INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

ELISARDO DO PRADO PORTO

ESTUDO DO EFEITO DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS NA EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

FLORIANÓPOLIS

2023

ELISARDO DO PRADO PORTO

ESTUDO DO EFEITO DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS NA EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Clima e Ambiente do Campus Florianópolis do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Mestre em Clima e Ambiente.

Orientador: Prof. D.Sc. Cássio Aurélio Suski

FLORIANÓPOLIS

2023

CDD 621.47
P853e

Porto, Elisardo do Prado
Estudo do efeito dos elementos meteorológicos na eficiência da geração de energia elétrica em células fotovoltaicas - [DIS] / Elisardo do Prado Porto; orientação de Cássio Aurélio Suski; – Florianópolis, 2023.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Fotovoltaico. 2. Energia solar. 3. Clima e ambiente. 4. Elementos meteorológicos. 5. Gases de efeito estufa. I. Suski, Cássio Aurélio. II. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues - CRB 14/1117

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE

Aluno (a): Elisardo do Prado Porto

Titulo:	**ESTUDO DO EFEITO DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS NA EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente

Dr(a). *Cássio Aurélio Suski*

gov.br Documento assinado digitalmente
CASSIO AURELIO SUSKI
Data: 04/09/2023 10:22:33-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientador(a) / Presidente / IFSC / Itajaí – SC
Participação: (x) Presencial ( ) Videoconferência
(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dr(a). Adriano Vitor

gov.br Documento assinado digitalmente
ADRIANO VITOR
Data: 04/09/2023 09:44:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC
Participação: (x) Presencial ( ) Videoconferência
(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dr(a). *Michel Nobre Muza*

IFSC Documento assinado digitalmente
MICHEL NOBRE MUZA
Data: 01/09/2023 17:54:16-0300
CPF: 977.090.260-87
Verifique as assinaturas em https://v.ifsc.edu.br

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC
Participação: (x) Presencial ( ) Videoconferência
(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dr(a). *Sergio Augusto Bitencourt Petrovcic*

IFSC Documento assinado digitalmente
SERGIO AUGUSTO BITENCOURT PETROVCIC
Data: 04/09/2023 09:58:28-0300
CPF: 026.649.159-67
Verifique as assinaturas em https://v.ifsc.edu.br

Avaliador(a) Externo / IFSC / Itajaí - SC Participação:
( ) Presencial (x) Videoconferência
(x) Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:
( ) maioria simples

(x) *unanimidade*

Itajaí, 30 de agosto de 2023.

Dedico à minha amada esposa, Valeria.
Você tem sido meu pilar de força, meu apoio
incondicional e minha fonte constante de inspiração.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que apoiaram a realização desta dissertação de mestrado. Sem o apoio e incentivo de vocês, este trabalho não teria sido possível.

Quero agradecer à minha amada esposa, Valéria, e à minha querida filha, Luiza, pelo amor incondicional, paciência e compreensão ao longo dessa jornada. Vocês foram minha fonte de motivação e força, e sou grato por ter vocês ao meu lado.

Desejo estender meus agradecimentos ao meu orientador, Cássio, pela sua orientação, sabedoria e dedicação em me ajudar a desenvolver este estudo. Suas sugestões valiosas e apoio contínuo foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Também sou muito grato aos professores Mario e Adriano, cujos conhecimentos e feedback foram essenciais para o aprimoramento desta dissertação. Suas contribuições críticas e percepções moldaram significativamente o conteúdo final.

Gostaria de agradecer aos meus colegas, Sergio, Rafael, Bernardo, Yhur e Pozas. Nossa troca de ideias, discussões e colaboração mútua foram enriquecedoras. Suas perspectivas e experiências únicas toleradas para um ambiente de aprendizado estimulante.

Não posso deixar de mencionar meus queridos pais, Elizardo e Elisa. Agradeço por sempre acreditarem em mim e por serem minha base de apoio durante toda a minha vida acadêmica. Seu amor, incentivo e encorajamento foram fundamentais para minha conquista.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todas as outras pessoas que, de alguma forma, toleraram para as realizações deste trabalho, mas que não foram especificamente mencionados. Seu apoio e encorajamento foram essenciais para minha jornada. A todos vocês, meu sincero obrigado! Este trabalho não é apenas meu, mas também de cada um que esteve presente em minha vida durante essa fase desafiadora. Espero que este seja apenas o começo de uma jornada de descobertas e contribuições expressas para a área em que estamos inseridos.

Pessoas me disseram que eu não seria capaz de muitas coisas…
Mas DEUS chegou e sussurrou em meu ouvido: Eu te capacito!
(Autor desconhecido, s/d)

RESUMO

A produção de energia elétrica limpa, que não agride sistemas ambientais, tem sido uma das principais corridas globais. As faixas de radiação ultravioleta, enviadas através da radiação solar, que podem ser captadas por células fotovoltaicas e transformam a radiação em energia elétrica, tornam o sol na fonte mais promissora para suprir as necessidades elétricas dos seres humanos. O clima tem uma considerável importância na captação de energia solar, pois a eficiência de um sistema de células está relacionada diretamente com as condições climáticas locais. O presente estudo tem por objetivo analisar a influência dos elementos meteorológicos na eficiência da geração de energia fotovoltaica e seu efeito climático com a redução de gases de efeito estufa. A metodologia se baseia na mensuração da geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas, na compilação dos elementos meteorológicos e temperatura de placa, no estudo da relação entre a geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas e os demais parâmetros e no levantamento dos parâmetros para melhoria da eficiência da geração de energia limpa. Os resultados mostram uma relação entre a geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas e os demais parâmetros, proporcionando uma geração média 15% mais alta em direções de vento entre 330° e 360°, bem como possibilitam uma alternativa de redução de até 4,7% da emissão de gases de efeito estufa por meio da ampliação da geração de energia fotovoltaica e redução da geração de energia por hidrelétricas e termelétricas, que atualmente se posicionam como as maiores fontes no Brasil.

Palavras-Chave: Fotovoltaico, Energia solar, Clima e ambiente, Elementos meteorológicos, Gases de efeito estufa.

ABSTRACT

The production of clean electricity, which does not harm environmental systems, has been one of the main global races. The ranges of ultraviolet radiation, sent through sunlight, which can be captured by photovoltaic cells and transform light into electrical energy, make the sun the most promising source to supply the electrical needs of human beings. The climate is of considerable importance in capturing solar energy, as the efficiency of a cell system is directly related to local climate conditions. The present study aims to analyze the influence of meteorological elements on the efficiency of photovoltaic energy generation and its climatic effect. The methodology is based on measuring the generation of electricity by means of photovoltaic cells, in the compilation of meteorological elements and plate temperature, in the study of the relationship between the generation of electricity by means of photovoltaic cells and the other parameters and in the survey of parameters for improving the efficiency of clean energy generation. The results show a relationship between the generation of electricity through photovoltaic cells and the other parameters, providing an average generation 15% higher in wind directions between 330 and 360°, as well as enabling an alternative reduction of up to 5, 3% of the emission of greenhouse gases through the expansion of photovoltaic energy generation and reduction of energy generation by hydroelectric and thermoelectric plants, which are currently positioned as the largest sources in Brazil.

Key words: Photovoltaic, Solar energy, Climate and environment, Meteorological elements, Greenhouse gases.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentual da potência instalada nos empreendimentos geradores em operação no Brasil em 2022.....22
Figura 2 - Percentual da potência instalada das termelétricas em operação no Brasil por tipo de combustível em 2022. 23
Figura 3 - Perfil esquemático de uma usina de energia nuclear.....31
Figura 4- Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil.....41
Figura 5 - Eficiência e no desempenho das células fotovoltaicas 44
Figura 6 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício. 45
Figura 7 - Localização do município de Itajaí. 65
Figura 8 - Kit gerador de energia solar. 70
Figura 9 - Conjunto de células.....70
Figura 10 - Estação meteorológica.....71
Figura 11 - Esquema de instalação de sensores. 72
Figura 12 - Gráficos de dispersão com linha de tendência 79
Figura 13 - Gráficos de dispersão com linha de tendência de 330° a 360° 79
Figura 14 - Intervalo de confiança para geração de energia dividindo os dados em quadrantes 83
Figura 15 Emissão de gases por decomposição anaeróbia de matéria orgânica dos reservatórios de hidrelétricas. 89
Figura 16 - Equipamento de geração de energia fotovoltaica e coleta de variáveis meteorológicas. 93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual da potência instalada nos empreendimentos geradores em operação no Brasil em 2022.....22
Tabela 2 - Percentual da potência instalada das termelétricas em operação no Brasil por tipo de combustível em 2022. 23
Tabela 3 - Energia por combustível (kWh). 57
Tabela 4 - Distribuição da potência instalada das termelétricas em operação no Brasil por tipo de combustível em 2023. 58
Tabela 5 - Consumo por unidade de combustível utilizado em termelétrica. 58
Tabela 6 - Poder Calorífico Inferior (PCI) de combustíveis fósseis e biomassa. 59
Tabela 7 - Relação entre a geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas e os demais parâmetros 73
Tabela 8 - Cenários propostos para análise da emissão de gases de efeito estufa em percentual.....75
Tabela 9 - Capacidade de produção em relação a área inundada. 75
Tabela 10 - Fatores de emissão de GEE das fontes de geração. 76
Tabela 11 - Valores médios (dados gerais) dos parâmetros analisados 79
Tabela 12 - Correlações de geração com os demais parâmetros 80
Tabela 13 - Valores médios dos parâmetros analisados no terceiro quartil em relação à direção do vento. 80
Tabela 14 - Valores médios dos parâmetros analisados no terceiro quartil em relação à direção do vento entre 300° e 360°. 81
Tabela 15 - Correlações 1º quadrante de direção de vento (0° a 90°) e geração maior que 175 W 82
Tabela 16 - Correlações 2º quadrante de direção de vento (90° a 180°) e geração maior que 175 W 82

Tabela 17 - Correlações 3º quadrante de direção de vento (180° a 270°) e geração maior que 175 W 82
Tabela 18 - Correlações 4º quadrante de direção de vento (270° a 360°) e geração maior que 175 W 82
Tabela 19 - Correlações para a direção de vento 300° a 360° e geração maior que 175 W 82
Tabela 20 - Correlações para a direção de vento 330° a 360° e geração maior que 175 W 82
Tabela 21 - Geração de energia para cada cenário e cada fonte de geração. 87
Tabela 22 - Emissões de GEE para cada cenário. 87
Tabela 23 - Reduções de combustíveis usados em termelétricas. 88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BP	British Petroleum
CEPAL	Comissão Econômica Para a América Latina e o Caribe
CH4	Metano
CO2	Dióxido de Carbono
CO2eq	Dióxido de Carbono Equivalente
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FASA	Financiamento Para Sistemas de Aquecimento Solar
FMIES	Fundo Municipal de Incentivo à Energia Solar
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Programa Brasileiro de Controle de Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	*Global Warming Potential*
IEA	*International Energy Agency*
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IHA	*International Hydropower Association*
IPCC	Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	*Maximum Power Point Tracking*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
NOAA	*National Oceanic and Atmospheric Administration*
OMS	Organização Mundial da Saúde
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PCCR	Programa Catarinense de Energias Renováveis
PNMC	Plano Nacional Sobre Mudança do Clima
ProGD	Programa de Desenvol. da Geração Distribuída de Energia Elétrica

PROGIRO	Programa Municipal de Incentivo à Geração de Energia Renovável
PROMISE	Programa Municipal de Incentivo à Energia Solar
UGD	Unidades e Geração Distribuída
USB	*Universal Serial Bus*
WMO	*World Meteorological Organization*
DT	Data
H	Hora
GER	Geração de energia elétrica
TP	Temperatura da placa
TA	Temperatura ambiente
VV	Velocidade do vento
DV	Direção do vento
PA	Pressão atmosférica
UM	Umidade relativa do ar
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 OBJETIVOS 21
1.1.1 Objetivo geral 21
1.1.2 Objetivo (s) específico (s) 21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22
2.1 TIPOS E FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA 22
2.1.1 Energia Não-Renovável 23
2.1.2 Energia Renovável 32
2.2 FATORES CLIMÁTICOS 46
2.3 ELEMENTOS METEOROLÓGICOS 48
2.4 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA 53
2.5 IMPACTOS AMBIENTAIS DA GERAÇÃO DE ENERGIA 56
3 METODOLOGIA 65
3.1 ÁREA DE ESTUDO 65
3.2 MENSURAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS 66
3.3 COMPILAÇÃO DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS E TEMPERATURA DE PLACA 73
3.4 RELAÇÃO ENTRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E OS DEMAIS PARÂMETROS 73
3.5 PARÂMETROS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA 74
4 RESULTADOS 78
4.1 MENSURAÇÃO E RELAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM OS DEMAIS PARÂMETROS 78
4.2 PARÂMETROS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA 86

4.2.1 Cálculo das emissões de gases das diversas fontes de geração 86
4.2.3 Cálculo da redução de consumo de combustíveis 88
4.2.3 Cálculo de redução de área de reservatório pela redução da geração em hidrelétricas 88
5 PRODUTOS DESENVOLVIDOS 93
5.1 - Equipamento integrado de geração de energia fotovoltaica e estação meteorológica 93
5.2 - Artigo publicado 94
5.3 - Artigo submetido 94
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 95
REFERÊNCIAS 96

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global e a produção de energia limpa são importantes preocupações relacionadas ao clima e ao meio ambiente. A falta de investimentos, aliado à falta de informações e de projetos práticos por parte do poder público, justifica o lento avanço nas conquistas de energias limpas.

O aumento da temperatura global é potencializado pelas ações antrópicas que interferem no efeito estufa natural do planeta devido ao aumento de emissões de gases de efeito estufa, oriundos da queima de combustíveis fósseis de usinas termelétricas, da decomposição da matéria orgânica que sobra do corte das árvores e do carbono presente no solo alagado pelas hidrelétricas, dentre outras fontes emissoras (SILVA, COLOMBO, 2019).

A energia gerada pelo sol, fonte inesgotável na escala de tempo de existência do planeta Terra, em suas duas principais funções de calor e de luz é, sem dúvida, uma das mais promissoras alternativas energéticas para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano. Quando se fala em energia, deve-se lembrar de que o sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na terra (HAYAT et al., 2018).

Os fatores atmosféricos geralmente observados na produção de energia solar são a nebulosidade, umidade do ar e temperatura ambiente, mas a disponibilidade de radiação solar, que é a energia incidente sobre a superfície terrestre, também é influenciada pela inclinação da terra em relação ao sol que varia durante o decorrer do dia, do mês e do ano (ANEEL, 2008).

A duração da luz solar varia conforme a região do planeta e períodos do ano, especificamente cita-se a questão dos solstícios que ocorrem no polo norte, quando em 21 de dezembro pode chegar até a não existir exposição solar, ou em 21 de junho, quando pode chegar a até 24 horas de exposição solar (RAZA et al., 2019).

Os primeiros estudos sobre o efeito fotovoltaico foram observados em 1839 e aprimorados com uso de outros materiais. Os primeiros grandes avanços nesses estudos ocorreram no período entre os anos 1930 e 1950 do século passado, com a utilização das células fotovoltaicas compostas por cristais de silício que são a base das células atuais (WOLFE, 2018).

O efeito fotoelétrico é um processo físico do elemento que converte luz solar em energia elétrica, sendo que a energia da luz absorvida pela célula fotovoltaica é transferida a seus átomos e elétrons e estes elétrons desprendem-se dos átomos componentes do material semicondutor, gerando a corrente elétrica através do fluxo elétrico ordenado (HANIFI et al., 2018).

Os módulos fotovoltaicos são o conjunto de células fotovoltaicas encapsuladas, cujo objetivo é que as células fiquem protegidas das intempéries e potencializem a produção de energia, principalmente da umidade do ar (KHOLOD et al., 2018).

A geração fotovoltaica pura é aquela que não possui outra forma de geração de eletricidade. Devido ao fato de o sistema gerar eletricidade apenas nas horas de sol, os sistemas autônomos ou off-grid são dotados de acumuladores que armazenam a energia para os períodos sem sol, o que acontece todas as noites, e nos períodos chuvosos ou nublados. Os acumuladores são baterias dimensionadas de acordo com a autonomia do sistema. O Sistemas off-grid da rede elétrica convencional para carregamento de bancos de baterias, necessita de um controlador de carga com tecnologia *MPPT* (JAIN et al., 2021).

No tocante à efetiva participação na geração de energia elétrica no sistema elétrico brasileiro a energia solar apresentou evolução nos últimos anos, com 5,7% em 2016, 7,2% em 2017 e 8,3% em 2018, ou seja, os investimentos em novas unidades geradoras têm sido crescentes (ANEEL, 2018).

No entanto, segundo Matin et al. (2020) apenas 33,33% da energia luminosa incidente nas células fotovoltaicas são absorvidas para a geração de energia elétrica, ou seja, a eficiência de geração das células fotovoltaicas ainda é bastante baixa e influenciada pela temperatura e irradiância solar e, consequentemente, pelos elementos meteorológicos. Apesar disso, são escassos os estudos que avaliam as variáveis meteorológicas que estão relacionadas à eficiência da geração de energia elétrica (MME, 2018).

As condições climáticas são importantes na geração de energia solar, pois o excesso ou falta de alguns fenômenos podem afetar a captação de energia. Um clima com umidade alta e sem vento pode gerar condições de calor excessivos junto às células, o que prejudica a produção energética e, além disso, a umidade pode gerar precipitação e nuvens que encobrem e dificultam a absorção da radiação solar. O vento é um dos elementos primordiais, pois ele movimenta as massas de ar,

empurrando a umidade, as nuvens e resfriando o sistema fotovoltaico (NAVNTOFT et al., 2019).

O presente estudo tem como justificativa a excelente oportunidade de trabalhos de pesquisa para avaliar a influência dos elementos meteorológicos na eficiência da geração de energia elétrica por células fotovoltaicas, visando possibilitar o aumento da participação das centrais solares na geração de energia elétrica. Com esse objetivo, serão analisados, dentre outros assuntos, as principais fontes de geração de energia elétrica, as respectivas emissões de gases de efeito estufa e o impacto dos elementos meteorológicos na geração de energia por células fotovoltaicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência dos elementos meteorológicos na eficiência da geração de energia fotovoltaica e seu efeito climático com a redução de gases de efeito estufa.

1.1.2 Objetivo (s) específico (s)

a. Mensurar a geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas e compilar os dados referentes aos elementos meteorológicos (velocidade e direção do vento, temperatura, umidade relativa do ar, radiação ultravioleta e pressão atmosférica) e temperatura de placa.
b. Possibilitar o estabelecimento da relação entre a geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas, os elementos meteorológicos e a quantidade de GEE.
c. Estabelecer parâmetros para melhoria da eficiência da geração de energia limpa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tipos e fontes de geração de energia

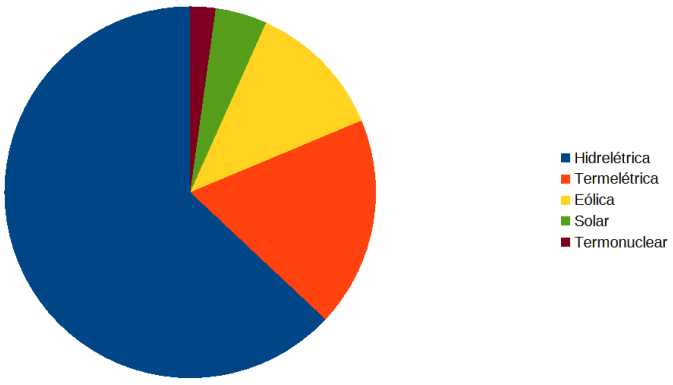
Por muitos anos o ser humano busca por formas de gerar energia e algumas dessas formas necessitam de recursos que são finitos. Tais energias podem ser classificadas como fontes de energia renovável, aquelas que constantemente são renovadas pela natureza, tais como, eólica, biomassa, hidráulica, geotérmica, marés e solar e, energia não-renovável, tais como, petróleo mineral, o gás natural, o carvão, xisto e energia nuclear. A potência instalada total segundo EPE (2023), das fontes geradoras de energia elétrica no Brasil é de 181,6 GW (gigawatts). A tabela 1 mostra os percentuais de potência instalada no Brasil, onde os principais empreendimentos geradores de energia elétrica são as hidrelétricas (hidráulica) e termelétricas movidas a biomassa, gás natural, óleo e carvão mineral. A tabela 2 mostra os percentuais de potência instalada por tipo de combustível utilizado para geração de energia elétrica nas termelétricas instaladas no Brasil.

Tabela 1 - Percentual da potência instalada nos empreendimentos geradores em operação no Brasil em 2022.

Hidrelétrica	Termelétrica	Eólica	Termonuclear	Solar
63,0%	18,3%	12,0%	2,2%	4,5%

Fonte: EPE, 2023

Figura 1 - Percentual da potência instalada nos empreendimentos geradores em operação no Brasil em 2022.



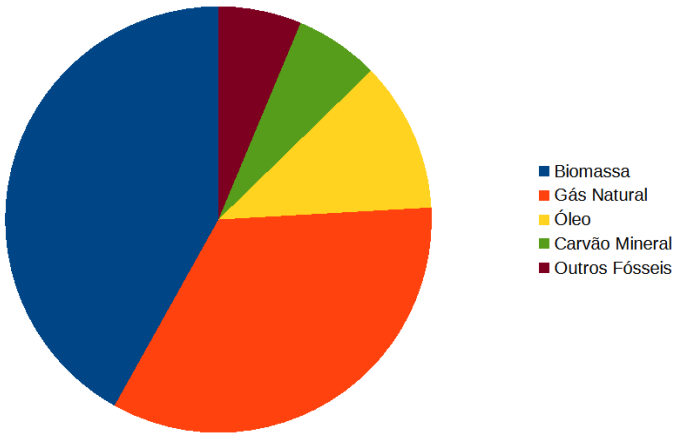
Fonte: EPE, 2023

Tabela 2 - Percentual da potência instalada das termelétricas em operação no Brasil por tipo de combustível em 2022.

Biomassa	Gás Natural	Óleo	Carvão Mineral	Outros Fósseis
41,9%	34,0%	11,4%	6,4%	6,3%

Fonte: EPE, 2023

Figura 2 - Percentual da potência instalada das termelétricas em operação no Brasil por tipo de combustível em 2022.



Fonte: EPE, 2023

2.1.1 Energia Não-Renovável

O uso de recursos não renováveis como fonte energética vem sendo amplamente pesquisado e as fontes energéticas mais utilizadas mundialmente são provenientes de fontes fósseis e não renováveis como carvão mineral, petróleo e gás natural (UDEAGHA, NGEPAH, 2022). No entanto, a grande dependência de fontes não renováveis de energia acarreta preocupações com seu esgotamento, assim como a grande emissão de gases tóxicos e poluentes que são liberados na atmosfera e geram efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono, assim como uma grande quantidade de material particulado.

A emissão de gases geradores de efeito estufa tem sido um problema crônico que contribui para as mudanças climáticas, levando a uma ampla discussão entre governos e pesquisadores. É importante destacar que o uso crescente de

combustíveis fósseis influenciou essas mudanças no planeta e também contribuiu para o desenvolvimento econômico das nações (JOHNSON, 2018).

Os recursos petrolíferos alternativos, como as areias betuminosas, xisto betuminoso, betume natural e óleo extrapesado, têm sido cada vez mais explorados como fontes de petróleo, à medida que as reservas de petróleo convencional se esgotam. Em termos de reservas globais, as areias betuminosas do Canadá e da Venezuela contêm a maior parte das reservas conhecidas de recursos petrolíferos alternativos, seguidas pelo xisto betuminoso encontrado nos Estados Unidos e na China. As reservas de betume natural e óleo extrapesado são relativamente menores e estão concentradas em alguns países, como a Rússia e a Venezuela.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (EIA, 2018), as reservas de petróleo em areias betuminosas e xisto betuminoso aumentaram significativamente nos últimos anos. Segundo o relatório, as reservas de petróleo em areias betuminosas no Canadá foram estimadas em cerca de 165 bilhões de barris, enquanto as reservas em xisto betuminoso nos Estados Unidos foram estimadas em cerca de 105 bilhões de barris.

As reservas de betume natural são relativamente menores e estão concentradas, principalmente, na Venezuela e no Oriente Médio. De acordo com a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP, 2020), as reservas comprovadas de petróleo em betume natural em 2018 foram de cerca de 250 bilhões de barris, sendo a Venezuela o país com a maior reserva.

Já as reservas de óleo extrapesado estão, principalmente, na Venezuela e no Canadá. Segundo o relatório BP Statistical Review of World Energy (2021), as reservas de óleo extrapesado em 2020 foram estimadas em cerca de 107 bilhões de barris.

No entanto, é importante notar que a exploração e produção de recursos petrolíferos alternativos é frequentemente mais complexa e cara do que a extração de petróleo convencional, o que pode limitar sua viabilidade econômica. Além disso, a extração e o processamento desses recursos podem ter impactos ambientais significativos, incluindo a emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa.

2.1.1.1 Petróleo

O petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos em seus três estados físicos (sólido, líquido e gasoso), que contém também pequenas quantidades de enxofre, oxigênio e nitrogênio (MURRAY et al., 2009).

A palavra "petróleo" vem do latim "petra", que significa pedra, e "oleum", que significa óleo. A formação do petróleo é um processo complexo que envolve a decomposição de matéria orgânica, como algas e plâncton, que são enterrados sob camadas de sedimentos ao longo de milhões de anos. Sob pressão e temperatura adequadas, a matéria orgânica se transforma em hidrocarbonetos líquidos e gasosos que são armazenados em rochas porosas e permeáveis chamadas reservatórios (PETERS, MOLDOWAN, 2004).

Uma das teorias mais prováveis sobre a origem do petróleo é a teoria biogênica, que sugere que o petróleo se originou a partir da decomposição de matéria orgânica depositada em ambientes marinhos rasos e lagos antigos. No entanto, ainda há debates e pesquisas em andamento sobre a origem exata do petróleo (MATINGLY, 2001).

De acordo com o Relatório Estatístico de Energia Mundial de 2021 da BP, as reservas globais de petróleo eram de, aproximadamente, 1,7 trilhão de barris em 2020. Os principais países produtores de petróleo são a Arábia Saudita, os Estados Unidos e a Rússia (BP, 2021).

Apesar da importância do petróleo como fonte de energia, a sua extração e consumo têm impactos significativos no meio ambiente, incluindo a emissão de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global. Por isso, há uma crescente busca por fontes de energia mais limpas e renováveis, como a energia solar, eólica e hidrelétrica (SOVACOOL, 2009).

A utilização do petróleo para geração de energia elétrica ocorre por meio da queima de combustíveis derivados do petróleo em caldeiras para produzir vapor, que é usado para girar as turbinas em geradores de energia. Esse processo é conhecido como geração de energia térmica a combustão (BP, 2021).

Os combustíveis derivados do petróleo mais comuns usados na geração de energia elétrica são o óleo combustível e o diesel. No entanto, o uso de combustíveis fósseis para geração de energia elétrica tem sido associado a

impactos ambientais negativos, como a emissão de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global (IEA, 2018).

De acordo com o Relatório Estatístico de Energia Mundial de 2021 da BP, o petróleo representou cerca de 33,1% da produção global de energia em 2020, com a maior parte sendo utilizada no transporte e na indústria. A geração de energia elétrica a partir de petróleo representou apenas cerca de 3,2% da produção global de energia em 2020 (BP, 2021).

No entanto, a tendência é que a demanda por energia elétrica aumente nos próximos anos, especialmente em países em desenvolvimento. Isso pode levar a um aumento no uso de combustíveis fósseis, incluindo o petróleo, para geração de energia elétrica, a menos que sejam tomadas medidas para promover a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis (IEA, 2018).

Algumas alternativas à geração de energia elétrica a partir de petróleo incluem a energia solar, a energia eólica, a energia hidrelétrica e a energia nuclear. Essas fontes de energia são consideradas mais limpas e renováveis do que o petróleo e têm o potencial de ajudar a reduzir a emissão de gases de efeito estufa (BP, 2021; IEA, 2018; IEA, 2021).

2.1.1.2 Gás natural

O petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos, que pode estar presente nos reservatórios em diferentes fases, como a fase líquida, a fase gasosa ou em solução. A parcela do petróleo que se encontra na fase gasosa ou em solução é conhecida como gás associado ou gás natural. O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves, com predominância do metano (CH_4), e que pode conter, em menores quantidades, etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}) e outros gases. Sua origem é semelhante à do petróleo e do carvão, sendo resultado do processo de decomposição de matéria orgânica, como plantas e animais, em ambientes com condições de alta pressão e temperatura. Atualmente, o gás natural é a terceira maior fonte de energia fóssil primária do mundo (USGS, 2019; BP, 2022). Ele é encontrado em rochas sedimentares em todo o mundo, e sua

produção é crescente, com destaque para os Estados Unidos, Rússia e China (BP, 2022).

O gás natural é uma fonte de energia cada vez mais utilizada em todo o mundo. Ele é considerado um combustível fóssil eficiente e limpo, em comparação com o petróleo e o carvão. Segundo o relatório da Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), a participação do gás natural na geração de energia elétrica mundial deve crescer em média 1,6% ao ano até 2040.

Antes de ser utilizado como combustível, o gás natural passa por um tratamento para remover impurezas, reduzir a umidade e ajustar os pontos de orvalho dos hidrocarbonetos. De acordo com a IEA (2019), o gás natural tratado é vendido dentro de limites específicos de pressão, poder calorífico e índice ou número de Wobbe.

Além de ser uma fonte de energia, o gás natural também é usado como matéria-prima na produção de produtos petroquímicos, como plásticos e produtos químicos. O enxofre elementar, presente no gás natural, é também uma importante fonte de enxofre para a produção de ácido sulfúrico e outros compostos químicos (EIA, 2019).

O transporte de gás natural e petróleo por dutos é uma das formas mais eficientes e seguras de movimentação desses recursos. Os dutos são capazes de transportar grandes volumes de gás ou petróleo a longas distâncias, reduzindo custos e aumentando a velocidade de entrega (RAMOS et al., 2020). Além disso, os dutos permitem um fluxo contínuo do produto, sem a necessidade de interrupções frequentes para reabastecimento, o que aumenta a eficiência operacional.

No entanto, a construção e operação de dutos também pode apresentar desafios significativos, especialmente em áreas de difícil acesso ou com alto risco ambiental. É necessário garantir a segurança dos trabalhadores envolvidos na construção e manutenção dos dutos, bem como a proteção ambiental das áreas por onde eles passam (MALCZEWSKA, HADWIGER-FRAENKL, 2019).

Além disso, os dutos podem apresentar vazamentos ou rupturas, o que pode levar a perdas significativas de produto e representar riscos para a segurança das pessoas e do meio ambiente (OLIVEIRA, SOUZA, 2019). Portanto, é essencial que sejam adotadas medidas rigorosas de manutenção e monitoramento de dutos, incluindo inspeções regulares e investimentos em tecnologias de detecção e correção de vazamentos.

Apesar dos desafios, o transporte por dutos continua sendo uma opção atraente para a indústria de petróleo e gás, especialmente em grandes projetos que envolvem a movimentação de grandes volumes de recursos. É importante, no entanto, que as empresas do setor adotem as melhores práticas e tecnologias disponíveis para garantir a segurança das pessoas e do meio ambiente durante a construção e operação dos dutos (KUNDU, NAWAZ, 2021).

O gás natural tem várias formas de utilização, que vão desde a reinjeção em poços de produção de petróleo, até o uso como fonte de energia limpa para a geração de eletricidade. Além disso, pode ser utilizado como matéria-prima em diversas indústrias, como a petroquímica e a de fertilizantes, contribuindo para a produção de inúmeros produtos químicos (IEA, 2018).

A substituição do gás liquefeito de petróleo (GLP) e da nafta pelo gás natural também tem sido uma prática cada vez mais comum. O gás natural é uma alternativa mais limpa e eficiente para o GLP, amplamente utilizado como combustível em residências e empresas, além de ser mais econômico e seguro do que a nafta (IEA, 2021).

Outra forma de utilização do gás natural é como combustível veicular, principalmente em países que possuem uma grande quantidade de reservas de gás natural. Além de ser uma opção mais limpa e econômica do que os combustíveis fósseis convencionais, o uso do gás natural como combustível veicular pode ajudar a reduzir a dependência de petróleo e seus derivados (SAUNDERS, MORENO, 2019).

Após a crise do petróleo dos anos 70, houve uma mudança na percepção global sobre a necessidade de diversificação da matriz energética e adoção de fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Vários países em desenvolvimento, como o Brasil, têm investido na produção de energia elétrica a partir do gás natural, por ser uma opção mais eficiente e menos poluente que outras fontes de energia fóssil, como o carvão (TOSTO, 2019).

Além da produção de energia elétrica, o gás natural tem sido amplamente utilizado como combustível em veículos, principalmente em países como China e Índia, como forma de reduzir a poluição do ar causada por veículos movidos a diesel (KAMMEN, FARHANG, 2018). Além disso, o gás natural também tem sido utilizado na indústria como matéria-prima para a produção de produtos químicos, como fertilizantes e plásticos (GHORBANI, JAHANMIRI, 2019).

Outra aplicação promissora do gás natural é sua utilização como combustível para a geração de energia elétrica em regiões remotas ou de difícil acesso, como áreas rurais ou ilhas, por meio de unidades de geração distribuída (UGD). Essa opção é mais viável economicamente do que a construção de grandes usinas de energia elétrica em regiões isoladas (FADEL et al., 2018).

2.1.1.3 Carvão

O carvão é uma fonte energética amplamente utilizada em todo o mundo, e sua composição química é um fator crucial para determinar sua qualidade e eficiência energética. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), o carvão é extraído de hidrocarbonetos sólidos e derivados do gás, petróleo e condensado, além de poder ser liquefeito para a produção de combustíveis sintéticos.

Para determinar a composição química do carvão, são realizadas análises aproximadas e final, que permitem avaliar sua umidade, matéria volátil, carbono fixo, teor de cinzas e outros componentes. Conforme destacado por Zhang et al. (2021), a análise aproximada é um método rápido e eficiente para avaliar a qualidade do carvão, enquanto a análise final permite uma avaliação mais precisa de sua composição química.

Além disso, a composição química do carvão pode variar significativamente, dependendo da origem vegetal da matéria-prima e do processo de coalificação. De acordo com Hower et al. (2019), a estrutura química do carvão pode variar devido à presença de diferentes tipos de matéria orgânica, que influenciam suas propriedades físicas e químicas.

Portanto, compreender a composição química do carvão é essencial para sua utilização como fonte de energia, e os métodos de análise são fundamentais para garantir sua qualidade e eficiência energética.

O consumo global de eletricidade continua a crescer com o aumento da população e o desenvolvimento econômico, e o carvão ainda desempenha um papel importante na geração de energia elétrica, contribuindo com cerca de 38% da produção mundial em 2019 (BP, 2021).

Apesar de sua relevância na produção de energia elétrica, o uso do carvão tem sido cada vez mais questionado devido aos seus impactos ambientais, especialmente em relação às emissões de gases de efeito estufa e poluição do ar. Por esse motivo, alguns países estão reduzindo sua dependência do carvão na geração de energia elétrica, como é o caso da China, que vem diminuindo sua participação no mix energético do país (IEA, 2019).

Por outro lado, ainda existem regiões do mundo em que o carvão é a principal fonte de energia para a geração de eletricidade, como na Índia, onde o carvão representou cerca de 70% da capacidade instalada de geração de energia elétrica em 2019 (IEA, 2021). Nesses países, há desafios na transição para fontes de energia mais limpas e renováveis, que envolvem questões econômicas e sociais, além das questões ambientais (FISCHER, 2018).

Portanto, embora a participação do carvão na geração de energia elétrica mundial esteja diminuindo gradualmente, sua relevância ainda é significativa, principalmente em países em desenvolvimento. No entanto, é importante que sejam tomadas medidas para reduzir seus impactos ambientais e acelerar a transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis (HOWER et al., 2019).

2.1.1.4 Xisto

As rochas de lama ou argila, conhecidas como xistos, são rochas sedimentares finamente granuladas, com partículas menores que 0,06 mm, que são depositadas em ambientes terrestres e marinhos. Esses sedimentos finos contêm material orgânico, e quando o índice de material orgânico é superior a 1%, é denominado folhelho carbonáceo ou folhelho preto. Os xistos são rochas geradoras de hidrocarbonetos convencionais e não convencionais, com baixa porosidade e alta permeabilidade. Embora sua capacidade de armazenamento seja limitada, o hidrocarboneto gerado pode migrar para rochas de arenito que atuam como reservatórios com alta porosidade. No caso do gás de xisto, a própria rocha de xisto é considerada tanto uma rocha geradora quanto uma rocha reservatória. O gás de xisto é inodoro e é composto principalmente de metano, com pequenas quantidades de etano, butano e pentano. Sua unidade de medida é um trilhão de pés cúbicos (TPC) (DAYAL, MANI, 2018).

Embora a produção de xisto seja mais cara do que a produção de petróleo, em alguns casos, como na Estônia e na China, o xisto é utilizado para evitar a importação de energia. Por exemplo, os rejeitos de xisto podem ser utilizados na geração de eletricidade por meio de caldeiras de leito fluidizado. O xisto retortado pode ser usado como matéria-prima nas indústrias de cimento e cerâmica, enquanto as águas de xisto podem ser usadas como corretores de pH do solo e o cal-xisto pode ser utilizado na agricultura (SANTOS, MATAI, 2018).

2.1.1.5 Nuclear

Energia atômica ou energia nuclear é a energia que é liberada por meio de uma reação nuclear ou processo de decaimento radioativo, onde o processo de fissão é de maior interesse ocorrendo em um reator nuclear e produz energia, geralmente, na forma de calor que, posteriormente, é utilizado em uma usina nuclear para produzir energia elétrica, conforme mostra a figura 1 (CNEN, 2020).

A possibilidade de uma reação em cadeia foi reconhecida assim que se soube que nêutrons foram liberados no processo de fissão. Se um nêutron é absorvido pelo núcleo de um átomo de urânio e um nêutron é produzido, o último pode ser absorvido em um segundo átomo de urânio e assim por diante (MURRAY; HOLBERT, 2019).

As radiações podem até atravessar a matéria ou serem absorvidas por ela, e podem identificar massas de quantidades ínfimas, não determinadas por métodos químicos (MURRAY; HOLBERT, 2019).

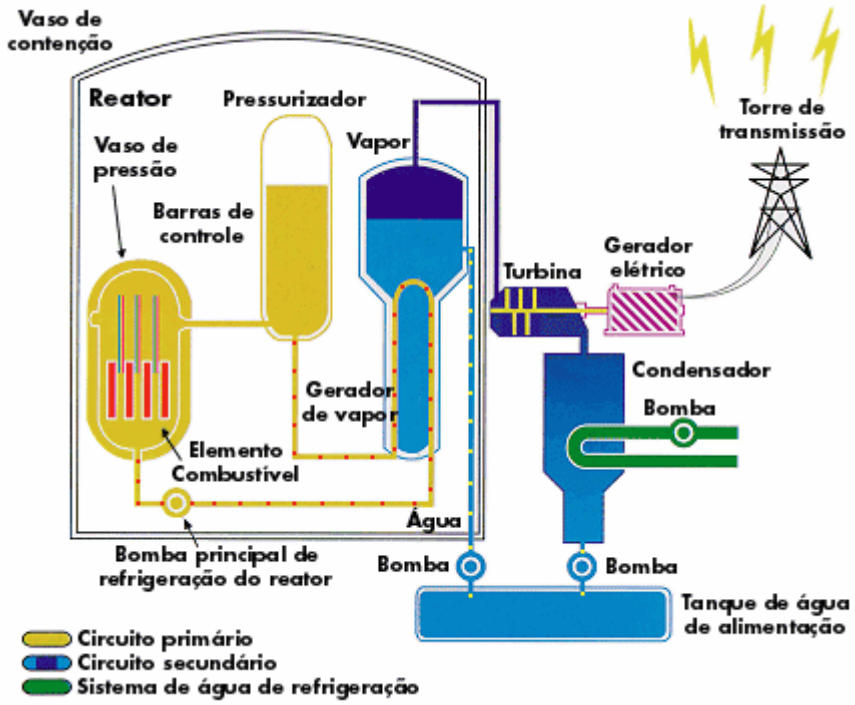


Figura 3 - Perfil esquemático de uma usina de energia nuclear.

Fonte: ANEEL, 2008.

A energia nuclear desempenha um papel importante no setor de energia elétrica no Brasil, embora sua participação seja relativamente modesta em comparação com outras fontes de energia, representando aproximadamente 2,2% da capacidade total de geração de eletricidade (EPE, 2023). Suas vantagens incluem a baixa emissão de gases de efeito estufa, tornando-a uma fonte de energia de baixa pegada de carbono, e a capacidade de geração contínua, conforto à rede elétrica. Além disso, a energia nuclear oferece alta concentração de energia a partir de uma pequena quantidade de material nuclear, o que a torna eficiente em termos de recursos (EPE, 2023).

O país depende principalmente de fontes como a energia hidrelétrica, com usinas nucleares, como Angra 1 e Angra 2, contribuindo de maneira mais modesta. A construção da Usina Nuclear Angra 3 envolveu desafios financeiros e políticos, afetando seu progresso (ANEEL, 2008). Apesar das vantagens da energia nuclear, o Brasil mantém sua ênfase em fontes renováveis, como a hidrelétrica e a biomassa, devido a considerações de segurança, gestão de resíduos nucleares e custos associados às usinas nucleares. A energia nuclear, embora importante para diversificar a matriz energética, desempenha um papel secundário no cenário energético brasileiro (EPE, 2023).

2.1.2 Energia Renovável

As energias renováveis representam 14% do consumo mundial de energias (IEA, 2018). O conceito de energia renovável (energia derivada de processos naturais que são reabastecidos em uma taxa mais rápida do que são consumidos) tem sido usado como contraste para fontes de combustíveis fósseis esgotáveis desde início de 1900, onde refere-se como energia renováveis as fontes de energia animal e madeira, e as fontes inesgotáveis sendo a radiação solar, vento, marés e energia hidrelétrica. O termo energia renovável vem sendo debatido desde a segunda guerra mundial, nas práticas da política energética, quando tomou conotações políticas na década de 1970, onde a contracultura e os primeiros movimentos ambientais de 1960 identificavam como alternativas às energias emanadas do carvão e energia nuclear. A energia eólica, solar, hidráulica e das marés, energia geotérmica, biocombustíveis e a parte renovável dos resíduos como energia renovável são contabilizados nas estatísticas contábeis da União Européia (HARJANNE; KORHONEN, 2019).

As energias renováveis, neste estudo, são representadas pela eólica, biomassa, hidráulica, geotérmica, marés e solar.

2.1.2.1 Eólica

A energia eólica é uma fonte limpa e renovável que tem um grande potencial para ser explorada em todo o mundo. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), a energia eólica responde por cerca de 6% da capacidade elétrica global com fontes renováveis, e sua participação contínua a crescer. Além disso, a energia eólica é uma das fontes de energia renovável que mais cresce no mundo, com um aumento anual de 17,4% desde 2010 (IEA, 2021).

No mercado energético brasileiro, o segmento eólico tem sido uma alternativa viável economicamente para o setor, além de apresentar características que apoiam questões socioambientais. De acordo com o Relatório de Informações de Energia de 2021 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a capacidade instalada de energia eólica no Brasil em 2020 era de 19.175 MW, o que representa 10,9% da capacidade

instalada total de geração de energia elétrica no país. Ainda segundo a EPE, a energia eólica foi a segunda fonte de energia elétrica mais utilizada no Brasil em 2020, respondendo por 9,5% da geração total de energia elétrica no país (EPE, 2021).

Um dos principais desafios da energia eólica é sua intermitência causada pela variação aleatória do vento, que pode levar a flutuações bruscas na potência gerada. Essas flutuações podem afetar a estabilidade do sistema elétrico, levando a interrupções no fornecimento de energia elétrica (ISLAM et al., 2020).

Para mitigar esse problema, é possível utilizar sistemas de armazenamento de energia para compensar a flutuação da energia gerada pelos parques eólicos. Isso permite que a energia gerada seja armazenada quando a produção é alta e liberada quando a produção é baixa, mantendo assim uma produção constante e previsível de energia (FARAHMAND et al., 2019).

Além disso, sistemas de controle avançado podem monitorar e ajustar a produção de energia em tempo real, ajudando a manter a estabilidade do sistema elétrico. Esses sistemas podem garantir que a produção de energia seja equilibrada com a demanda, evitando flutuações indesejadas na tensão e frequência do sistema elétrico (ISLAM et al., 2020).

A construção de redes de transmissão mais robustas e interconectadas também pode ajudar a mitigar a flutuação da energia eólica. Isso permite que a energia gerada em um local seja compartilhada com outras regiões, reduzindo a dependência de uma única fonte de energia e melhorando a estabilidade do sistema elétrico como um todo (SHAFIEE, TOPAL, 2019).

É importante destacar que a pesquisa contínua e os avanços tecnológicos estão contribuindo para resolver os desafios associados à energia eólica, tornando-a cada vez mais viável como fonte de energia renovável. Por isso, é fundamental que as políticas públicas incentivem o investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e infraestrutura relacionadas à energia eólica, de modo a acelerar a transição para um sistema de energia mais limpo e sustentável (ISLAM et al., 2020).

2.1.2.2 Biomassa

A biomassa é definida como todo recurso renovável proveniente de matéria orgânica, tanto de origem animal quanto vegetal, que pode ser utilizado para produção de energia (ROSILLO-CALLE et al., 2019). A biomassa é uma fonte energética renovável utilizada desde a antiguidade através da queima de lenha, mas, a partir da crise do petróleo em 1970, passou a ser vista como uma alternativa aos derivados do petróleo (DEMIRBAS, 2001). As biomassas tradicionais são consideradas não sustentáveis e são utilizadas principalmente para cocção e aquecimento residencial, por serem baratas e acessíveis. Na África subsaariana, a biomassa corresponde a 70 a 90% da energia primária utilizada (MULUGETTA et al., 2020). Na Ásia, 80% da biomassa é utilizada no meio rural e 20% em áreas urbanas para cocção (JAIN et al., 2019).

A produção de energia elétrica limpa por meio da biomassa é uma transformação estratégica de energia voltada para o desenvolvimento sustentável, principalmente no quesito preservação ambiental. A biomassa da cana-de-açúcar, é um subproduto derivado da extração do álcool anidro “etanol” e açúcar, tem ganhado espaço no mercado, visto que os benefícios estão ligados à diminuição do consumo de recursos não renováveis. Tanto que, a cogeração de energia derivada da queima da biomassa além de atribuir valor ao subproduto, anteriormente sem fins lucrativos, é considerado um passivo ambiental e exerce atualmente a função de satisfazer necessidades energéticas dos consumidores (ALVES, 2019).

2.1.2.3 Hidráulica

A energia hidrelétrica (hidráulica) é uma das principais fontes de energia elétrica do mundo, representando cerca de 16% da capacidade elétrica global. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), a energia hidrelétrica é a fonte de energia renovável mais utilizada em todo o mundo, respondendo por mais de 50% da capacidade de geração de energia renovável (IEA, 2020).

No Brasil, a energia hidrelétrica é a principal fonte de geração de energia elétrica, representando cerca de 64% da capacidade instalada total de geração de

energia elétrica em 2020, de acordo com o Relatório de Informações de Energia de 2021 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Apesar de ser considerada uma fonte de energia limpa, as barragens criadas para acumular água para a geração de energia elétrica podem ter impactos negativos no meio ambiente e na saúde humana. A decomposição da biomassa inundada pode resultar na emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, óxido nitroso e metano (KUIK et al., 2020). E segundo o método de Santos et al. (2008) a emissão de CH_4 é de 0,36 ton x 10^6 ano, para os reservatórios no Brasil.

Além disso, a construção de usinas hidrelétricas pode resultar na perda de habitats naturais e na interrupção da migração de peixes, impactando a biodiversidade local (BERNARDES et al., 2021). A falta de planejamento e controle pode causar ainda mais danos ambientais, sociais e econômicos, como a remoção forçada de comunidades e a perda de terras produtivas (FEARNSIDE, 2020).

No entanto, a energia hidrelétrica ainda é considerada uma das fontes de energia mais seguras e confiáveis, principalmente em países com grandes reservatórios de água e topografia favorável. O desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e a implementação de medidas de mitigação de impactos ambientais podem tornar a energia hidrelétrica uma opção mais sustentável para a geração de energia elétrica no futuro (CHEN et al., 2021).

2.1.2.4 Geotérmica

A energia geotérmica é uma fonte de energia renovável que se origina do fluxo geotérmico profundo, radiação solar absorvida, fluxo de águas subterrâneas e energia térmica armazenada no terreno (BIZZARRI, CUFFARO, 2019). Ela é considerada uma fonte de energia limpa, pois não emite gases de efeito estufa, poluentes atmosféricos ou resíduos tóxicos (AMARAL et al., 2020). A energia geotérmica pode ser utilizada para fins de utilização direta de baixa e média entalpia, como aquecimento de residências, piscinas e estufas, além de ser utilizada indiretamente na geração de eletricidade (ZHOU et al., 2019).

O potencial geotérmico varia de acordo com a profundidade da fonte de calor. Segundo Bizzarri e Cuffaro (2019), as zonas de intrusões, também conhecidas como

cinturões magmáticos, possuem um elevado potencial geotérmico, uma vez que o gradiente térmico do magma aumenta com a profundidade. Essas zonas podem ser classificadas em alta entalpia, com temperaturas aproximadas de 150°C acima (geralmente vapor seco); média entalpia, com temperaturas entre 80 e 150°C; ou baixa entalpia, com temperaturas abaixo de 80°C.

A energia geotérmica tem aplicações diversas em setores como o industrial, residencial e agrícola (AMARAL et al., 2020). Na agricultura, por exemplo, a energia geotérmica pode ser utilizada para aquecimento de estufas, irrigação e criação de animais. Além disso, a energia geotérmica pode ser utilizada para climatização de edifícios, aquecimento de piscinas e produção de água quente sanitária (ZHOU et al., 2019).

A utilização da energia geotérmica para a geração de eletricidade é mais comum em locais com alta entalpia, onde a temperatura da fonte de calor é elevada o suficiente para produzir vapor que aciona uma turbina. Esse processo é conhecido como ciclo binário (AMARAL et al., 2020). A energia geotérmica pode ser ainda utilizada em conjunto com outras fontes de energia renovável, como a solar e a eólica, para formar um sistema híbrido de geração de eletricidade (ZHOU et al., 2019).

Fora das áreas vulcânicas, a energia geotérmica possui aplicações limitadas, principalmente no fornecimento de aquecimento de baixa temperatura (BIZZARRI, CUFFARO, 2019). Apesar disso, a energia geotérmica tem um grande potencial para ser explorada em muitas regiões do mundo, especialmente em países com elevado potencial geotérmico, como a Islândia, o Japão e a Itália (AMARAL et al., 2020).

A energia geotérmica é uma fonte de energia renovável e limpa, que pode ser utilizada para diversas finalidades, como aquecimento de residências, piscinas, estufas, produção de água quente sanitária, climatização de edifícios, irrigação e criação de animais. Além disso, ela pode ser utilizada na geração de eletricidade, especialmente em locais com alta entalpia. Apesar das limitações em áreas não vulcânicas, a energia geotérmica apresenta um grande potencial para ser explorada em muitas regiões do mundo, especialmente em países com elevado potencial geotérmico. A utilização de fontes de energia renovável, como a energia geotérmica, é fundamental para reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis e para mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

2.1.2.5 Marés

A energia maremotriz é uma forma de energia renovável que é gerada a partir das marés. Essa fonte de energia é intermitente, mas sua previsibilidade é uma vantagem quando da utilização para produção de energia, pois se conhece os fenômenos astronômicos que são relacionados com as marés. Segundo Savvaidis et al. (2019), a energia maremotriz pode oferecer um grande potencial de geração de energia renovável, mas ainda é pouco explorada em relação a outras fontes renováveis, como a energia solar e a energia eólica.

No entanto, apesar de ser uma fonte de energia livre de emissões de carbono, este tipo de exploração energética deve ser muito bem analisado, pois envolve vários aspectos ambientais e sociais na região em que for instalada. De acordo com Fleuren et al. (2020), o impacto ambiental da construção de uma usina maremotriz pode ser significativo, afetando a flora e a fauna local, bem como a qualidade da água. Além disso, a instalação de usinas maremotrizes pode ter impactos sociais, como a necessidade de realocação de comunidades locais ou a interrupção de atividades econômicas tradicionais. Portanto, é necessário realizar uma análise criteriosa dos impactos ambientais e sociais antes de implementar projetos de energia maremotriz.

Um fator positivo no aspecto social, e exemplificando, é a Usina de La Rance, que impactou a região adequando-se às atividades humanas locais e alavancou o turismo regional. Segundo Lacour et al. (2019), a usina de La Rance, na França, é uma das maiores usinas maremotrizes do mundo e tem sido muito bem-sucedida em termos de impacto social. A construção da usina levou em consideração a adaptação às atividades humanas locais e promoveu o desenvolvimento do turismo regional. Além disso, a usina tem sido um exemplo de como a energia maremotriz pode ser usada de forma sustentável para atender às necessidades energéticas.

Os equipamentos eletromecânicos utilizados atualmente permitem a captação de energia em baixa queda d'água, o que torna um fator positivo para a geração de energia. Segundo Kumar et al. (2021), o desenvolvimento de novas tecnologias tem permitido a captação de energia maremotriz em áreas com baixa queda d'água, aumentando assim o potencial de geração de energia. Além disso, as tecnologias

mais recentes têm permitido a construção de usinas maremotrizes com menor impacto ambiental e social.

O funcionamento das usinas maremotrizes podem operar de forma simples quando a geração de eletricidade ocorre só na maré enchente ou vazante, ou dupla, atuando em ambas as marés, e potencializando a produção, sendo que pode ocorrer ou não o bombeamento durante as horas de espera, o que também otimiza o nível do reservatório. De acordo com Wang et al. (2019), existem diferentes tipos de tecnologias que podem ser utilizadas para a geração de energia maremotriz, como turbinas de fluxo axial e de fluxo cruzado, bombas reversíveis e dispositivos de movimento oscilatório. Cada uma dessas tecnologias apresenta vantagens e desvantagens, e a escolha da tecnologia a ser utilizada deve levar em consideração as características do local de instalação e os objetivos do projeto.

A energia maremotriz é uma fonte de energia renovável com grande potencial de geração de eletricidade, mas que deve ser analisada cuidadosamente em relação aos impactos ambientais e sociais. No entanto, a construção de usinas maremotrizes pode ter impactos positivos, como o exemplo da Usina de La Rance, na França, que tem sido um modelo de uso sustentável da energia maremotriz. O desenvolvimento de novas tecnologias tem permitido a captação de energia maremotriz em áreas com baixa queda d'água, aumentando assim o potencial de geração de energia. É necessário, portanto, investir em pesquisas e projetos para o desenvolvimento sustentável da energia maremotriz.

2.1.2.6 Solar

A energia solar, por meio da captação de luz e energia emitida pelo sol, é uma das principais fontes de energia renovável disponíveis hoje em dia. É também considerado um dos mercados mais promissores no setor de energia renovável (IRENA, 2020). A energia solar pode ser captada e convertida em eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos, que são compostos por células fotovoltaicas (MARTINS, 2021).

A energia solar apresenta muitas vantagens, uma vez que é uma fonte de energia 100% gratuita e está disponível para países desenvolvidos e em desenvolvimento (IRENA, 2020). A energia solar pode ser facilmente convertida em

outras formas de energia e é uma opção muito importante para apoiar o desenvolvimento de regiões menos desenvolvidas, bem como garantir a estabilidade e independência energética (IRENA, 2020). Além disso, o uso da energia solar reduz as emissões de CO_2 e ajuda a proteger o meio ambiente, o que é muito importante para o desenvolvimento econômico sustentável (MARTINS, 2021).

Nos últimos anos, a energia solar tem sido cada vez mais utilizada em todo o mundo. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2020), a capacidade instalada de energia solar em todo o mundo cresceu mais de 30% em 2019 em comparação com o ano anterior, alcançando 627 GW. O relatório também prevê que a capacidade de energia solar pode crescer ainda mais rapidamente nos próximos anos, especialmente à medida que mais países adotarem políticas de energia renovável (IEA, 2020).

Um exemplo de país que tem investido fortemente em energia solar é a Índia. Em 2019, a Índia estabeleceu a meta de ter 100 GW de capacidade instalada de energia solar até 2022 (IRENA, 2020). Para alcançar essa meta, o governo indiano está implementando várias políticas para incentivar a produção de energia solar, como leilões competitivos e tarifas de alimentação (IRENA, 2020). Como resultado, a capacidade instalada de energia solar na Índia cresceu rapidamente nos últimos anos, atingindo cerca de 35 GW em 2020 (IEA, 2020).

Além disso, a tecnologia de energia solar está em constante evolução, com novas inovações e avanços técnicos que permitem a produção de energia solar mais eficiente e acessível. Por exemplo, a tecnologia de painéis solares bifaciais, que podem captar a luz do sol em ambos os lados do painel, está se tornando cada vez mais popular (IRENA, 2020). Outra tecnologia promissora é a energia solar flutuante, que permite a instalação de painéis solares em reservatórios de água (IRENA, 2020).

Algumas das principais vantagens das células fotovoltaicas podem incluir energia limpa e renovável, sustentabilidade, redução de custos a longo prazo, baixo impacto ambiental, Independência energética, aplicabilidade diversificada, valorização imobiliária, incentivos e subsídios (IRENA, 2020). Isso é particularmente importante em regiões remotas ou rurais, onde a construção de infraestrutura elétrica pode ser cara e difícil. A energia solar pode ser usada para fornecer eletricidade a áreas remotas, como vilarejos ou fazendas, o que pode melhorar significativamente a qualidade de vida das pessoas que vivem lá (MARTINS, 2021).

Além disso, a energia solar também pode ser combinada com outras fontes de energia renovável, como energia eólica e hidrelétrica, para criar sistemas de energia renovável integrados e mais eficientes (IRENA, 2020). Esses sistemas de energia renovável podem ser usados para atender a demanda de energia de comunidades inteiras, e podem ajudar a reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

No entanto, há alguns desafios a serem enfrentados no setor de energia solar. Um desses desafios é a necessidade de armazenamento de energia. Como a energia solar é gerada apenas durante o dia, é necessário armazená-la para uso durante a noite ou em dias nublados. A tecnologia de armazenamento de energia, como baterias, está evoluindo rapidamente, mas ainda é cara e pode ser um obstáculo para a adoção generalizada da energia solar (IRENA, 2020).

Algumas das principais desvantagens das células fotovoltaicas podem incluir a dependência da luz solar, custo inicial de investimento, espaço físico, intermitência da geração solar, materiais usados na fabricação e eficiência dos painéis solares diminui com o tempo (IRENA, 2020). É importante que os governos estabeleçam regulamentações e padrões de qualidade para garantir que os sistemas de energia solar sejam seguros e eficientes.

A energia solar é uma fonte de energia renovável e sustentável que apresenta muitas vantagens, incluindo a disponibilidade em todo o mundo, a geração distribuída e a capacidade de ser combinada com outras fontes de energia renovável. Embora existam desafios a serem enfrentados, como armazenamento de energia e regulamentação, o setor de energia solar continua a crescer e a evoluir, impulsionado por políticas de energia renovável e avanços tecnológicos. A energia solar desempenha um papel fundamental na transição para um sistema de energia mais limpo e sustentável.

Segundo o relatório "Renewables 2021 Global Status Report" da REN21, a energia solar continua a crescer rapidamente no Brasil. Em 2020, foram adicionados cerca de 2,2 GW de capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no país, atingindo um total de 7,4 GW. Isso representa um aumento de cerca de 42% em relação ao ano anterior (REN21, 2021).

O relatório também destaca que o Brasil tem um grande potencial para a energia solar, especialmente nas regiões Nordeste e Centro-Oeste do país, que possuem altas taxas de radiação solar. Além disso, o governo brasileiro tem

implementado políticas e incentivos para o desenvolvimento da energia solar, como leilões de energia renovável e programas de financiamento (REN21, 2021).

A projeção do crescimento da implantação de energia fotovoltaica no Brasil é uma área de interesse significativa devido ao potencial solar considerável do país e ao crescimento contínuo desse setor em pouco mais de 10 anos, pode ser observado na figura 2 (EPE, 2023).

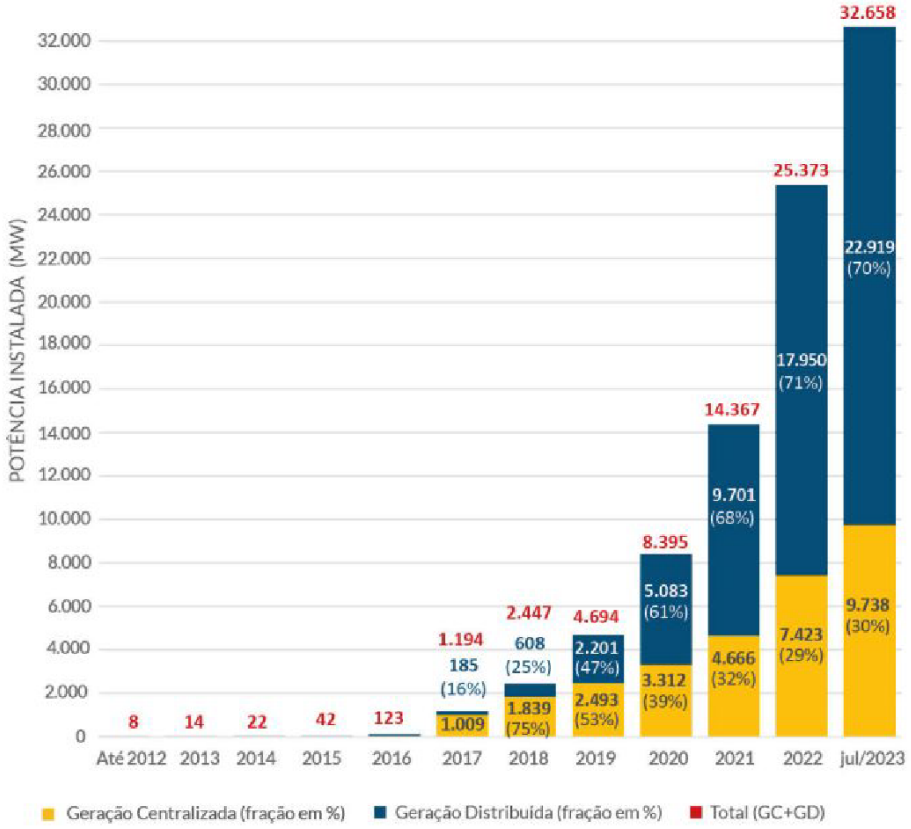


Figura 4- Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil.

Fonte: EPE(2023).

Destaca-se que o custo da energia solar fotovoltaica tem caído significativamente em todo o mundo, incluindo no Brasil. De acordo com o relatório, o custo médio ponderado global da energia solar fotovoltaica em 2020 foi de cerca de 6,8 centavos de dólar por kWh, uma redução de cerca de 85% em relação a 2010. No Brasil, o custo da energia solar fotovoltaica em leilões de energia renovável tem sido competitivo em relação a outras fontes de energia (IRENA, 2020).

Esses relatórios mostram que a energia solar no Brasil está em um bom caminho e deve continuar a crescer nos próximos anos. O país possui um grande potencial solar e políticas governamentais favoráveis à energia renovável, o que deverá continuar a atrair investimentos para o setor.

A tecnologia fotovoltaica é uma forma sustentável de gerar energia elétrica a partir da luz solar. Desde a sua criação, a tecnologia fotovoltaica tem se desenvolvido de forma constante e tem ganhado cada vez mais espaço devido aos diversos benefícios, onde pode-se destacar a ampla flexibilidade de operação e utilização e a maior disponibilidade de itens fabricados com um baixo nível de impacto ambiental (SEIA, 2018).

A busca por energia limpa, tem proporcionado um aumento da demanda mundial destas tecnologias, resultando na redução de custo de fabricação e implantação dos sistemas de painéis fotovoltaicos. Essa fonte energética passa a ser uma das principais fontes para o sistema de geração distribuída, pois os incentivos governamentais, tecnologias avançadas, baixo custo operacional e de manutenção, geração de emprego e energia limpa e renovável passam a ser um acelerador para o desenvolvimento da tecnologia e para o cuidado com o meio ambiente e a saúde da população (REN21, 2019).

O sistema de conversão da radiação solar em energia aproveitável sob a forma de eletricidade (Sistema Fotovoltaico) é constituído por um bloco de gerador, um bloco de condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento (SANTOS et al., 2021). Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como isolados ou autônomos, que normalmente não possuem acesso à rede elétrica, para isso necessitam de um armazenador de energia e em sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica dispensando assim os bancos de baterias necessários em sistemas do tipo autônomo e os elevados custos e manutenções decorrentes (SEABRA et al., 2021).

As células fotovoltaicas são o componente mais importante de um sistema fotovoltaico. Em sua maioria, as células são compostas por um sanduíche de cristais de silício semicondutor dos tipos N com carga negativa e P com carga positiva, onde na região entre os cristais N e P ocorre a recombinação de elétrons e possibilita a criação de uma barreira de potencial elétrico que impede o fluxo de cargas (JAIN et al., 2021). Os principais tipos de células solares comerciais fabricadas são as células de silício cristalino, podendo ser de cristais de silício monocristalinos, policristalinos

ou de silício amorfo. Já as células de filmes finos (CIS) são fabricadas com silício amorfo, compostos cristalinos e arsenito de gálio (MORALES-ACEVEDO et al., 2020).

Atualmente, os avanços tecnológicos têm permitido o desenvolvimento de células solares mais eficientes e com menor custo de produção. Por exemplo, a tecnologia de células solares de perovskita, que foi descoberta em 2009, tem apresentado avanços significativos e promissores em termos de eficiência e custo de produção (FAUST et al., 2018).

Além disso, a utilização de sistemas fotovoltaicos tem trazido benefícios não só para o meio ambiente, mas também para a economia e a sociedade como um todo. A geração distribuída de energia fotovoltaica tem permitido que residências, empresas e outras instituições possam gerar sua própria energia e até mesmo vender o excedente para a rede elétrica, criando uma nova fonte de renda. Além disso, essa fonte de energia renovável tem potencial para trazer mais segurança energética e desenvolvimento socioeconômico para países em desenvolvimento, principalmente em áreas remotas e de difícil acesso (REN21, 2019).

Em suma, a tecnologia fotovoltaica é uma das principais opções para a geração de energia limpa e renovável, e tem ganhado cada vez mais espaço no mercado devido aos seus benefícios econômicos, sociais e ambientais. A evolução constante da tecnologia das células fotovoltaicas e dos sistemas de geração distribuída tem impulsionado ainda mais o seu uso, e espera-se que no futuro a energia solar fotovoltaica seja ainda mais acessível e difundida em todo o mundo. Ainda há muito a ser desenvolvido na tecnologia fotovoltaica, como a criação de sistemas de armazenamento de energia mais eficientes e acessíveis. No entanto, a crescente demanda por energia limpa e a constante evolução tecnológica indicam um futuro promissor para a energia solar (SEIA, 2018).

A geração de eletricidade em células fotovoltaicas é influenciada por vários fatores, incluindo a intensidade da luz solar, o ângulo de incidência dos painéis solares em relação ao sol, a limpeza das células e a presença de sombreamento, e a temperatura, sendo que cada um desses fatores desempenha um papel crucial na eficiência da geração fotovoltaica (RODRIGUES, 2017).

É importante observar que a eficiência das células fotovoltaicas pode variar de um tipo para outro, com células monocristalinas, policristalinas e de filme fino tendo eficiências diferentes. Além disso, o desenvolvimento de tecnologia contínua

tem levado a melhorias na eficiência e no desempenho das células fotovoltaicas ao longo do tempo (NREL, 2021).

Material	Eficiência		
	Máxima Teórica	Em Laboratório	Produção em Série
Silício Mono	24,7%	18%	14%
Silício Poli	19,8%	15%	13%
Silício Amorfo	15%	10,5%	7,5%
CIGS	18,8%	14%	10%
CdTe	16,4%	10%	9%

Figura 5 - Eficiência e no desempenho das células fotovoltaicas

Fonte: NREL, 2021.

Os principais tipos de células solares comerciais fabricadas são as células de silício cristalino (Figura 4), podendo ser de cristais de silício monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo. Já as células de filmes finos (CIS) são fabricadas com silício amorfo, compostos cristalinos e arsenito de gálio (BLAZEV, 2020).

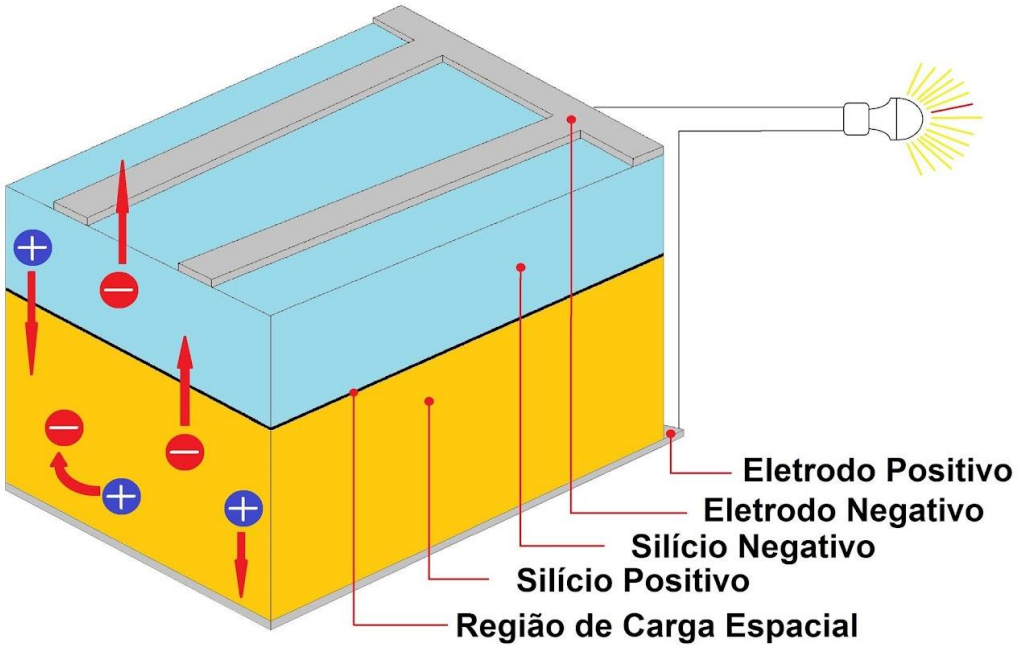


Figura 6 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.

Fonte: Autor(2023).

As células fotovoltaicas são construídas a partir de materiais semicondutores, geralmente feitos de silício, que é um dos materiais mais comuns para essa aplicação. Esses semicondutores são processados em camadas finas e estão frequentemente interligados em painéis solares. Cada célula fotovoltaica contém duas camadas, uma dopada positiva (P) e outra dopada negativa (N), que juntas criam um campo elétrico. Quando a luz solar incide sobre uma célula, ela gera pares elétron-lacuna no material, criando uma corrente elétrica (VIEIRA, 2023).

O princípio de geração de energia fotovoltaica é baseado no efeito fotovoltaico. Quando os fótons da luz solar atingem uma célula fotovoltaica, eles fornecem energia suficiente para que os elétrons se movam de uma camada para outra, criando uma corrente elétrica. Esse fluxo de elétrons é então coletado e direcionado através de circuitos elétricos, gerando eletricidade que pode ser usada em residências, empresas ou para alimentação na rede elétrica (Bento, 2019).

2.2 Fatores Climáticos

Clima é um conjunto de fenômenos atmosféricos e meteorológicos que ocorrem em uma determinada região e época, obtido com base no histórico de observações de 30 anos. É influenciado por questões geográficas e físicas, como a latitude, altitude, relevo, continentalidade e maritimidade, correntes marítimas, circulação geral da atmosfera e massas de ar. Esses fatores climáticos são as condições que determinam ou interferem nos elementos meteorológicos ou climáticos, como temperatura do ar, radiação solar, vento, umidade do ar, precipitação e pressão atmosférica (WMO, 2018).

A latitude é um fator climático que parte da linha do equador, percorrendo uma distância medida em graus até um ponto qualquer da superfície terrestre. Os valores variam de zero graus no equador a noventa graus nos polos. A latitude tem grande influência no clima, principalmente na temperatura. Segundo Oliveira e Souza (2019), a latitude influencia diretamente a quantidade de radiação solar que chega à superfície terrestre, e consequentemente, a temperatura. Quanto maior a

latitude, mais afastada a região está do equador e assim é menor a quantidade de radiação solar, o que resulta em climas mais frios.

A altitude é outra condição climática que tem forte influência nas mudanças na temperatura e umidade do ar. É uma distância medida em metros, a partir de qualquer ponto da superfície da Terra e da atmosfera, até o que é considerado o nível médio do mar. A altitude afeta a temperatura e a umidade do ar, pois a pressão atmosférica diminui com a altitude, que por sua vez afeta a capacidade do ar de reter umidade e a formação de nuvens e precipitação. É importante notar que a relação entre altitude e umidade é um fator significativo na meteorologia e nas mudanças climáticas, pois influencia diretamente as condições climáticas em diferentes regiões do mundo. Segundo Buriol (2018), a temperatura diminui cerca de 6,4°C a cada 1000 metros de altitude. Além disso, a altitude também influencia a umidade do ar, pois quanto maior a altitude, menor é a pressão atmosférica, o que resulta em uma menor capacidade do ar de reter umidade.

A continentalidade e a maritimidade também são fatores climáticos importantes. A distância aos oceanos, mares e grandes lagos pode influenciar na capacidade de resfriamento, devido à capacidade da água de reter o calor dos raios solares por mais tempo que o solo. Segundo Nascimento et al. (2021), as áreas próximas ao mar apresentam climas mais amenos e úmidos, enquanto as áreas continentais são mais extremas em termos de temperatura e umidade.

As correntes marítimas são deslocamentos de massas de água, principalmente em oceanos e mares, como se fossem rios dentro de outras camadas de água. A rotação da Terra é o principal efeito gerador das correntes de superfície, juntamente com o vento predominante e as ressurgências de águas profundas. De acordo com Zavala-Garay et al. (2019), as correntes marítimas influenciam a temperatura e a umidade do ar das áreas próximas às costas, podendo criar climas específicos, como o clima mediterrâneo.

A circulação atmosférica é um fator climático que determina a distribuição de umidade e temperatura em todo o planeta. A circulação atmosférica é influenciada pelos gradientes de pressão e temperatura, além da rotação da Terra. Segundo Mendonça et al. (2017), existem três células de circulação atmosférica que influenciam o clima global: a célula de Hadley, a célula de Ferrel e a célula Polar. A célula de Hadley é responsável pela distribuição de calor e umidade dos trópicos para as regiões temperadas, enquanto a célula de Ferrel age como uma célula de

transferência de calor e umidade entre as células de Hadley e Polar. A célula Polar é responsável por transportar ar frio e seco do polo para as regiões temperadas e tropicais.

O El Niño e La Niña são fenômenos climáticos que ocorrem no Oceano Pacífico, afetando o clima global. O El Niño é um aquecimento anômalo das águas do Pacífico equatorial, enquanto La Niña é um resfriamento anômalo dessas mesmas águas. Esses fenômenos afetam a circulação atmosférica global, modificando a distribuição de chuvas e temperatura em diferentes regiões do mundo. Segundo Souza et al. (2019), o El Niño e La Niña podem causar secas e enchentes em diferentes partes do mundo, afetando a produção agrícola e a economia global.

As mudanças climáticas antropogênicas são um fator climático recente e têm um impacto significativo no clima global. A queima de combustíveis fósseis, desmatamento e outras atividades humanas têm aumentado a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, causando o aquecimento global e mudanças no clima. Segundo o relatório do IPCC de 2021, as emissões humanas de gases de efeito estufa são responsáveis pelo aquecimento global observado nas últimas décadas, e as mudanças climáticas resultantes têm impactos significativos em todo o planeta, como o aumento do nível do mar, mudanças na distribuição de chuvas e a intensificação de eventos climáticos extremos.

2.3 Elementos meteorológicos

A atmosfera é uma camada de gases que envolve a Terra e é fundamental para a existência de vida no planeta. Os seres vivos estão constantemente em contato com os elementos meteorológicos, que são as variáveis físicas medidas para descrever o estado da atmosfera e do clima. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO) de 2018, os principais elementos meteorológicos incluem a temperatura do ar, a umidade relativa do ar, a pressão atmosférica, a precipitação, a velocidade e direção do vento, a radiação solar, a névoa ou neblina e a visibilidade, a cobertura de nuvens, as trovoadas e relâmpagos e a concentração de poluentes atmosféricos.

A medição desses elementos é realizada por estações meteorológicas, que podem ser automáticas ou manuais, dependendo da localização e da precisão das medições necessárias. As estações automáticas são equipadas com sensores eletrônicos que coletam informações e as transmitem para centros de processamento de dados. Já as estações manuais contam com observadores humanos que registram os valores dos elementos meteorológicos em instrumentos analógicos. As informações coletadas a partir dessas medições são utilizadas em modelos meteorológicos e climáticos para previsão do tempo e do clima (MCILVEEN, 2018).

A temperatura do ar é um dos elementos meteorológicos mais conhecidos e medidos. Ela representa a medida da energia térmica das moléculas de ar e é expressa em graus Celsius (°C) ou Fahrenheit (°F). A temperatura do ar influencia diretamente na vida dos seres vivos, pois regula o funcionamento de diversos processos biológicos, como o metabolismo e a reprodução. A variação da temperatura do ar ao longo do tempo é responsável pelas estações do ano, sendo mais alta no verão e mais baixa no inverno (Ferreira et al., 2018).

A umidade relativa do ar é outra variável importante para os seres vivos, pois indica a quantidade de vapor de água presente na atmosfera em relação à quantidade máxima que a atmosfera pode suportar. Ela é medida em porcentagem e influência diretamente na sensação térmica das pessoas e nos processos biológicos que dependem da transpiração, como a respiração das plantas. A baixa umidade relativa do ar pode aumentar o risco de doenças respiratórias e de incêndios florestais (Ferreira et al., 2020).

A pressão atmosférica é um fator importante na previsão do tempo e na navegação aérea. As mudanças na pressão atmosférica podem indicar a chegada de uma frente fria ou quente, ou de condições de tempestade. Além disso, as variações na pressão atmosférica podem ser utilizadas para determinar a altitude de um avião ou para calibrar instrumentos de medição (KUMAR et al., 2019).

A pressão atmosférica é uma medida da força exercida pela atmosfera terrestre em uma unidade de área na superfície da Terra, sendo influenciada por vários fatores. É comumente medida em relação ao nível do mar com um barômetro, permitindo a comparação de leituras em diferentes locais. As variações na pressão atmosférica podem ser utilizadas para prever o tempo, calibrar instrumentos de medição e auxiliar na navegação aérea (MURRAY, DEARDEN & MAY, 2018).

A precipitação é um dos elementos meteorológicos mais visíveis e conhecidos pela população em geral. Ela representa a quantidade de água que cai do céu na forma de chuva, granizo ou neve e é medida em milímetros ou polegadas. A precipitação é fundamental para a agricultura e a hidrologia, pois influencia diretamente na disponibilidade de água para as plantas e os reservatórios de água doce. Além disso, a precipitação é responsável pela formação de rios, lagos e oceanos, e pela erosão e sedimentação do solo. Segundo o relatório "State of the Climate in 2020", publicado em 2021 pela American Meteorological Society, o ano de 2020 foi um dos três anos mais quentes já registrados na história e apresentou um aumento global na precipitação média em relação à média histórica.

A velocidade do vento é medida em metros por segundo (m/s) ou quilômetros por hora (km/h) e a direção do vento é expressa em graus, sendo medida com o auxílio de uma bússola. Além disso, para representar graficamente a direção do vento, é comum usar uma rosa dos ventos, uma figura circular que mostra as visões cardeais e outras informações detalhadas em relação ao norte verdadeiro. Esta ferramenta é amplamente utilizada em cartografia e navegação para indicar a orientação do vento em mapas e cartas de navegação (MENDONÇA, 2017).

A radiação solar é outra variável meteorológica e trata-se da fonte de energia primária para a vida na Terra. Ela influencia diretamente a fotossíntese das plantas, na evaporação da água, e na temperatura do ar e da superfície terrestre. A exposição excessiva à radiação solar pode causar danos à saúde, como queimaduras e câncer de pele, por isso é importante monitorar a radiação solar em diferentes regiões (BRITO, GOMES, 2020).

A radiação solar é uma das principais variáveis meteorológicas que afeta o clima e as condições ambientais (WMO, 2020). Ela é a energia radiante emitida pelo Sol e que é responsável por aquecer a Terra e fornecer a energia necessária para o ciclo hidrológico e a fotossíntese (NASA, 2020). Trata-se de uma fonte de energia inesgotável, que ocorre todos os dias do ano, com pequenas variações de distribuição e, que sua incidência possui relação direta com os elementos meteorológicos (IEA, 2020).

Desde 2019, as informações sobre a radiação solar incluem novas tecnologias, como satélites meteorológicos e estações terrestres com equipamentos cada vez mais precisos para medir a radiação solar (WMO, 2020). Além disso,

existem modelos numéricos que simulam o comportamento da radiação solar na atmosfera terrestre (NASA, 2020).

Essas novas tecnologias são utilizadas por meteorologistas e outros profissionais para prever o tempo, avaliar a qualidade do ar, monitorar a radiação ultravioleta e estudar os efeitos das mudanças climáticas (IEA, 2020).

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (WMO), a névoa é um fenômeno meteorológico que ocorre quando partículas suspensas na atmosfera, como gotículas de água ou cristais de gelo, reduzem a visibilidade. A visibilidade é a medida da distância até onde um objeto pode ser visto claramente na atmosfera. É influenciada por vários fatores, incluindo a presença de névoa, a quantidade de umidade no ar e a presença de partículas suspensas (WMO, 2021).

Os serviços meteorológicos medem a visibilidade usando instrumentos, como medidores de visibilidade por transmissão de luz ou por reflexão. A visibilidade é frequentemente estimada em metros. A previsão de névoa é importante para permitir que as pessoas se preparem adequadamente para essas condições meteorológicas. Os modelos meteorológicos usados pelos serviços meteorológicos, como a Modelagem por Conjunto, têm sido usados com sucesso para prever a ocorrência de névoa em diferentes regiões do mundo (CAO et al., 2018).

A névoa pode causar problemas de segurança no trânsito, no transporte aéreo e em outras atividades ao ar livre. Esses problemas de segurança são exacerbados quando as condições de visibilidade são reduzidas por períodos prolongados. Estudos recentes mostraram que as condições de névoa podem levar a um aumento no número de acidentes de trânsito, bem como atrasos e cancelamentos de voos em aeroportos (CHOI et al., 2019).

A pesquisa científica tem sido realizada para entender melhor a formação de névoa e desenvolver métodos mais eficazes para prever esses fenômenos. A formação de névoa é complexa e pode ser influenciada por uma série de fatores, incluindo a temperatura, a umidade e a presença de partículas suspensas. Estudos recentes têm se concentrado no uso de técnicas de aprendizado de máquina para melhorar a precisão das previsões de névoa (ZHANG et al., 2021).

No entanto, é importante destacar que a emissão de gases de efeito estufa e outras atividades humanas podem afetar a formação de névoa em algumas regiões. Por exemplo, em algumas áreas urbanas, a poluição do ar pode aumentar a concentração de partículas suspensas, o que pode agravar a formação de névoa

(BAE et al., 2018). Portanto, é essencial que sejam implementadas medidas efetivas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e combater a poluição do ar, a fim de minimizar os impactos negativos desses fenômenos meteorológicos. No entanto, é importante que sejam tomadas medidas efetivas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e combater a poluição do ar, a fim de minimizar os impactos negativos desses fenômenos meteorológicos em todo o mundo.

A cobertura de nuvens é uma medida da quantidade e distribuição de nuvens em uma determinada área ou região. Ela pode ser expressa em termos de fração de cobertura, que é a fração da área do céu que é coberta por nuvens em um determinado momento (NOAA, 2018). A cobertura de nuvens pode variar desde um céu completamente claro até um céu completamente encoberto, e pode ser medida por meio de observações visuais ou instrumentais (NASA, 2020).

A observação visual da cobertura de nuvens é geralmente feita por um observador treinado, que estima a fração de cobertura de nuvens com base em sua experiência e conhecimento do céu. Essas observações são amplamente utilizadas em redes meteorológicas nacionais e internacionais para a coleta de dados meteorológicos, incluindo a cobertura de nuvens (WMO, 2020).

Além da observação visual, a cobertura de nuvens também pode ser medida por meio de instrumentos, como os satélites meteorológicos. Esses satélites fornecem imagens em tempo quase real da cobertura de nuvens em uma determinada região, permitindo a previsão do tempo com maior precisão (FOSTER et al., 2018). As imagens de satélite são especialmente úteis para a identificação de sistemas de nuvens grandes e complexos, como tempestades tropicais e furacões (NASA, 2020).

Esta cobertura é um elemento meteorológico importante que afeta a radiação solar, a temperatura e a umidade do ar. As nuvens refletem a radiação solar, impedindo que ela atinja a superfície da Terra, e também afetam a quantidade de calor que é irradiada de volta para a atmosfera (TAKAHASHI et al., 2019). A cobertura de nuvens também afeta a temperatura e a umidade do ar, uma vez que as nuvens impedem que o sol aqueça a superfície da Terra e aumentem a umidade do ar (MURRAY, DURRAN, BOOS 2018).

Ainda assim, vale ressaltar que a cobertura de nuvens desempenha um papel de relevância incontestável em setores críticos, a exemplo da aviação e da produção de energia solar. Em circunstâncias específicas por uma visibilidade limitada,

decorrente da onipresença das nuvens, a aviação corre o risco de ser impactada, potencialmente resultando em cancelamentos de voos ou atrasos consideráveis nas operações. Além disso, as nuvens exercem um impacto significativo sobre a capacidade de geração de energia solar, uma vez que obstruem os raios solares, ajudando a promover a eficiência da produção de energia a partir da fonte solar (KUMAR et al., 2019).

Desta forma a cobertura de nuvens é uma medida da quantidade e distribuição de nuvens em uma determinada área ou região, podendo ser medida por meio de observações visuais ou instrumentos, como os satélites meteorológicos. A cobertura de nuvens afeta a radiação solar, a temperatura e a umidade do ar, além de ter impactos na aviação e na geração de energia solar.

Os fatores mencionados anteriormente têm impacto significativo na qualidade do ar e no meio ambiente. A cobertura de nuvens afeta a radiação solar, a temperatura e a umidade do ar, além de ter impactos na aviação e na geração de energia solar. Já a concentração de poluentes atmosféricos é responsável por diversos problemas de saúde pública, além de ser um dos principais contribuintes para a mudança climática. Portanto, é importante considerar ambos os fatores ao avaliar a qualidade do ar e suas consequências para a saúde humana e o meio ambiente (MURRAY, DEARDEN, MAY, 2018**).**

A concentração de poluentes atmosféricos é um dos principais problemas ambientais da atualidade, com consequências negativas para a saúde humana e o meio ambiente. Os poluentes atmosféricos são emitidos por várias fontes, incluindo a queima de combustíveis fósseis, atividades industriais e agricultura. Esses poluentes podem causar doenças respiratórias, cardiovasculares e neurológicas, além de contribuir para a mudança climática (OMS, 2019).

Os poluentes atmosféricos têm impactos significativos na qualidade do ar e no meio ambiente. A poluição do ar pode levar à formação de smog, um fenômeno que ocorre quando poluentes como dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio reagem com a luz solar para formar ozônio e outras partículas. O smog pode reduzir a visibilidade, danificar plantas e reduzir a qualidade do ar, prejudicando a saúde humana (EPA, 2019).

As fontes de poluição atmosférica variam de acordo com a região e o setor econômico, mas algumas fontes são mais significativas do que outras. A indústria, o transporte e a agricultura são os maiores emissores de poluentes atmosféricos em

muitos países. A queima de combustíveis fósseis, incluindo petróleo, carvão e gás natural, é responsável pela maior parte das emissões de dióxido de carbono, principal gás de efeito estufa (IEA, 2019).

Existem várias medidas que podem ser adotadas para reduzir a emissão de poluentes atmosféricos. Uma das medidas é a utilização de tecnologias mais limpas na indústria e no transporte, incluindo a utilização de fontes de energia renovável. As políticas públicas, como incentivos fiscais e regulamentação mais rigorosa, também podem ajudar a reduzir a poluição do ar. A conscientização pública sobre os impactos da poluição atmosférica na saúde e no meio ambiente também é crucial (IEA, 2019).

A poluição do ar é um problema global que afeta a saúde humana e o meio ambiente. As fontes de poluição atmosférica incluem a queima de combustíveis fósseis, atividades industriais e agricultura. As medidas para reduzir a emissão de poluentes atmosféricos incluem o uso de tecnologias mais limpas, políticas públicas e conscientização pública sobre a importância de reduzir a poluição do ar (EPA, 2019).

2.4 Influência dos elementos meteorológicos na geração de energia

Os elementos meteorológicos estão interligados e influenciam uns aos outros de diversas maneiras, afetando a eficiência da produção de energia fotovoltaica. É importante levar em consideração esses fatores ao projetar e instalar sistemas de energia solar, a fim de garantir a máxima eficiência na produção de energia limpa e renovável.

De acordo com estudos recentes, a relação entre os elementos meteorológicos é fundamental para entender o impacto dessas variáveis na geração de energia fotovoltaica. Por exemplo, a temperatura do ar e a umidade relativa do ar têm uma relação direta, uma vez que a capacidade do ar de reter água aumenta com a temperatura (HUANG et al., 2018). A umidade relativa do ar também influencia a quantidade de nuvens presentes no céu, já que a umidade pode aumentar a probabilidade de formação de nuvens (GEORGE et al., 2019).

A presença de nuvens no céu pode reduzir a quantidade de luz solar que chega aos painéis solares, reduzindo a eficiência da conversão da energia solar em

eletricidade (FENG et al., 2020). Além disso, a velocidade e direção do vento também têm influência direta na produção de energia fotovoltaica, pois podem afetar a temperatura do ar e a umidade relativa do ar, assim como a presença ou não de nuvens (HAYASHI et al., 2018).

A concentração de poluentes atmosféricos também pode afetar a eficiência dos painéis solares. Poluentes como poeira, fumaça e partículas em suspensão podem se acumular nos painéis, reduzindo a quantidade de luz solar que é capaz de penetrar nos mesmos e, consequentemente, a produção de energia (Kazem, Chaichan, 2019).

De acordo com Green et al. (2021) e Smets et al. (2016), a eficiência dos módulos solares é influenciada por diversos fatores, sendo a irradiância solar incidente um dos mais importantes. A quantidade e qualidade da radiação solar recebida pelos módulos solares têm um impacto direto na geração de energia. Além disso, Corkish et al. (2011) e Wenham et al. (2000) ressaltam que a temperatura exerce uma influência significativa no desempenho dos módulos solares, com o aumento da temperatura levando a uma redução na eficiência da conversão de energia.

É importante considerar os efeitos combinados da irradiância solar e da temperatura para avaliar o desempenho dos módulos solares, como destacado por Green et al. (2012). Além desses fatores, outros elementos como inclinação, umidade e velocidade do vento, como mencionado por Smets et al. (2016) e Wenham et al. (2000), também são relevantes na análise do desempenho dos módulos solares. Portanto, no projeto e na operação de sistemas de energia solar, é necessário levar em conta esses fatores para garantir a máxima eficiência e desempenho dos módulos solares, conforme apontado por Corkish et al. (2008).

Estudos recentes, como mencionado por Green et al. (2021), enfatizam a importância de modelos precisos de previsão da irradiância solar e do desenvolvimento de técnicas de controle de temperatura para maximizar o aproveitamento da energia solar em sistemas fotovoltaicos. Essas abordagens, conforme discutido por Green (2021 e Smets et al. (2016), podem contribuir para uma melhor integração de sistemas solares, garantindo maior eficiência energética e maximizando a geração de eletricidade limpa e renovável.

Os materiais envolvidos na construção das células fotoelétricas perdem a eficiência de geração de energia elétrica quando submetidos a altas temperaturas,

porém funcionam melhor em temperaturas mais baixas, apesar de boa parcela da energia luminosa incidente nas células transformar-se em calor. Da mesma forma, a intensidade luminosa interfere na geração de energia elétrica, pois a célula fotovoltaica recebe todo o espectro de radiação solar, mas responde somente a alguns comprimentos de onda, absorvendo apenas 33,33% da energia luminosa incidente (MATIN et al., 2020).

No entanto, os demais elementos meteorológicos e a poluição também desempenham papéis importantes na qualidade do ar. Segundo a Environmental Protection Agency (EPA) dos Estados Unidos, as condições meteorológicas podem afetar a dispersão de poluentes na atmosfera, bem como a sua formação e transformação. A poluição, por sua vez, pode ter origem em diversas fontes, como veículos automotores, indústrias, queimadas, entre outras (OMS, 2019).

Além disso, existem diferentes tipos de poluentes, como partículas sólidas e líquidas, gases e compostos orgânicos voláteis (COVs). Cada um desses poluentes pode ter diferentes efeitos sobre a saúde humana e sobre o meio ambiente (EPA, 2019).

Devido à complexidade e variedade desses fatores, a medição e controle da qualidade do ar são atividades que envolvem diversas disciplinas e abordagens. Os governos, por exemplo, podem implementar políticas e regulamentações para controlar as emissões de poluentes, incentivar a adoção de tecnologias mais limpas e promover o uso de fontes de energia renováveis (OMS, 2019).

As empresas e a sociedade em geral também podem contribuir para a melhoria da qualidade do ar, adotando práticas mais sustentáveis e conscientes em relação ao meio ambiente. Isso inclui medidas como a redução do uso de veículos automotores, o investimento em tecnologias mais limpas e eficientes, a reciclagem de materiais e a adoção de hábitos de consumo mais responsáveis (EPA, 2019).

A qualidade do ar é um tema complexo e relevante, que envolve uma série de fatores e desafios. A adoção de medidas sustentáveis e responsáveis por parte dos governos, empresas e sociedade em geral é fundamental para garantir um ambiente saudável e sustentável para as gerações presentes e futuras (OMS, 2019).

2.5 Impactos ambientais da geração de energia

Estudos recentes de Fonteles (2019) mostram que o desenvolvimento urbano está diretamente associado a fatores climatológicos. Para realizar estudos climatológicos precisos, são necessárias tecnologias avançadas, que demandam investimentos. A coleta de dados é um ponto central para dimensionar o problema e para o desenvolvimento de ações preventivas. Nesse sentido, é essencial contar com tecnologias avançadas, como o rastreamento da emissão de gases de efeito estufa (GEE), por meio de satélites, drones e sensores aéreos e em prédios, para criar uma rede confiável de dados e compreender melhor a origem e a quantidade emitida de GEE. Ainda existem incertezas sobre a origem de alguns dos GEE e a quantidade emitida. Compreendê-los e rastreá-los é essencial para desenvolver tecnologias capazes de reverter seus efeitos (FONTELES, 2019).

A geração de energia é uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa, contribuindo significativamente para as mudanças climáticas e para a degradação ambiental. Embora a energia seja essencial para o desenvolvimento socioeconômico, é importante considerar o impacto ambiental de cada fonte utilizada. Apesar da energia hidrelétrica ser uma fonte de energia renovável, a construção de grandes barragens necessárias para sua geração pode alterar ecossistemas, prejudicar a fauna e flora locais e comprometer a qualidade da água. Além disso, a geração de metano resultante do apodrecimento de árvores e outros resíduos vegetais também deve ser considerada (IPCC, 2019).

A geração de metano (CH_4) é um importante contribuinte para o aquecimento global. Pesquisas recentes apontam que a emissão anual de metano proveniente de resíduos orgânicos chega a cerca de 74 milhões de toneladas métricas, enquanto a atividade pecuária contribui para a emissão de 65 milhões de toneladas métricas por ano. Além disso, a produção de hidroeletricidade por meio de represas pode resultar na emissão de metano devido à decomposição anaeróbia de matéria orgânica presente nos reservatórios. Estudos indicam que essas emissões podem ser particularmente relevantes em regiões tropicais e subtropicais, onde as condições de decomposição anaeróbia são mais favoráveis (BARROS et al., 2021).

É importante destacar que o metano é um gás de efeito estufa muito mais potente do que o dióxido de carbono (CO_2), o que o torna um grande contribuinte

para as mudanças climáticas. Segundo o IPCC (2021), o potencial de aquecimento global do metano é cerca de 28 vezes maior do que o CO_2, em um horizonte de tempo de 100 anos. Dessa forma, é crucial adotar medidas para reduzir as emissões de metano e limitar os impactos das mudanças climáticas.

A estimativa da quantidade de metano gerada em hidrelétricas pode ser realizada por meio de modelagem matemática, que leva em consideração diversos fatores, como a área do reservatório, o volume de água, a temperatura e o teor de matéria orgânica no sedimento do fundo. O modelo mais amplamente utilizado é o modelo de IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), que considera a temperatura da água, a profundidade do reservatório, a quantidade de matéria orgânica depositada no fundo, a taxa de sedimentação e outros fatores para estimar a quantidade de metano produzida (IPCC, 2019).

De acordo com estudos de Louis et al. (2000), a taxa média de emissão de metano em hidrelétricas pode variar de 3 a 50 g de CH_4/m^2 por dia, dependendo das condições locais. Esse valor é significativo e destaca a importância de se buscar soluções para mitigar a emissão de gases de efeito estufa em fontes de energia hidráulica (AMARAL et al., 2017).

A queima de combustíveis fósseis, como carvão mineral, petróleo e gás natural, para geração de energia térmica em usinas termelétricas é uma das principais fontes de emissão de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global e as mudanças climáticas (IAE, 2018).

Para as termelétricas Ferraz (2018) cita que os combustíveis comerciais mais disponíveis em grandes lotes são o carvão mineral, os derivados de petróleo, o gás natural e o urânio, onde suas características energéticas são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Energia por combustível (kWh).

Combustível		**Pode produzir cerca de**
1 kg de madeira		2 kW
1 kg de carvão		3 kW
1 kg de óleo		4 kW
1 m^3 de gás natural		6 kW
1 kg de	Usina nuclear com reator do tipo PWR	60.000 kW

urânio	Usina nuclear com reator do tipo FBR	3.000.000 kW

Fonte: (FERRAZ, 2018)

Em registros realizados pela Empresa de pesquisa energética as UTE em 2023 geraram 33,23GW de energia fiscalizada, desta forma em relação a tabela 2 pode-se demonstrar a distribuição de cada tipo de produção de energia elétrica (tabela 4).

Tabela 4 - Distribuição da potência instalada das termelétricas em operação no Brasil por tipo de combustível em 2023.

Biomassa (GW)	**Gás Natural (GW)**	**Óleo (GW)**	**Carvão Mineral (GW)**	**Outros Fósseis (GW)**
13,92	11,30	3,79	2,13	2,09

Fonte: Autor(2023).

Durante levantamento a tabela 5 mostra o consumo por unidade de combustível utilizado em termelétrica, baseado no estudo de Ferraz (2018).

Tabela 5 - Consumo por unidade de combustível utilizado em termelétrica.

Combustível	**Produção (kW)**	**Produção Nacional**	**Consumo por unidade de**
1 kg de madeira	2	13,92	27.840.000,00 Kg
1 kg de carvão	3	11,30	33.900.000,00 Kg
1 kg de óleo	4	3,79	15.160.000,00 Kg
1 m^3 de gás	6	2,13	12.780.000,00 m3

Fonte: Autor(2023).

As emissões de CO_2 resultantes da queima de combustíveis fósseis e biomassa estão associadas ao seu poder calorífico. De acordo com Garg et al. (2019), o Poder Calorífico Inferior (PCI) de um combustível é a quantidade de

energia liberada na forma de calor durante a sua combustão completa, quando toda a água formada é condensada e não há vapor d'água na saída da chaminé.

De acordo com a tabela 6, pode-se observar que os combustíveis fósseis possuem um PCI maior em comparação à biomassa. O carvão, por exemplo, apresenta um PCI entre 18,5 e 28,5 MJ/kg, enquanto a madeira possui um PCI de 14 a 19 MJ/kg. Esses valores são importantes para o cálculo das emissões de gases de efeito estufa decorrentes da queima de combustíveis em processos.

Tabela 6 - Poder Calorífico Inferior (PCI) de combustíveis fósseis e biomassa.

Combustível	PCI (MJ/kg)	Fonte
Carvão	18,5 - 28,5	(IEA, 2019)
Óleo combustível	41,9 - 46,4	(EIA, 2019)
Gás Natural	55,5 - 56,1	(EIA, 2020)
Madeira	14 - 19	(Santos et al., 2020)

Fonte: Autor(2023).

A utilização de biomassa para geração de energia pode ser uma alternativa interessante para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e, consequentemente, as emissões de gases de efeito estufa. A utilização de biomassa para geração de energia pode contribuir para o desmatamento e a perda de habitats naturais, além de gerar poluição atmosférica e sonora regiões (BRITO, GOMES, 2020).

O aumento da temperatura global devido às emissões de gases de efeito estufa (GEE) é uma das maiores ameaças ambientais da atualidade. De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as atividades humanas são responsáveis por grande parte das emissões de GEE e, portanto, têm um papel fundamental na mitigação do aquecimento global (IPCC, 2018).

A adoção de fontes de energia renovável, como a eólica, solar e hidrelétrica, pode ajudar a reduzir as emissões de GEE. Um estudo publicado em 2020 na

revista Renewable and Sustainable Energy Reviews aponta que a expansão da energia eólica e solar é uma das principais formas de reduzir as emissões de GEE na geração de energia elétrica (SCHILLINGS et al., 2020). Além disso, a energia hidrelétrica é uma fonte de energia limpa e renovável, mas sua construção pode causar impactos ambientais significativos, como a inundação de áreas florestais e o deslocamento de comunidades ribeirinhas (IHA, 2018).

No entanto, a redução das emissões de GEE não se limita apenas à adoção de fontes de energia renovável e outras medidas também podem ser adotadas. De acordo com o Plano Nacional de Energia 2050, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em 2018, uma das principais estratégias é aumentar a participação de fontes renováveis de energia, como a energia eólica e solar, em detrimento das fontes fósseis. Além disso, é importante investir em tecnologias mais avançadas e eficientes, que possam melhorar a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, reduzindo as perdas e o desperdício.

Outra referência importante é o relatório World Energy Outlook 2018, da Agência Internacional de Energia (IEA), que destaca a necessidade de uma transição energética global para limitar o aquecimento global a 2 graus Celsius. Segundo o relatório, as fontes renováveis de energia são fundamentais para alcançar esse objetivo, mas também é preciso promover a eficiência energética e a inovação tecnológica.

A Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL, 2020) publicou o Panorama dos investimentos em inovação em energia no Brasil: dados para um grande impulso energético, que apresenta uma análise das políticas energéticas da região e propõe um modelo de planejamento energético que priorize a sustentabilidade ambiental e a inclusão social. O documento destaca a importância de se promover políticas públicas de incentivo à energia renovável, bem como a necessidade de se investir em infraestrutura e capacitação técnica para a transição energética.

O combate ao aquecimento global é uma tarefa complexa e que requer a colaboração de todos os setores da sociedade. É necessário que governos, empresas e sociedade civil se unam para adotar medidas que possam reduzir as emissões de GEE e preservar o meio ambiente para as gerações futuras.

As atividades humanas são responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa e pelo aquecimento global. A adoção de fontes de energia renovável, como a eólica, solar e hidrelétrica, pode ajudar a reduzir as emissões de GEE. Além disso, a preservação das florestas tropicais e a adoção de práticas agrícolas sustentáveis são medidas importantes para combater o aquecimento global.

O Programa Brasileiro de Controle de Gases de Efeito Estufa (GHG) foi criado em 2010 como parte da Política Nacional sobre Mudança do Clima, instituída pela Lei nº 12.187/2009. Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), o GHG tem como objetivo "promover ações para reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) e aumentar a eficiência energética em diferentes setores da economia" (MCTI, 2009).

Entre as principais metas do GHG estão (MCTI, 2022):

- Desenvolver e implementar medidas para reduzir as emissões de GEE em diferentes setores da economia brasileira, incluindo energia, indústria, transporte, agricultura e resíduos;
- Incentivar a adoção de práticas de gestão ambiental pelas empresas e instituições;
- Promover a elaboração de inventários de emissões de GEE para avaliar o desempenho ambiental das empresas e instituições e apoiar a tomada de decisões para reduzir as emissões.

Desde a criação do GHG, o programa tem incentivado a adoção de fontes de energia limpa e renovável, incluindo a energia fotovoltaica. De acordo com o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), o Brasil tem o objetivo de alcançar 45% de participação de fontes renováveis na matriz energética até 2030 (MCTI, 2022).

Nesse sentido, o GHG tem incentivado a instalação de sistemas de energia fotovoltaica em empresas e residências, por meio de incentivos fiscais e financeiros, como o Financiamento para Sistemas de Aquecimento Solar (FASA) e o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), que inclui sistemas fotovoltaicos.

O GHG também tem promovido ações para aumentar a eficiência energética em diferentes setores da economia, o que inclui a adoção de sistemas de iluminação e refrigeração mais eficientes e o uso de equipamentos mais econômicos em termos de energia. Essas medidas têm como objetivo reduzir o consumo de energia e, consequentemente, as emissões de GEE.

Sendo o GHG, iniciativa importante do governo brasileiro para controlar as emissões de GEE e promover a adoção de práticas de gestão ambiental nas empresas e instituições. O incentivo à energia fotovoltaica faz parte das medidas do programa para aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira e reduzir as emissões de GEE.

A adoção de fontes de energia limpa e renovável é cada vez mais necessária para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e combater as mudanças climáticas. No Brasil, existem diversos programas que incentivam a utilização de energias renováveis e o controle das emissões de GEE, tanto em âmbito nacional quanto em nível estadual e municipal.

Um dos principais programas de abrangência nacional é o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), que tem como objetivo incentivar a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como a solar, eólica e hidráulica. O programa permite que consumidores possam gerar a própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e ainda comercializar o excedente com a rede elétrica. Além disso, o ProGD também oferece incentivos fiscais e financeiros para a implantação de sistemas de geração distribuída, como a energia solar fotovoltaica (MME, 2022).

No estado de Santa Catarina, um dos programas que incentivam o uso de energias renováveis é o Programa Catarinense de Energias Renováveis (PCCR). Criado em 2018, o programa tem como objetivo promover o desenvolvimento sustentável do estado por meio do uso de fontes renováveis de energia. Entre as ações do programa estão a promoção de estudos e pesquisas sobre energias renováveis, a disseminação de informações e a capacitação de profissionais e empresas para atuar no setor de energias renováveis (SC, 2021).

No município de Florianópolis, existe o Programa Floripa Solar, que tem como objetivo incentivar a instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica em residências, empresas e órgãos públicos. O programa oferece consultoria gratuita para a implantação dos sistemas fotovoltaicos, além de incentivos financeiros, como o Fundo Municipal de Incentivo à Energia Solar (FMIES), que financia a instalação dos sistemas fotovoltaicos em residências de baixa renda e instituições públicas (PMF, 2022).

No município de Itajaí, existe o Programa Municipal de Incentivo à Geração de Energia Renovável (PROGIRO), que tem como objetivo incentivar a utilização de fontes de energia renovável em residências, empresas e instituições públicas. O programa oferece incentivos financeiros para a instalação de sistemas fotovoltaicos e térmicos, além de oferecer cursos de capacitação para profissionais e empresas do setor de energias renováveis (PMI, 2022).

No município de Garopaba, existe o Programa Municipal de Incentivo à Energia Solar (PROMISE), que tem como objetivo incentivar a instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica em residências, empresas e órgãos públicos. O programa oferece incentivos financeiros, como a isenção de impostos para a instalação dos sistemas fotovoltaicos, e realiza campanhas de conscientização sobre o uso de energias renováveis (PMG, 2022).

Assim, existem diversos programas de abrangência nacional, estadual e municipal que incentivam a utilização de energias renováveis e o controle de gases de efeito estufa.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa e análise da influência dos elementos meteorológicos na eficiência da geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas o estudo foi dividido em 4 etapas:

- Etapa 1: Mensuração da geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas e Compilação dos elementos meteorológicos e temperatura de placa;

- Etapa 2: Relação entre a geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas e os demais parâmetros;

- Etapa 3: Parâmetros para melhoria da eficiência da geração de energia limpa;

3.1 Área de estudo

1 O estudo foi desenvolvido na cidade de Itajaí (figura 5), localizada na costa norte do estado de Santa Catarina (latitude 26°55'52.8" S e longitude 48°41'05.3"O), na margem direita da foz do rio Itajaí-Açu, na região Sul do Brasil. A população estimada de Itajaí é de 226.617 habitantes, sua cobertura territorial é de 289,215 km² (IBGE, 2021), o índice de desenvolvimento humano (IDH) é de 0,795 (PNUD, 2010) e possui o maior PIB per capita do estado (IBGE, 2022). 26°55'52.8"S 48°41'05.3"W

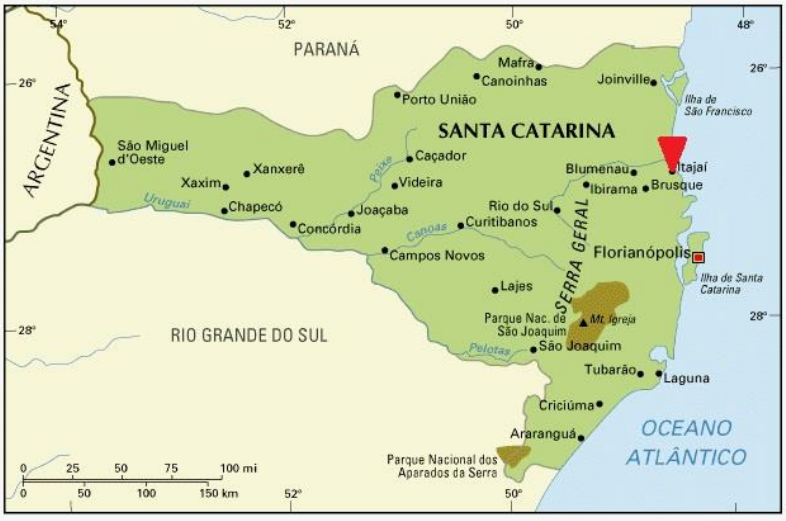


Figura 7 - Localização do município de Itajaí.

Fonte: SC, 2021

3.2 Mensuração da geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas

A mensuração da geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas foi realizada no período de 01 de dezembro de 2022 a 30 de abril de 2023. Para esta mensuração foi utilizado um kit gerador de energia solar (Figura 6) com células fotovoltaicas marca Canadian Solar, modelo CS6U-325P (Figura 7), instalado na direção Noroeste verdadeiro (282° NW) com uma inclinação de 27°.

Segundo dados do fabricante o painel fotovoltaico CS6U-325P é um módulo solar eficiente que utiliza células policristalinas para converter luz solar em eletricidade. Com uma potência nominal de 325 watts e 72 células interligadas, ele é capaz de gerar uma quantidade específica de energia sob condições ideais de irradiação solar. A tecnologia policristalina é conhecida por sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade. A tensão e a corrente de saída do painel variam dependendo das condições de operação. Nas condições padrão de teste (STC), que incluem uma irradiação solar de 1.000 watts por metro quadrado (W/m^2) e uma temperatura de célula de 25°C, o painel geralmente fornece uma tensão em torno de 36-40 volts (V) e uma corrente de 8-9 amperes (A) (CS, 2022).

Esses painéis são amplamente utilizados em uma variedade de aplicações, desde sistemas de energia solar residenciais até projetos de grande escala, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, é importante observar que o preço inicial pode ser mais elevado, embora a economia a longo prazo compense o investimento. A eficiência do painel, geralmente variando de 16% a 18%, mede sua capacidade de aproveitar um incidente de energia solar. Os painéis solares como o CS6U-325P desempenham um papel significativo na busca por fontes de energia limpa e renovável. Sua eficiência em converter luz solar em eletricidade, juntamente com durabilidade e longa vida útil, torna-os uma escolha popular para sistemas de geração de energia solar. No entanto, é fundamental considerar fatores como o custo inicial e a possibilidade de manipulação da eficiência ao longo do tempo para avaliar a adequação desses painéis para um projeto específico (CS, 2022).

O Controlador de Carga MPPT 40A (XTRA 4210N), segundo o fabricante EPEVER, é um dispositivo projetado para melhorar a eficiência de carregamento de

baterias por meio do rastreamento do ponto de potência máxima. Com uma capacidade de 40A, é adequado para sistemas de médio porte, oferecendo uma série de recursos de proteção e monitoramento. Suas especificações técnicas incluem a tecnologia MPPT, uma tensão nominal do sistema de 12/24Vcc automático, uma corrente de carga e descarga de 40A, uma ampla faixa de tensão da bateria de 8 a 32V, além de suportar uma tensão máxima do arranjo fotovoltaico de 100Vcc. A taxa de tensão MPP varia de Vbat+2V a 72V, com uma potência máxima de entrada de 520W para sistemas de 12V e 1040W para sistemas de 24V. Este driver é compatível com diferentes tipos de baterias, incluindo seladas, gel, inundadas e de lítio. Com dimensões de 255 mm x 185 mm x 67,8 mm e peso de 1,70 kg, possui terminais 6AWG (16mm2) para conexões seguras. Embora sua função principal seja atualizar o carregamento de baterias em sistemas de energia solar, ele também fornece informações relevantes, como o estado de carga da bateria, dados de geração de energia, histórico de desempenho e alertas em caso de problemas. No entanto, vale ressaltar que o armazenamento de dados não é sua função principal, e para fins de armazenamento e análise de dados de energia solar, podem ser necessários dispositivos adicionais, como registradores de dados ou sistemas de monitoramento conectados ao sistema de energia solar (EPEVER, 2022).

O inversor IP-2000-42(MUC) da linha Ipower da EPEVER é uma escolha para aplicações de energia confiáveis. Com uma potência contínua de 1600W, oferece uma capacidade de pico de 2000W por até 15 minutos e até 3200W por 3 segundos. É ideal para uso profissional não severo e pode ser usado em instalações móveis, como motorhomes e barcos, ou estacionárias em residências, sítios e áreas rurais. Ele produz uma onda senoidal pura, adequada para aparelhos alimentares sensíveis, e inclui proteções contra baixa tensão, sobretensão, sobrecarga e curto-circuito. O inversor é compatível com baterias de chumbo-ácido e permite monitoramento via porta RS485 (cabo não incluído). Com uma garantia de 2 anos contra defeitos de fabricação, o IP-2000-42(MUC) oferece uma solução confiável para fornecimento de energia em diversas aplicações (EPEVER, 2022).

O EPEVER eLog01 é um registrador de dados projetado para monitorar o desempenho dos controladores de carga solar em sistemas de 12V. Ele fornece informações cruciais, como tensão da bateria, corrente de carga e potência gerada pelos painéis solares. Esses dados ajudam os proprietários a avaliar o

funcionamento dos drivers, identificar tendências e melhorar a eficiência do sistema solar. Compatível com drivers de carga EPEVER, simplifica a coleta de dados, facilitando o monitoramento, a manutenção preventiva e a identificação de problemas em sistemas solares. Essa ferramenta é fundamental para a análise e acompanhamento detalhado de sistemas de energia solar, contribuindo para a maximização dos benefícios proporcionados por sistemas fotovoltaicos (EPEVER, 2022).

O kit foi acoplado à estação meteorológica protótipo de Sanches (2020) (Figura 8), com os seguintes sensores:

O sensor HMC5883L, produzido pela Honeywell, é um módulo de montagem em superfície que abriga um sensor multi-chip especialmente projetado para detectar campos magnéticos de baixa intensidade. Ele incorpora uma interface digital e é ideal para aplicações como a criação de bússolas de custo acessível e magnetômetro. Internamente, o dispositivo possui um conversor analógico-digital (ADC) de 12 bits, em combinação com sensores Anisotrópicos Magnetoresistentes (AMR) de baixo ruído, possibilitando uma resolução de 5 mili-gauss em uma faixa de ±8 Gauss, resultando em uma precisão de direção da bússola entre 1 e 2 graus. Ele se conecta ao módulo de processamento de dados através da interface I2C (Inter-Integrated Circuit) e suporta uma taxa de saída rápida de até 160 Hz. Para sua operação, requer alimentação com corrente contínua, variando de 2,16 V a 3,6 V, e consome apenas 100 μA no modo de leitura (HONEYWELL, 2010).

O sensor US1881, de efeito Hall com uma notável sensibilidade magnética, que se fundamenta na tecnologia CMOS (Semicondutor de Óxido Metálico Complementar). Essa abordagem tecnológica confere a ele uma dimensão compacta e um consumo de energia minimizado, além de garantir estabilidade nas propriedades magnéticas, juntamente com uma notável velocidade e precisão. Operando com uma faixa de tensão entre 3,5 e 24 V, com um consumo de energia baixo e capacidade de funcionamento em ampla variação de temperaturas, torna esse sensor particularmente apropriado para uma variedade de aplicações, abrangendo setores automotivos, industriais e de consumo (MELEXIS, 2006).

O BME280, é um sensor digital que engloba a medição de umidade relativa do ar, pressão atmosférica e temperatura, fundamentado em princípios de detecção comprovados. Este módulo sensor é encapsulado em uma cobertura metálica de dimensões extraordinariamente compactas, com apenas 2,5 × 2,5 mm² de área e

uma altura de 0,93 mm. Ele suporta uma interface de comunicação digital I2C, operando a uma velocidade máxima de 3,4 MHz, pode ser alimentado com uma tensão variando de 1,71 a 3,6 V, e seu consumo de corrente máximo atinge 3,6 µA. A faixa de operação abrange temperaturas entre -40 a 85°C, níveis de umidade relativa do ar de 0 a 100%, e pressões entre 300 e 1100 hPa. O sensor de umidade oferece uma resposta extremamente rápida, o que possibilita o reconhecimento ágil de condições de aplicação e mantém uma alta precisão ao longo de uma vasta amplitude de temperaturas. O sensor de pressão, por sua vez, é um sensor de pressão barométrica absoluta, caracterizado por sua precisão excecional, resolução refinada e um nível de ruído consideravelmente inferior em comparação com o sensor BMP180 da Bosch Sensortec (BOSCH, 2014).

O sensor de Raios Ultravioleta ML8511 é uma solução técnica de alto desempenho para a detecção precisa de radiação ultravioleta (UV). é capaz de identificar com eficácia ondas UV com comprimentos de onda na faixa de 280 a 390 nanômetros. Ideal para monitorar a exposição à radiação solar e promover práticas de proteção adequadas contra os raios UV. Uma das vantagens notáveis deste módulo é sua versatilidade. Com uma faixa de tensão de operação que varia de 3 a 5V (PINTO, 2021).

O sensor remoto termopar tipo K de temperatura é especificamente projetado para ser compatível com um controlador que possui um conector 3.81/2P. Com uma resistência nominal de 47K ohms e um conector de 3.81mm/2P, este sensor é capaz de operar em uma ampla faixa de temperaturas, variando de -55 ℃ a +125 ℃. Sua precisão de medição é notável, com uma margem de erro de apenas ±1 ℃, garantindo que as informações de temperatura obtidas sejam confiáveis e consistentes. Este sensor desempenha um papel essencial na otimização da eficiência do sistema de placa solar, ajudando a garantir um funcionamento confiável e eficaz em diversas condições ambientais (CLAIB, 2012).

O protocolo RS-485 é amplamente utilizado em aplicações que exigem comunicação de dados de longa distância e imunidade a ruídos elétricos. Seu uso é comum em ambientes industriais, automação residencial, sistemas de controle de acesso, e muito mais. Uma de suas características distintivas é a capacidade de transmissão de dados de longa distância, que pode chegar a vários metros ou quilômetros, dependendo do ambiente e dos componentes utilizados. A imunidade a

ruídos elétricos e a capacidade de suportar vários dispositivos em uma única rede também são características notáveis (CUÉLLAR, 2008).

Figura 8 - Kit gerador de energia solar.

Fonte: Autor(2023).

Figura 9 - Conjunto de células.

Fonte: www.energiatotal.com.br.

Figura 10 - Estação meteorológica.

Fonte: Sanches (2020).

O conjunto, constituído por estruturas mecânicas e eletroeletrônicas, foi instalado em área livre, sobre o telhado do bloco 2 do IFSC, Câmpus Itajaí, a aproximadamente 12 m de altura em relação ao solo. O local da instalação foi definido de modo que evite interferências de outras edificações nos elementos meteorológicos envolvidos nas análises.

A estrutura mecânica é constituída de um suporte metálico para fixação das células fotovoltaicas e encaixe dos sensores e da estação meteorológica.

A estrutura eletroeletrônica é composta por um controlador XTRA4210N-XDS2 de carga e descarga de baterias e corrente de passagem de 40 A com tecnologia MPPT, sendo que o referido equipamento está instalado no Laboratório de Eletroeletrônica, situado no Bloco 2, segundo piso, no referido Campus, juntamente com o banco de 3 baterias Modelo 12MN105, o módulo inversor Modelo IP2000-22 e o sistema de proteção com disjuntores, dispositivos de proteção de aterramento e para raios.

A Figura 9 demonstra o esquema de disposição formado pelo sistema de células fotovoltaicas, estação meteorológica e dispositivos de proteção.

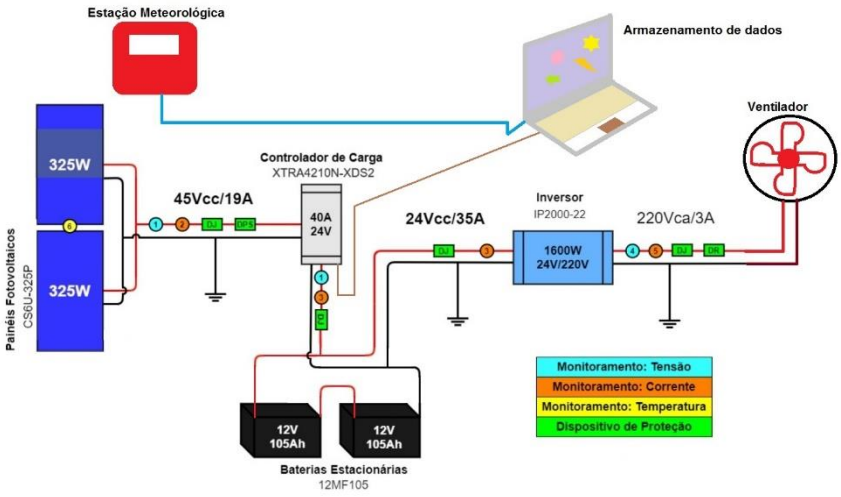


Figura 11 - Esquema de instalação de sensores.

Fonte: Autor(2023).

O conjunto de geração de energia foi instalado e, posteriormente, calibrado por meio de conferência com multímetro (ET-1002 Minipa) na entrada e saída do controlador, a fim de verificar se a tensão (37,0 V) e corrente (8,78 A) estão adequadas e, consequentemente, a potência a ser gerada (325 W).

O sistema opera *off grid* (onde o sistema não está ligado à rede da distribuidora de energia), e está ligado a equipamentos de consumo com aproximadamente 500 W, durante todo o período de geração de energia. Este é um fator essencial para o correto funcionamento do controlador do sistema das placas fotovoltaicas, pois o mesmo interrompe seu funcionamento em caso de acúmulo de carga máxima pelo banco de baterias. Após a carga limite de armazenamento o controlador interrompe o circuito para as baterias, mesmo mantendo o circuito de energia para o equipamento de consumo contínuo (eletro ventilador), porém esta alternância de corrente interrompe a leitura dos parâmetros objetos do estudo.

A leitura da tensão gerada (V), corrente produzida (A) e potência calculada (W) foi realizada, a cada 10 minutos (programação disponível), por meio de controlador de carga XTRA4210N-XDS2 que disponibiliza em tempo real em display e em software LandStar B(LS-B). Esses dados foram disponibilizados em forma de tabelas e gráficos a fim de permitir a análise da geração da energia elétrica.

Posteriormente, os dados de leitura da tensão, corrente e potência foram relacionados com os elementos meteorológicos e temperatura da placa.

3.3 Compilação dos elementos meteorológicos e temperatura de placa

A estação meteorológica realizou a leitura dos elementos meteorológicos velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, temperatura do ar, radiação UV e temperatura da placa, de maneira sincronizada com a leitura do controlador de carga (energia elétrica) a cada 10 minutos.

A estação meteorológica utilizou uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre e de placa única (Arduino) que utiliza a linguagem de programação C++, onde tal plataforma gerou um banco de dados dos parâmetros acima mencionados.

3.4 Relação entre a geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas e os demais parâmetros

Após a mensuração e compilação dos dados obtidos nas linguagens de programação C++ e LS-B (Embarcado), formatou-se a *tabela 7*, bem como gráficos de correlação para discussão e análise da influência dos elementos meteorológicos na geração de energia.

Tabela 7 - Relação entre a geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas e os demais parâmetros

DT	H	GER	TP	T	UM	UV	VV	DV	PA
d/m/a	h:m:s	W	ºC	ºC	%	índice	m/s	º	mb

Fonte: Autor(2023).

Nesta etapa foram correlacionados a potência gerada pelas placas com os elementos meteorológicos (velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, temperatura, radiação UV) e temperatura da placa, na eficiência da geração de energia elétrica das células fotovoltaicas. Tais correlações, assim como a estatística básica, foram obtidas por meio do Minitab, com apoio do método de Rô de Spearman.

A estatística é uma ferramenta fundamental na análise de dados em diversas disciplinas, desempenhando um papel essencial na pesquisa científica, nos

negócios e nas ciências sociais. Dentre as técnicas estatísticas disponíveis, o Método de Rô de Spearman é uma abordagem inovadora para avaliar a relação entre variáveis, especialmente quando os dados não se enquadram em hipóteses de distribuição normal ou quando a relação entre as variáveis não é linear (LIRA,2004).

O Método de Rô de Spearman, também conhecido como Correlação de Spearman, é uma técnica estatística não paramétrica que se concentra na análise de variáveis ordinais ou ordinárias. Ele se baseia na classificação das observações de cada variável e na análise das diferenças entre as posições de classificação. A Correlação de Spearman quantifica a direção e a força da relação monotônica (crescente ou decrescente) entre as variáveis, tornando-se uma ferramenta útil quando se lida com dados classificados (AZEVEDO, MORALES & PINHO, 2018).

Existem outros métodos estatísticos semelhantes, como a Correlação de Pearson, que é usada para avaliar a relação linear entre variáveis contínuas, e a Correlação de Kendall, que se concentra na relação de classificação entre variáveis ordinais. A escolha do método estatístico a ser utilizado deve ser fundamentada nas características dos dados e nos objetivos da análise (GARCIA, 2020).

Será considerado, primeiramente, as gerações médias dos quatro quadrantes da direção do vento (DV), entre 0° e 360°, do terceiro quartil (acima de 175 W de geração de energia fotovoltaica) e, na sequência, identificar, mais especificamente, as direções de vento que apresentavam as maiores médias de geração de energia para o terceiro quartil.

A partir desses dados foram realizadas as correlações entre as variáveis velocidade do vento, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, temperatura, radiação (UV) e temperatura da placa.

3.5 Parâmetros para melhoria da eficiência da geração de energia limpa

Por meio da interpolação da relação dos parâmetros foram geradas hipóteses de uso em relação à posição de instalação e aos elementos meteorológicos a fim de obter a melhor eficiência das células fotovoltaicas, proporcionando a redução da utilização de energia elétrica gerada por hidrelétricas e termelétricas e,

consequentemente, prevendo a influência destes no impacto ambiental e na geração de GEE.

A realização de estimativas para a emissão de gases efeito estufa é muito importante na criação de novas estratégias de redução e controle dessas emissões.

O efeito da melhoria da eficiência da geração de energia limpa no ambiente foi medido por meio de um levantamento da possível redução das usinas hidrelétricas e pela redução do consumo de combustíveis (óleo, biomassa e carvão) nas termelétricas e, consequentemente, da emissão de GEE da área do reservatório.

Para a avaliação da redução da emissão de GEE neste estudo foram propostos três cenários (tabela 8), além do cenário atual. O cenário categorizado como atual está baseado nos percentuais de geração de energia elétrica das tabelas 1 e 2. Os demais cenários foram determinados com reduções graduais do percentual de utilização das usinas hidrelétrica (Hidráulica) e termelétricas (Biomassa, óleo e carvão). Com base nos cenários propostos foi calculada a redução de emissão de GEE por meio dos fatores de emissão de cada fonte de emissão.

Tabela 8 - Cenários propostos para análise da emissão de gases de efeito estufa em percentual.

	Percentual de geração de energia por tipo de fonte								
Cenário	**Hidráulica**	**Biomassa**	**Eólica**	**Gás Natural**	**Óleo**	**Carvão**	**Nuclear**	**Solar**	**Total**
Atual (2022)	63,0	7,7	12,0	6,2	3,2	1,3	2,2	4,5	**100**
1	62,4	7,6	12,0	6,2	3,1	1,2	2,2	5,5	
2	61,8	7,5	12,0	6,2	3,0	1,1	2,2	6,5	
3	61,2	7,4	12,0	6,2	2,9	1,0	2,2	7,5	

Fonte: Aneel (2018).

A tabela 9 mostra a capacidade produzida por quilômetro quadrado de reservatório, em algumas hidrelétricas do Brasil.

Tabela 9 - Capacidade de produção em relação a área inundada.

Usina	**Área inundada (km²)**	**Capacidade instalada (MW)**	**MW/km²**
Itaipu	1.350	14.000	10,37
Tucuruí (PA)	2.430	8.370	3,44
Porto Primavera (SP)	2.250	1.540	0,68
Sobradinho (BA)	4.214	1.050	0,25

Fonte: Itaipu (2018).

Para estimativa de emissão de CO_2 na geração de energia em hidráulica, eólica, gás natural, óleo, carvão e nuclear foram considerados os fatores de emissão estimados por Miranda[1] (2012).

Os fatores de emissão da biomassa e solar foram obtidos do Estudo de Baixo Carbono para o Brasil[2] - Uso da Terra, Mudanças do Uso da Terra e Florestas de Soares Filho et al. (2010) e do Pacto de Autarcas para o Clima e Energia[3] de Neves et al., (2016), respectivamente (tabela 10).

Tabela 10 - Fatores de emissão de GEE das fontes de geração.

	Hidráulica[1]	Biomassa[2]	Eólica[1]	Gás Natural[1]	Óleo[1]	Carvão[1]	Nuclear[1]	Solar[3]
Fator (gCO_{2eq}/kWh)	86	1580	16	518	829	1144	14	50

Fonte: Autor(2023).

Para o caso da energia em hidrelétrica foram considerados estudos de avaliação do ciclo de vida que englobasse etapas de construção, geração e emissões de reservatórios, uma vez que estes possuem emissões significativas e caracterizam a fase de operação da usina, assim como uma potência instalada total das fontes geradoras de energia elétrica no Brasil é de 181,60 GW.

A metodologia de cálculo das emissões de carbono para fontes de geração de energia (EGEE) se baseia na capacidade instalada de produção de energia (CPUSINA) e no fator de emissão de GEE (FGEE) e o cálculo pode ser representado pela equação 1:

$$E_{GEE} = (CP_{USINA}\ x\ F_{GEE}) \qquad (1)$$

Onde:

E_{GEE} - Estimativa de geração de GEE (ton CO_2)

CP_{USINA} - Capacidade Instalada de produção de Energia (kWh)

F_{GEE} - Fator de emissão de GEE (gCO_{2eq}/kWh)

Para calcular a redução de área do reservatório das hidrelétricas devido à redução da geração por meio dessa fonte utiliza-se as equações 2 e 3.

$$E_{GEE\ at} = (E_{GEE}\ x\ A_{RES\ ATUAL}) \qquad (2)$$

Onde:

$E_{GEE\ at}$ - Geração de GEE em Hidrelétricas para o total de área alagada (ton CO_{2eq});

E_{GEE} - Emissão de GEE ton CO_{2eq} por km^2;

$A_{RES\ ATUAL}$ - Área total de reservatório no cenário atual (km^2).

$$R_{ARES} = (A_{RES\ ATUAL} - A_{RES\ CEN3}) \qquad (3)$$

Onde:

R_{ARES} - Redução de área do reservatório das hidrelétricas (km^2);

$A_{RES\ ATUAL}$ - Área do reservatório das hidrelétricas no cenário atual (km^2);

$A_{RES\ CEN3}$ - Área do reservatório das hidrelétricas no cenário 3 (km^2).

4 RESULTADOS

4.1 Mensuração e relação da geração de energia elétrica com os demais parâmetros

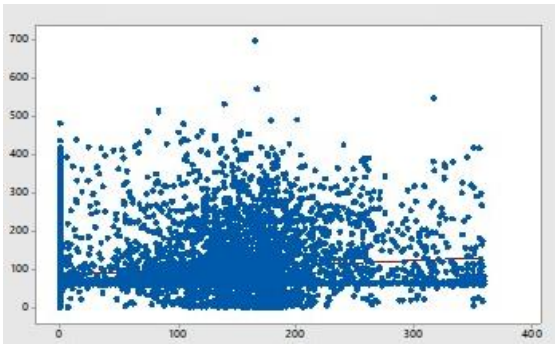
A figura 10 mostra os gráficos de dispersão entre a geração de energia e a direção do vento em quatro situações diferentes. Pode-se observar a tendência crescente das gerações conforme a direção do vento se aproxima do quarto quadrante (Figura 10a). Com a filtragem dos dados para o terceiro quartil de geração, ou seja, onde há as maiores gerações de energia, também pode-se perceber a tendência crescente dos dados (Figuras 10b, 10c e 10d), o que possibilita observar uma maior média de geração de energia na direção do vento de 330° - 360° (Figura 11).

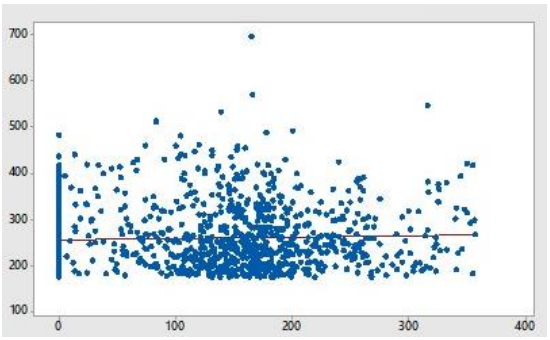
A tabela 11 mostra a geração de energia média (dados gerais) de 100,18 W e a tabela 12 mostra as correlações de geração de energia com os demais parâmetros, com os valores de UV e temperatura da placa mais significativos, 0,483 e 0,442, respectivamente.

Com o fracionamento da série histórica de geração de energia em subamostras, utilizando como filtro o terceiro quartil da direção do vento, ou seja, dividindo 25% dos dados das maiores gerações em quatro quadrantes de atuação do vento, onde 0 a 90° constitui-se uma amostra, entre 90° e 180° a segunda amostra, e assim sucessivamente, observa-se, na tabela 13 que, a média de geração de energia é de 258,79 W, entre 0° e 90º (primeiro quadrante), 257,36 W no segundo quadrante, 257,47 W no terceiro quadrante e 261,43 W no quarto quadrante, resultando em um pequeno acréscimo na eficiência de geração no último quadrante em relação aos demais quadrantes.

a. Dados gerais de geração para todas as DV

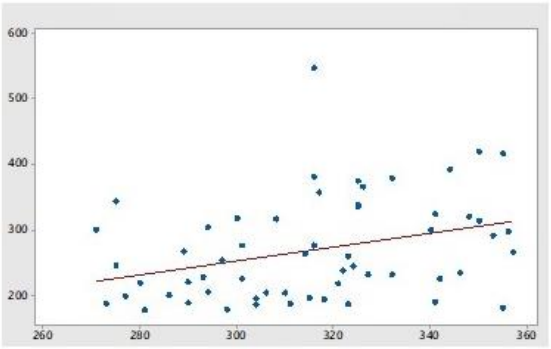
b. Dados de geração maiores que 175 W (terceiro quartil) para todas as DV





c. Dados de geração maiores que 175 W (terceiro quartil) para DV 270° – 360°

d. Dados de geração maiores que 175 W (terceiro quartil) para DV 300° – 360°



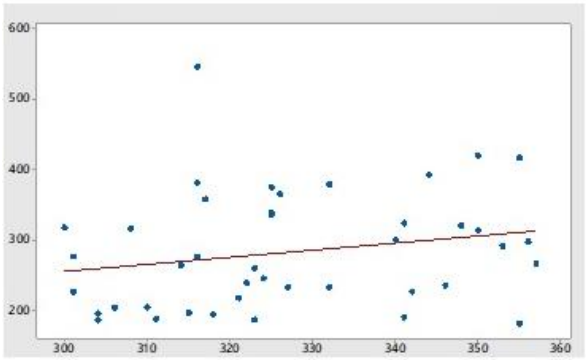


Figura 10 - Gráficos de dispersão com linha de tendência de 270° a 360°

Fonte: Autor(2023).

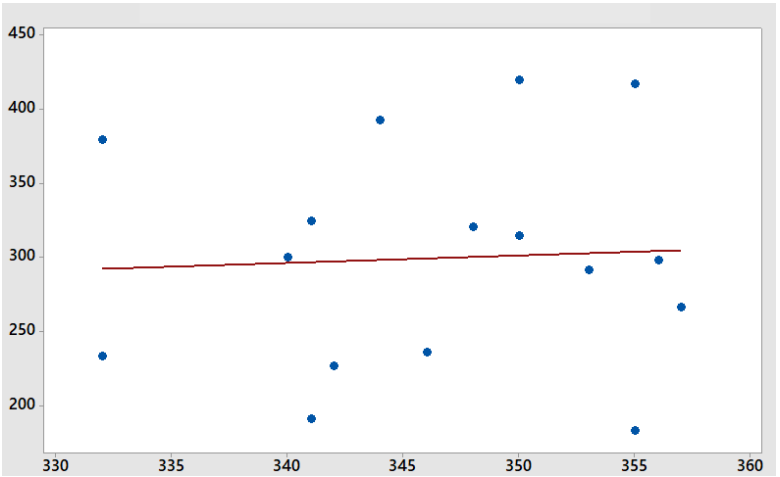


Figura 13 - Gráficos de dispersão com linha de tendência de 330° a 360°

Fonte: Autor(2023).

Tabela 11 - Valores médios (dados gerais) dos parâmetros analisados

Estatísticas Descritivas: Geracao; Placa Temp; TEMP; ... ; UV; VV; DV; PA

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Geracao	7431	0	100.18	0.955	82.32	0.220	61.17	68.88	122.54	696.47
Placa Temp	7431	0	27.336	0.0573	4.941	12.080	23.550	27.180	30.610	48.440
TEMP	7431	0	29.039	0.0565	4.870	11.650	25.430	29.590	32.690	45.320
UMIDADE	7431	0	59.007	0.209	18.039	17.600	45.530	54.100	69.830	100.000
UV	7431	0	6.9969	0.0148	1.2768	5.3500	6.0400	6.6600	7.6300	12.3200
VV	7431	0	0.15720	0.00226	0.19451	0.00000	0.00000	0.08000	0.25000	1.51000
DV	7431	0	98.44	1.04	89.47	0.00	0.00	105.00	162.00	359.00
PA	7431	0	1012.3	0.0477	4.11	1000.7	1009.6	1012.7	1015.4	1021.4

Fonte: Autor(2023).

Tabela 12 - Correlações de geração com os demais parâmetros

	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV	DV	PA
Geração	0,442	0,371	-0,338	0,483	0,068	0,157	0,044
Valor p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autor(2023).

Tabela 13 - Valores médios dos parâmetros analisados no terceiro quartil em relação à direção do vento.

1. Geração maior que 175 W e DV entre 0° e 90°

Estatísticas Descritivas: Geracao; Placa Temp; TEMP; ... ; UV; VV; DV; PA

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Geracao	465	0	258.79	3.07	66.22	175.07	205.90	244.70	296.13	513.47
Placa Temp	465	0	30.130	0.182	3.923	20.660	27.265	29.650	32.360	43.250
TEMP	465	0	31.613	0.125	2.685	20.610	29.945	31.790	33.330	41.530
UMIDADE	465	0	51.829	0.438	9.434	30.240	45.095	50.970	57.175	86.800
UV	465	0	7.2224	0.0262	0.5640	6.0400	6.8800	7.1400	7.5500	9.9100
VV	465	0	0.05944	0.00644	0.13894	0.00000	0.00000	0.00000	0.01000	0.91000
DV	465	0	12.13	1.18	25.50	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00
PA	465	0	1012.7	0.161	3.48	1003.3	1010.4	1013.5	1015.4	1020.5

2. Geração maior que 175 W e DV entre 90° e 180°

Estatísticas Descritivas: Geracao; Placa Temp,(â„ƒ); TEMP; ... VV; DV; PA

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3
Geracao	495	0	257.36	3.30	73.49	175.00	200.85	237.19	297.84
Placa Temp,(â„ƒ)	495	0	29.923	0.206	4.583	16.770	26.980	29.410	32.160
TEMP	495	0	30.514	0.143	3.172	17.240	28.560	30.710	32.450
UMIDADE	495	0	51.900	0.404	8.978	26.920	45.330	51.400	57.970
UV	495	0	7.2905	0.0259	0.5768	6.1300	6.9000	7.1800	7.6700
VV	495	0	0.17376	0.00725	0.16120	0.02000	0.05000	0.12000	0.24000
DV	495	0	148.32	1.14	25.34	90.00	129.00	152.00	170.00
PA	495	0	1013.3	0.158	3.51	1003.6	1011.0	1013.9	1015.8

3. Geração maior que 175 W e DV entre 180° e 270°

Estatísticas Descritivas: Geracao; Placa Temp; TEMP; ... ; UV; VV; DV; PA

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Geracao	238	0	257.47	3.95	60.90	175.12	206.36	244.71	297.44	491.49
Placa Temp	238	0	29.350	0.262	4.049	16.770	26.488	29.155	31.595	40.330
TEMP	238	0	30.673	0.221	3.413	17.240	28.212	31.140	33.245	37.570
UMIDADE	238	0	51.617	0.549	8.475	36.460	45.863	50.045	56.438	78.870
UV	238	0	7.2196	0.0325	0.5015	5.6400	6.9300	7.1400	7.5200	9.0200
VV	238	0	0.14416	0.00766	0.11818	0.02000	0.05000	0.11000	0.20000	0.59000
DV	238	0	215.95	1.79	27.64	180.00	191.00	212.00	241.25	270.00
PA	238	0	1011.5	0.244	3.76	1003.6	1008.3	1011.2	1013.9	1020.5

4. Geração maior que 175 W e DV entre 270° e 360°

Estatísticas Descritivas: Geracao; Placa Temp; TEMP; ... ; UV; VV; DV; PA

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Geracao	306	0	261.43	4.34	75.88	175.15	203.01	239.43	304.80	696.47
Placa Temp	306	0	30.388	0.268	4.682	20.960	27.210	29.735	33.093	43.820
TEMP	306	0	30.840	0.181	3.175	21.900	28.740	30.950	32.897	39.920
UMIDADE	306	0	50.776	0.500	8.743	26.920	44.845	50.125	56.308	79.200
UV	306	0	7.2839	0.0295	0.5165	6.1300	6.9400	7.1800	7.6400	9.1800
VV	306	0	0.15935	0.00833	0.14579	0.02000	0.04000	0.11500	0.23250	0.87000
DV	306	0	157.63	0.828	14.49	130.00	146.00	158.50	170.25	180.00
PA	306	0	1013.1	0.218	3.81	1003.6	1010.2	1013.6	1015.8	1020.4

Fonte: Autor(2023).

Após levantamento das médias de geração de energia elétrica do terceiro quartil em relação a cada quadrante de direção do vento pode-se ajustar a faixa de análise para as maiores média de gerações de energia e, com isso, identificou-se que a direção de vento entre 330° e 360° apresenta a maior média de geração do terceiro quartil, com valor de 299,6 W (tabela 14), perfazendo um acréscimo na eficiência da geração de energia de, aproximadamente, 15% com relação à média do quarto quadrante.

Tabela 14 - Valores médios dos parâmetros analisados no terceiro quartil em relação à direção do vento entre 300° e 360°.

Estatísticas Descritivas: Geracao; Placa Temp; TEMP; ... ; UV; VV; DV; PA

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Geracao	42	0	284.0	12.6	81.8	182.7	214.9	271.4	336.9	546.2
Placa Temp	42	0	32.126	0.572	3.707	26.170	29.587	31.240	33.940	45.860
TEMP	42	0	33.182	0.432	2.802	26.600	31.790	32.510	34.490	42.290
UMIDADE	42	0	45.40	1.20	7.76	31.15	40.26	44.73	48.61	72.64
UV	42	0	7.5726	0.0911	0.5905	6.6600	7.0200	7.6300	7.9300	9.3400
VV	42	0	0.2024	0.0261	0.1692	0.0200	0.0700	0.1550	0.3000	0.7700
DV	42	0	327.14	2.69	17.41	300.00	314.75	324.50	342.50	357.00
PA	42	0	1011.2	0.616	3.99	1004.4	1007.6	1011.8	1014.4	1018.5

Fonte: Autor(2023).

Por meio das correlações (tabelas 15 a 19) entre os valores obtidos pela leitura dos elementos meteorológicos e os dados de geração e temperatura de placa pode-se iniciar uma observação mais detalhada desses dados.

Pode-se observar que, em geral, as correlações entre geração de energia e a direção do vento, a temperatura de placa e a radiação ultravioleta proporcionam valores mais significativos em relação aos demais elementos.

No terceiro quadrante (tabela 17) pode-se encontrar a maior correlação entre a radiação ultravioleta e geração de energia que alcança o valor de 0,401, considerada moderada. Ainda há uma relação proporcional inversa em relação a umidade relativa de -0,313. Diante destes fatores numéricos pode-se, de forma empírica, ter uma impressão de ser o quadrante que apresenta os resultados mais positivos para o estudo.

No entanto, ao se estabelecer uma correlação por meio da observação da concentração de dados com maiores valores de geração, identifica-se que há uma faixa da coordenada na direção noroeste, 330° a 360° (tabela 20), que apresenta valores médios de geração (299,6 W) mais elevados (figura 12).

Tabela 15 - Correlações 1º quadrante de direção de vento (0° a 90°) e geração maior que 175 W

	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV	DV	PA
Geração	0,308	0,223	-0,284	0,308	0,180	0,184	-0,093
p-value	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autor(2023).

Tabela 16 - Correlações 2º quadrante de direção de vento (90° a 180°) e geração maior que 175 W

	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV	DV	PA
Geração	0,228	0,207	-0,181	0,292	0,063	-0,019	-0,096
p-value	0,000	0,000	0,000	0,000	0,162	0,674	0,032

Fonte: Autor(2023).

Tabela 17 - Correlações 3º quadrante de direção de vento (180° a 270°) e geração maior que 175 W

	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV	DV	PA
Geração	0,397	0,315	-0,313	0,401	0,132	0,066	-0,132
p-value	0,000	0,000	0,000	0,000	0,043	0,314	0,041

Fonte: Autor(2023).

Tabela 18 - Correlações 4º quadrante de direção de vento (270° a 360°) e geração maior que 175 W

	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV	DV	PA
Geração	0,115	-0,018	0,077	0,253	0,082	0,333	-0,119
p-value	0,392	0,892	0,567	0,053	0,540	0,011	0,375

Fonte: Autor(2023).

Tabela 19 - Correlações para a direção de vento 300° a 360° e geração maior que 175 W

	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV	DV	PA
Geração	0,012	-0,155	0,062	0,386	-0,069	0,272	-0,001
p-value	0,942	0,328	0,696	0,012	0,663	0,082	0997

Fonte: Autor(2023).

Tabela 20 - Correlações para a direção de vento 330° a 360° e geração maior que 175 W

	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV	DV	PA
Geração	-0,112	-0,271	0,315	-0,231	-0,021	0,010	0,253
p-value	0,680	0,311	0,425	0,389	0,940	0,970	0,345

Fonte: Autor(2023).

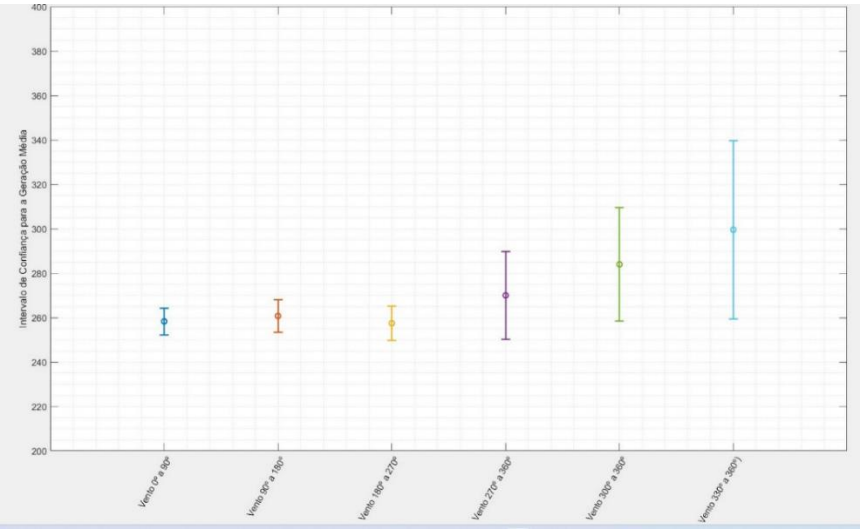


Figura 14 - Intervalo de confiança para geração de energia dividindo os dados em quadrantes

Fonte: Autor(2023).

A fim de possibilitar a maior precisão da análise dos dados pode-se observar que, além da direção do vento entre 330° e 360º possuir estimativa pontual para a média maior, o limite inferior para a estimativa da geração média, nesse intervalo de direção do vento, quase supera o limite superior para as estimativas de geração média de todos os outros quadrantes. Já o teste estatístico nesta faixa afasta a igualdade com valor p de 0,07, o que traz uma proximidade muito grande a 95% de confiabilidade.

Não há diferença significativa entre as médias dos quadrantes em relação à geração, assim a hipótese nula não foi refutada, isso não implica que as médias sejam necessariamente iguais. Pode ser que as diferenças entre as médias sejam pequenas. Os resultados do teste de hipóteses para cada quadrante, incluindo estatísticas relevantes como valor-p.

Dessa forma, pode-se observar que a geração de energia é função de uma composição de variáveis, que pode diferir em cada região ou local de instalação das placas fotovoltaicas e, para este caso, em específico, ocorre geração mais alta em direções de vento entre 330 e 360°, onde a temperatura da placa, a temperatura ambiente, a radiação ultravioleta e a velocidade do vento estão mais altas do que nas outras direções. A pressão atmosférica se mantém em todas as direções e a umidade relativa está mais baixa do que nas outras direções.

Segundo Matin et al (2020) a eficiência de geração das células fotovoltaicas ainda é bastante baixa e influenciada pela temperatura e irradiância solar e, consequentemente, pelos elementos meteorológicos.

Tal especificidade pode estar relacionada à posição geográfica característica do local de observação no Município de Itajaí, onde a face coletora das placas fotovoltaicas está instalada à 282° NW. O vento noroeste é um vento mais seco, proveniente de dentro do estado de Santa Catarina, deixando o céu com menos nebulosidade, ampliando a radiação ultravioleta para dentro de uma faixa de padrões excelentes de geração de energia.

As condições climáticas desempenham um papel crucial na geração de energia solar, já que o excesso ou a falta de certos fenômenos podem afetar diretamente a captação de energia. Um clima caracterizado por alta umidade e falta de vento pode resultar em condições de calor excessivo ao redor das células solares, prejudicando significativamente a produção de energia. Além disso, a presença de umidade pode levar à formação de precipitação e nuvens que encobrem e dificultam a absorção eficiente da radiação solar. O vento, por sua vez, é um elemento de extrema importância, pois tem o papel de movimentar as massas de ar, deslocar a umidade e dispersar as nuvens. Além disso, ele desempenha um papel essencial no resfriamento do sistema fotovoltaico, contribuindo para a sua eficiência e desempenho geral (NAVNTOFT et al., 2019).

De acordo com a análise de sensibilidade conduzida por LV et al. (2014) com base nos dados de medição da geração de energia solar em 2011, de uma perspectiva abrangente de geração de energia diária e mensal, as cinco principais variáveis climáticas de importância são tempo de radiação solar (ou seja, radiação solar), velocidade do vento, umidade relativa, cobertura de nuvens e temperatura externa.

A potência gerada pelos módulos fotovoltaicos é linearmente dependente da irradiância, exceto para pequenos valores de irradiância quando a potência de saída é zero. A eficiência da planta fotovoltaica não depende apenas fortemente da irradiância, mas também depende da temperatura do módulo (CHOKMAVIROJ et al., 2006).

Neste estudo não foi identificada grandes variações entre a temperatura da placa e a temperatura ambiente (tabela 13), inclusive com a média de temperatura da placa em torno de 1°C menor do que a temperatura ambiente. Esse fato pode

estar relacionado ao local e posição de instalação da placa, pois o conjunto fotovoltaico está elevado do telhado, possibilitando a circulação e convecção de ar nas placas.

Segundo Hamrouni et al (2008), para diversas radiações solares variando entre 100 a 1000 W/m² e para uma temperatura constante igual a 25 °C, tem-se um crescente da geração com o aumento da radiação e um máximo de eficiência global do sistema fotovoltaico para 300 W/m² de radiação.

Segundo a pesquisa de Kaldellis et al. (2014), à medida que a velocidade do vento aumenta, a temperatura de trabalho das células fotovoltaicas se aproxima gradualmente da temperatura ambiente, o que influencia a eficiência da geração de energia. Dessa forma, o processo de conversão fotovoltaica, além da radiação solar instantânea, depende também da temperatura dos módulos. A temperatura do módulo, por sua vez, é influenciada pelas condições climáticas, bem como pelas características técnicas dos painéis fotovoltaicos.

A irradiância solar tem o maior impacto na potência de saída de um sistema fotovoltaico (DIAF et al, 2008). Além da irradiância, as condições climáticas, como a temperatura ambiente, juntamente com vários outros fatores (por exemplo, ângulo de incidência (AOI), poeira, etc.) (KALDELLIS et al., 2012) também podem afetar a saída de energia e a produção de energia de um módulo fotovoltaico. Para este fim, a temperatura do módulo é influenciada pela temperatura ambiente, padrões de nuvens e velocidade do vento (BUDAY, 2011), enquanto a taxa de mudança de temperatura depende também do material fotovoltaico e da posição do quadro.

Normalmente, o impacto da convecção livre é bastante limitado, enquanto o mecanismo de radiação é dominante durante valores baixos de velocidade do vento (KALDELLIS et al., 2014).

O processo de conversão fotovoltaica, além da radiação solar instantânea, depende também da temperatura dos módulos. A temperatura do módulo, por sua vez, depende das condições climáticas (por exemplo, temperatura ambiente, irradiação solar e velocidade do vento) e das características técnicas dos painéis fotovoltaicos (por exemplo, material, tipo, montagem e ventilação) (KALDELLIS et al., 2014).

Para uma melhor caracterização e previsão do desempenho do módulo fotovoltaico sob uma ampla variedade de condições climáticas, vários estudos detalhados foram realizados (JACQUES et al., 2013; ARMSTRONG et al., 2010) e

vários modelos foram propostos, com a maioria deles baseados apenas em medições internas controladas (por exemplo, controlando o fluxo de vento sobre a superfície do painel com ventiladores).

4.2 Parâmetros para melhoria da eficiência da geração de energia limpa

4.2.1 Cálculo das emissões de gases das diversas fontes de geração

A partir dos resultados de melhoria da eficiência de geração de energia fotovoltaica pode-se perceber a possibilidade de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes de hidrelétricas e termelétricas, em detrimento da utilização de energia solar.

As tabelas 21 e 22 mostram os valores de geração de energia e de emissões calculados por meio da equação 1, por tipo de geração de energia e para cada cenário proposto. Nestes cenários foram mantidos constantes os valores referentes às energias relacionadas à Eólica, Gás Natural e Nuclear, assim como foram reduzidas as energias provenientes de hidráulicas e de termelétrica (biomassa, carvão e óleo) e foi ampliada a energia oriunda de solar.

No cenário atual há uma emissão de gases totais de 28.609 x 10^6 tonCO_{2eq}, enquanto nos cenários propostos são gerados 28.170, 27.592 e 27.078 x 10^6 tonCO_{2eq}, ou seja, uma redução de, aproximadamente 1.531 x 10^6 tonCO_{2eq} do cenário 3 em comparação com o cenário atual, o que resulta em 4,7% de redução.

De acordo com o relatório especial do IPCC (2021), é crucial reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em 45% até 2030, em relação aos níveis de 2010, para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. Essa redução é necessária para evitar consequências mais graves das mudanças climáticas.

Embora uma redução de 4,7% nas emissões, relacionadas à geração de energia elétrica no Brasil, não seja suficiente para gerar um grande impacto no aumento da temperatura média global, é mais um fator a se considerar para mitigação do aquecimento global e, é fundamental reconhecer que esse fenômeno é

complexo e influenciado por diversos fatores. Portanto, além desse progresso, é necessário um esforço muito maior, no tema fontes de geração de energia elétrica, para alcançar as metas de mitigação do aquecimento global estabelecidas pelo IPCC e prevenir impactos significativos e irreversíveis.

Tabela 21 - Geração de energia para cada cenário e cada fonte de geração.

	Geração de energia (GW)								
Cenário	**Hidráulica**	**Biomassa**	**Eólica**	**Gás Natural**	**Óleo**	**Carvão**	**Nuclear**	**Solar**	**Total**
Atual (2022)	114,41	13,98	21,79	11,26	5,81	2,36	3,81	8,17	181,60
1	113,32	13,62	21,79	11,26	5,63	2,18	3,81	9,99	
2	112,23	13,26	21,79	11,26	5,45	2,00	3,81	11,80	
3	111,14	12,89	21,79	11,26	5,27	1,82	3,81	13,62	

Fonte: Autor(2023).

Tabela 22 - Emissões de GEE para cada cenário.

	Emissões (x 10^6 tonCO_{2eq})									
Cenários	**Hidráulica**	**Biomassa**	**Eólica**	**Gás Natural**	**Óleo**	**Carvão**	**Nuclear**	**Solar**	**Total**	**Redução (%)**
Atual (2022)	9839	11	349	5833	4816	2700	53	409	24009	-
1	9746	11	349	5833	4667	2494	53	500	23652	1,5
2	9652	10	349	5833	4518	2288	53	590	23293	3,1
3	9558	10	349	5833	4369	2082	53	681	22935	4,7

Fonte: Autor(2023).

4.2.3 Cálculo da redução de consumo de combustíveis

Como consequência da redução da geração de energia proveniente de termelétricas há uma redução do consumo (tabela 21) dos combustíveis (carvão, óleo e biomassa), chegando ao máximo de 22,9% de redução para o carvão e, aproximadamente 9,3% e 7,8% para o óleo e a biomassa respectivamente.

Tabela 23 - Reduções de combustíveis usados em termelétricas.

	Consumo Combustível (kg)				
Combustível	**Cenário atual**	**Cenário 1**	**Cenário 2**	**Cenário 3**	**Redução (%) Cenário 3 x Cenário atual**
Carvão	7.080.000	6540000	6000000	5460000	22,9
Óleo	2.3240.000	22520000	21800000	21080000	9,3
Biomassa	27.960.000	27240000	26520000	25780000	7,8

Fonte: Autor(2023).

4.2.3 Cálculo de redução de área de reservatório pela redução da geração em hidrelétricas

Mediante redução do percentual de geração de energia por meio das fontes hidráulica, biomassa, óleo e carvão (tabela 21), da manutenção da geração de energia por meio das fontes eólica, gás natural e nuclear e da ampliação da geração de energia por meio da fonte solar, além de uma redução das emissões de CO_2, provenientes da geração propriamente dita, há também uma possibilidade de redução de emissões oriundas da geração de CH_4 devido à decomposição

anaeróbia de matéria orgânica presente dos lagos de hidrelétricas (BARROS et al., 2021).

Parte da emissão de CO_{2eq} é proveniente da emissão de CH_4 dos reservatórios das hidrelétricas, que ocorre devido à decomposição anaeróbia de matéria orgânica (figura 13).

Zanoni et al (2015) analisando as características do solo inundado e a produção CH_4 que é produzido no fundo dos reservatórios pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica e emitido na interface água-ar, através de bolhas ou difusão, demonstrou que os fatores locais do alagamento influenciam na quantidade de CH_4 produzida.

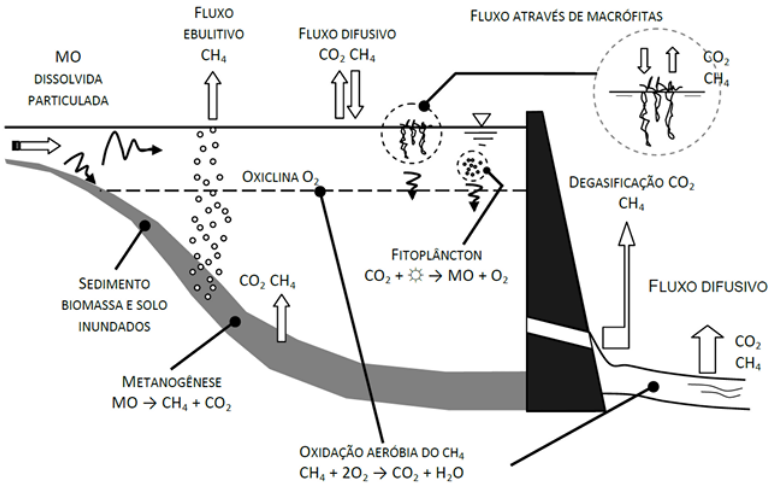


Figura 15 Emissão de gases por decomposição anaeróbia de matéria orgânica dos reservatórios de hidrelétricas.

Fonte: IHA (2008).

Segundo alguns autores (LOUIS et al., 2000; PUEYO et al, 2011), a taxa média de emissão de metano em hidrelétricas pode variar de 20 a 300 mg de CH_4/m^2 por dia, dependendo das condições locais.

Segundo o método de Santos et al. (2008) a emissão de CH_4 é 18,29 $kg.km\text{-}2.dia^{-1}$, o que corresponde há uma emissão anual de 0,36 ton x 10^6 em 55.000 km^2 de área de reservatório, resultando em 2,06 ton x 10^6 CO_{2eq} ano, considerando um GWP de CH_4 de 21.

Considerando a geração de GEE em Hidrelétricas para o total de área alagada (E_{GEEatl}), para o cenário atual, em 9839 x 10^6 ton CO_{2eq} (tabela 22) e a área

total de reservatório de 55.000 km², pode-se calcular a emissão de GEE por km² (E_{GEE}), por meio da equação 2.

$$E_{GEE\ at} = (E_{GEE}\ x\ A_{RES\ ATUAL})$$

$$9.839\ x\ 10^6 = (E_{GEE}\ x\ 55.000)$$

$$E_{GEE\ at} = 178.891\ \frac{ton\ CO_{2eq}}{Km^2}$$

A partir da emissão do cenário 3 (9.558 x 10^6 ton CO_{2eq} - tabela 22) pode-se então calcular a área final do reservatório.

$$E_{GEE\ at} = (E_{GEE}\ x\ A_{RES\ CEN3})$$

$$9.558\ x\ 10^6 = (163.927\ x\ A_{RES\ CEN3})$$

$$A_{RES\ CEN3} = 53.429{,}21\ km^2$$

E, por meio da equação 3, pode-se calcular a sua consequente redução de área (aproximadamente 2,9%), pela redução da geração de energia por meio de hidrelétricas.

$$R_{ARES} = (A_{RES\ ATUAL} - A_{RES\ CEN3})$$

$$R_{ARES} = (55.000 - 53.429{,}21)$$

$$R_{ARES} = 1.570{,}79\ km^2$$

Estas equações são uma forma simplificada de estimar a geração de gases de efeito estufa em usinas hidrelétricas e, é importante lembrar que, o fator de emissão pode variar de acordo com as características de cada usina e que outros fatores podem influenciar nas emissões, como o tipo de vegetação removida durante a construção do reservatório e o tipo de solo presente na região.

De acordo com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), existem aproximadamente 220 usinas hidrelétricas em operação no Brasil, com capacidade instalada total de mais de 104 GW (gigawatts) no ano de 2022. A ANEEL fornece informações detalhadas sobre cada uma dessas usinas, incluindo o tamanho das barragens e represas, área inundada e o volume de água armazenado.

Por meio dos estudos do Ministério de Minas e Energia do Brasil, é possível constatar que no ano de 2020 houve um consumo significativo de energia oriunda de hidrelétricas, totalizando 396.381 GWh (MME, 2022). Essa quantidade expressiva de energia gerada por meio das usinas hidrelétricas reforça a importância desse setor na matriz energética nacional e destaca seu papel fundamental no abastecimento de eletricidade no país.

No entanto, vale lembrar que as hidrelétricas em operação no Brasil têm uma área total de barragens e represas de aproximadamente 55.000 km² (ANEEL, 2022) e também é válido destacar que o tamanho das barragens e represas das hidrelétricas no Brasil é objeto de debate e controvérsia em função dos impactos socioambientais que esses empreendimentos causam. Diversas organizações e movimentos sociais têm questionado a construção de grandes barragens e represas, argumentando que elas causam a perda de áreas florestais, a remoção de comunidades tradicionais e o deslocamento forçado de populações ribeirinhas (FEARNSIDE, 2020).

Já Amaral et al. (2019) realizou uma avaliação ambiental de usinas hidrelétricas no Brasil, utilizando a análise de ciclo de vida e a metodologia de inventário. A partir disso, os autores calcularam as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e outras categorias de impacto ambiental, considerando a densidade de potência da usina para diferenciar as emissões por km² de área inundada. Os resultados mostraram que a densidade de potência foi um fator importante na determinação das emissões de GEE, com variações significativas entre as usinas avaliadas. O estudo destacou a importância da consideração da densidade de potência como um fator relevante para a avaliação ambiental de usinas hidrelétricas. A estimativa da geração de gases de efeito estufa na geração de energia hidrelétrica pode ser realizada através de uma equação simplificada, que leva em consideração a capacidade de geração de energia da usina, a área do reservatório e o fator de emissão.

Os trabalhos de Miranda (2012) e Amaral (2019) abordam a avaliação do desempenho ambiental de usinas hidrelétricas, com foco na análise das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Ambos os estudos utilizam a abordagem de ciclo de vida para avaliar as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida das usinas, desde a construção até o fim da vida útil.

Enquanto Miranda (2012) enfatiza a importância da consideração da densidade de potência da usina na avaliação das emissões de GEE, Amaral (2019) utiliza esse conceito para calcular as emissões de GEE por km² de área inundada. Essa abordagem permite uma análise mais precisa do desempenho ambiental de diferentes usinas hidrelétricas, considerando as características específicas de cada empreendimento. Combinando essas abordagens, é possível obter uma avaliação mais completa do desempenho ambiental das usinas hidrelétricas.

Além disso, é importante destacar que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em seu Relatório Anual da Fiscalização do Uso do Patrimônio da União (2022), utiliza como referência a capacidade de geração elétrica e a área total de barragens no Brasil para estimar as emissões de gases de efeito estufa. Essa abordagem considera a diversidade de usinas e barragens existentes no país, que apresentam diferentes características de operação e impacto ambiental. No entanto, é importante salientar que essa metodologia pode ser aprimorada com a inclusão de fatores de emissão específicos para cada usina, como proposto por Miranda e Amaral.

5 PRODUTOS DESENVOLVIDOS

5.1 - Equipamento integrado de geração de energia fotovoltaica e estação meteorológica

O equipamento (figura 14) foi organizado com o objetivo de proporcionar a coleta de dados de geração de energia fotovoltaica, conjuntamente com a coleta das variáveis meteorológicas (direção e velocidade do vento, temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, radiação ultravioleta, além da temperatura da placa).

Este equipamento representa uma ferramenta tecnológica que possibilita o estudo da eficiência da geração de energia mediante as variáveis meteorológicas.

Figura 16 - Equipamento de geração de energia fotovoltaica e coleta de variáveis meteorológicas.

Fonte: Autor(2023).

5.2 - Artigo publicado

Influência dos elementos meteorológicos na eficiência da geração de energia elétrica em células fotovoltaicas. Estrabão Vol (2):223 - 2296, 2021. DOI: 10.53455/re.v2i.53

5.3 - Artigo submetido

PORTO, E. P.; SUSKI, C. A. Melhoria da eficiência da geração fotovoltaica pela adequabilidade aos elementos meteorológicos. Renewable Energy. Submetido em 2023.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da análise da influência da direção e velocidade do vento, da temperatura ambiente, da umidade relativa, da pressão atmosférica, da radiação ultravioleta e da temperatura da placa na eficiência da geração de energia fotovoltaica e seu efeito climático pode-se identificar que:

- A eficiência da geração de energia fotovoltaica pode ser influenciada pela composição dos elementos meteorológicos e da temperatura da placa e pode diferir em cada região ou local de instalação das placas fotovoltaicas, neste trabalho não foi observado, no entanto não deve ser excluído de trabalhos futuros, sabendo que a temperatura da placa é diretamente proporcional a energia produzida;
- No caso específico desse estudo, ocorre uma geração média 15% mais alta em direções de vento entre 330° e 360°, pois a face coletora das placas fotovoltaicas está instalada à 282° NW e, o vento noroeste é um vento mais seco, proveniente de dentro do estado de Santa Catarina, deixando o céu com menos nebulosidade, ampliando a radiação ultravioleta para dentro de uma faixa de padrões excelentes de geração de energia;
- A proposição de cenários com ampliação do percentual de geração de energia por placas fotovoltaicas resulta em uma redução das emissões de gases de efeito estufa de até 4,7 %.
- A redução da geração de energia por meio de hidrelétrica, proposta nos cenários, possibilita uma redução de 2,9% da área dos reservatórios;
- A redução da geração de energia por meio de termoelétrica, proposta nos cenários, possibilita uma redução do consumo do Carvão, Óleo e Biomassa de 22,9; 9,3 e 7,8%, respectivamente;
- O estudo proporciona mais um fator a se considerar para a mitigação do aquecimento global e, é fundamental reconhecer que esse fenômeno é complexo e influenciado por diversos componentes.
- Trabalhos futuros podem avaliar o ganho de eficiência como resultado do resfriamento da placa fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

ALVES, B. B. **Biomassa na produção de energia limpa**. 2019. 16f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) - Centro Universitário de Maringá - Unicesumar - Ead, Maringá, 2019.

Alves, T. L. B., Azevedo, P. V. de., & Olinda, R. A. de. (2015). **Influência do clima na incidência de infecção respiratória aguda em crianças nos municípios de campina grande e monteiro, paraíba, brasil**. Revista Brasileira De Meteorologia, 30(4), 467–477. https://doi.org/10.1590/0102-778620140066

AMARAL, F. C. A. et al. **Geothermal energy in Brazil: A review of its potential and barriers**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 127, p. 109879, 2020.

AMARAL, T. et al. **Environmental impacts of hydroelectric power plants: a case study from the Brazilian Amazon**. Energy Policy, v. 100, p. 118-128, 2017.

AMARAL, T. R.; NAVEIRA-COTTA, C. P.; NASSER, L. S.; BEZERRA, B. S.; SANTOS, A. M.; LIMA, R. P. **Environmental performance of hydropower plants: A Brazilian case study**. Journal of Cleaner Production, v. 232, p. 751-763, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.277

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica Atlas de Energia Elétrica** – ANEEL 2ª Edição; Brasília. 2008.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica. Relatório De Desempenho Das Usinas Termoelétricas Despachadas Centralizadamente – Tipos I E Iia** / Agência Nacional de Energia Elétrica. – Brasília: ANEEL, 2018.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2021**. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656877/10166071/Atlas+de+Energia+El%C3%A9trica+do+Brasil+2021.pdf. E-Pub.

ANEEL. **Banco de Informações de Geração**. Brasília, 2022. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm. E-pub.

ARMSTRONG, S; HURLEY, WG. **A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions**. Appl Therm Eng 2010; 30 (11e12): 1488-95.

AZEVEDO, P. R. M., MORALES, F. E. C., PINHO, A. L. S.. **Métodos básicos de estatística**. Natal, RN : EDUFRN, 2018.

BAE, M.-S.; HAN, J.; KIM, J.; CHOI, K.-C. **Influence of particulate matter on visibility deterioration under different weather conditions**. Atmospheric Research, v. 204, p. 34-42, 2018.

BARROS, N. et al. **Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs: what knowledge do we have and what needs to be done?**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 147, 111231, 2021.

BENTO, T. S., HÉLIA, S.. **Células Solares - Uma Abordagem para o Ensino Médio.** Barra do Garças: UFMT, 2019.

BERNARDES, M. C., Ferreira, F. M., & Bentes, M. P. (2021). **The social and environmental impacts of hydropower plants in the Amazon region**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144, 111048.

BIZZARRI, A.; CUFFARO, M. **Geothermal energy: A review on the status and potential in Italy**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 108, p. 165-177, 2019.

BLAZEV, A. S. **Photovoltaics for Commercial and Utilities Power Generation**. Dinamarca: River Publishers. 2020.

Blunden, J. and T. Boyer, Eds., **2020: "State of the Climate in 2020"**. Bull. Amer. Meteor. Soc., 102 (8), Si–S475, doi:10.1175/2021BAMSStateoftheClimate.1.

BOSCH SENSORTEC. **Datasheet: BME280 Combined humidity and pressure sensor**. Alemanha, publicação eletrônica, 55p. 2014, disponível em : https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf.

BP. BP **Statistical Review of World Energy 2021**. Disponível em: https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html. E-pub.

BP. BP **Statistical Review of World Energy 2022**. Disponível em: https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html. E-Pub.

BRITO, Jorge de; GOMES, Maria da Glória (editores). **Building Thermal Envelope**. Suíça: MDPI AG, 2020, p. 30.

BUDAY, M.S. **Measuring irradiance, temperature and angle of incidence effects on photovoltaic modules in Auburn Hills**, Michigan. 2011.

https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/3665/MNPEF__Disserta%C3%A7%C3%A3o_de_Mestrado_Profissional_Kleber_Dettogni_Vieira_Turma_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

CS – CANADIAN SOLAR - **Manufacturer Data Sheet. Canadá, 2022.** http://www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/Canadian-Solar/3460/CS6U-325P/specification-data-sheet.html

CHEN, G.; Li, G.; Chen, X. (2021). **Research on sustainable development of hydropower energy: Status, challenges, and prospects**. Energy Policy, 149, 112062.

CHOI, Y.; JUNG, S.; PARK, J.-H. **Analysis of fog occurrence and visibility at an airport in Korea from 2013 to 2017**. International Journal of Climatology, v. 39, n. 14, p. 5383-5397, 2019.

CHOKMAVIROJ, S.; WATTANAPONG, R.; SUCHART, Y.; **Performance of a 500 kWp Grid Connected Photovoltaic System at Mae Hong Son Province**, Thailand, Renewable Energy, Vol. 31, N°1, pp. 19 – 28, 2006.

CLAIB - **V Latin American Congress on Biomedical Engineering 2011**, Habana, Cuba: Sustainable Technologies for the Health of All. Alemanha, Springer Berlin Heidelberg, 2012.

CNEN. **Comissão Nacional de Energia Nuclear, Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro**, Rio de Janeiro, 2020.

CEPAL Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe/Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), "**Panorama dos investimentos em inovação em energia no Brasil: dados para um grande impulso energético**", Documentos de Projetos (LC/TS.2020/62; LC/BRS/TS.2020/4), Santiago, 2020.

CORKISH, R., et al. (2006). **Silicon nanostructures for third generation photovoltaic solar cells**. Thin Solid Film. Volumes 511–512 Pages 654-662,

CORKISH, R., et al. (2011). **Impacts of Photovoltaic Penetration Levels on Australian Distribution Networks**. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2(2), 165-171.

CUÉLLAR, A. A.. **Sistemas de Procesamiento Digital.** Espanha, Delta Publicaciones, 2008.

DAYAL, U.; MANI, A. **Unconventional hydrocarbon resources: prospects and challenges**. In: Emerging I

DEMİR BAŞ, A. **Biomass Resource Facilities and Biomass Conversion Processing for Fuels and Chemicals**. Academic Press, 2019.

DIAF, S; NOTTON, G; BELHAMEL, M; HADDADI, M; LOUCHE, A. **Design and technoeconomical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions**. Appl Energy 2008; 85:968e87.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Air pollution**. 2019. Disponível em: https://www.epa.gov/air-pollution-transportation. Acesso em: 25 jan. 2022.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório de Informações de Energia 2021**. Brasília, Brasil, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/relatorios
-publicacoes/informacoes-energeticas. E-Pub.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022**. Brasília, Brasil, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica. E-Pub.

FADEL, M. A. et al. **Techno-economic feasibility study of natural gas-fired microturbines for rural electrification in developing countries**. Energy for Sustainable Development, v. 44, p. 39-52, 2018.

FARAHMAND, H.; JADID, S.; AKBARI, E.; ANVARI-MOGHADDAM, A. **Wind power forecasting: A review of the state-of-the-art with emphasis on wind power variability mitigation**. Renewable Energy, v. 131, p. 899-913, 2019.

FAUST, A.; ABATE, A.; BARNES, P. R. F.; BRUNETTI, G.; FERRY, V. E.; GALLI, G.; GRÄTZEL, M.; KORVINK, J. G.; MASSEY, S.; NEJADDAZZER, P.; NICHOLLS, J. M.; PETER, L. M.; SALIBA, M.; SCHMIDT-MENDE, L.; SMITH, C.; SUM, T. C.; TUCKER, M. G.; WHITE, T. P.; SNAITH, H. J. **Twenty percent efficiency perovskite solar cells with large-area uniformity and improved stability**. Nature, v. 557, p. 429-433, 2018.

FEARNSIDE, P. M. (2020). **Large hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: A flawed climate solution?**. Environmental Science & Policy, 112, 215-225.

FERRAZ, V. C. T**ERMELÉTRICAS - UMA VISÃO GERAL: combustíveis, ciclos térmicos, eficiência**. 2018. 119. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/188714?show=full.

FERREIRA, A. F. et al. **Temperature response to urbanization in the São Paulo metropolitan area**. Climatic Change, v. 146, n. 1-2, p. 129-141, 2018.

FENG, Y. et al. (2020). **Machine learning models to quantify and map daily global solar radiation and photovoltaic power**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. p. 1-13.

FISCHER, G. **Coal transitions in India's electricity sector**. Energy Research & Social Science, v. 44, p. 225-236, 2018. doi: 10.1016/j.erss.2018.03.018.

FLEUREN, R., SCHOLTEN, D., & RIJNSBURGER, S. (2020). **Environmental and social impacts of tidal energy: a review of the literature**. Sustainability, 12(7), 2778.

FOSTER, M. J. et al. **Cloud properties from 16 years of Terra-MODIS observations using the collection** 6.1 retrieval algorithms. Journal of Applied Remote Sensing, v. 12, n. 4, p. 045003, 2018. DOI: 10.1117/1.JRS.12.045003.

GARG, A., MAHAPATRA, S., & BANERJEE, R. (2019). **Biomass combustion: A review on its process and emissions**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101, 545-561. doi: 10.1016/j.rser.2018.11.031

GARCIA, J.. **Determinação dos fatores influentes no consumo de água em residências unifamiliares de Joinville.** Joinville: UDESC. 2020.

GEORGE, M. et al. **Performance analysis of a photovoltaic panel under varying humidity and temperature levels**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 471, n. 1, p. 1-10, 2019.

GHORBANI, M.; JAHANMIRI, A. **Natural gas as a feedstock for chemical industry: A review**. Journal of Natural Gas Science and Engineering, v. 68, p. 1-13, 2019.

Green, M. A., et al. (2012). **The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 20(6), 606-614.

Green, M. A., et al. (2021). **Solar cell efficiency tables (version 57). Progress in Photovoltaics**: Research and Applications, 29(1), 3-15.

HAMROUNI, N.; JRAIDI; M.; CHÉRIF, A. **Solar radiation and ambient temperature effects on the performances of a PV pumping system**. Revue des Ener gies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008) 95 – 106.

HANIFI, H., PFAU, C., TUREK, M., SCHNEIDER, J. **A Practical Optical and Electrical Model to Estimate the Power Losses and Quantification of Different Heat Sources in Silicon Based PV Modules**. Renewable Energy, v. 127, p. 602-612, 2018. Available at:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118310173. E-pub.

HARJANNE, A.; KORHONRN, J. M. **Abandoning the concept of renewable energy**. Energy Policy, April 2019.

HAYASHI, Y. et al. **Effects of wind direction and speed on the energy yield of photovoltaic systems**. Solar Energy, v. 159, p. 130-138, 2018.

HAYAT, M. B.; Ali, D.; Monyake, K. C.; Alagha, L.; Ahmed, N. Solar Energy-A Look into Power **Generation, Challenges, and A Solar-Powered Future**. Int. J. Energy Res., v. 43, n. 3, p. 1049–1067, 2019. DOI: 10.1002/er.4252.

HONEYWELL. **Datasheet: 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L. Plymouth**, Estados Unidos, publicação eletrônica, 2010, disponível em: **https://www.jameco.com/jameco/products/prodds/2150248.pdf.**

HOWER, J. C. et al. **Coal's complex chemical structures**. Fuel, v. 239, p. 1126-1136, 2019.

HUANG, L. et al. **Study on the effect of ambient temperature and relative humidity on the performance of solar PV modules**. Applied Energy, v. 222, p. 604-613, 2018.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2018). **Matriz Energética Mundial 2016**.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2018). **Energy Technology Perspectives 2018**. International Energy Agency. Disponível em: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2018. E-Pub.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2018)1. **World Energy Outlook 2018**. Disponível em: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018. E-Pub.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2019). **Annual Energy Outlook 2019**. Disponível em: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2019.pdf.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2019). Coal 2019. Disponível em: https://www.iea.org/reports/coal-2019

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2019). **CO_2 emissions from fuel combustion - Highlights. 2019**. Disponível em: https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-2019-highlights. E-Pub.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2019). **Gas 2019**. Disponível em: https://www.iea.org/reports/gas-2019. E-pub.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2019). **What is natural gas?** 2019. Disponível em: https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/what-is-natural-gas.php. E-Pub.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2020). **Solar radiation**. 2020. Disponível em: https://www.iea.org/topics/solar-radiation

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2021). **India**. Disponível em: https://www.iea.org/countries/india

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2021). **Natural Gas**. United States Energy Information Administration. Disponível em: https://www.eia.gov/naturalgas/. E-Pub.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2021). **Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025**. Paris: IEA, 2020.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2021). **Renewables 2021: Analysis and Forecast to 2026**. Paris, França: IEA Publications, 2021. Disponível em: https://www.iea.org/reports/renewables-2021. E-pub.

IHA. INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. **Hydropower and the environment**. Assessment of the GHG status of freshwater reservoirs. 2008.

IHA. INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION, **Hydropower and the environment**, 2018. Disponível em: https://www.hydropower.org/blog/hydropower-and-the-environment.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas de população para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Panorama - PIB per capita. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IPCC. Climate Change 2021: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.

IPCC. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 5: Waste. [s.l.], 2019. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol5.html.

SCHILLINGS, C, IPCC. **Summary for policymakers. In: GLOBAL WARMING OF 1.5°C**. IPCC, 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/.

IRENA, **Renewable Power Generation Costs in 2020**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. (2021)

ISLAM, S.; HOSSAIN, M. S.; SAIDUR, R. **Wind power generation and challenges: a review**. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, n. 2, p. 1193-1208, 2020.

ITAIPU. **Sala de Imprensa**. 2018. Disponível em: https://www.itaipu.gov.br. E-pub.

JACQUES, S; CALDEIRA, A; REN, Z; SCHELLMANNS, A; BATUT, N. **Impact of the cell temperature on the energy efficiency of a single glass PV module: thermal modeling in steady-state and validation by experimental data**. In: Proceedings of the international conference on renewable energies and power quality 2013 (ICREPQ'13) Bilbao, Spain.

JAIN, P. K.; CHAUHAN, Y. P. S.; DUBEY, R. K.; DUBEY, D. K. **Solar cell technologies: Fundamentals and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2021.

JAIN, S., SHARMA, M., & THAKUR, N. S. (2019). **Analysis of biomass availability and energy consumption pattern in Asia. In Biomass Energy for the Future: Prospects and Possibilities** (pp. 79-96). Springer.

JAIN, Sachin, DHARA, Sumon, AGARWAL, Vivek. **A Voltage-Zone Based Power Management Scheme With Seamless Power Transfer Between PV-Battery for OFF-Grid Stand-Alone System**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 57, n. 1, p. 754-763, 2021. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9319219. E-pub.

JOHNSON, Jeff. **Last Chance to Curb Greenhouse Gas Emissions**, Climate Change. C & EN Global Enterprise, v. 96, n. 41, p. 18, 2018. Disponível em: https://cen.acs.org/environment/Last-chance-curb-greenhouse-gas/96/i41. E-pub.

KALDELLIS, J.K, KAVADIAS K., ZAFIRAKIS D. **Experimental validation of the optimum photovoltaic panels' tilt angle for remote consumers**. Renew Energy 2012; 46: 179 e 91. KALDELLIS, J.K.; KAPSALI, M.; KAVADIAS, K.A. **Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations.** experience obtained from outdoor measurements in greece, Renewable Energy 66 (2014) 612–624.

KAMMEN, D. M.; FARHANG, M. **Energy access and development**. Science, v. 359, n. 6376, p. eaas9794, 2018.

KAZEM, H. A., CHAICHAN, M. T. **The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels' outcomes based on an experimental study of six**

locations in Northern Oman, Solar Energy, Volume 187, 2019, Pages 30-38, ISSN 0038-092X, https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.036.

KHOLOD, Yana et al. **Excitation Energy Transfer Pathways in Light-harvesting Proteins: Modeling with PyFREC**. Journal of Computational Chemistry, v. 39, n. 8, p. 438-449, 2018. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jcc.25101. E-pub.

KUIK, O., Iacobuta, G. (2020). **The climate impact of hydroelectricity**. Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 7(4), 117-126.

KUMAR, P., KHARE, M., HARRISON, R. M., BLOSS, W. J., LEWIS, A. C., & COE, H. (2019). **New directions: air pollution challenges for developing megacities like Delhi**. Atmospheric Environment, 200, 311-315.

KUMAR, V. A.; CÁRDENAS RODRÍGUEZ, M.; ELA, W. P. **Characterizing the Effect of Clouds on Solar Photovoltaic Power Generation: A Comprehensive Review**. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 9, n. 4, p. 1074-1087, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2902905. E-Pub.

KUMAR, V., et al. **Potential of Tidal Energy Generation and Associated Challenges: A Review**. International Journal of Energy Research, v. 45, n. 1, p. 16-32, 2021.

KUNDU, S.; NAWAZ, S. **Oil and Gas Pipelines: An Overview. In: Multifunctional Operation and Application of GPS**. IntechOpen, 2021. Disponível em: https://www.intechopen.com/chapters/77691. E-Pub.

LACOUR, S., LABRIET, M., STETZ, J. B., LOUVRIER, J. (2019). **Analysis of the Social and Economic Impacts of Tidal Power Generation in France: A Case Study of the Rance Tidal Power Station**. Energies, 12(4), 636.

LIRA. S. A.. **Analise de correlação: abordagem teorica e de Construção dos coeficientes com aplicações**, Curitiba: UFPR, 2004

LOUIS, V. L. ST.; KELLY, C. L. A.; DUCHEMIN, É.; RUDD, J. W. M.; ROSENBERG, D. M. **Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate**. BioScience, v. 50, n. 9, p. 766-775, 2000.

LV, J.W.X.; ZHU, H.; SONG, Y. **The influence of meteorological factors on the photovoltaic daily generation** (2014). doi: 10.13941/j.cnki.21-1469/ tk.2014.10.001.

MALCZEWSKA, J.; HADWIGER-FRAENKL, L. **Sustainability of the Oil and Gas Pipeline Infrastructure. Journal of Ecological Engineering**, v. 20, n. 6, p. 150-158, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.12911/22998993/113707. E-Pub.

MARTINS, Marcos José. **Energia solar fotovoltaica: história, tecnologias, mercado e aplicações**. São Paulo: Érica, 2021.

MATIN, M. A. et al. **Bi(1-y) SmyFeO3 como potenciais materiais fotovoltaicos. Bull Mater Sci**, v. 43, p. 167, 2020. https://doi-org.ez130

MATINGLY, B. C. **Origin of Petroleum: A Compilation of Recent Organic Geochemical Evidence**. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 29, p. 1-22, 2001.

MCILVEEN, R. **Fundamentals of Weather and Climate**. CRC Press, 2018.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Mudança do Clima**, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Lei nº 12.187/2009**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm.

MELEXIS. Datasheet: US1881 Hall Latch – High Sensitivity. rev. 15, publicação eletrônica, Estados Unidos, 12 p. 2006. Disponível em: https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/us1881-datasheet-melexis.pdf.

MENDONÇA, F; DANNI-OLIVEIRA, I. M., **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

MIRANDA, M. M. (2012). **Fator de emissão de gases efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**.

MME - Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Modelagem Climática para a Geração Elétrica.** 2018 [PDF]. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/documents/36144/472561/Produto+3.pdf%0A

MME - Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Balanço Energético Nacional: Síntese 2022** [PDF]. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2022/ben_sintese_2022_pt.pdf/view

MME - Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2050**. (2018). https://www.mme.gov.br/documents/10584/1102077/PNE+2050+-+vers%C3%A3o+final.pdf/3e3d0dbb-bf14-0c48-c287-0d4f3e33df44

MORALES-ACEVEDO, A.; ROMERO-HERNÁNDEZ, J. L.; HERNÁNDEZ-VALENCIA, C.; MULUGETTA, Y., WARNAARS, T., & SONG, Y. (2020). **Sustainable bioenergy production in Africa. In Handbook of Bioenergy Economics and Policy** (pp. 321-343). Springer.

MURRAY, C. J.; DURRAN, D. R.; BOOS, W. R. **The role of radiatively driven subsidence in the formation of stratocumulus-capped boundary layers**. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 75, n. 10, p. 3477-3496, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0061.1. E-pub.

MURRAY, R. K.; Granner, D. K.; Mayes, P. A.; Rodwell, V. W. **Harper's illustrated biochemistry**. 29. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Medical, 2009.

MURRAY, R., & HOLBERT, K. (2019). N**uclear Energy: An Introduction to the Concepts**, Systems, and Applications of Nuclear Processes (8ª ed.). Butterworth-Heinemann.

MURRAY, W., DEARDEN, C., & MAY, B. (2018). **Meteorology for aviators**. Australian Government Civil Aviation Safety Authority.

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **The Sun's Role in Climate**. 2020. Disponível em: https://climate.nasa.gov/effects/

NASCIMENTO, R. S., & ALVES, G. M. (2016). **Fontes Alternativas E Renováveis De Energia No Brasil: Métodos E Benefícios Ambientais**. Trabalho apresentado no XX Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência – Universidade do Vale do Paraíba.

NAVNTOFT, L. C., CRISTÓFALO, M. P., CUCCORESE, S., DEFFERRARI, I. R., & ROMERO, I. (2019). **Manual de Generación Distribuida Solar Fotovoltaica** (1ª ed. revisada). Secretaría de Gobierno de Energía.

NEVES, A; BLONDEL, L; BRAND, K; HENDEL, B. S; RIVAS, C. S.; IANCU, A; MELICA, G; KOFFI, L. B; ZANCANELLA, P; KONA, A. **Guia para a apresentação dos resultados do Pacto de Autarcas para o Clima e Energia**; EUR 28160 PT; doi: 10.2790/717311.

NOAA. **Cloud Cover**. National Oceanic and Atmospheric Administration. 2018.Disponível em: https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00643. E-Pub.

OLIVEIRA, L. A. M.; SOUZA, M. S. R. **Análise de Riscos em Gasodutos**. In: 36º Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, 2019. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/205042/1/An%C3%A1lise-de-Riscos-em-Gasodutos.pdf. E-Pub.

OPEP. Organização dos Países Exportadores de Petróleo. **OPEC Annual Statistical Bulletin 2020**. Disponível em: https://www.opec.org/opec_web/en/publications/202.htm. E-Pub.

OMS. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Air pollution**. 2019. Disponível em: https://www.who.int/news-room/air-pollution. E-Pub.

PACHECO, EV (2015). **Adaptação Tecnológica à Mudança Climática na Área do Rio Candelaria, Campeche, México**. Revista de Arqueologia Americana, (33), 85+

Peters, K. E.; Moldowan, J. M. (Org.). **The biomarker guide: biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

PINTO, C. A. **5 Projetos Avançados para você estudar e praticar com Arduin**o. N.p., CapSistema, 2021.

PNMC - P**lano Nacional sobre Mudança do Clima**. Disponível em: http://www.gov.br/mcti/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/plano-nacional-sobre-mudanca-do-clima.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, 2010.

PMF – **Prefeitura Municipal de Florianópolis**. (2019). https://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/22_02_2019_09.28.14_88a3ba5a5f5c5b46b74db5d2f1680b39.pdf

PMG – Prefeitura Municipal de Garopaba. (2022). **Plano Municipal de Sustentabilidade e Energias Renováveis**.
https://garopaba.sc.gov.br/cms/pagina/ver/codMapaItem/73844

PMI – Prefeitura Municipal de Itajaí. (2020). **Plano de Ação para Energias Renováveis**.
http://www.itajai.sc.gov.br/arquivos/leis/2021/07/15/2021_07_15_10_40_04_60504d11ab77e9f328ae0ecf.pdf

PORTO, E., SUSKI, C. (2021). **Influência dos elementos meteorológicos na eficiência da geração de energia elétrica em células fotovoltaicas**. *Estrabão*, *2*, 223–229. https://doi.org/10.53455/re.v2i.53

PUEYO, S.; FEARNSIDE, P. M. **EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DOS RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS: IMPLICAÇÕES DE UMA LEI DE POTÊNCIA**. Oecologia Australis 15(2): 199-212, junho 2011 doi:10.4257/oeco.2011.1502.02.

RAMOS, R. M. C. et al. **Oil and Gas Pipeline Transportation. In: Offshore Engineering.** Elsevier, 2020. p.

RAZA. A, Syed J, Muhammad Ali F, et al. **Incidence of Vitamin D Deficiency in Different Seasons in the Adult Karachi Population Presenting in the Medical Outpatient Department with Generalized Body** Ache. Cureus, v. 11, n. 7, p. e5167, 2019. DOI: 10.7759/cureus.5167.

NREL. Photovoltaic (PV) **Module Technologies: 2020 Benchmark Costs and Technology Evolution** Framework Results. 2021

REN21. (2021). **Renewables 2021 Global Status Report**.

REN21. **Renewables 2019 Global Status Report**. 2019.

RODRIGUES, M. J. S.. **Avaliação teórica e experimental de geradores fotovoltaicos sob diferentes condições de sombreamento**. 2017. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2017.

Rosillo-Calle, F., González-García, S., Aznar, M. P., & Bauen, A. (2019). **Handbook of bioenergy economics and policy: Volume I: Bioenergy supply chains**. Springer.

SANCHES, S. R. **Sistema de Transmissão de Dados Meteorológicos em Tempo Real para Celulares de Usuários de Marinas**. Florianópolis: IFSC, 2020.

SANTOS, M.A.; ROSA, L.P.; MATVIENKO, B.; SANTOS, E.O.; D'ALMEIDA ROCHA, C.H.E.; SIKAR, E.; SILVA, M.B. & JUNIOR, A.M.P.B. 2008. **Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas**. Oecologia Brasiliensis, 12: 116-129.

SILVA, K.Z.; COLOMBO, R. **Mudanças Climáticas: Influência Antrópica, Impactos e Perspectivas**. Fronteiras : Journal of Social, Technological and Environmental Science, v. 8, n. 3, p. 47-68, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.21664/2238-8869.2019v8i3.p47-68.

SANTOS, A. L.; MATAI, K. **Shale gas and its environmental impact. In: Handbook of Environmental** Materials Management. Springer, 2018. p. 491-503.

SANTOS, C. A. et al. **Valuation of the feasibility of use of biomass in thermoelectric generation**. Energies, v. 13, n. 20, p. 5314, 2020.

SANTOS, J. A. dos; ARAÚJO, E. G. de; SILVA, L. C. da; ANDRADE, R. F. de; OLIVEIRA, L. R. B. de; LOPES, J. A. da S. Sistemas Fotovoltaicos: Uma Análise dos Componentes e das Aplicações. Research, Society and Development, v. 10, n. 1, 2021.

SAUNDERS, Robert J.; MORENO, Rene. Natural gas as a transportation fuel. In: Natural Gas. Routledge, 2019. p. 249-271.

Savvaidis, P., Katsiri, A., Avraamides, M., & Poullikkas, A. (2019). Tidal energy potential in Europe: A review of current technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 102, 57-69.

SC – Governo do Estado de Santa Catarina. (2019). Plano Estadual de Energia 2025.

https://www.sc.gov.br/images/SecPlan/Planejamento_Energetico/Plano_Estadual_de_Energia_2025.pdf

SEABRA, E.; BATISTA, V. S. L.; NERY, L. M.; SOUSA, L. R. de; VASCONCELOS, G. G. B. Integração de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil. Research, Society and Development, v. 10, n. 5, 2021.

SEIA - SOLAR ENERGY INDUSTRIES ASSOCIATION. Solar Market Insight Report 2018 Q3. 2018.

SHAFIEE, M.; TOPAL, E. A review of state-of-the-art technologies and challenges for wind power forecasting. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 113, p. 109258, 2019.

Smets, A., et al. (2016). A survey of solar module technologies and their efficiency trends. Solar Energy Materials and Solar Cells, 157, 370-377.

SOARES FILHO et al. Estudo de Baixo Carbono para o Brasil - Uso da Terra, Mudanças do Uso da Terra e Florestas, 2010.

SOVACOOL, B. K. Renewable Energy and the Environment: A Review of Current Status and Future Prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 6-7, p. 1465-1474, 2009.

TAKAHASHI, H. et al. Cloud Radiative Effects on the Diurnal Cycle of Surface Temperature over Land. Journal of Climate, v. 32, n. 12, p. 3363-3378, 2019. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0676.1.

TOSTO, S. G. Análise das estratégias de utilização do gás natural na geração de energia elétrica no Brasil. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2019.

UDEAGHA, Maxwell Chukwudi, NGEPAH, Nicholas. Disaggregating the Environmental Effects of Renewable and Non-renewable Energy Consumption in South Africa: Fresh Evidence from the Novel Dynamic ARDL Simulations Approach. Economic Change and Restructuring, v. 55, n. 3, p. 1767-1814, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10644-021-09344-3. E-pub.

USGS. United States Geological Survey. Petroleum Geology and Resources of the West-Central Part of the Gulf of Mexico Exclusive Economic Zone. Professional Paper 1829. Reston, VA: USGS, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3133/pp1829. E-Pub. em: https://www.eia.gov/petroleum/. E-Pub.

VIEIRA, K . D.. **Unidades de ensino potencialmente significativos para o estudo do efeito fotoelétrico e fotovoltaico**. Cariacica: IFES, 2023.

WANG, Q., et al. Energy generation potential of marine current power: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 109, p. 103-118, 2019.

WEI, Taoyuan et al. A method for calculating CO_2 emissions from fossil fuel-fired power plants. Energy, v. 204, p. 117908, 2020.

WENHAM, S., et al. (2000). High efficiency silicon solar cells. Semiconductor Science and Technology, 15(6), 515-520.

WMO. ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. (2018). Elements of Weather and Climate. Disponível em: https://public.wmo.int/en/resources/library/elements-weather-and-climate

WMO. ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. Fog and Mist. 2021. Disponível em: https://public.wmo.int/en/our-mandate/weather/climate/weather-services/fog-and-mist. E-pub.

WMO. Guidelines on the Observation of Clouds and Other Meteors, Volume I - WMO-No. 407. World Meteorological Organization, 2020. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10106. E-pub.

WMO. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Radiation measurement. 2020. Disponível em: https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/weather-climate-observations-monitoring/radiation-measurement

WMO. World Meteorological Organization. "What is Climate?". 2018. Disponível em: https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate. E-pub.

WOLFE, Philip R. "What Is Photovoltaics?" In: The Solar Generation. 1st ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018. p. 9-24.

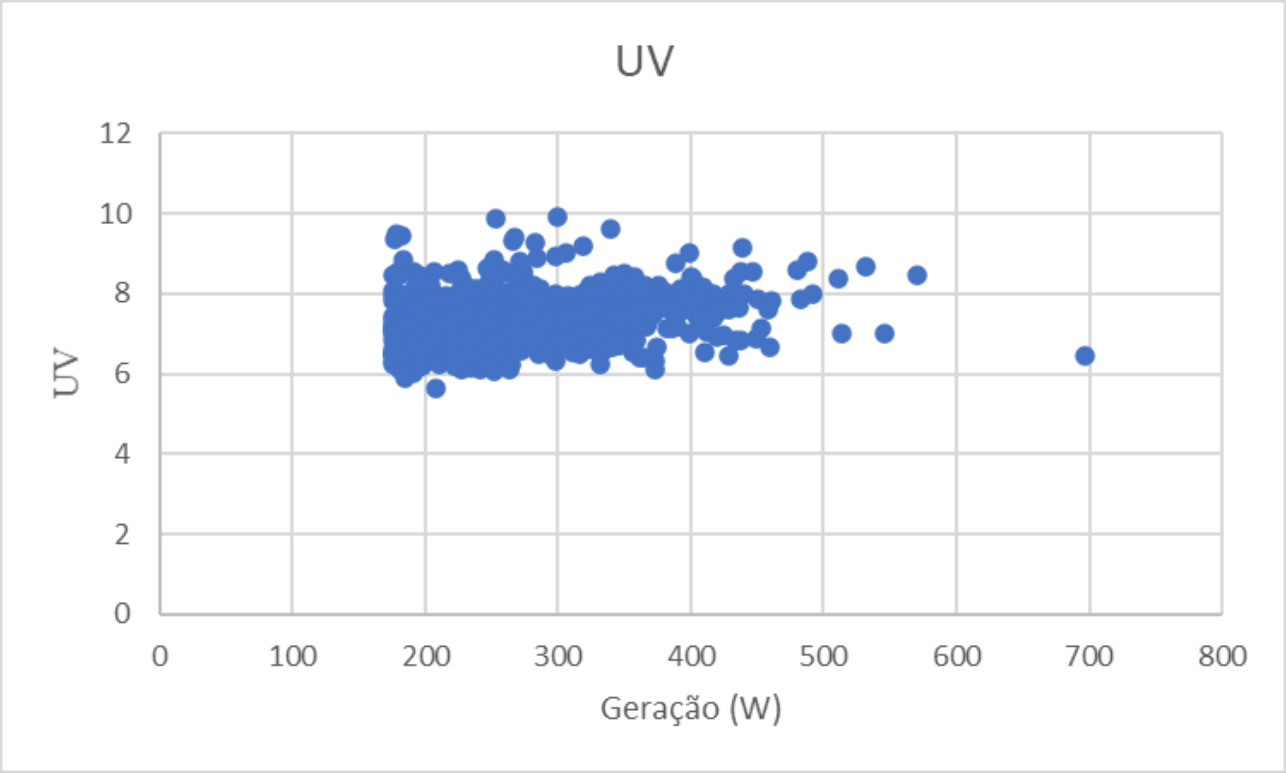
ZANONI, Maria M. V., Josiléia A. Zanatta, Jeferson Dieckow, Akemi Kan, and Carlos B. Reissmann. "Emissão De Metano Por Decomposição De Resíduo Florestal Inundado." Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental 19.2 (2015): 173-79.

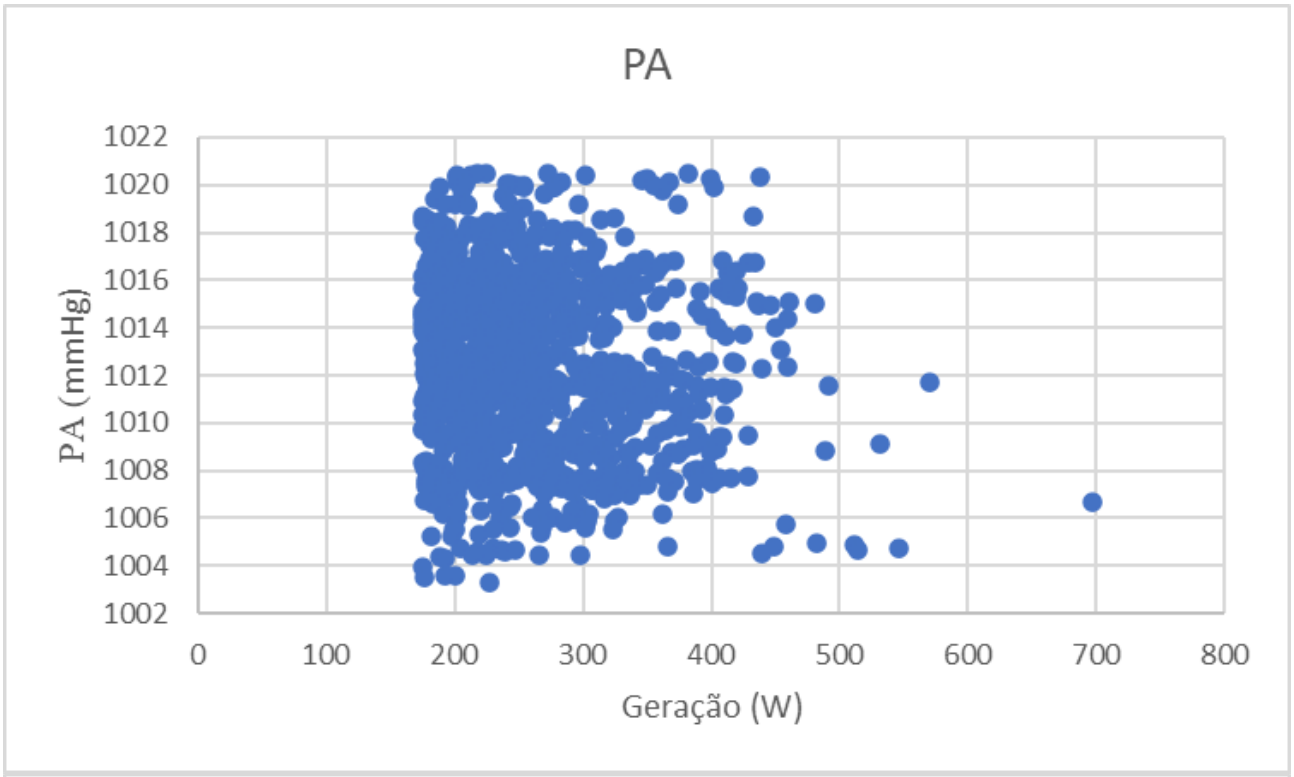
ZHANG, Y. et al. Advances in the evaluation of coal properties by proximate analysis. Energy Exploration & Exploitation, v. 39, n. 3, p. 844-861, 2021.

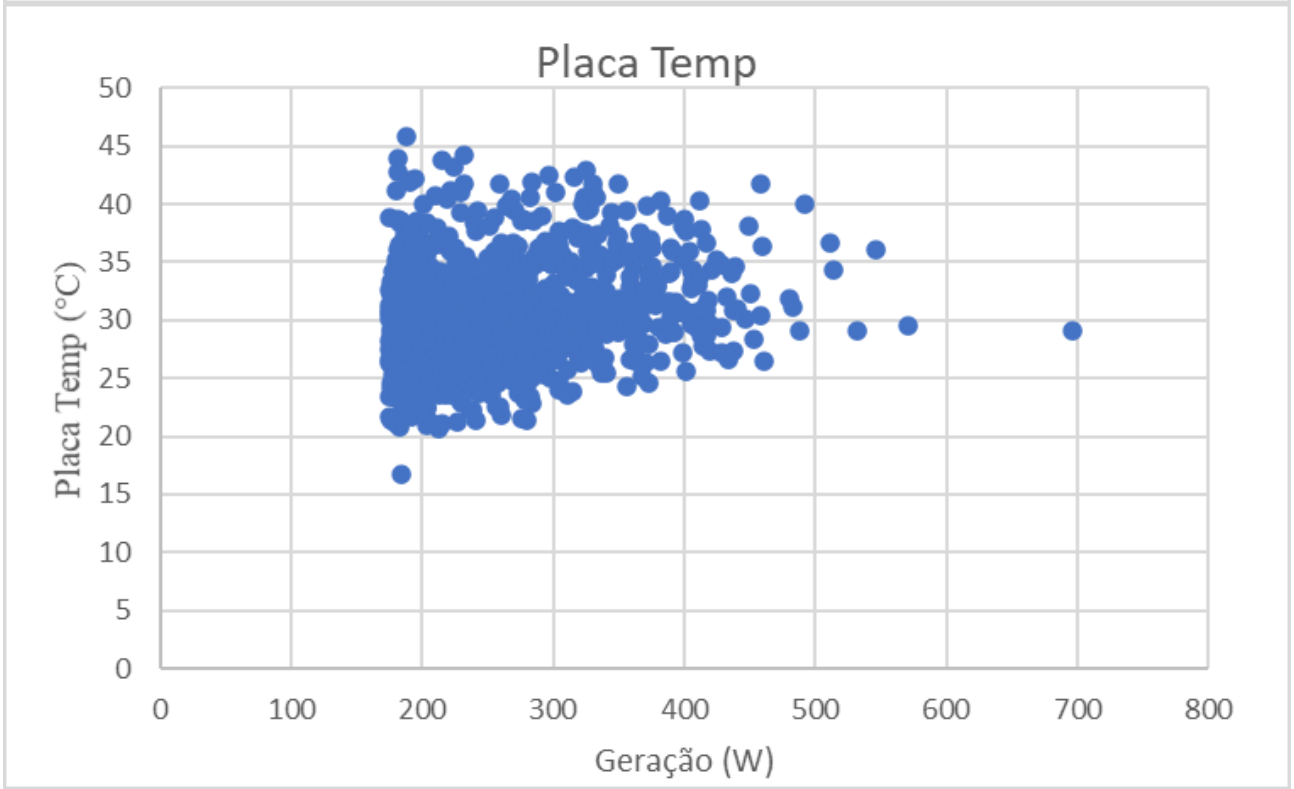
Zhang, Y.; Wang, Y.; Zhu, Y.; Yang, L.; Ge, L.; Luo, C. Visibility Prediction Based on Machine Learning Algorithms. Atmosphere 2022, 13, 1125. https://doi.org/10.3390/atmos13071125

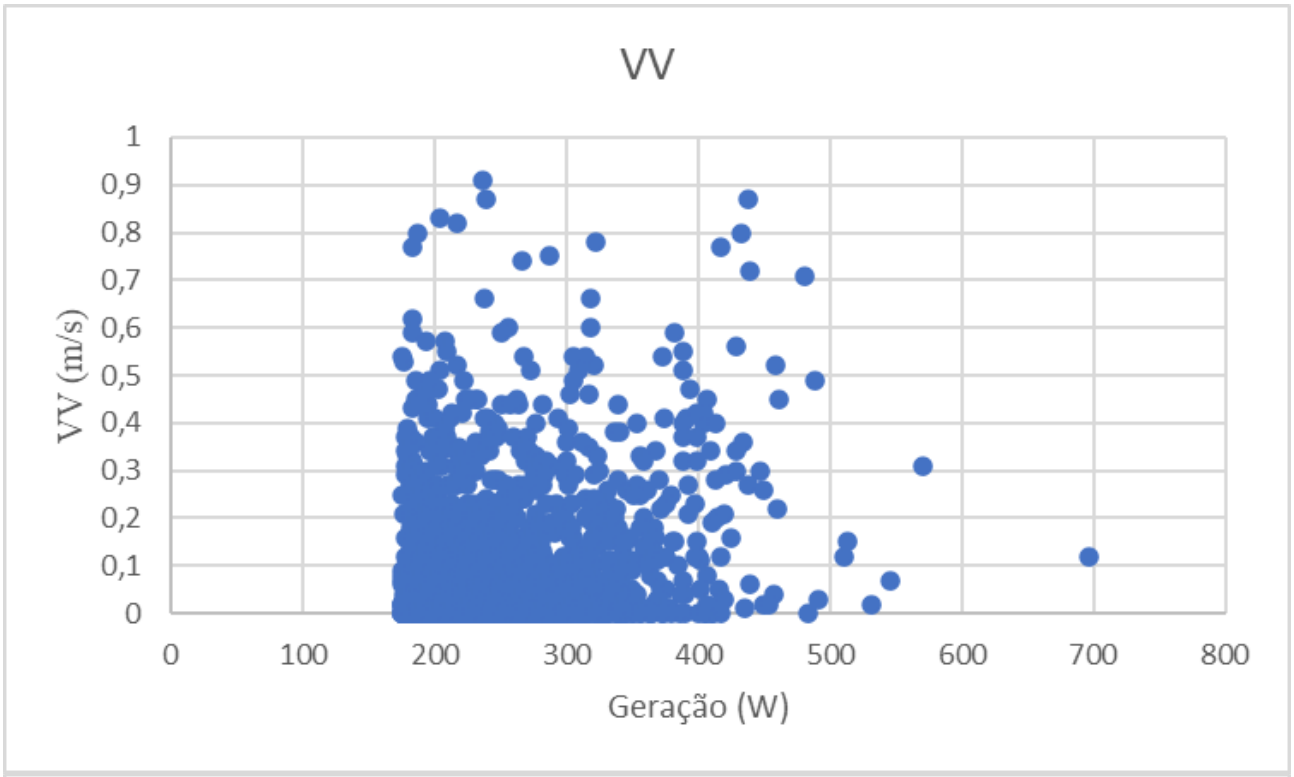
APÊNDICE A

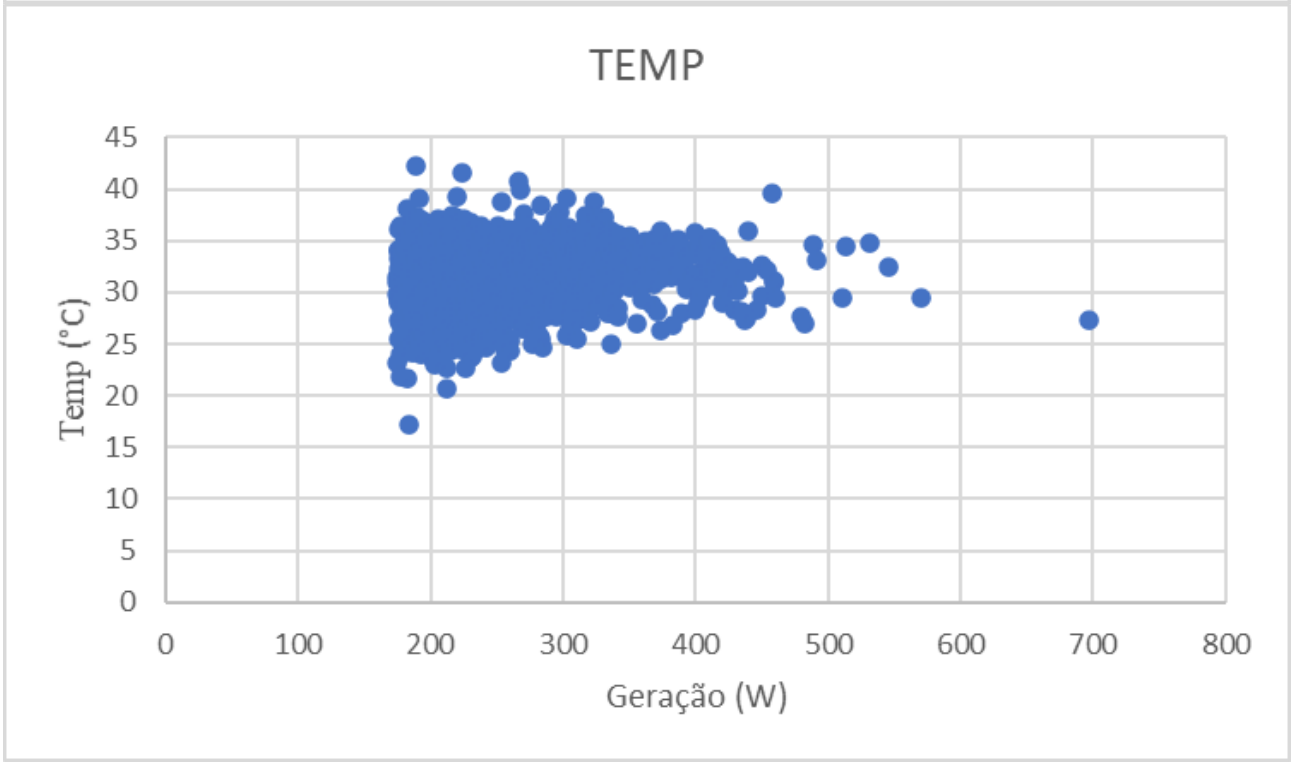
Relações de geração de energia com ultravioleta, pressão atmosférica, temperatura da placa, velocidade do vento, temperatura ambiente, direção do vento e umidade.

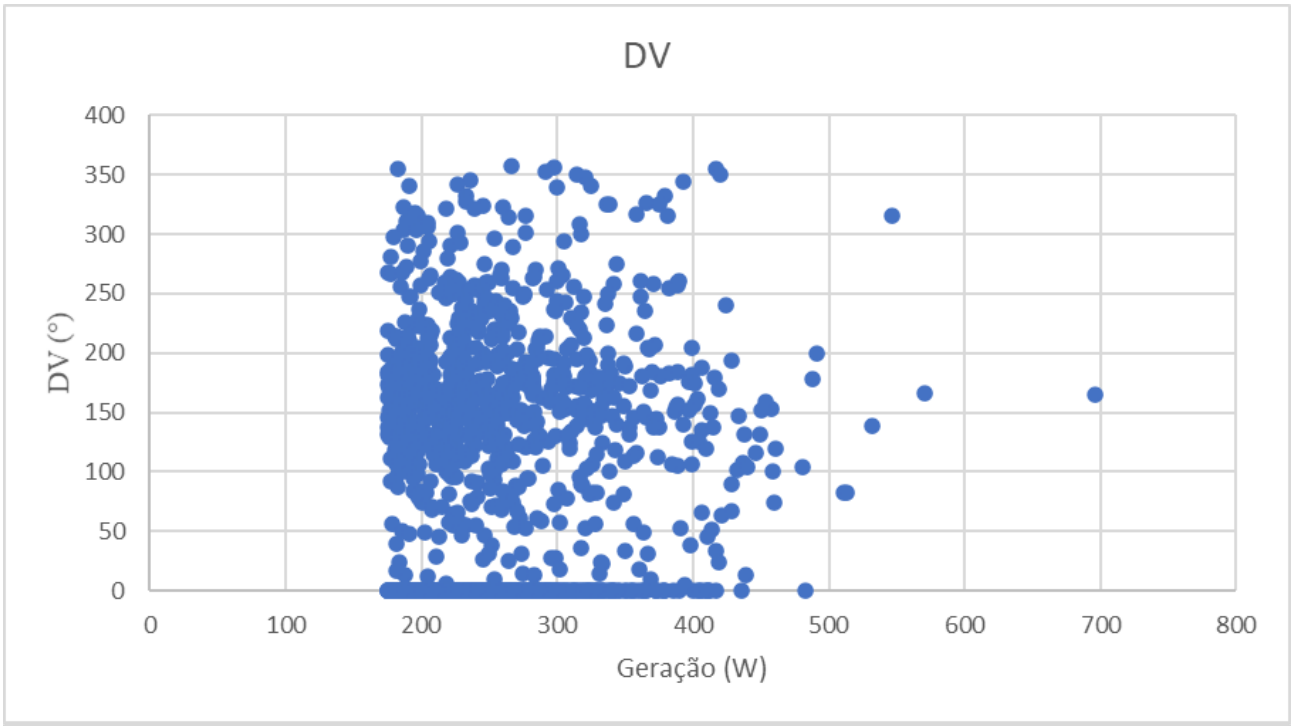


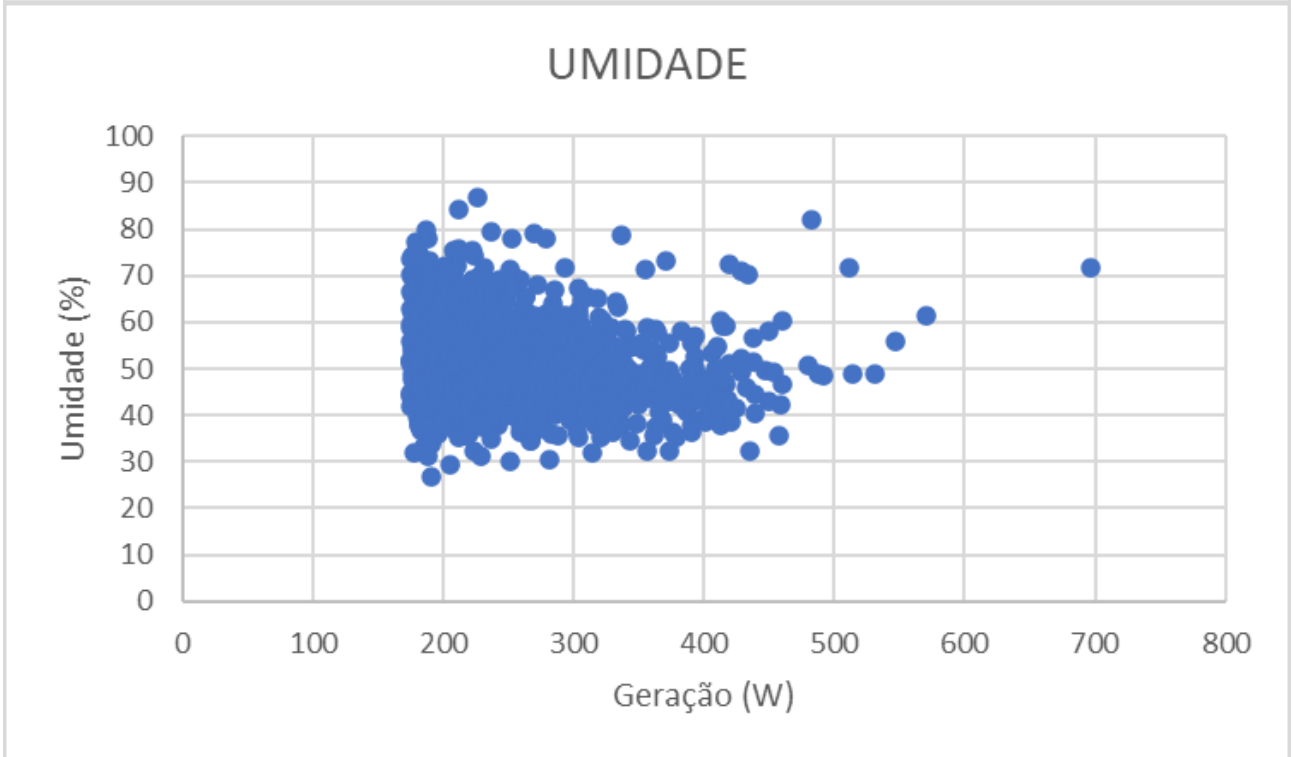

PA
PA (mmHg)
1022
1020
1018
1016
1014
1012
1010
1008
1006
1004
1002
0
100
200
300
400
500
600
700
800
Geração (W)


Placa Temp
Placa Temp (°C)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
Geração (W)


VV
VV (m/s)
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
Geração (W)


TEMP
Temp (°C)
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
Geração (W)


DV
DV (°)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
Geração (W)


UMIDADE
Umidade (%)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
Geração (W)

APÊNDICE B

Valores médios dos parâmetros analisados (dados gerais) e correlações entre geração de energia e as demais variáveis por quadrante de DV

1. Primeiro quadrante (0 a 90°)

Estatísticas Descritivas: Geracao; Placa Temp; TEMP; ... ; UV; VV; DV; PA

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Geracao	3618	0	89.72	1.30	78.24	0.22	43.79	65.91	110.23	513.47
Placa Temp	3618	0	26.180	0.0795	4.784	12.080	22.550	25.750	29.620	43.250
TEMP	3618	0	28.072	0.0832	5.002	11.650	23.940	28.380	32.090	44.740
UMIDADE	3618	0	64.425	0.322	19.351	20.290	48.218	60.155	80.375	100.000
UV	3618	0	6.7473	0.0197	1.1847	5.3500	5.8800	6.4100	7.2300	12.0700
VV	3618	0	0.08714	0.00288	0.17310	0.00000	0.00000	0.00000	0.09000	1.12000
DV	3618	0	16.078	0.480	28.884	0.000	0.000	0.000	19.000	89.000
PA	3618	0	1012.8	0.0675	4.06	1000.7	1010.2	1013.3	1015.7	1021.4

Rô de Spearman: Geracao; Placa Temp; TEMP; UMIDADE; ... VV; DV; PA

Correlações

	Geracao	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV
Placa Temp	0.529					
	0.000					
TEMP	0.492	0.899				
	0.000	0.000				
UMIDADE	-0.468	-0.805	-0.888			
	0.000	0.000	0.000			
UV	0.601	0.717	0.752	-0.762		
	0.000	0.000	0.000	0.000		
VV	0.101	0.536	0.449	-0.475	0.435	
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
DV	0.065	0.510	0.420	-0.443	0.401	0.880
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PA	0.016	-0.307	-0.283	0.128	-0.053	-0.206
	0.341	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000

	DV
PA	-0.187
	0.000

Conteúdo da Célula
Rô de Spearman
Valor-p

2. Segundo quadrante (90 a 180°)

Estatísticas Descritivas: Geracao; Placa Temp; TEMP; ... ; UV; VV; DV; PA

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Geracao	2990	0	98.13	1.42	77.57	0.22	62.28	67.00	109.99	696.47
Placa Temp	2990	0	28.407	0.0827	4.523	14.190	25.340	28.205	31.110	44.280
TEMP	2990	0	29.807	0.0768	4.202	15.870	27.128	30.160	32.752	45.320
UMIDADE	2990	0	55.270	0.271	14.804	17.600	44.790	52.010	62.990	100.000
UV	2990	0	7.1914	0.0243	1.3291	5.3500	6.1300	6.9000	7.9600	12.0300
VV	2990	0	0.22711	0.00362	0.19813	0.02000	0.07750	0.17000	0.34000	1.51000
DV	2990	0	137.57	0.460	25.18	90.00	117.00	138.00	160.00	179.00
PA	2990	0	1012.3	0.0716	3.92	1000.8	1009.8	1012.8	1015.3	1021.1

Rô de Spearman: Geracao; Placa Temp; TEMP; UMIDADE; ... VV; DV; PA

Correlações

	Geracao	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV
Placa Temp	0.377					
	0.000					
TEMP	0.267	0.836				
	0.000	0.000				
UMIDADE	-0.232	-0.684	-0.779			
	0.000	0.000	0.000			
UV	0.372	0.589	0.631	-0.661		
	0.000	0.000	0.000	0.000		
VV	-0.058	0.219	0.103	-0.108	0.127	
	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	
DV	0.071	-0.227	-0.162	0.138	-0.170	-0.223
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PA	0.102	-0.238	-0.284	0.014	0.044	-0.125
	0.000	0.000	0.000	0.433	0.017	0.000

	DV
PA	0.045
	0.013

Conteúdo da Célula
Rô de Spearman
Valor-p

3. Terceiro quadrante (180 a 270°)

Estatísticas Descritivas: Geracao; Placa Temp; TEMP; ... ; UV; VV; DV; PA

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Geracao	938	0	123.35	3.00	91.74	0.24	62.36	92.86	175.30	491.49
Placa Temp	938	0	26.521	0.163	4.988	12.910	22.657	25.960	30.083	43.460
TEMP	938	0	28.580	0.174	5.344	14.550	24.458	28.740	32.502	44.190
UMIDADE	938	0	58.166	0.605	18.534	18.780	44.862	53.690	69.028	100.000
UV	938	0	7.0817	0.0406	1.2440	5.3900	6.1700	6.9400	7.5100	12.3200
VV	938	0	0.15213	0.00468	0.14348	0.02000	0.05000	0.11000	0.20000	1.11000
DV	938	0	209.46	0.854	26.15	180.00	187.00	200.00	229.00	269.00
PA	938	0	1011.5	0.137	4.21	1001.1	1008.2	1011.6	1015.0	1021.0

Rô de Spearman: Geracao; Placa Temp; TEMP; UMIDADE; ... VV; DV; PA

Correlações

	Geracao	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV
Placa Temp	0.443					
	0.000					
TEMP	0.345	0.884				
	0.000	0.000				
UMIDADE	-0.263	-0.696	-0.782			
	0.000	0.000	0.000			
UV	0.401	0.658	0.628	-0.726		
	0.000	0.000	0.000	0.000		
VV	0.025	0.243	0.172	-0.241	0.195	
	0.446	0.000	0.000	0.000	0.000	
DV	0.212	0.273	0.225	-0.322	0.311	0.131
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PA	0.036	-0.405	-0.374	0.191	-0.099	-0.122
	0.264	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000

	DV
PA	-0.142
	0.000

Conteúdo da Célula
Rô de Spearman
Valor-p

4. Quarto quadrante (270 a 360°)

Estatísticas Descritivas: Geracao; Placa Temp; TEMP; ... ; UV; VV; DV; PA

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Geracao	330	0	116.24	4.65	84.40	5.97	63.81	77.88	139.46	546.22
Placa Temp	330	0	30.532	0.248	4.513	18.260	27.358	30.250	33.245	48.440
TEMP	330	0	31.885	0.206	3.733	18.810	29.942	32.055	34.377	42.610
UMIDADE	330	0	46.524	0.573	10.402	19.750	39.570	44.970	51.305	85.920
UV	330	0	7.8561	0.0803	1.4591	5.4700	6.8600	7.6300	8.5700	11.8300
VV	330	0	0.23215	0.00936	0.16996	0.02000	0.11000	0.20000	0.30000	0.93000
DV	330	0	321.52	1.42	25.83	270.00	301.00	322.50	345.00	359.00
PA	330	0	1011.4	0.218	3.96	1003.0	1008.4	1011.8	1014.0	1019.9

Rô de Spearman: Geracao; Placa Temp; TEMP; UMIDADE; ... VV; DV; PA

Correlações

	Geracao	Placa Temp	TEMP	UMIDADE	UV	VV
Placa Temp	0.266					
	0.000					
TEMP	0.147	0.780				
	0.007	0.000				
UMIDADE	-0.003	-0.472	-0.568			
	0.952	0.000	0.000			
UV	0.062	0.382	0.330	-0.430		
	0.258	0.000	0.000	0.000		
VV	-0.115	0.147	0.005	-0.027	0.065	
	0.037	0.007	0.921	0.625	0.236	
DV	-0.128	0.189	0.106	0.172	-0.037	0.201
	0.020	0.001	0.055	0.002	0.501	0.000
PA	0.049	-0.232	-0.280	0.151	-0.004	-0.191
	0.372	0.000	0.000	0.006	0.945	0.000

	DV
PA	0.023
	0.674

Conteúdo da Célula
Rô de Spearman
Valor-p