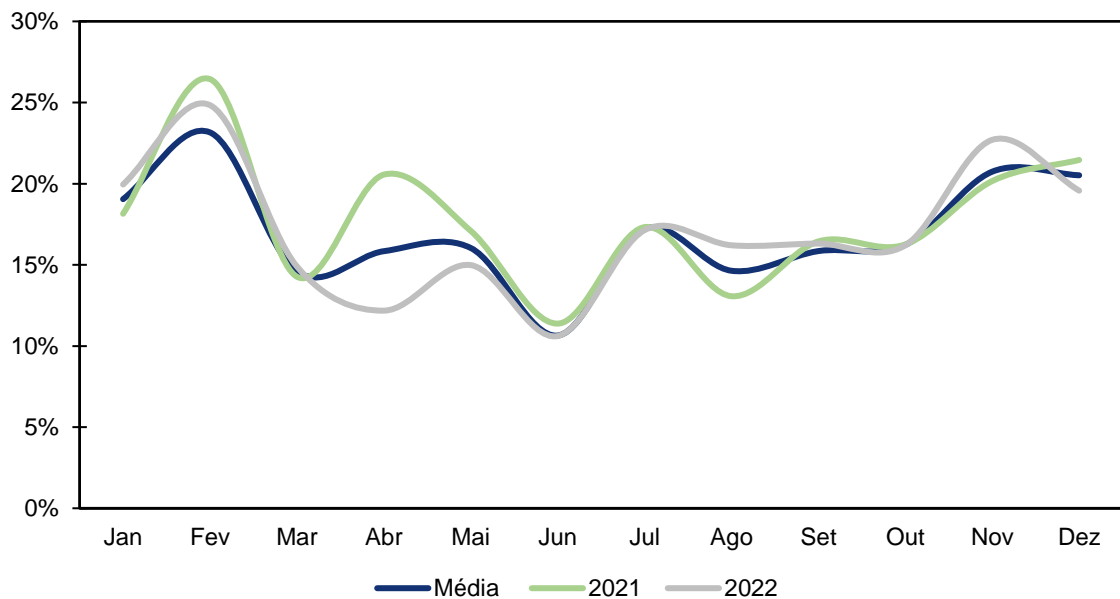
Tabela 7. Fator de capacidade do período analisado.

Meses do ano	Fator de Capacidade médio	Fator de Capacidade 2021	Fator de Capacidade 2022
Jan	19%	18%	20%
Fev	23%	26%	25%
Mar	15%	14%	15%
Abr	16%	21%	12%
Mai	16%	17%	15%
Jun	11%	11%	11%
Jul	17%	17%	17%
Ago	15%	13%	16%
Set	16%	16%	16%
Out	16%	16%	16%
Nov	21%	20%	23%
Dez	21%	21%	20%
<b>Média</b>	<b>17%</b>	<b>18%</b>	<b>17%</b>

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 13. Fator de capacidade médio e dos anos de 2021 e 2022.

### Fator de Capacidade Geral



Fonte: elaborado pelo autor

### 5.3 ESPECTRO DA RADIAÇÃO

Para explicar os resultados do espectro da radiação na cidade de Araranguá, será adotada uma divisão por trimestres. O primeiro trimestre compreende os meses de janeiro, fevereiro e março, o segundo trimestre abrange abril, maio e junho, o terceiro trimestre inclui julho, agosto e setembro, e o quarto trimestre engloba outubro, novembro e dezembro. Essa segmentação por trimestres nos permitirá analisar as variações do espectro ao longo do ano e identificar possíveis padrões sazonais relacionados à radiação solar que afetam diretamente a geração de energia como visto na análise de geração e indicadores de desempenho apresentadas previamente.

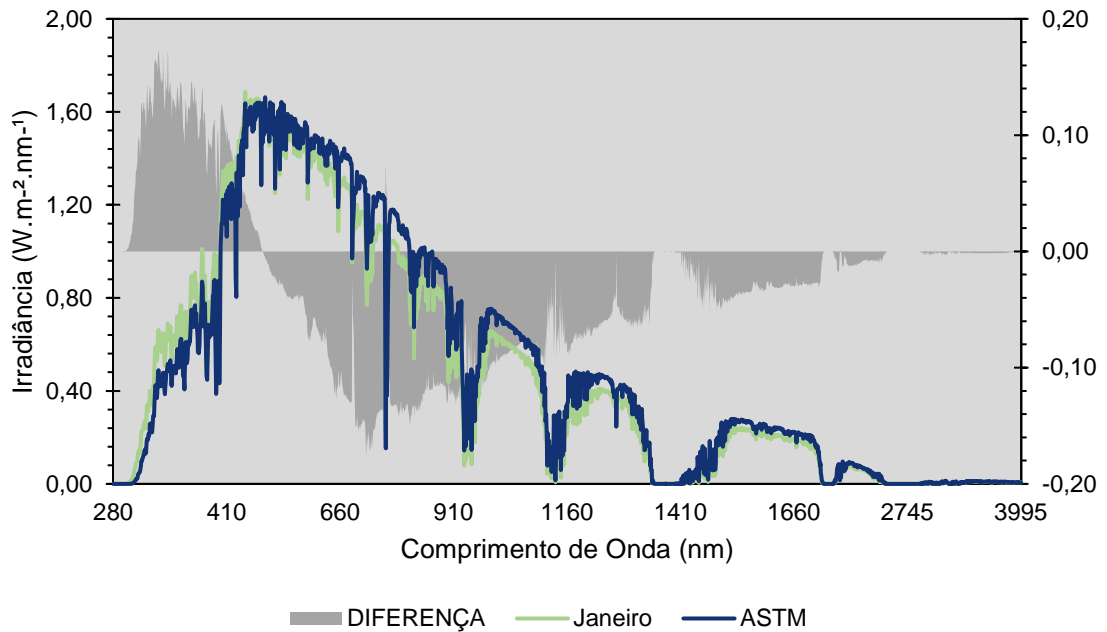
As figuras de 14 a 19 representam os espectros da radiação solar do primeiro e quarto trimestre, em condições que refletem os meses com maior disponibilidade de radiação. Observa-se uma semelhança comportamental com a norma de referência, apresentando diferenças positivas em relação ao espectro registrado na cidade de Araranguá/SC. Essas diferenças são notáveis, especialmente nos comprimentos de onda entre 280 nm e 500 nm, abrangendo as faixas de radiação ultravioleta, violeta e índigo. É importante destacar que essa faixa específica de radiação é absorvida pelo ozônio presente na atmosfera, resultando em uma baixa intensidade que não é prontamente aproveitada pelas células fotovoltaicas.

Ao analisar essa variação do espectro, é possível observar que as células fotovoltaicas apresentam menor eficiência na conversão da radiação ultravioleta, devido à sua baixa intensidade. No entanto, é importante notar que as células fotovoltaicas são projetadas para responder de maneira mais eficiente aos comprimentos de onda na faixa visível e próxima ao infravermelho, que possuem maior energia e são mais adequados para a conversão em energia elétrica.

Essas diferenças no espectro da radiação solar entre Araranguá/SC e a norma podem ser atribuídas a fatores atmosféricos locais, como a presença de ozônio na região. A absorção do espectro ultravioleta pelo ozônio é uma resposta natural que desempenha um papel importante na proteção contra os raios ultravioleta prejudiciais.

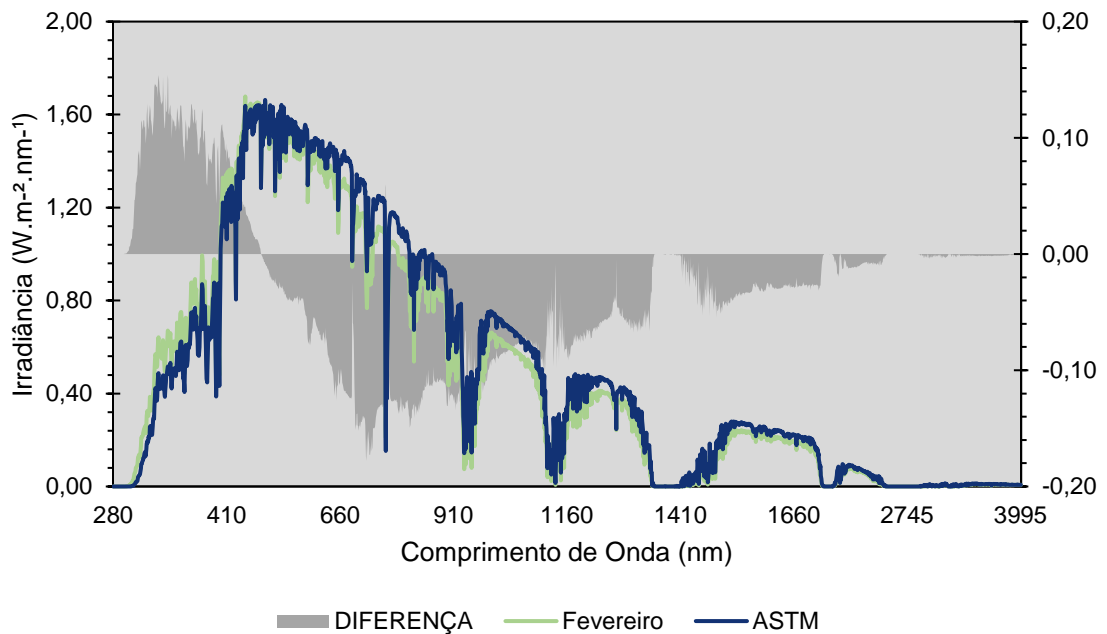
Além disso, é importante ressaltar que períodos com maior distribuição espectral, refletem maior geração de energia, ou seja, em meses de verão e primavera é esperado um melhor desempenho de sistemas fotovoltaicos, isso pode ser confirmado através da análise da figura 10, que apresenta no primeiro e quarto trimestre maiores faixas de geração de energia.

Figura 14. Espectro da radiação solar para o mês de janeiro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



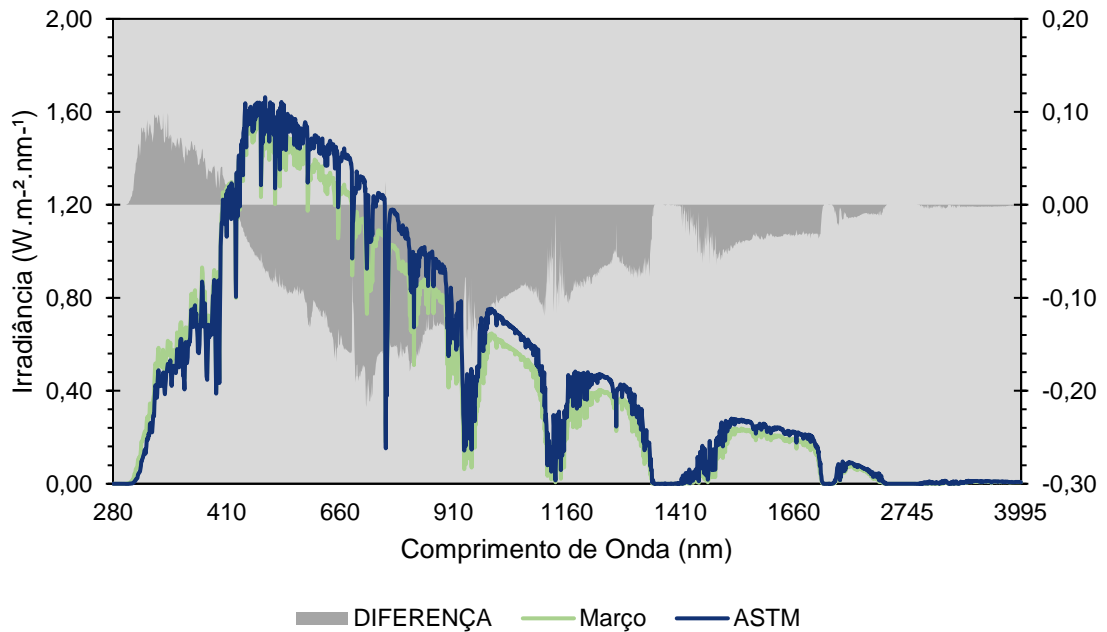
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 15. Espectro da radiação solar para o mês de fevereiro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



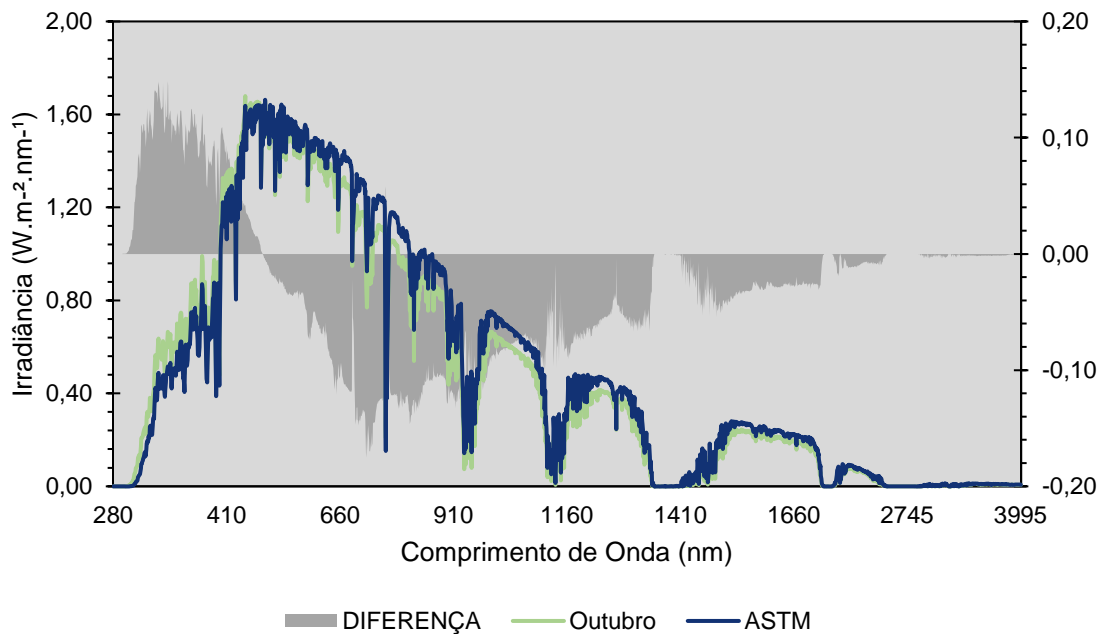
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 16. Espectro da radiação solar para o mês de março em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



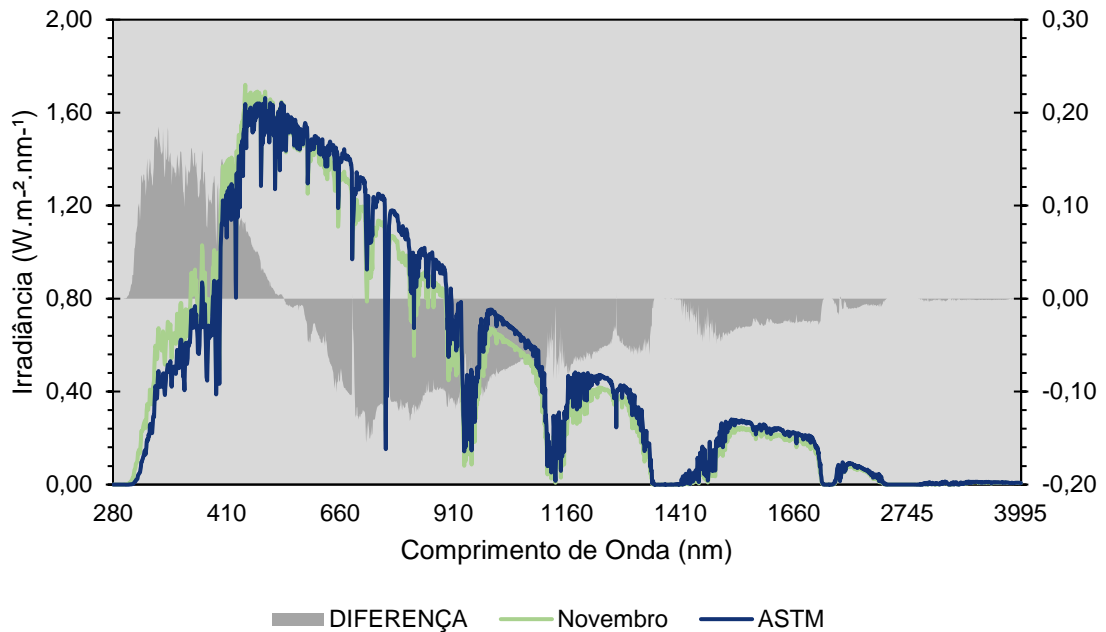
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 17. Espectro da radiação solar para o mês de outubro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



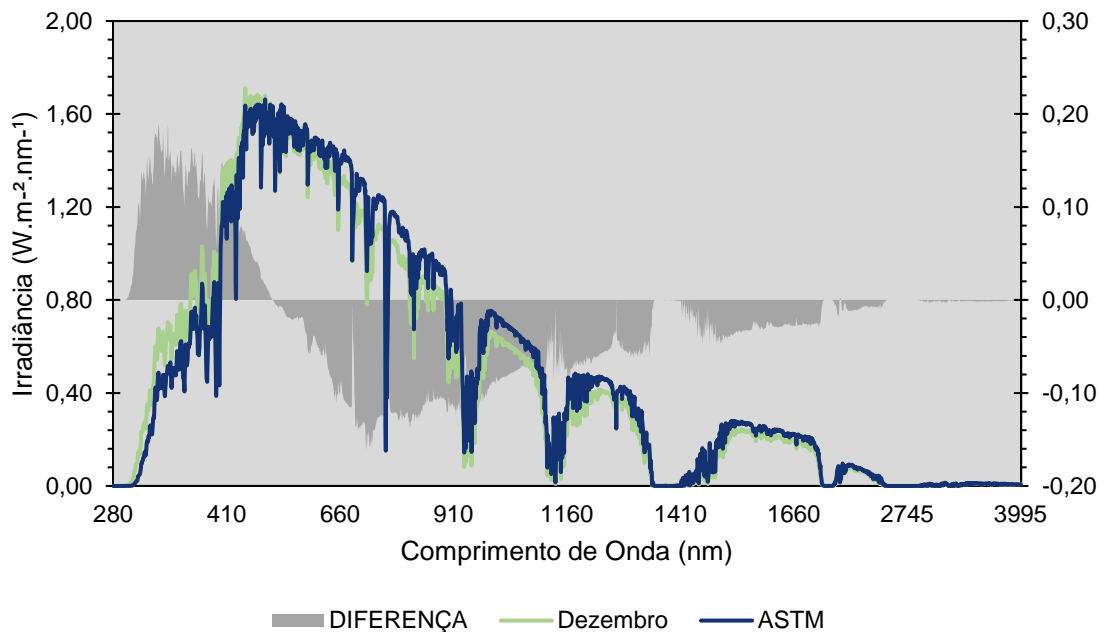
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 18. Espectro da radiação solar para o mês de novembro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 19. Espectro da radiação solar para o mês de dezembro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



Fonte: elaborado pelo autor

Quando comparado o espectro da radiação solar entre a cidade de Araranguá/SC e a norma ASTM G-173, é possível observar diferenças negativas nos

demais comprimentos de onda. Essas disparidades podem ser explicadas pelas características das componentes atmosféricas que atuam nessas faixas de onda. Durante os meses de verão, o vapor d'água apresenta uma diferença média de 32,53%. Essa componente atmosférica possui uma capacidade significativa de absorver radiação, tanto na faixa do comprimento de onda infravermelho quanto em outras faixas do espectro eletromagnético.

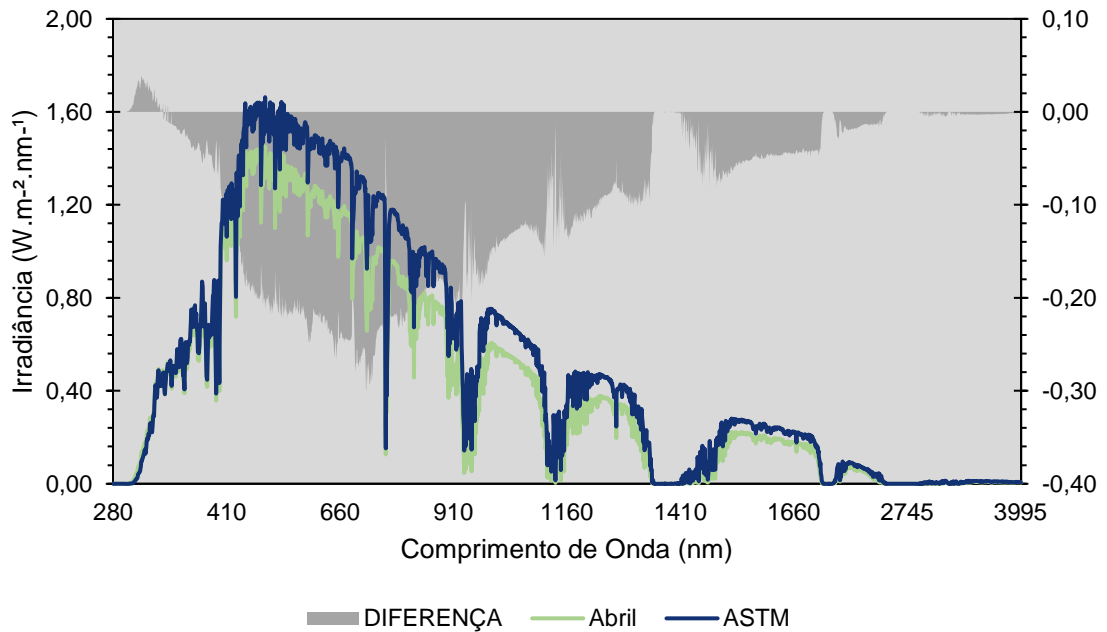
Além do vapor d'água, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e os aerossóis também contribuem para a absorção do espectro infravermelho. Os aerossóis, em particular, atuam desde os comprimentos de onda curtos na faixa do ultravioleta até as ondas longas próximas de 200 nm. Esses componentes atmosféricos, juntamente com o vapor d'água, influenciam a distribuição da radiação solar em diferentes comprimentos de onda, resultando nas diferenças observadas entre o espectro da cidade de Araranguá e a norma ASTM G-173.

As figuras de 20 a 25 apresentam o espectro da radiação solar na cidade de Araranguá/SC durante os meses de outono e inverno, períodos caracterizados por uma menor disponibilidade de radiação devido à inclinação do planeta em relação ao sol. Os dados climáticos coletados para gerar esses espectros revelaram diferenças percentuais semelhantes às observadas nos meses de verão em comparação com os dados do espectro de referência (norma ASM G-173). No entanto, os espectros gerados para a cidade de Araranguá/SC exibem diferenças que chegam a aproximadamente -0,5, como é o caso do mês de junho.

Essas diferenças são notadas em quase todas as faixas de comprimento, mas são mais pronunciadas nos comprimentos que abrangem o espectro visível, de 400 nm a 700 nm. Essas discrepâncias podem ser atribuídas ao modelo utilizado no software SMARTS para caracterizar as condições climáticas de localidades subtropicais durante os meses de inverno. É importante considerar que esse modelo pode não capturar com precisão as variações atmosféricas específicas de Araranguá nessa estação do ano, o que pode levar a desvios nos espectros simulados.

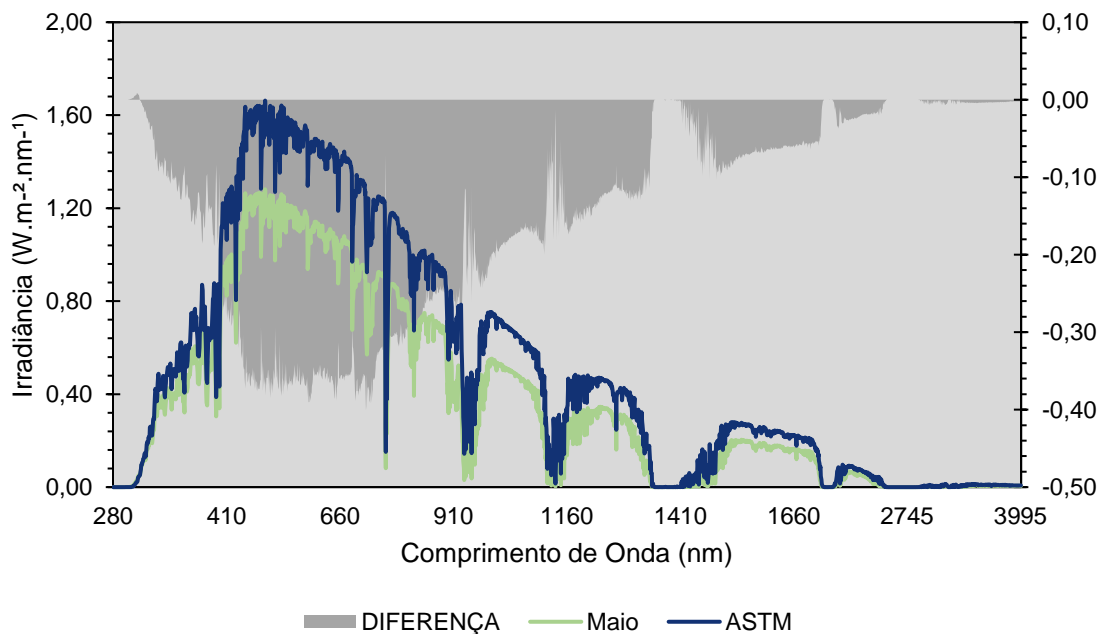
É importante ressaltar que menores faixas de espectro da radiação correspondem a menor irradiação disponível para a conversão da energia solar em elétrica, isso pode ser observado na figura 9 que retrata a geração de energia de um SFCR para Araranguá/SC. É visível que nos meses de outono e inverno a geração de energia é menor justamente devido as características climáticas das estações, caracterizadas por períodos de menor incidência solar.

Figura 20. Espectro da radiação solar para o mês de abril em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



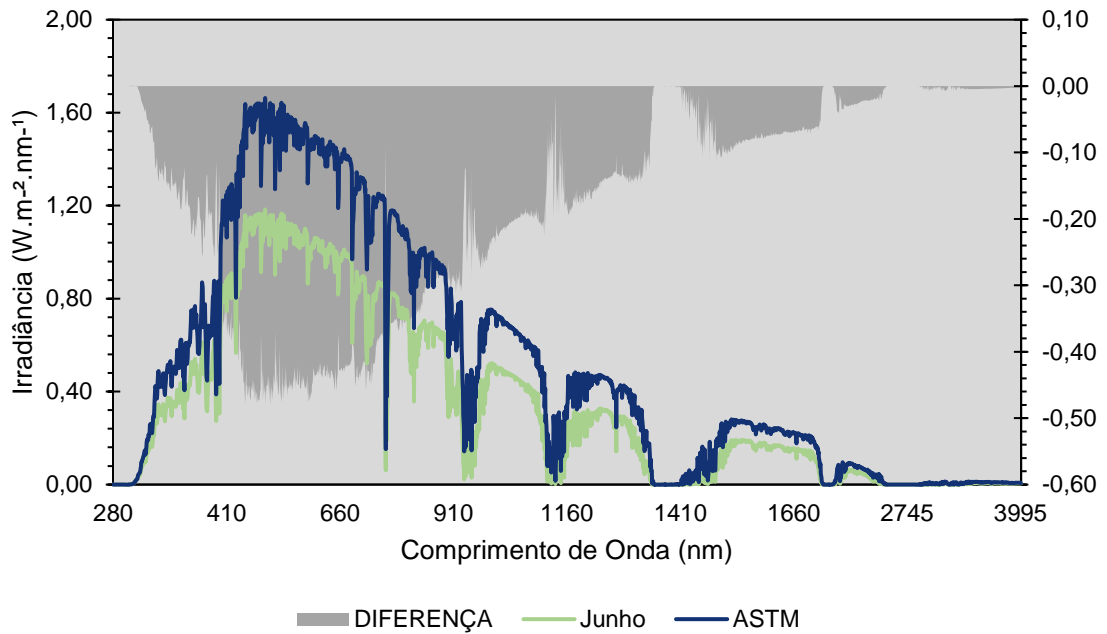
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 21. Espectro da radiação solar para o mês de maio em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



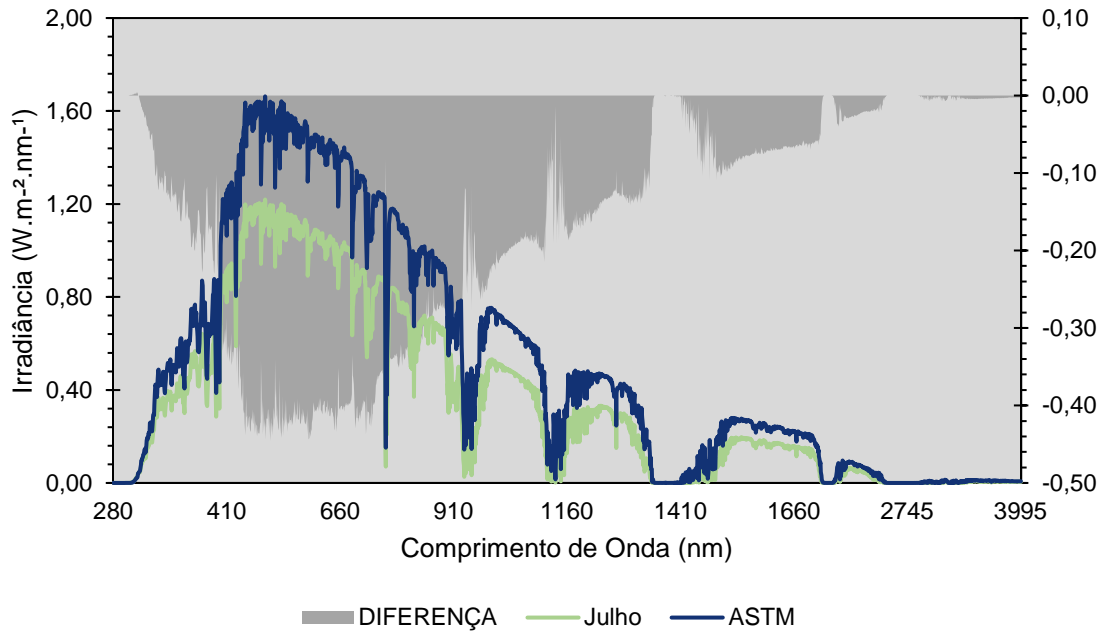
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 22. Espectro da radiação solar para o mês de junho em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



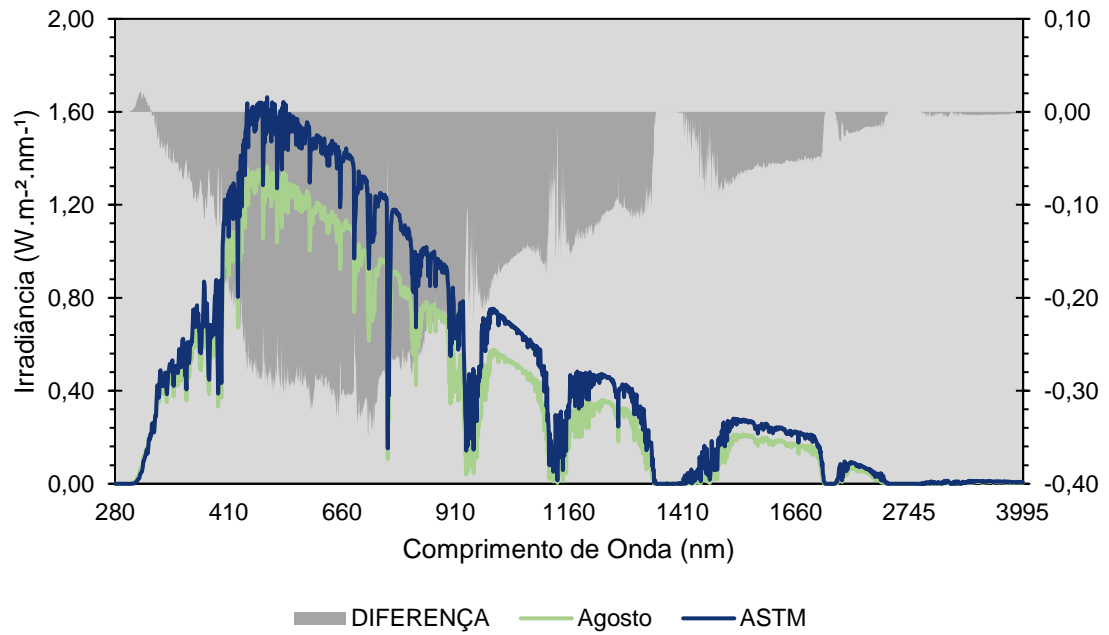
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 23. Espectro da radiação solar para o mês de julho em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



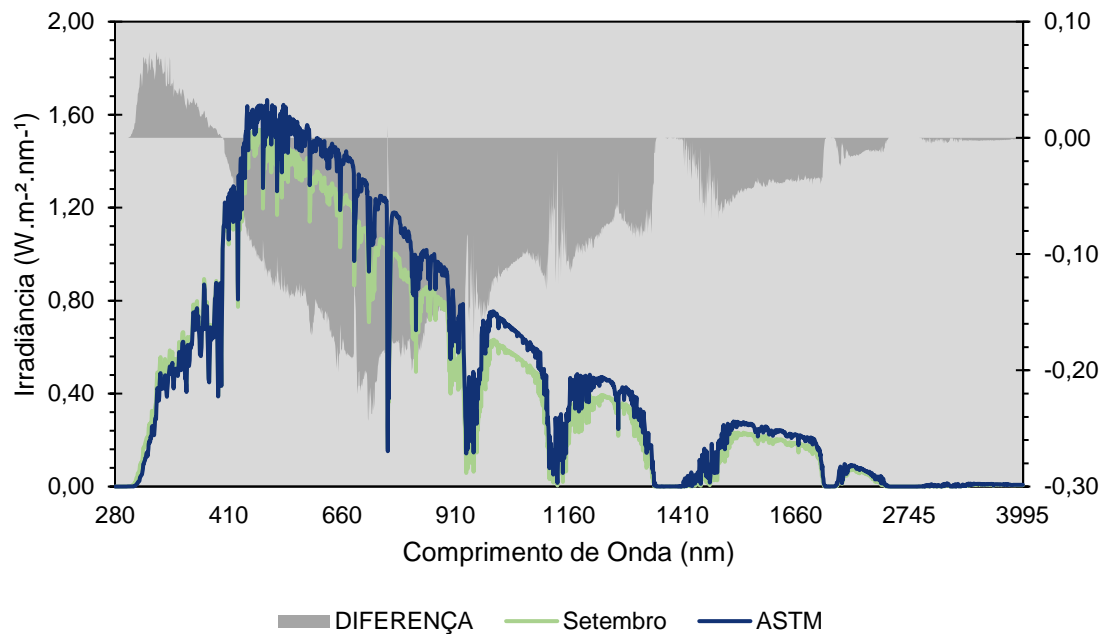
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 24. Espectro da radiação solar para o mês de agosto em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 25. Espectro da radiação solar para o mês de setembro em comparação com o espectro solar da norma ASTM G-173.



Fonte: elaborado pelo autor

## 5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR

Os resultados da regressão linear são apresentados nas figuras de 26 a 37, expressos por meio das equações das retas e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), fornecem informações sobre a relação entre a ASTM G-173 e os espectros gerados para cada mês. Para janeiro, a equação da reta é  $y = 0,9484x - 0,0053$ , com um  $R^2$  de 0,9821. Esses valores indicam que aproximadamente 98,21% da variabilidade do espectro em janeiro para a cidade de Araranguá/SC pode ser explicada pela ASTM G-173.

Esses padrões se mantêm consistentes ao longo dos meses subsequentes, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) elevados, variando de 0,9825 em novembro a 0,9937 em junho e julho e apresentando uma tendência linear.

Observa-se que durante os meses de inverno junho e julho, independente das diferenças observadas na análise da distribuição espectral, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) ainda são relativamente altos, além do comportamento linear da regressão, indicando uma relação entre os espectros gerados pelo software SMARTS 2 e a referência ASTM G-173. Isso sugere que, mesmo durante o inverno, quando a cidade apresenta menor quantidade de recurso solar disponível, a norma de referência pode ser utilizada como base para caracterizar o espectro de Araranguá/SC.

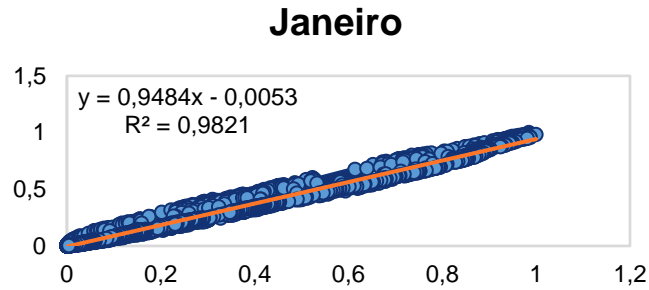
As discrepâncias observadas podem ser atribuídas a diferenças nas condições atmosféricas específicas da região durante os meses de inverno e outono. Fatores como a presença de nebulosidade, umidade, concentração de aerossóis e características da atmosfera podem afetar a transmissão e absorção da radiação solar, resultando em espectros de radiação ligeiramente diferentes dos esperados pela norma ASTM G-173.

O software SMARTS 2 é uma ferramenta amplamente utilizada para a geração de espectros de radiação solar, mas pode haver limitações em sua capacidade de modelar com precisão todas as condições atmosféricas. Essas limitações podem levar a discrepâncias nos dados gerados, especialmente em situações específicas, como durante os meses de inverno e primavera.

Além das condições atmosféricas, fatores específicos da região, como a topografia local, a vegetação circundante e a proximidade de corpos d'água, podem

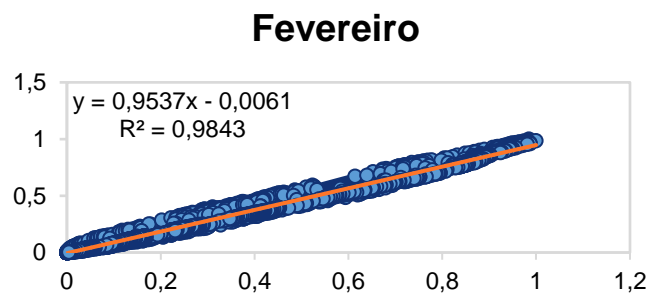
influenciar os espectros de radiação solar. Essas variáveis podem interagir com as características climáticas da região, causando discrepâncias nos dados gerados pelo software SMARTS 2 em relação à norma ASTM G-173.

Figura 26. Regressão linear para o mês de janeiro.



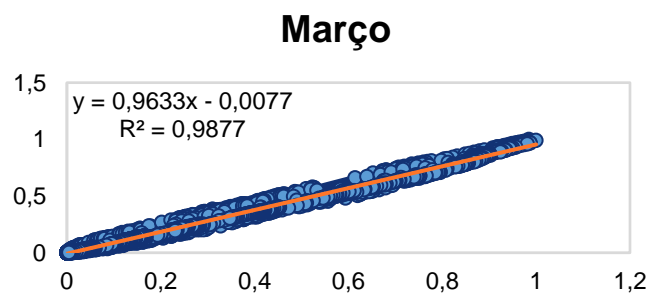
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 27. Regressão linear para o mês de fevereiro.



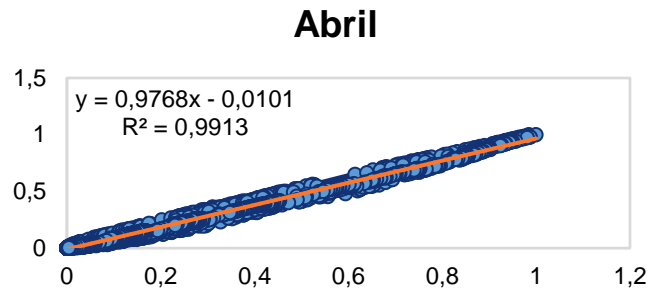
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 28. Regressão linear para o mês de março.



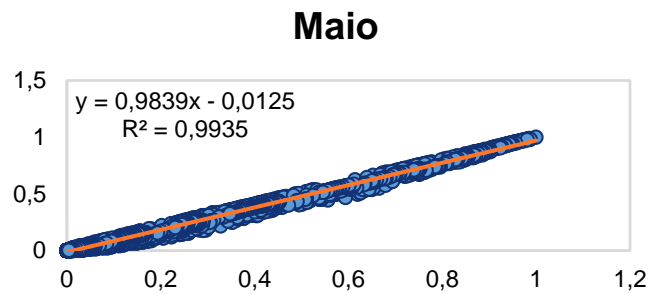
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 29. Regressão linear para o mês de abril.



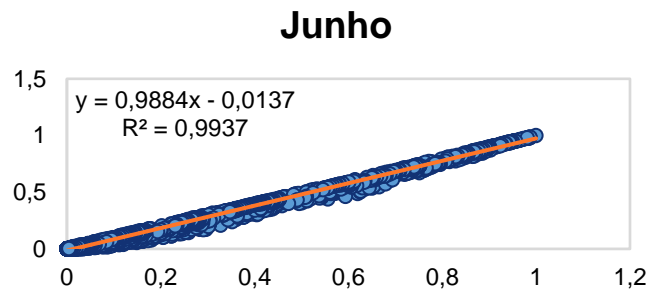
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 30. Regressão linear para o mês de maio.



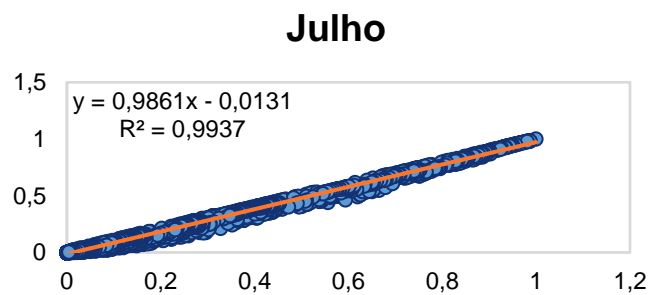
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 31. Regressão linear para o mês de junho.



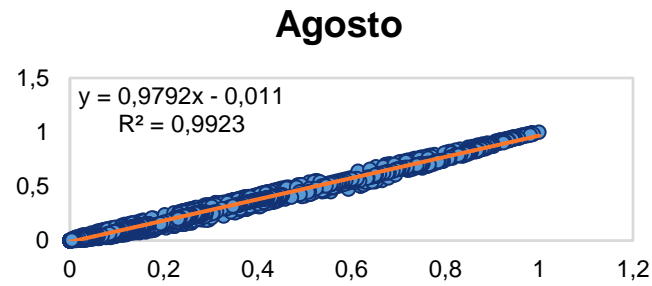
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 32. Regressão linear para o mês de julho.



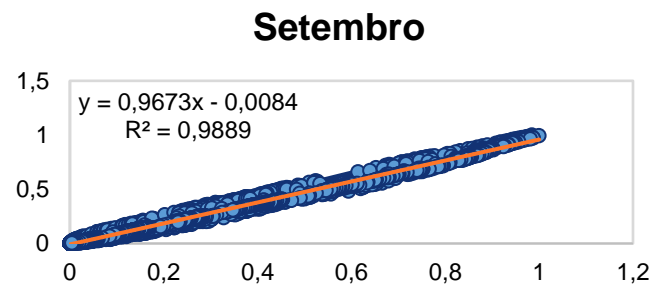
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 33. Regressão linear para o mês de agosto.



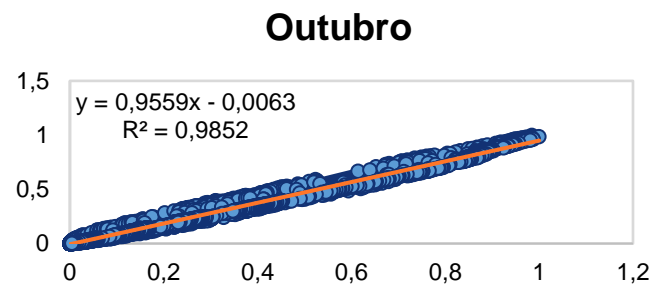
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 34. Regressão linear para o mês de setembro.



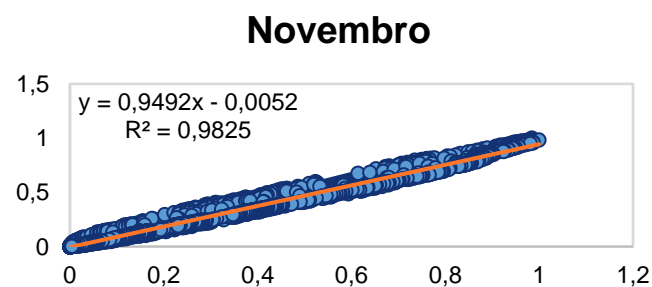
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 35. Regressão linear para o mês de outubro.



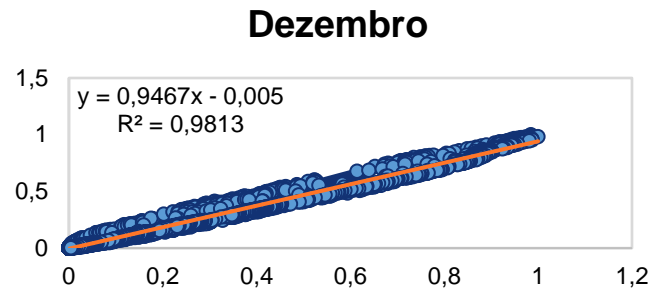
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 36. Regressão linear para o mês de novembro.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 37. Regressão linear para o mês de dezembro.



A figura 38 e tabela 8 dão continuidade à análise dos dados utilizados na geração do perfil do espectro da radiação solar ao longo de um ano. O box plot apresentado fornece informações relevantes acerca da qualidade dos dados empregados. Antes de gerar o referido gráfico, procedeu-se à normalização dos dados em uma escala comum, com a finalidade de evitar distorções e discrepâncias nos intervalos de valores. A análise do box plot constata que apesar das limitações do software SMARTS 2 na geração dos dados do espectro da radiação solar, sobretudo durante os meses de inverno, o conjunto de dados não exhibe a presença de *outliers*, isto é, pontos que se distanciam de forma acentuada dos demais.

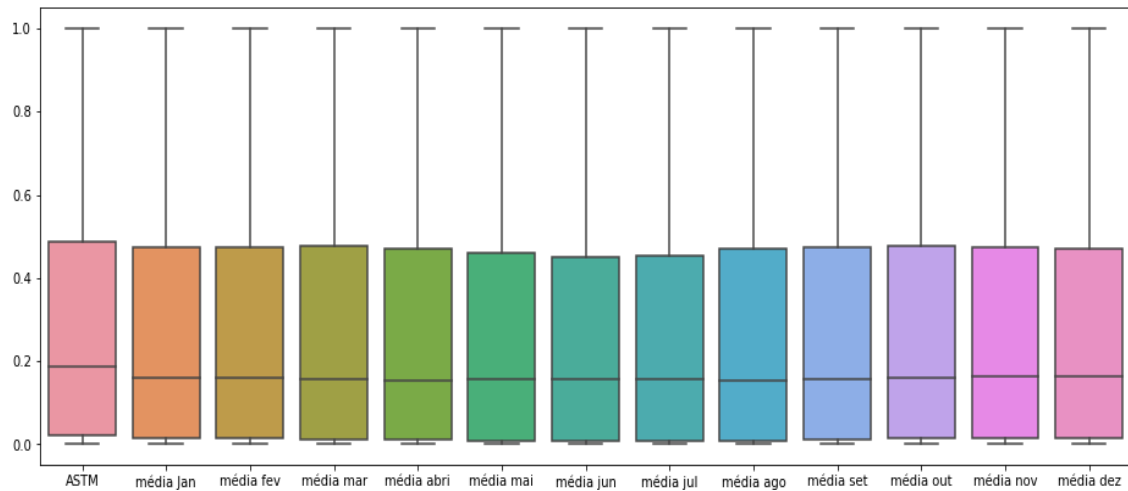
A análise comparativa entre os dados modelados pelo software SMARTS 2 e da norma ASTM revela percepções relevantes sobre a qualidade e a precisão da modelagem do espectro da radiação. Ao examinar a distribuição dos quartis e a mediana, verificamos que em todos os casos, os valores modelados pelo SMARTS 2 se aproximam ASTM, com medianas alinhadas, quartis inferiores e superiores alinhados, indicando que o software é capaz de capturar corretamente as características do espectro de radiação durante o decorrer de um ano.

Tabela 8: Análise descritiva dos dados normalizados de box plot.

	ASTM	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Média</b>	0,30	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28
<b>Desvio Padrão</b>	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29
<b>Mínimo</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>25%</b>	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
<b>50%</b>	0,19	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16
<b>75%</b>	0,49	0,47	0,47	0,48	0,47	0,46	0,45	0,45	0,47	0,47	0,48	0,47	0,47
<b>Máximo</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 38. Box plot dos dados normalizados do espectro da radiação.



Fonte: elaborado pelo autor

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo apresentar uma análise de desempenho energético de um sistema fotovoltaico de 0,99 kWp instalado em uma planta piloto bioclimática ao longo de dois anos de 2021 e 2022 a partir dos dados obtidos da plataforma de monitoramento do inversor. Além disso, o trabalho objetiva apresentar a análise da distribuição espectral da radiação solar sobre a cidade de Araranguá (SC) obtido com o software SMARTS 2 e comparação com o espectro da norma ASTM G-173. Utilizando uma abordagem metodológica adequada, foram aplicados indicadores de desempenho de energia elétrica e análise estatística dos dados obtidos, visando obter uma compreensão mais aprofundada sobre a energia solar na cidade de Araranguá (SC).

Ao longo deste trabalho, foram discutidos e analisados os resultados obtidos, que revelaram os meses de verão como os mais influentes para a geração de energia elétrica com uma média de 140 kWh e os meses de inverno como esperado devido a menor disponibilidade do recurso solar como o período de menor influência de geração, apresentando uma média de 109 kWh. Através da análise dos indicadores de desempenho energético foi possível concluir que o sistema opera dentro do esperado quando comparado a outros estudos que envolveram sistemas fotovoltaicos e os mesmos indicadores, com a média do fator de capacidade ao longo do ano em cerca de 17%, além disso, a análise do espectro da radiação para a cidade de Araranguá/SC através do software SMARTS 2, demonstrou a capacidade desse

software para descrever o comportamento do espectro no hemisfério sul do planeta. Esses dados quando foram comparados com o espectro da norma ASTM G-173 demonstraram uma boa eficácia, considerando que não foram encontrados *outliers* na análise do *box plot* dos dados e a regressão linear demonstrou valores de  $R^2$  que variam de 0,98 a 0,99 mostrando que a regressão se ajusta aos dados obtidos, confirmando assim além da análise visual que o comportamento do sistema é linear. Essas descobertas foram consistentes com as expectativas iniciais e demonstraram a importância de conhecer o recurso que está sendo utilizado como fonte geradora de energia.

Os resultados obtidos contribuem significativamente para a área de estudo, fornecendo material científico que demonstra a abundância do recurso solar presente no território brasileiro, bem como métodos de análise da energia gerada por sistemas fotovoltaicos com foco em indicadores que podem ser utilizados para realizar comparações em sistemas instalados em qualquer lugar do planeta, independente da tecnologia das células e capacidade instalada, além de um método como custo zero para analisar o espectro da radiação solar através de um software de acesso público. Essas contribuições têm o potencial de difundir e ampliar o conhecimento científico em cima de tecnologias renováveis e influenciar outras áreas a detalharem localmente a qualidade dos recursos renováveis utilizados para a geração de energia, excluindo assim a necessidade de extrapolar as informações disponíveis em portais e atlas de energia.

É importante mencionar que, embora os resultados tenham sido promissores, este estudo apresentou algumas limitações. Para obter uma curva do espectro da radiação de maior qualidade se faz necessária a utilização de dados mais atualizados, visto que algumas bases têm cerca de 20 ou mais anos e considerando que tanto a infraestrutura da cidade, quanto o próprio clima e vegetação sofreram alterações ao longo dos anos. Estas alterações podem resultar em um cenário diferente, visto que estas alterações têm impacto na atmosfera da cidade. No entanto, essas limitações oferecem oportunidades para pesquisas futuras, tais como o rastreamento do espectro da radiação solar através de sistemas fotovoltaicos integrados a sistemas de computação embarcada como o arduino para a leitura dos dados do espectro da radiação no período de um ano ou mais, resultando assim em dados mais condizentes com a atmosfera da cidade.

Em suma, esta pesquisa proporcionou uma visão aprofundada sobre o espectro da radiação solar e a análise de indicadores de desempenho de sistemas fotovoltaicos, fornecendo contribuições valiosas para a área de estudo. Espera-se que este estudo estimule e inspire pesquisadores a continuarem investigando a área de energias renováveis e a explorarem ainda mais suas implicações. A compreensão adquirida ao longo deste trabalho pode servir de base para futuros avanços e aplicações práticas, contribuindo assim para o desenvolvimento e aprimoramento contínuo nessa área de conhecimento.

## REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 30 maio 2023.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 482 de 17 de Abril de 2012. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 25 out. 2022.

BARKER, P. P. Photovoltaics support distribution feeder. Electric Light & Power, Vol, 1997

BELISKI, Letícia Mara. ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM UNIDADES PROSSUMIDORAS RESIDENCIAIS. 2017. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2017.

BADRA, Mateus. Lei 14.300: fator de simultaneidade e regras para solicitação de acesso. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/lei-14-300-fator-de-simultaneidade-e-regras-para-solicitacao-de-acesso/>. Acesso em: 06 jul. 2023.

Brasil. Mauricio Tiomno Tolmasquim. EPE. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

BRASIL. Lei Nº 14.300, de 6 de Janeiro de 2022. Brasília, 6 jan. 2022.

BRASIL. Projeto de Lei Nº 5829, de 2019. Brasília, 24 ago. 2021.

CANAL SOLAR. O que é geração distribuída de energia elétrica? Disponível em: <https://canalsolar.com.br/o-que-e-geracao-distribuida-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 07 nov. 2022.

DAGOSTIN, Carla Silva. ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO SOLAR PARA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA EM PORTO ALEGRE. 2021. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

Engenharia Mecânica, Unisinos, São Leopoldo, 2010.

EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 20 set. 2022

FIORIN, Daniel V. et al. Aplicações de redes neurais e previsões de disponibilidade de recursos energéticos solares. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 1, pp.01-20, mar. 2011. FapUNIFESP.

FUSANO, Renato Hideo. Análise Dos Índices De Mérito Do Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Do Escritório Verde Da Ufpr. 2013. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

GASPARIN, F. P.; BÜHLER, A. J.; KRENZINGER, A. Análise da importância do fator de descasamento espectral na caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos. Congresso Brasileiro de Energia Solar, 4 e Conferência Latino-americana da ISES, 5. São Paulo. 2012.

GINN, J. et al. Photovoltaics as distributed energy resource. NCPV and Solar Program Review Meeting, NREL/CD 520-33586, 2003.

GIS, Solar. Photovoltaic Power Potential Brazil. Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>. Acesso em: 25 nov. 2022.

HAAG, Rafael; KREZINGER, Arno. ESPECTRO SOLAR CARACTERÍSTICO PARA A REGIÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, v. 6., 2016, Belo Horizonte.

KORMANN, L. et al. “Desenvolvimento de Mapas de Avaliação do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos em Diferentes Ângulos de Inclinação e de Azimute”, ASADES, v. 18, p. 04.01-04.08, 2014.

Kumar, M., Kumar, A. Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 78, 2017, Pages 554-587, ISSN 1364-0321. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.083.

Lorenzo, E. Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos, Electricidad Solar Fotovoltaica, V. II, Espanã, 2006.

Macagnan, M. H. Introdução a Radiação Solar. Programa de Pós-Graduação em MACHADO, Andriele Bratti. ANÁLISE TEMPORAL E ESPACIAL DE INDICADORES DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM OPERAÇÃO NO SUL DE SANTA CATARINA. 2019. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019.

Mello, Arthur Durigon; Rampinelli, Giuliano Arns. DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE MÉRITO PARA AVALIAR O DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE. VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, v.6., 2016, Belo Horizonte.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2031. Brasília: MME, 2022.

NASCIMENTO M. A. P. Avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico numa rede elétrica. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Sistemas de potência e Automação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F.L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar.2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, v. 1, p. 47-499, 2014.

Rampinelli, Giuliano Arns. Estudo De Características Elétricas E Térmicas De Inversores Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede. 2010. 285 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ROSSO, André Possamai. Desenvolvimento de células e módulos de referência para medição da radiação solar. 2019. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019

RÜTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

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

SOLAR ENERGY. Solução Residencial de Energia Solar. Disponível em: <http://solarenergy.com.br/energia-solar/residencial/>. Acesso em: 08 nov. 2022. NASA. n.d. Disponível em: . Acesso em: nov. 2022.

SOLAR POWER EUROPE. Global Market Outlook for Solar Power 2022 – 2026),. Europe: Solar Power Europe, 2021.

SOLAR, Nteel. Equipamentos e Instrumentos. Disponível em: Acesso em: 08 nov. 2022.

SOUZA A. C. Análise dos impactos da geração distribuída por fonte solar fotovoltaica na qualidade da energia elétrica. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

SOUZA M. E. M. Inserção de microgeração distribuída nas redes de baixa tensão: implantação de telhados solares – estudo de caso real. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

STANDARDS COMMITTEE. IEC 61724: 1998: Photovoltaic system performance monitoring - Guidelines for measurement, data exchange and analysis. London: British Standard, 1998. 20 p.

WALLACE, J. M. ; HOBBS, P. V. Atmospheric science: an introductory survey. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2006.

## ANEXO A – Código em Python Para a Normalização dos Dados do Espectro da Radiação, Regressão Linear e Gráfico Box Plot

```
import pandas as pd
import statsmodels.api as sm
from matplotlib import pyplot as plt
import seaborn as sns

#biblioteca para normalização
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler

df = pd.read_excel("dados_regressão.xlsx")
display(df)

#análise do resumo das medidas
df.describe()

#criando objeto para normalizar dados
obj_normaliza = MinMaxScaler().fit(df)

#Aplicando a normalização
df_normaliza = obj_normaliza.transform(df)

#vizualizando dados normalizados
df_normaliza

#Transformando para dataframe e nomeando as colunas
df_normaliza = pd.DataFrame(df_normaliza)
```

```
df_normaliza.columns = ['Wvlgth', 'média Jan', 'média fev', 'média mar', 'média  
abri', 'média mai', 'média jun', 'média jul', 'média ago', 'média set', 'média out',  
'média nov', 'média dez']
```

```
#vizualizando os dados padronizados
```

```
df_normaliza
```

```
#gráfico box plot
```

```
plt.figure(figsize=(16,6))
```

```
ax = sns.boxplot(data=df_normaliza)
```

```
df.columns
```

```
Y = df_normaliza[['Wvlgth']]
```

```
X = df_normaliza[['média Jan', 'média fev', 'média mar', 'média abri',  
                 'média mai', 'média jun', 'média jul', 'média ago', 'média set',  
                 'média out', 'média nov', 'média dez']]
```

```
#Regressão linear pelo método dos mínimos múltiplos quadrados
```

```
est = sm.OLS(Y,X).fit()
```

```
est.summary()
```

## ANEXO B – Código em Python Para O Tratamento Dos Dados De Geração de Energia

```
#Importando bibliotecas para o tratamento de dados
import pandas as pd
from glob import glob

#Empilhamento dos arquivos diários de geração de energia
arquivos = sorted(glob(r"C:\INDIQUE O CAMINHO DA PASTA\*.xls"))
arquivos

#Unindo todos os arquivos excel em um único dataframe
arquivos_unidos = pd.concat((pd.read_excel(cont) for cont in arquivos))
arquivos_unidos

#Colocando o índice em ordem contínua
arquivos_unidos = pd.concat((pd.read_excel(cont) for cont in arquivos),
ignore_index=True)
arquivos_unidos

#Alterando o nome das colunas sem nome 0 e 1
arquivos_unidos.columns = ['Data/Hora', 'Potência']
arquivos_unidos

#Localizando linhas na coluna de potência que não são valores numéricos
arquivos_unidos.loc[arquivos_unidos['Potência']!='UFSC']

#Excluindo valores não numéricos da coluna potência
data_tratamento= arquivos_unidos.drop([ESCREVA O NÚMERO DAS
LINHAS CONTENTO VALORES NÃO NUMÉRICOS], axis = 0)
```

```
#Localizando valores não numéricos na coluna potência
data_tratamento.loc[data_tratamento['Potência']!='Potência(W)']
```

```
#Excluindo valores não numéricos na coluna potência
data_tratamento2 = data_tratamento.drop([ESCREVA O NÚMERO DAS
LINHAS CONTENTO VALORES NÃO NUMÉRICOS ], axis=0)
```

```
#Alterando o tipo de variável da coluna potência de object para inteiro e
multiplicando a coluna para que os dados estejam em kwh
data_tratamento2['Potência'] = data_tratamento2['Potência'].astype(int)
data_tratamento2['Potência'] = data_tratamento2['Potência']*(1/12)
data_tratamento2.dtypes
```

```
#Separando a coluna data/hora em duas colunas, Data e Hora
data_tratamento3=data_tratamento2
data_tratamento4[['Data', 'Hora']] = data_tratamento2['Data/Hora'].str.split(
',expand=True)
data_tratamento3
```

```
#Excluindo coluna Data/Hora
data_tratamento3.drop('Data/Hora', axis=1)
```

```
#Alterando o tipo de dados da coluna Data/Hora de object para data
data_tratamento3['Data'] = data_tratamento3['Data'].astype('datetime64')
```

```
#Excluindo coluna Data/Hora em uma nova variável
data_final = data_tratamento3.drop('Data/Hora', axis=1)
```

```
#Exportando o dataframe para um arquivo excel
data_final.to_excel('ESCREVA O NOME DO ARQUIVO.xlsx')
```