UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

IVO GOMES DA SILVA JÚNIOR

PROPOSTA DE ALGORITMO EM *PYTHON* PARA HIBRIDIZAÇÃO ASSOCIADA DE PARQUES EÓLICOS E SOLARES

Recife
2024

IVO GOMES DA SILVA JÚNIOR

PROPOSTA DE ALGORITMO EM *PYTHON* PARA HIBRIDIZAÇÃO ASSOCIADA DE PARQUES EÓLICOS E SOLARES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Dr. Davidson da Costa Marques

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva Júnior, Ivo Gomes da.
Proposta de algoritmo em Python para hibridização associada de parques eólicos e solares / Ivo Gomes da Silva Júnior. - Recife, 2024.
73 p.

Orientador(a): Davidson da Costa Marques
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2024.
Inclui referências.

1. Renovável. 2. Eólica. 3. Solar. 4. Híbrido. 5. Python. I. Marques, Davidson da Costa. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

IVO GOMES DA SILVA JÚNIOR

PROPOSTA DE ALGORITMO EM *PYTHON* PARA HIBRIDIZAÇÃO ASSOCIADA DE PARQUES EÓLICOS E SOLARES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovado em: 13/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Davidson da Costa Marques (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. Dr. José Filho da Costa Castro (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. Dr. Pablo Luiz Tabosa da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de estar vivo e poder usufruir desse momento especial. Em seguida, expresso minha profunda gratidão à minha família, em especial aos meus pais, Ivo e Carminha. Eles tornaram este momento possível ao me apoiar incondicionalmente, incentivar meus sonhos e investir no meu futuro em todos os aspectos. Sem o amor e o suporte deles, nada disso seria possível.

Agradeço à empresa Aeroespacial pelos quase dois anos de apoio ao meu desenvolvimento social e profissional. Durante esse período, tive a oportunidade de crescer e aprender de maneiras que nunca imaginei. Em especial, sou grato a André, que acreditou no meu potencial desde o início. Sua disposição em compartilhar seu conhecimento e experiência comigo, além do apoio contínuo no meu dia a dia, foram fundamentais para o meu crescimento. Agradeço a todos os colegas de trabalho que contribuíram para esse aprendizado com seu profissionalismo e camaradagem.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Pernambuco por toda a experiência proporcionada ao longo deste período de graduação. Agradeço a todos os professores e colegas que cruzaram meu caminho, compartilhando seu conhecimento e contribuindo para a minha formação. Em especial, expresso minha mais sincera gratidão ao Professor, Orientador e amigo Dr. Davidson Marques pela confiança depositada no meu trabalho. Sua dedicação e incentivo foram fundamentais, especialmente nesta reta final, para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pelo apoio contínuo, pelas orientações valiosas e pelo exemplo de profissionalismo e ética que sempre demonstrou.

RESUMO

Diante da crescente demanda por fontes renováveis, foi desenvolvido um algoritmo que analisa dados de 16 anos de geração eólica de um projeto localizado na Bahia, com uma potência instalada de 100 MW e um Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST) contratado de 110 MW, além de dados simulados de geração solar de 1 MW de potência instalada, ambos com resolução temporal de 10 minutos, obtidos a partir de medições dos recursos primários do local. O algoritmo associa a geração solar ao parque eólico, simulando diversos cenários nos quais a potência instalada solar é incrementada gradualmente de forma linear. A abordagem permite avaliar o impacto da integração da energia solar ao sistema eólico, decorrente em termos energéticos e econômicos. Os resultados das simulações para os diferentes cenários são exportados pelo algoritmo, e uma análise econômica é realizada para determinar a capacidade de geração da usina solar que melhor se adapta ao contexto. Com isso, o algoritmo propôs a associação de um parque solar com uma potência instalada de 57 MW ao empreendimento eólico.

Palavras-chave: Renovável; Eólica; Solar; Híbrido; Python.

ABSTRACT

Given the increasing demand for renewable energy sources, an algorithm has been developed to analyze 16 years of wind generation data from a project located in Bahia, with an installed capacity of 100 MW and a contracted Transmission System Usage Amount of 110 MW, along with simulated solar generation data with an installed capacity of 1 MW, both with a temporal resolution of 10 minutes, obtained from local primary resource measurements. The algorithm integrates solar generation with the wind farm, simulating various scenarios in which the installed solar capacity is gradually increased linearly. The approach allows for evaluating the impact of integrating solar energy into the wind system, in terms of energy and economic outcomes. The simulation results for the different scenarios are exported by the algorithm, and an economic analysis is conducted to determine the solar plant generation capacity that best fits the context. Consequently, the algorithm proposed the integration of a solar park with an installed capacity of 57 MW into the wind farm.

Keywords: Renewable; Wind; Solar; Hybrid; Python.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da capacidade instalada em MW do Brasil. 13
Figura 2 - Potencial de energia fotovoltaica. 14
Figura 3 - Demonstração da formação do vento. 17
Figura 4 - Fluxo de ar fluindo através de uma área transversal A. 19
Figura 5 - Principais componentes de uma turbina eólica. 21
Figura 6 - Demonstração do efeito esteira. 23
Figura 7 - Projeção da posição solar. 25
Figura 8 - Variação anual da irradiação extraterreste. 26
Figura 9 - Variação diária da irradiação solar. 27
Figura 10 - Componentes da irradiância solar. 28
Figura 11 - Efeito fotovoltaico. 29
Figura 12 - Módulo fotovoltaico. 31
Figura 13 - Inversor. 32
Figura 14 - Demonstração de uma usina solar. 33
Figura 15 - Geração e Fator de Capacidade Eólico Mensal do Brasil, em MWmed. 34
Figura 16 - Geração e Fator de Capacidade Solar Mensal do Brasil, em MWmed. 35
Figura 17 - Usinas Adjacentes. 37
Figura 18 - Usinas Associadas. 38
Figura 19 - Usinas Híbridas. 39
Figura 20 - Portfólios Comerciais. 40
Figura 21 - Fluxograma do algoritmo. 45
Figura 22 - Funcionamento da função “carregamento_arquivo_txt”. 49
Figura 23 - Funcionamento da função “criacao_tabelas_medias_anuais”. 50
Figura 24 - Funcionamento da função “criacao_tabelas_medias_horarias_mensais”. 52
Figura 25 - Funcionamento da função “criacao_cabecalho”. 53
Figura 26 - Funcionamento da função “criacao_graficos”. 56
Figura 27 - Perfis Mensais de Geração em MWmed. 58
Figura 28 - Perfis Horários de Geração em MWmed. 59
Figura 29 - Inserção dos dados no algoritmo. 60
Figura 30 - Série de geração utilizada no algoritmo. 61

Figura 31 - Resultado prévio para o cenário 98 e finalização das simulações. 62
Figura 32 - Incremento de Potência Instalada Solar x Geração Solar x Corte de Geração (% da geração Solar) (98 cenários). 63
Figura 33 - Incremento de Potência Instalada Solar x Geração Solar x Corte de Geração (% da geração Solar). 63
Figura 34 - Resultados da aba Resumo para os cenários simulado. 64
Figura 35 - Potência Solar Instalada x LCOE dos 98 cenários.....65
Figura 36 - Potência Instalada Solar x LCOE em passos de 10 cenários. 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição da função "carregamento_arquivo_txt".....49
Tabela 2 - Descrição da função "criacao_tabelas_medias_anuais". 50
Tabela 3 - Descrição da função "criacao_tabelas_medias_horarias_mensais". 51
Tabela 4 - Descrição da função "criacao_cabecalho". 53
Tabela 5 - Descrição da função "criacao_excel". 54
Tabela 6 - Descrição da função "criacao_graficos". 55
Tabela 7 - Descrição da função "main". 57
Tabela 8 - Parâmetros de entrada para análise econômica. 60
Tabela 9 - Resultados de LCOE dos 98 cenários. 66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GW	Gigawatts
MW	Megawatts
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
LCOE	*Levelized Cost of Energy*
FC	Fator de Capacidade
MUST	Montante de Uso do Sistema de Transmissão
SZA	Ângulo Zenital
SAA	Ângulo Azimutal
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
PWM	*Pulse Width Modulation*
PLL	*Phase-Locked Loop*
MPPT	*Maximum Power Point Tracking*
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
CUST	Contrato de Uso do Sistema de Transmissão
CUSD	Contrato de Uso do Sistema de Distribuição
EUST	Encargos de Uso do Sistema de Transmissão
TUST	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Numpy	*Numerical Python*
O&M	*Operations and Maintenance*
BESS	*Battery Energy Storage System*

LISTA DE SÍMBOLOS

v	Velocidade do vento
m	Massa de ar
E	Energia cinética
P	Potência
t	Tempo
$\dot{E}$	Fluxo de energia
$\dot{m}$	Fluxo de massa de ar
ρ	Massa específica do ar
A	Área da seção transversal
Pa	Pressão atmosférica
R	Constante do ar
T	Temperatura ambiente
z	Altitude do local
G_0	Irradiância extraterrestre
TOA	Irradiância no topo da atmosfera
G_{dif}	Irradiância difusa
G_n	Irradiância direta normal
G_{dir}	Irradiância direta
G	Irradiância global horizontal
GTI_i	Irradiância global no plano inclinado
C_{CAPEX}	Custo total de construção e instalação
C_{OPEX}	Custo total de operação e manutenção
Eg	Total de energia gerada
i	Ano
n	Vida útil do empreendimento
r	Taxa de desconto
$C_{O\&M}$	Custos de O&M
$desc_{TUST}$	Desconto de incentivo governamental

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

1.1 OBJETIVOS 15

1.1.1 Geral 15

1.1.2 Específicos 15

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 16

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA. 17

2.1 GERAÇÃO EÓLICA 17

2.2 GERAÇÃO SOLAR 25

2.3 FATOR DE CAPACIDADE 33

2.4 MONTANTE DE USO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO 35

2.5 TIPOLOGIAS DE COMBINAÇÕES DE USINAS 36

2.5.1 Usinas Adjacentes 36

2.5.2 Usinas Associadas 37

2.5.3 Usinas Híbridas 38

2.5.4 Portfólios Comerciais 39

2.6 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA 40

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO 43

3.1 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO 43

3.1.1 Bibliotecas 46

3.1.2 Funções 48

3.2 APLICAÇÃO DO ALGORITMO 58

3.2.1 Dados de entrada 58

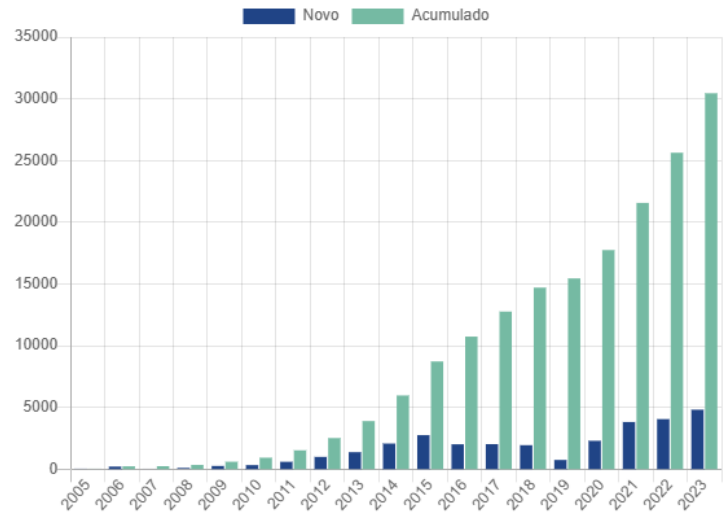
3.2.2 Resultados 61

4 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE 69

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica tem se consolidado como uma importante fonte de geração elétrica no Brasil, e seu crescimento contínuo é notável, como mostra a Figura 1. Atualmente, o país ocupa a sexta posição no ranking mundial de energia eólica *onshore* (instalação de geração de energia eólica localizada em terra firme) com 21,5 gigawatts (GW) de capacidade instalada. Mais de 750 parques eólicos estão em operação no território brasileiro, com mais de 10 mil torres eólicas (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021). Além disso, em 2023, o Brasil foi o terceiro país que mais instalou usinas eólicas, ficando atrás apenas da China e dos Estados Unidos (ABEEÓLICA, 2024). Esses números refletem o crescimento consistente do setor eólico no país, que desempenha um papel cada vez mais relevante na matriz elétrica brasileira.

Figura 1 - Evolução da capacidade instalada em MW do Brasil.



Fonte: Retirada de (ABEEÓLICA).

O Brasil é um país que apresenta uma insolação privilegiada, especialmente nas regiões Nordeste e Sudeste, como mostrado na Figura 2, devido a sua localização geográfica próxima à linha do Equador e ao clima tropical diversificado. Isso resulta em uma alta incidência solar em todo o território nacional, com a região Nordeste apresentando os melhores níveis de insolação, seguida pelo Centro-Oeste, Sudeste,

Norte e Sul, respectivamente. Atualmente, a fonte solar já está em 15 GW, com mais de R$ 78,5 bilhões de investimentos acumulados e mais de 450 mil empregos criados desde 2012 (FILIPPE, 2022). Entre janeiro e setembro de 2023, o país registrou o maior incremento da capacidade de geração solar centralizada de toda a história. Foram adicionados 3 GW de potência, impulsionando nossa matriz energética (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

Figura 2 - Potencial de energia fotovoltaica.

Fonte: Retirada de (ATLAS SOLAR GLOBAL).

Os números atuais e as projeções futuras indicam que as fontes de energia solar fotovoltaica e eólica desempenham um papel crucial no suprimento de eletricidade do país. Atualmente, a eólica representa 11,9% do total de energia gerada, enquanto a solar representa 2,8%. No entanto, as previsões sugerem que a participação da eólica aumentará para 13,9% até dezembro de 2026, e a solar, para 5,3% no mesmo período (ONS). Além disso, a energia eólica é a mais competitiva em termos de custo em comparação com outras formas de geração (ENEL, 2020).

A hibridização associada de um parque eólico com um parque solar é um modelo de geração de energia que combina as produções de energia em localidades próximas e que compartilham fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão à rede. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) realizou vários estudos que destacam os benefícios da hibridização associada de fontes renováveis, especialmente entre parques eólicos e solares, dentre esses benefícios: (CUNHA e TELES, 2020)

- Maior uso da rede elétrica;
- Redução de custos de transmissão;
- Melhoria da estabilidade do sistema;
- Otimização da produção energética;
- Redução de emissões de gases de efeito estufa.

Dessa forma, busca-se com esse estudo encontrar para quais condições uma usina solar, associada a um empreendimento eólico, apresenta melhor viabilidade energética e econômica, utilizando como métrica de avaliação o *Levelized Cost of Energy* (LCOE).

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Proposta de um algoritmo em *Python* para analisar a associação entre um parque eólico existente e um potencial parque solar, simulando diversos cenários de aumento na geração solar, a fim de propor um parque solar que maximize a eficiência energética e seja economicamente viável.

1.1.2 Específicos

- Desenvolver um algoritmo em linguagem *Python* capaz de processar e analisar dados históricos de geração de energia eólica e solar;

- Utilizar o algoritmo desenvolvido para simular cenários de aumento da potência instalada solar e analisar a sua complementaridade com a produção de energia eólica em cada cenário, apresentando o comportamento da associação dessas duas fontes renováveis ao longo do tempo;
- Estabelecer a potência instalada de um parque solar que melhor complemente um parque eólico já existente em termos financeiros e energéticos, por meio de uma análise econômica, com base nos resultados de geração exportados pelo algoritmo.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado para fornecer uma compreensão detalhada da associação híbrida entre um parque eólico e solar por meio de um algoritmo em *Python*, abrangendo desde a concepção teórica até a implementação prática do algoritmo.

No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica abrangente, abordando a origem das gerações eólica e solar, parâmetros operacionais de parques eólicos e solares, como o Fator de Capacidade (FC) e MUST, além de uma análise do parâmetro econômico LCOE.

No Capítulo 3, é apresentado o desenvolvimento do trabalho, detalhando o processo de criação do algoritmo, as bibliotecas utilizadas, as funções desenvolvidas para o seu funcionamento, a aplicação prática do algoritmo e os resultados obtidos.

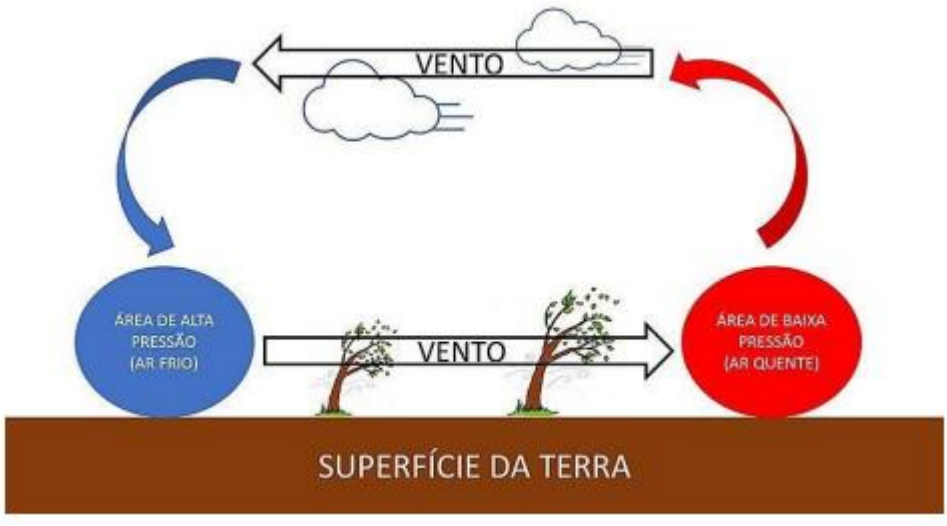
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.

Este capítulo apresenta a base teórica fundamental para o entendimento do trabalho, abordando os seguintes tópicos: Geração Eólica e Solar e suas características, FC, MUST, Tipologias de combinações de usinas e Custo Nivelado de Energia.

2.1 Geração Eólica

O vento se forma pela diferença de pressão entre áreas de alta e baixa pressão na atmosfera. Isso ocorre porque a temperatura da atmosfera varia de acordo com a latitude e a altitude, o que afeta a densidade do ar. Quando o ar é aquecido, torna-se menos denso e sobe, enquanto o ar mais frio é mais denso e desce. Essa diferença de densidade cria uma pressão que faz o ar se deslocar de uma área de alta pressão para uma área de baixa pressão criando o movimento do ar que é conhecido como vento, como mostrado na Figura 3 (SANTOS, 2018).

Figura 3 - Demonstração da formação do vento.



Fonte: Retirada de (SANTOS, 2018).

A temperatura ambiente influencia tanto a velocidade quanto a direção do vento, com velocidades mais altas em dias quentes e mais baixas em dias frios, devido às variações na densidade do ar e na pressão atmosférica. A velocidade do vento também varia ao longo do dia, sendo mais alta durante o dia e mais baixa à noite. Isso ocorre devido às mudanças na temperatura ambiente e na umidade do ar, que afetam a densidade do ar e, consequentemente, a velocidade do vento. Além disso, a direção do vento muda ao longo do dia, com padrões mais fortes e constantes durante o dia e mais fracos e variáveis à noite. Essas variações são influenciadas pelas mudanças na pressão atmosférica e na circulação geral da atmosfera (OLIVEIRA e COSTA, 2010) (SOUSA, 2020).

A variabilidade do vento é um fenômeno complexo influenciado por vários fatores climáticos e geográficos. Ela segue um padrão sazonal, com diferentes velocidades e direções em diferentes estações do ano. Durante o verão, a circulação geral da atmosfera é mais forte e constante, resultando em ventos mais intensos e estáveis. No inverno, a circulação é mais fraca e variável, levando a ventos mais fracos e irregulares (OLIVEIRA e COSTA, 2010) (SOUSA, 2020).

Eventos climáticos como *El Niño* e *La Niña* também afetam a variabilidade do vento. Durante eventos de *El Niño*, os ventos tendem a ser mais fortes e constantes, enquanto durante eventos de *La Niña*, os ventos são mais fracos e variáveis. Isso se deve às mudanças na circulação geral da atmosfera e na temperatura ambiente (OLIVEIRA e COSTA, 2010) (SOUSA, 2020).

Com isso, a geração eólica é baseada no princípio de que o vento pode ser convertido em energia elétrica. O vento varia constantemente, tanto na velocidade de escoamento quanto na direção do seu deslocamento.

Ao considerar um fluxo de ar, movendo-se à velocidade v, perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário, como mostrado na Figura 4, a energia cinética E de massa de ar m, movendo-se à velocidade v pode ser expressa, matematicamente, na Equação (2.1) (CUSTÓDIO, 2009).

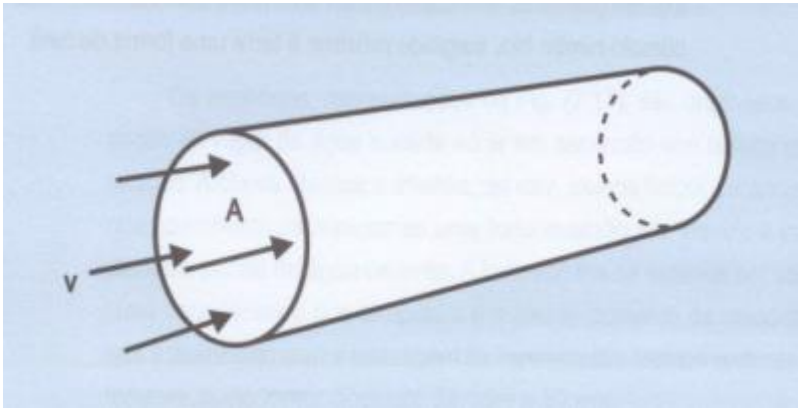
$$E = \frac{m \cdot v^2}{2} \tag{2.1}$$

Sendo:

- E = Energia cinética [J];

- m = Massa de ar [kg];
- v = Velocidade do vento [m/s]

Figura 4 - Fluxo de ar fluindo através de uma área transversal A.



Fonte: Retirada de (CUSTÓDIO, 2009).

Sendo assim, a potência P disponível no vento é definida como a derivada da energia no tempo $\dot{E}$ (CUSTÓDIO, 2009),

$$P = \dot{\boldsymbol{E}} = \frac{dE}{dt} = \frac{\dot{m} \cdot v^2}{2} \tag{2.2}$$

Sendo:

- P = Potência disponível no vento [W];
- E = Energia cinética do vento [J];
- $\dot{E}$ = Fluxo de energia [J/s];
- t = Tempo [s];
- $\dot{m}$ = Fluxo de massa de ar [kg/s];
- v = Velocidade do vento [m/s]

O fluxo de massa é dado por (CUSTÓDIO, 2009),

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \tag{2.3}$$

Sendo:

- $\dot{m}$ = Fluxo de massa de ar [kg/s];

- ρ = Massa específica do ar [kg/m³];
- v = Velocidade do vento [m/s];
- A = Área da seção transversal [m²]

Substituindo a equação (2.3) em (2.2), temos que a potência disponível no vento que passa pela seção A, transversal ao fluxo de ar, é dada por (CUSTÓDIO, 2009),

$$P = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \tag{2.4}$$

Sendo:

- P = Potência do vento [W];
- ρ = Massa específica do ar [kg/m³];
- A = Área da seção transversal [m²];
- v = Velocidade do vento [m/s]

Sendo a equação (2.4) a mais importante para análise de energia eólica, pois observa-se um importante aspecto, que a potência disponível no vento é proporcional ao cubo da velocidade que ele apresenta. Além disso, verifica-se uma relação direta entre a potência disponível no vento e a massa específica do ar, que de acordo com a lei de estado dos gases perfeitos, varia com a temperatura e a pressão atmosférica (CUSTÓDIO, 2009),

$$\rho = \frac{Pa}{\mathrm{R} \cdot \mathrm{T}} \tag{2.5}$$

Sendo:

- ρ = Massa específica do ar [kg/m³];
- R = Constante do ar [287 J/kg.K];
- Pa = Pressão atmosférica [Pa];
- T = Temperatura ambiente [K]

A altitude do local afeta a temperatura ambiente e a pressão atmosférica, o que, por sua vez, influencia a massa específica do ar. Uma expressão útil para a estimativa da massa específica do ar, ou densidade, em função da altitude do local e da temperatura ambiente é dada por (CUSTÓDIO, 2009),

$$\rho \cong \frac{353{,}4 \cdot \left(1 - \frac{z}{45271}\right)^{5{,}2624}}{273{,}15 + T} \tag{2.6}$$

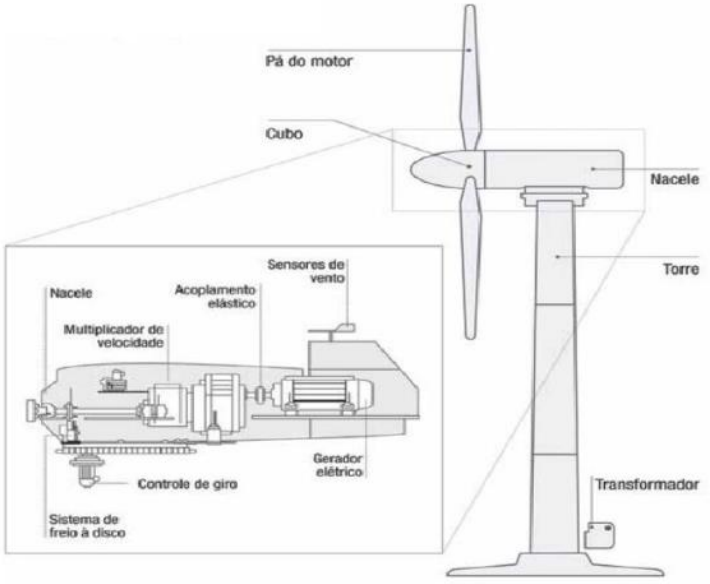
Sendo:

- ρ = Massa específica do ar [kg/m³];
- z = Altitude do local [m];
- T = Temperatura ambiente [ºC]

A energia cinética do vento é captada por máquinas projetadas especificamente para isso, chamadas turbinas eólicas ou aerogeradores. Para aproveitar a energia eólica, a potência do vento é transformada em potência mecânica por meio dessas turbinas, permitindo a realização de trabalho ou a conversão em energia elétrica (CUSTÓDIO, 2009).

A Figura 5 apresenta um exemplo dos principais componentes de uma turbina eólica.

Figura 5 - Principais componentes de uma turbina eólica.

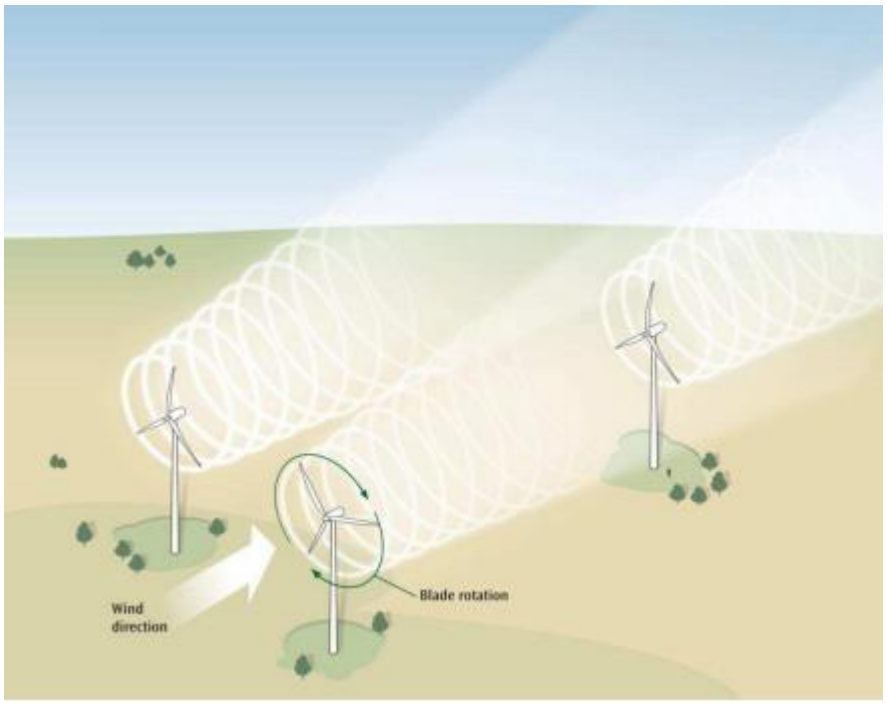


Fonte: Retirada de (LEUSIN, VAZ e MALDONADO, 2018).

- Pá do Motor: Estrutura aerodinâmica que captura a energia cinética do vento. Ela é projetada para girar quando o vento incide sobre suas superfícies curvas. As pás são geralmente feitas de materiais leves e resistentes, como fibra de vidro ou materiais compostos.
- Cubo: Centro da turbina onde as pás estão conectadas. Ele transfere a energia cinética das pás para o eixo da turbina. O cubo é robusto e projetado para suportar as forças geradas pelas pás em movimento.
- Nacele: Estrutura que abriga os principais componentes da turbina. Ela gira para direcionar as pás para o vento, maximizando a captura de energia. Dentro da nacele, estão o gerador elétrico, o sistema de controle e outros dispositivos.
- Multiplicador de Velocidade: Aumenta a velocidade de rotação do eixo da turbina. Ele é essencial para otimizar a geração de energia, permitindo que o gerador funcione em velocidades ideais.
- Acoplamento Elástico: Conecta o eixo da turbina ao gerador elétrico. Ele absorve choques e vibrações, protegendo os componentes contra danos.
- Gerador Elétrico: Converte a energia mecânica da rotação em eletricidade. Ele é o coração da turbina, gerando a energia que será enviada à rede elétrica.
- Controle de Giro: Ajusta a posição da nacele para acompanhar a direção do vento. Ele garante que a turbina esteja sempre alinhada para capturar a máxima energia.
- Sistema de Freio a Disco: Usado para parar a turbina em emergências ou manutenção. Ele garante a segurança durante operações críticas.
- Torre: Sustenta toda a estrutura da turbina, elevando-a para altitudes onde os ventos são mais fortes. A altura da torre afeta diretamente a eficiência da turbina.
- Transformador: Converte a eletricidade gerada pela turbina para a tensão adequada para a rede elétrica. Ele permite que a energia seja transmitida eficientemente.
- Sensores de Vento: Monitoram a direção e a velocidade do vento em tempo real. Esses dados são usados para otimizar o posicionamento da turbina e ajustar sua operação.

Uma turbina eólica extrai parte da energia cinética do vento, e o fluxo de ar que atravessa o rotor da turbina, portanto, tem sua energia cinética diminuída e, em consequência, a velocidade do vento se reduz, fenômeno esse chamado de efeito esteira. Além do que, o movimento das pás da turbina ainda provoca o giro da massa de ar que a atravessa, como mostrado na Figura 6 (CUSTÓDIO, 2009) (LANE, 2019).

Figura 6 - Demonstração do efeito esteira.



Fonte: Retirada de (NUNES, 2013).

A região atrás da turbina eólica onde é formada a esteira é denominada de sombra. Quando uma turbina opera na sombra de outra, ela extrai energia de uma massa de ar com menor potencial que a original, apresentando uma menor velocidade média do vento. Isso resulta em uma redução do desempenho dessa turbina (CUSTÓDIO, 2009) (SILVA, 2014).

A influência de uma turbina sobre outra é inversamente proporcional à distância entre elas. Ou seja, quanto maior o distanciamento entre as turbinas, menor será a interferência mútua. O distanciamento entre as turbinas aumenta a eficiência geral do parque eólico. Entretanto, quanto maior a distância entre as turbinas, maior será a área necessária para a implantação do parque (CUSTÓDIO, 2009) (SILVA, 2014).

A perda de eficiência do parque eólico depende de diversos fatores, como o espaçamento entre as turbinas, a orientação destas, as características do terreno e sua topografia. Essas perdas podem chegar a até 20% da energia bruta produzida. No entanto, um bom projeto de parque eólico, com 8 a 10 turbinas bem posicionadas, pode apresentar perdas inferiores a 5% (CUSTÓDIO, 2009).

Na definição da disposição das turbinas em um parque eólico, é fundamental considerar a rosa dos ventos predominantes. Deve-se buscar evitar, ou ao menos minimizar, a localização de turbinas na sombra de outras em relação à direção do vento predominante, pois essa é a direção com maior influência na produção de energia do parque (CUSTÓDIO, 2009).

Portanto, o posicionamento estratégico dos aerogeradores em um parque eólico, também conhecida como *micrositing*, desempenha um papel crucial na eficiência da usina. O *micrositing* é um processo de otimização que visa determinar a localização mais eficiente para as turbinas eólicas em um parque eólico. Isso é feito considerando a topografia do local, a direção e a velocidade do vento, bem como as características das turbinas eólicas (CUSTÓDIO, 2009).

O objetivo do *micrositing* é maximizar a produção de energia eólica, minimizar os custos de construção e manutenção, e garantir a segurança e a eficiência do parque eólico. Para alcançar isso, os especialistas em consultoria eólica utilizam softwares e técnicas avançadas para simular e otimizar a localização das turbinas (GIACOMOLLI, 2018).

Principais passos do processo de *micrositing* (ROCA, 2015):

- Análise da topografia: A topografia do local é analisada para determinar a direção e a velocidade do vento, bem como as características do terreno, como a inclinação e a profundidade.
- Simulação de vento: Softwares especializados são utilizados para simular a direção e a velocidade do vento em diferentes pontos do parque eólico.
- Definição da localização das turbinas: Com base nas simulações de vento, as turbinas são localizadas de forma a maximizar a produção de energia eólica.
- Otimização do layout: O layout das turbinas é otimizado para minimizar a interferência entre elas e maximizar a produção de energia.

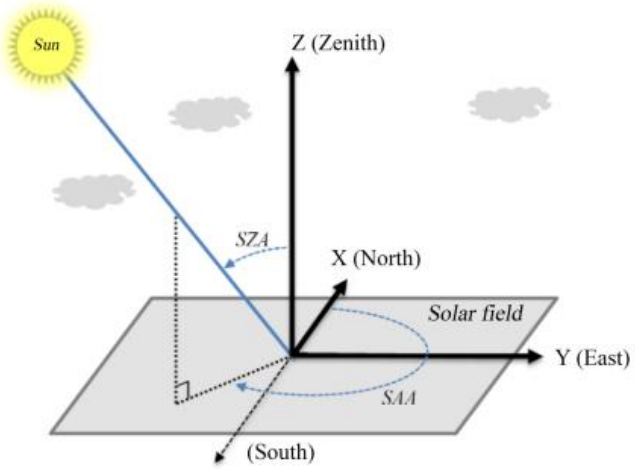
- Verificação da viabilidade: A viabilidade do projeto é verificada considerando fatores como a distância entre as turbinas, a altura das torres e a capacidade de produção de energia.

2.2 Geração Solar

A radiação solar que atinge a superfície terrestre depende da posição do Sol, da radiação extraterrestre e das especificidades atmosféricas do local em estudo (FLAMANT, 2022).

O conhecimento da mecânica celeste que governa o par Terra-Sol é um pré-requisito essencial para avaliar os diversos componentes da radiação solar. Esse conhecimento pode ser utilizado para determinar o ângulo zenital (SZA) e o ângulo azimutal (SAA) do Sol a cada momento, a partir de qualquer ponto de observação no globo terrestre, como mostrado na Figura 7. Esses ângulos são então utilizados para modelar ou medir os componentes direto e indireto da radiação solar terrestre (FLAMANT, 2022).

Figura 7 - Projeção da posição solar.



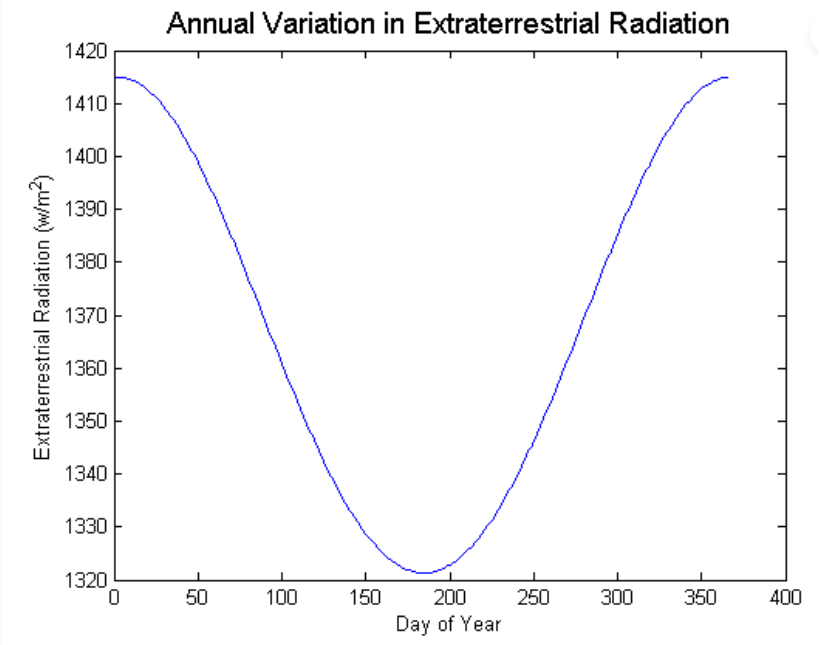
Fonte: Retirada de (FLAMANT, 2022)

A irradiação solar é a intensidade da radiação solar que atinge a superfície da Terra sem passar pela atmosfera, medida em unidades de irradiância (W/m²) e

expressa em relação a uma superfície perpendicular aos raios solares. Essa radiação é definida como a intensidade da radiação solar que chega à superfície terrestre sem a atenuação causada pela atmosfera, sendo uma medida fundamental para a compreensão e o aproveitamento da energia solar (SANDIA NATIONAL LABORATORIES).

A irradiação solar extraterrestre varia ao longo do ano, como mostrado na Figura 8, devido à distância média entre a Terra e o Sol. Essa distância varia em função do período orbital da Terra, e pode ser representada empiricamente por equações, resultando em uma variação da intensidade da radiação solar recebida pela superfície da Terra (SANDIA NATIONAL LABORATORIES).

Figura 8 - Variação anual da irradiação extraterreste.



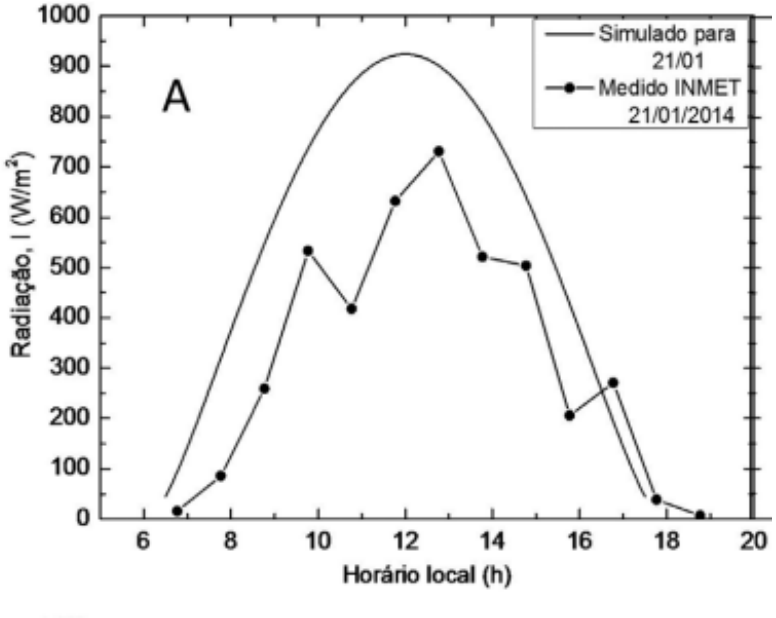
Fonte: Retirada de (SANDIA NATIONAL LABORATORIES).

A atmosfera terrestre atenua a irradiação solar em proporções variáveis, dependendo principalmente do ângulo zenital solar e da composição atmosférica. Isso resulta em uma redução da intensidade da radiação solar que atinge a superfície da Terra (ANDRADE, TIBA, *et al.*, 2015).

A irradiação solar também varia ao longo do dia, como mostrado na Figura 9, dependendo da posição do Sol no céu. Isso resulta em uma variação da intensidade

da radiação solar recebida pela superfície da Terra ao longo do dia (CAMPOS e ALCANTARA, 2016).

Figura 9 - Variação diária da irradiação solar.

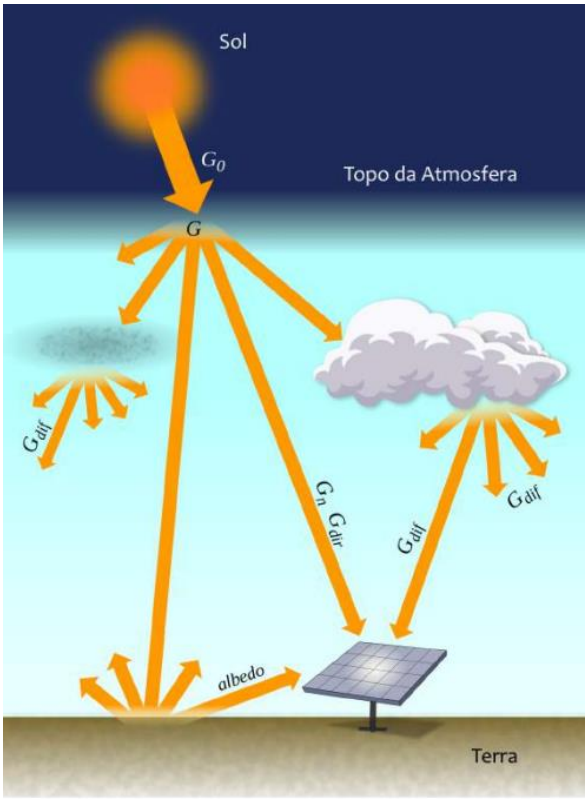


Fonte: Retirada de (CAMPOS e ALCANTARA, 2016).

A irradiação solar é fundamental para a geração de energia solar, pois é a base para a estimativa da radiação solar que atinge a superfície da Terra. Isso permite que os sistemas de geração de energia solar sejam projetados e dimensionados de forma eficaz.

A irradiação é absorvida parcialmente pela atmosfera, enquanto outra parte é espalhada, resultando em uma radiação indireta, categorizada em algumas componentes, como observado na Figura 10 (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017).

Figura 10 - Componentes da irradiância solar.



Fonte: Retirada de (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017).

Definições da Figura 10 (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017),

- Irradiância extraterrestre (G_0): É o fluxo instantâneo de energia solar incidente em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. É também conhecida como irradiância no topo da atmosfera (TOA);
- Irradiância difusa (G_{dif} ou DHI): É o fluxo instantâneo de energia solar incidente sobre uma superfície horizontal, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens etc.);
- Irradiância direta normal (G_n ou DNI): É o fluxo instantâneo de energia solar proveniente diretamente do Sol que incide sobre uma superfície em direção normal ao feixe de radiação solar, sem sofrer nenhum espalhamento durante o seu percurso na atmosfera;
- Irradiância direta (G_{dir}): É a parcela da DNI que incide perpendicularmente a uma superfície horizontal, determinada pela equação (2.7) ;

$$G_{dir} = DNI \cdot SZA \tag{2.7}$$

- Irradiância global horizontal (G ou GHI): É o fluxo instantâneo de energia solar incidente sobre uma superfície horizontal, determinada pela equação (2.8) ou (2.9);

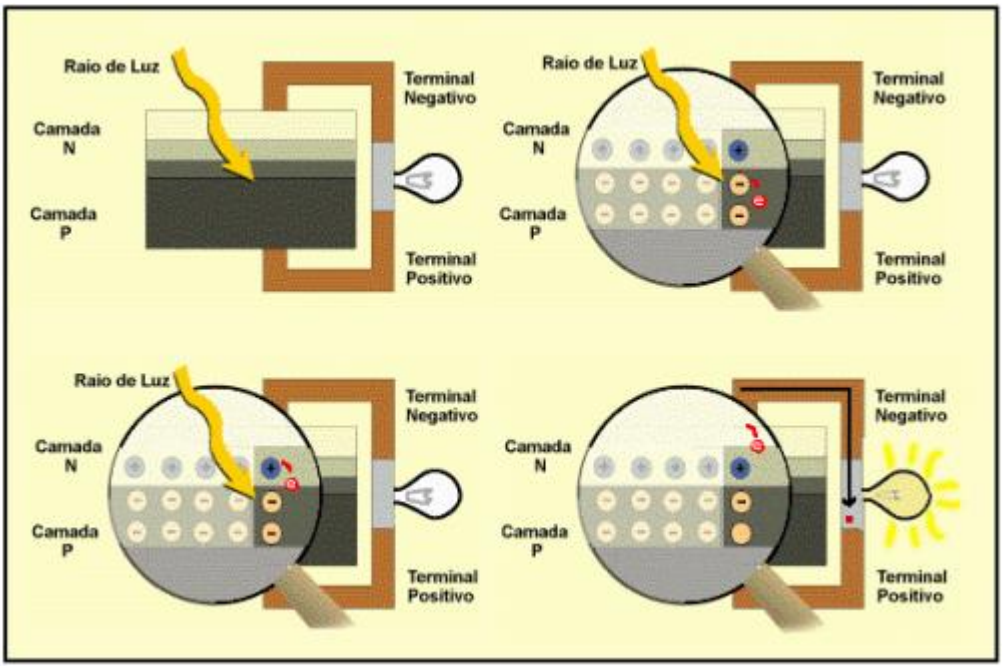
$$GHI = DHI + G_{dir} \tag{2.8}$$

$$GHI = DHI + DNI \cdot SZA \tag{2.9}$$

- Irradiância global no plano inclinado (GTI_i): É o fluxo instantâneo de energia solar por unidade de área incidente sobre um plano inclinado em relação à superfície da Terra. Em geral, essa nomenclatura é adotada para descrever a irradiância solar em um plano com ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal e com face voltada para o norte (ou sul) geográfico no hemisfério sul (ou norte).

Com isso, a energia solar é proveniente da conversão direta da irradiação solar incidente nos módulos fotovoltaicos pelas células solares através do efeito fotovoltaico, mostrado na Figura 11 (SILVA e ARAÚJO, 2022).

Figura 11 - Efeito fotovoltaico.



Fonte: Retirada de (SILVA, 2022)

O efeito fotovoltaico é o processo de conversão direta da energia da luz solar em energia elétrica. Esse fenômeno ocorre quando fótons, que são partículas de luz, interagem com um material semicondutor, como o silício, e geram pares de elétrons e lacunas (ausência de elétrons).

Quando a luz solar incide sobre uma célula fotovoltaica, os fótons com energia suficiente (maior que o gap de energia do material) são absorvidos pelo material semicondutor. Isso faz com que os elétrons da banda de valência sejam excitados e transitem para a banda de condução, abandonando lacunas na banda de valência Esses elétrons excitados e as lacunas formam pares elétron-lacuna que são separados por um campo elétrico interno presente na célula fotovoltaica. Esse campo elétrico é criado pela junção de materiais semicondutores do tipo p (excesso de lacunas) e do tipo n (excesso de elétrons), formando uma junção p-n (MACHADO e MIRANDA, 2015).

Os elétrons livres na banda de condução e as lacunas na banda de valência são então coletados em eletrodos opostos, gerando uma diferença de potencial (tensão) entre esses eletrodos. Essa tensão, quando conectada a uma carga, faz com que os elétrons fluam, gerando uma corrente elétrica que pode ser utilizada para alimentar dispositivos elétricos (MACHADO e MIRANDA, 2015).

Portanto, o efeito fotovoltaico envolve a absorção de fótons, a geração de pares elétron-lacuna, a separação desses portadores de carga por um campo elétrico interno e a coleta dos portadores em eletrodos, resultando na conversão direta da energia luminosa em energia elétrica (MACHADO e MIRANDA, 2015).

O módulo fotovoltaico, como mostrado na Figura 12, é um conjunto de células solares conectadas em série e paralelo, projetado para produzir uma quantidade específica de energia elétrica. Cada célula solar é composta por um material semicondutor, como silício, que converte a radiação solar em corrente elétrica. Essas células são organizadas em painéis ou módulos, que são os componentes básicos de um sistema fotovoltaico (PEREZ, 2022) (OLIVEIRA, 2019).

Figura 12 - Módulo fotovoltaico.

Fonte: Retirada de (GREENVOLT, 2019).

Existem diferentes tipos de módulos fotovoltaicos, incluindo:

- Módulos de Silício Cristalino: São os mais comuns e eficientes, utilizando silício cristalino como material semicondutor.
- Módulos de Silício Policristalino: São menos eficientes que os de silício cristalino, mas mais baratos e com uma estrutura mais simples.
- Módulos de Silício Amorfo: São menos eficientes que os de silício cristalino e policristalino, mas mais baratos e com uma estrutura mais simples.
- Módulos de Filmes Finos: São menos eficientes que os de silício cristalino e policristalino, mas mais baratos e com uma estrutura mais simples

Os módulos geram corrente contínua (CC) e a conversão da corrente contínua em corrente alternada (CA) é realizada através do inversor, como mostrado na Figura 13, o processo é fundamental para alimentar cargas CA ou injetar energia na rede elétrica.

Figura 13 - Inversor.

Fonte: Retirada de (WEG).

O inversor utiliza circuitos eletrônicos de chaveamento para converter a entrada de CC em uma saída de CA. Essa conversão é feita através de uma técnica chamada modulação por largura de pulso, ou *Pulse Width Modulation* (PWM), que gera uma onda quadrada com amplitude e frequência controladas (RAMPINELLI, KRENZINGER e ROMERO, 2013).

Para obter uma onda senoidal pura na saída, o inversor utiliza filtros LC (indutores e capacitores) para remover os harmônicos indesejados gerados pelo chaveamento PWM. Além disso, nos inversores conectados à rede elétrica, é necessário um circuito de sincronização, como um *Phase-Locked Loop* (PLL), para alinhar a frequência e a fase da saída do inversor com a rede (RAMPINELLI, KRENZINGER e ROMERO, 2013).

Para manter a corrente injetada na rede dentro dos limites adequados, os inversores conectados à rede utilizam malhas de controle, como controle de malha dupla com realimentação da corrente injetada. Isso é especialmente importante para evitar sobrecargas na rede e garantir a segurança e a eficiência do sistema (RAMPINELLI, KRENZINGER e ROMERO, 2013).

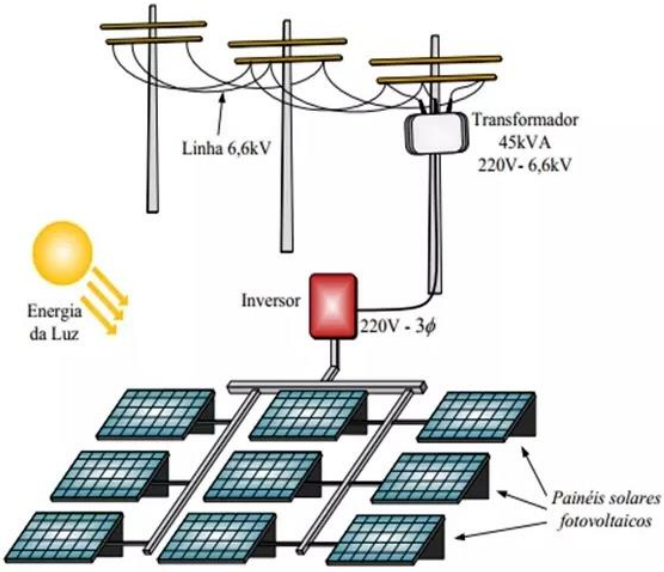
Existem diferentes topologias de inversores, como meia-ponte, ponte completa e multinível, cada uma com suas vantagens e desvantagens em termos de eficiência, custo e complexidade. A escolha da topologia depende da aplicação e dos requisitos do sistema. Além disso, os inversores também podem incluir recursos adicionais, como rastreamento do ponto de máxima potência, ou *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), para otimizar a extração de energia dos painéis solares e circuitos de

proteção contra sobretensão e sobrecorrente (RAMPINELLI, KRENZINGER e ROMERO, 2013).

O projeto e a implementação de um inversor envolvem a modelagem matemática dos estágios de conversão, a sintonia dos controladores, a implementação do algoritmo de controle e a simulação computacional dos circuitos. Isso requer conhecimentos em eletrônica, automação e controle, além de habilidades em programação e simulação.

Dessa forma, observar-se a estrutura de um parque solar na Figura 14.

Figura 14 - Demonstração de uma usina solar.



Fonte: Retirada de (MATTEDE).

2.3 Fator de capacidade

O FC é um parâmetro fundamental para avaliar a performance de um parque eólico ou solar. Ele é definido como a razão entre a energia gerada efetivamente e a energia teoricamente disponível, considerando a potência instalada e a disponibilidade de ventos ou radiação solar. Matematicamente segue a equação (CUSTÓDIO, 2009) (BREITENBACH, 2016),

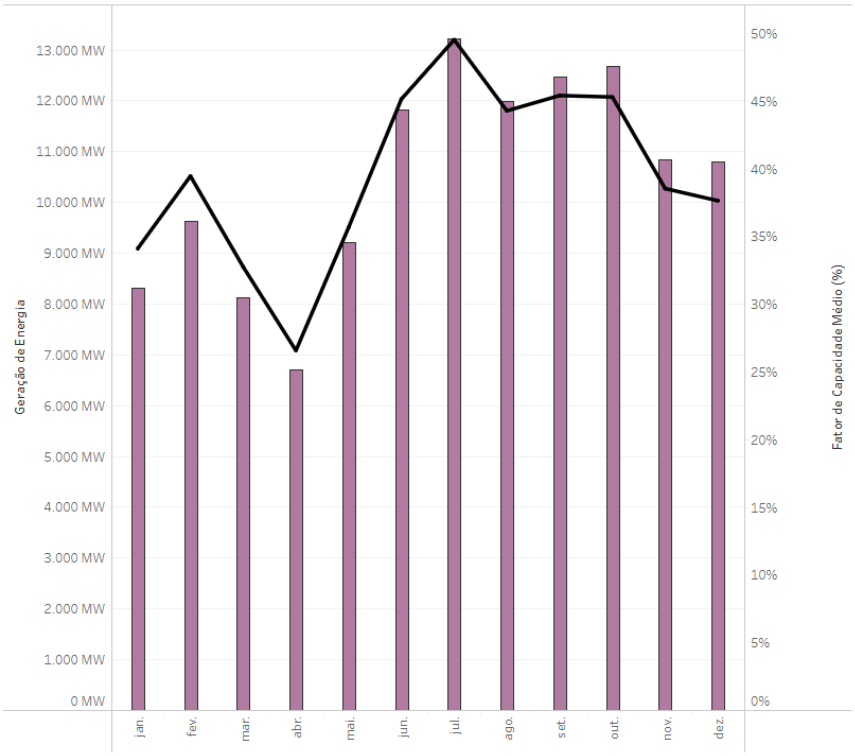
$$FC = \frac{Energia\ Gerada}{Potência\ Instalada\ \cdot Horas\ no\ período}\ x\ 100\% \qquad (2.10)$$

Sendo:

- Energia Gerada: Quantidade total de energia elétrica produzida pelo sistema em um determinado período [MWh];
- Potência Instalada: Capacidade nominal do sistema [MW];
- Horas no período: Número total de horas no período considerado [h].

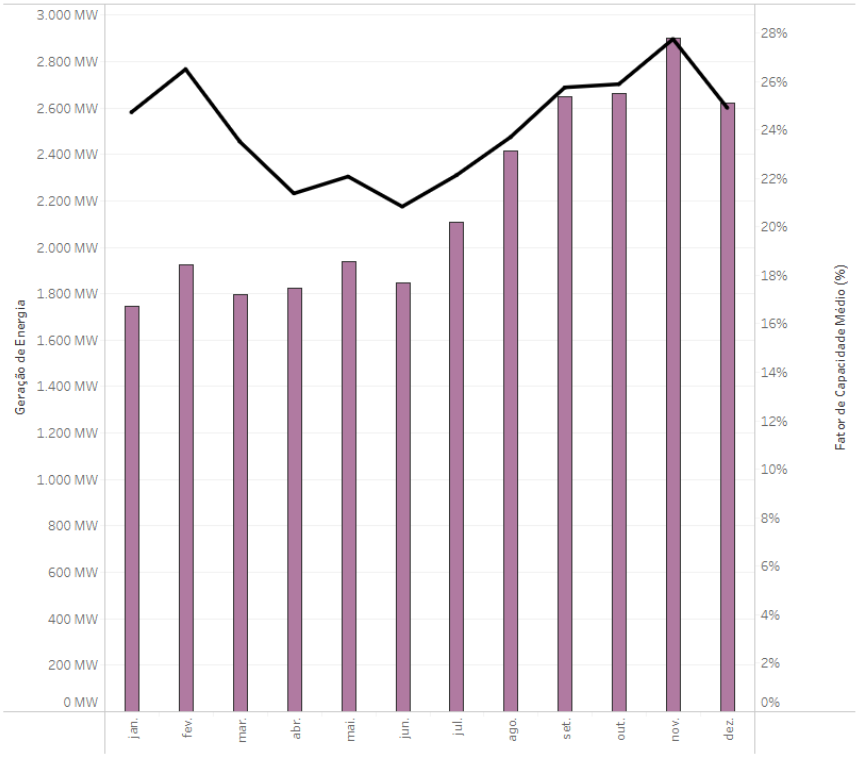
A análise de dados de geração e Fator de Capacidade médios mensais é fundamental para entender a performance de parques eólicos e solares. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), por exemplo, divulga dados mensais sobre a geração e Fator de Capacidade médios para diferentes regiões do Brasil, como mostrado nas Figura 15 e Figura 16. Esses dados permitem avaliar a performance de diferentes sistemas e identificar tendências e problemas de geração (BASTOS, MARTINEZ e TAHIM, 2020).

Figura 15 - Geração e Fator de Capacidade Eólico Mensal do Brasil, em MWmed.



Fonte: Retirada de (ONS).

Figura 16 - Geração e Fator de Capacidade Solar Mensal do Brasil, em MWmed.



Fonte: Retirada de (ONS).

2.4 Montante de Uso do Sistema de Transmissão

O MUST refere-se à quantidade de energia elétrica que os agentes utilizam para transmitir ou distribuir eletricidade através da rede de transmissão. Esses montantes são calculados com base nos contratos de uso do sistema e levam em consideração fatores como a capacidade instalada, a localização geográfica e a demanda dos pontos de conexão. Em resumo, o MUST representa a quantidade de energia que cada agente utiliza para acessar a infraestrutura de transmissão e distribuição no sistema elétrico brasileiro.

Se o MUST for ultrapassado, o ONS classifica os eventos de ultrapassagem e sobrecontratação. Isso ocorre quando o uso da rede de transmissão excede o montante contratado, causando uma sobrecarga no sistema. Os agentes devem realizar a contestação dos eventos de ultrapassagem e sobrecontratação dentro de um prazo determinado. Se não houver contestação, os eventos serão considerados consistidos automaticamente por decurso de prazo (ONS, 2022) (ONS, 2020).

A ultrapassagem pode causar problemas de estabilidade no sistema elétrico, pois a sobrecarga pode levar a oscilações na frequência e tensão da rede elétrica, afetando a qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica (CASTRO, SILVA, *et al.*, 2020).

Portanto, é fundamental que os agentes de transmissão e distribuição tenham um monitoramento contínuo do uso da rede de transmissão e realizem ajustes necessários para evitar a ultrapassagem do MUST, garantindo a estabilidade e a segurança do sistema elétrico.

2.5 Tipologias de Combinações de Usinas

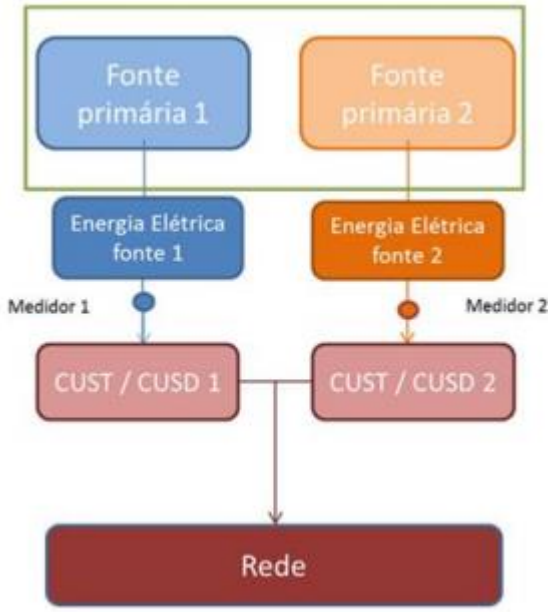
Esse tópico apresenta as quatro tipologias de integração entre fontes geradoras. No intuito de facilitar o entendimento dessas tipologias, têm-se como infraestrutura de conexão à rede: o Contrato de Uso do Sistema de Transmissão (CUST) é um contrato celebrado entre o ONS e os usuários conectados ao sistema de transmissão de energia elétrica, estabelecendo os termos e condições gerais que regulam o uso da Rede Básica pelos usuários. Já o Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) é celebrado entre a distribuidora de energia elétrica e os usuários conectados ao seu sistema de distribuição, estabelecendo os termos e condições para o uso desse sistema (EPE, 2018) (ONS, 2022).

2.5.1 Usinas Adjacentes

As usinas adjacentes, como mostradas na Figura 17, são aquelas construídas em localidades próximas entre si, podendo compartilhar terreno e instalações de interesse restrito. Cada usina deve contratar capacidade de uso da rede compatível com sua potência nominal, conforme as regras vigentes. Esse arranjo pode proporcionar ganhos no custo de terreno e sinergia operativa, apesar desses custos representarem uma pequena parcela do total.

Porém, do ponto de vista do sistema, são usinas distintas, pois não há compartilhamento de equipamentos de geração. Portanto, não são propriamente usinas híbridas.

Figura 17 - Usinas Adjacentes.



Fonte: Retirada de (EPE, 2018).

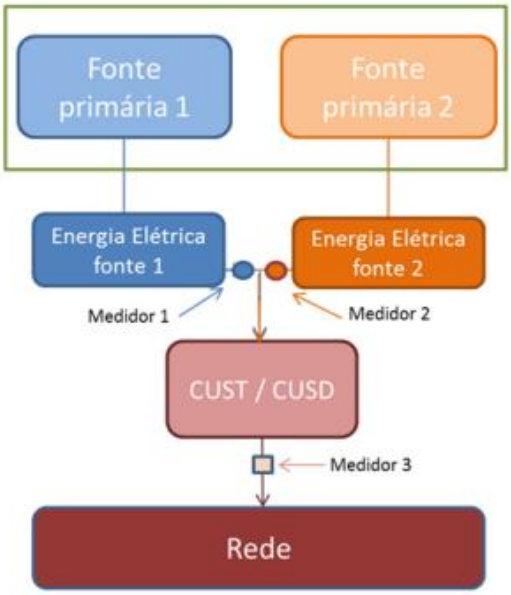
2.5.2 Usinas Associadas

As usinas associadas, como mostradas na Figura 18, são aquelas em que duas ou mais usinas de fontes energéticas distintas, com características de produção complementar, compartilham fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão e acesso à rede. Nessa configuração, as usinas contratam menos capacidade de uso da rede do que a soma de suas potências nominais.

Essa configuração apresenta potenciais vantagens, como otimização de custos, mas também maior complexidade, especialmente no que se refere ao tratamento do *curtailment*, ou seja, a limitação de escoamento da energia gerada. Ajustes regulatórios e contratuais são necessários (EPE, 2018).

Apesar de serem vistas como uma única injeção de potência pelo operador do sistema, as usinas associadas não são consideradas propriamente híbridas, pois os equipamentos de geração são independentes, com medição individualizada. Cada usina produz energia de forma independente.

Figura 18 - Usinas Associadas.



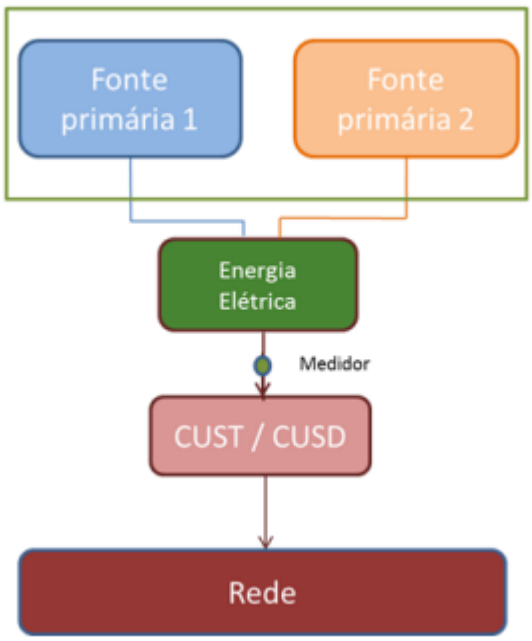
Fonte: Retirada de (EPE, 2018).

2.5.3 Usinas Híbridas

As usinas híbridas, como mostradas na Figura 19, são aquelas em que as diferentes fontes de energia se combinam ainda no processo de produção de eletricidade. Nessa categoria, enquadram-se, por exemplo, uma planta solar heliotérmica com queima de biomassa, de modo que o vapor produzido por ambas as fontes é aproveitado na mesma turbina (ciclo Rankine), ou uma usina fotovoltaica que compartilhe os conversores dos aerogeradores, dispensando o uso de inversores fotovoltaicos. Nesses casos, não é possível distinguir qual fonte primária foi responsável pela geração de determinada energia elétrica (EPE, 2018).

Essa configuração se diferencia de outras arranjos, como usinas adjacentes e associadas, em que as fontes mantêm equipamentos de geração independentes, mesmo compartilhando infraestrutura. Nas usinas híbridas, a integração física entre as fontes é mais profunda, de modo que a produção de energia não pode ser atribuída individualmente a cada uma delas.

Figura 19 - Usinas Híbridas.



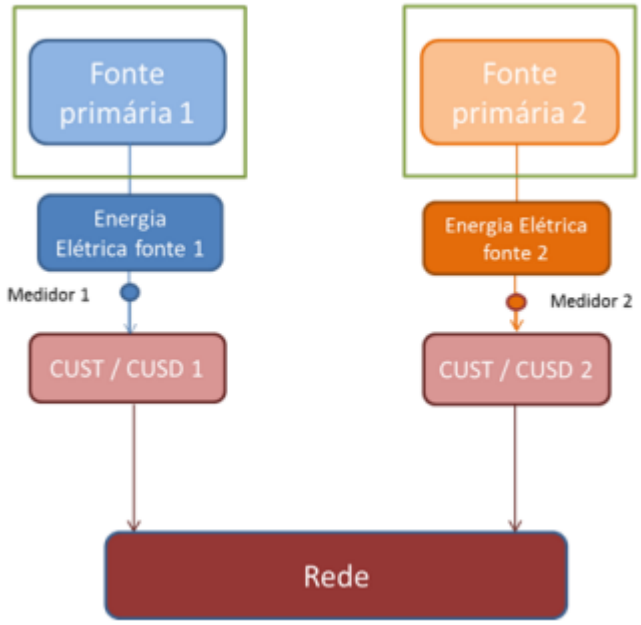
Fonte: Retirada de (EPE, 2018).

2.5.4 Portfólios Comerciais

A composição de portfólios de projetos de diferentes fontes, como mostrada na Figura 20, se distingue das demais categorias por não envolver necessariamente proximidade física ou compartilhamento de equipamentos. Sua natureza é puramente comercial-contratual, como forma de reduzir exposições a preços de curto prazo, especialmente em contratos por quantidade (EPE, 2018).

Essa configuração faz sentido quando as usinas possuem recursos complementares, independentemente de sua localização. Os portfólios comerciais também não afetam a contratação do uso da rede de transmissão ou distribuição (EPE, 2018).

Figura 20 - Portfólios Comerciais.



Fonte: Retirada de (EPE, 2018).

2.6 Custo Nivelado de Energia

O LCOE, ou Custo Nivelado de Energia, é uma métrica amplamente utilizada para avaliar e comparar os custos de diferentes tecnologias de geração de energia. Essa métrica representa o custo médio por unidade de energia elétrica gerada ao longo da vida útil de uma usina de energia. O LCOE também é utilizado para avaliar a viabilidade de projetos de energia renovável, uma vez que esses projetos geralmente têm custos de capital mais altos, mas custos de operação e manutenção mais baixos em comparação com as tecnologias de geração de energia convencionais. Essa análise é crucial para o planejamento e implementação de políticas energéticas sustentáveis (POZZATTI, 2023).

O cálculo do LCOE envolve uma série de parâmetros, como taxa de desconto, vida útil da usina, fator de capacidade, custos de investimento inicial, custos de operação e manutenção, e custos de combustível. Esses parâmetros variam de acordo com a tecnologia de geração de energia, localização geográfica, condições de mercado e outros fatores. Matematicamente, têm-se (POZZATTI, 2023):

$$\text{LCOE} = \frac{C_{CAPEX} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{C_{OPEX_i}}{(1+r)^i}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{Eg_i}{(1+r)^i}} \tag{2.11}$$

Sendo:

- C_{CAPEX} = Custo total de construção e instalação [R$];
- C_{OPEX} = Custo total de operação e manutenção [R$];
- Eg = Total de energia gerada [kWh];
- i = Ano;
- n: Vida útil do empreendimento;
- r: Taxa de depreciação.

O C_{CAPEX} depende unicamente da capacidade instalada da usina fotovoltaica e com base nos custos de instalação para empreendimentos fotovoltaicos (POZZATTI, 2023).

O valor de C_{OPEX} para cada ano, representado através da Equação (2.12), compreende os custos de O&M $(C_{O\&M})$ da usina fotovoltaica, e, também, os custos relativos aos Encargos de Uso do Sistema de Transmissão (EUST) (POZZATTI, 2023).

$$C_{OPEX} = C_{O\&M} + \text{EUST} \tag{2.12}$$

O $C_{O\&M}$ refere-se aos gastos necessários para manter o sistema de geração fotovoltaica funcionando de forma eficiente e confiável. Já o EUST são os valores devidos pelos usuários (geradores, distribuidores, consumidores livres etc.) às concessionárias de transmissão pela prestação dos serviços de transmissão de energia elétrica (POZZATTI, 2023) (ONS, 2023).

O valor do EUST é calculado mensalmente, multiplicando a Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST) do ponto de conexão da usina pelo MUST contrato pelo projeto aplicado, se for o caso, o desconto de incentivo governamental $desc_{TUST}$, definido pela Equação (2.13) (POZZATTI, 2023).

$$EUST = \text{TUST} \cdot \text{MUST} \cdot (1 - desc_{TUST}) \tag{2.13}$$

O TUST refere-se ao pagamento pela utilização da rede de transmissão de energia elétrica para escoar a energia gerada pelo parque até os centros de consumo. Esse custo é definido e regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2023) .

O $desc_{TUST}$ é um mecanismo regulatório adotado, também, pela ANEEL para incentivar a comercialização de energia elétrica proveniente de fontes incentivadas, como energia eólica, solar, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (CCEE, 2023).

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Este capítulo apresenta a metodologia adotada no detalhamento do desenvolvimento do algoritmo proposto. Serão abordados aspectos relacionados ao funcionamento do algoritmo, as bibliotecas utilizadas, sua estrutura e lógica, bem como a aplicação do algoritmo, incluindo os dados de entrada e os resultados obtidos.

3.1 Desenvolvimento do algoritmo

A proposta do algoritmo engloba o seu desenvolvimento na linguagem *Python*. *Python* é amplamente utilizada em análise de dados devido a suas características vantajosas. É uma linguagem de alto nível de fácil implementação e entendimento, o que simplifica a transição para a análise de dados. Além disso, *Python* possui uma extensa variedade de bibliotecas e módulos especializados, como *NumPy*, Pandas e *Scikit-learn*, que permitem realizar tarefas específicas de manipulação, visualização e aprendizado de máquina. Essas ferramentas são amplamente utilizadas e mantidas por uma comunidade ativa.

A flexibilidade e extensibilidade da linguagem permitem que os usuários criem soluções personalizadas. O *Python* também pode ser facilmente integrada a outras tecnologias, tornando a análise de dados mais eficiente e escalável. Sua comunidade ativa e amplo suporte oferecem muitos recursos para ajudar os usuários a resolverem problemas e melhorar suas habilidades.

Embora *Python* seja uma linguagem de alto nível, suas bibliotecas são otimizadas para melhorar o desempenho, tornando-a adequada para aplicações que envolvem grandes volumes de dados. Além disso, por ser de código aberto, *Python* é gratuita e acessível, o que a torna uma escolha atraente para o desenvolvimento de soluções de análise de dados.

Para o melhor entendimento dos próximos passos, o termo corte é definido como o quantitativo da energia que ultrapassa o MUST contratado. Além disso, assume-se que a estrutura composta por módulos, montagem e inversor é idêntica para cada inversor na estimativa da produção de múltiplos inversores baseada na produção de apenas um (PVLIB). Por exemplo, para uma série de produção solar fornecida para

uma potência instalada de 1 MW, em uma simulação que utiliza uma potência solar instalada de 2 MW, a série de produção solar será duplicada em relação à de 1 MW fornecida como entrada. Por fim, a ideia de utilizar um corte de referência com relação à geração solar é que qualquer corte que vier a ocorrer será aplicado proporcionalmente à geração solar associada.

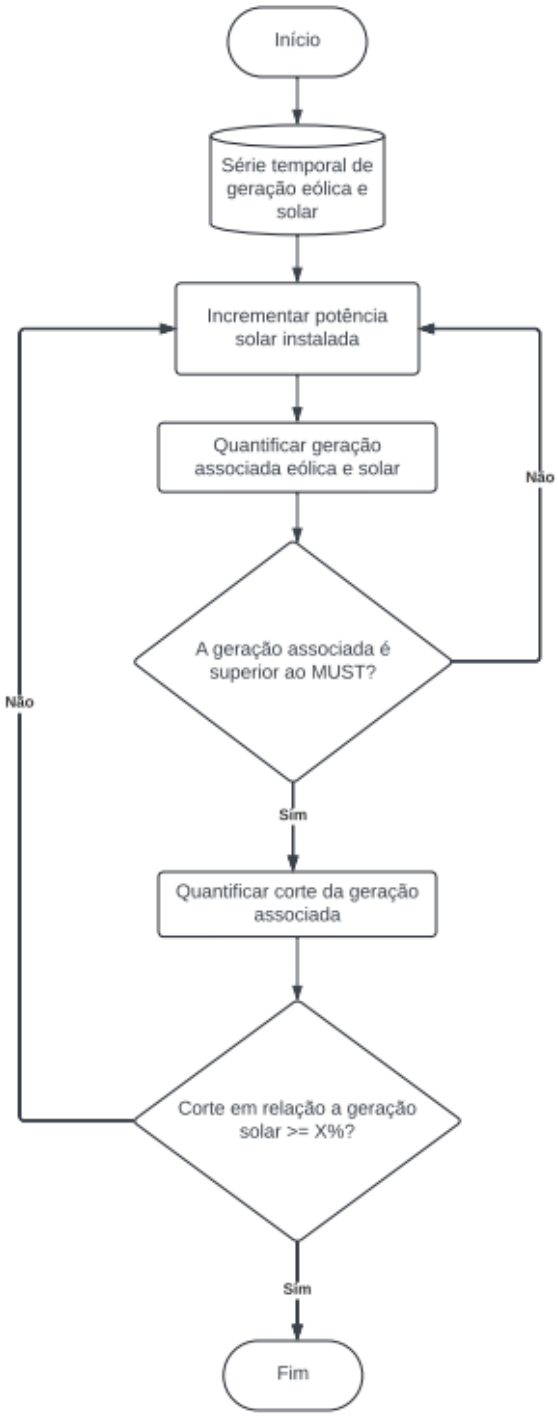
O funcionamento do algoritmo pode ser observado na Figura 21, seguindo a lógica: inicialmente o algoritmo recebe como entrada uma série temporal de geração eólica e solar, além, são fornecidos o MUST contratado do parque, a potência instalada das usinas eólica e solar correspondentes à geração de entrada, a quantidade inicial de inversores utilizada para obter a produção solar de entrada, a quantidade de inversores a ser incrementada em cada cenário e o valor de corte de referência em relação à geração solar.

Em cada cenário, a produção solar é incrementada e associada à geração eólica. O algoritmo analisa, em cada passo de tempo, se essa geração combinada ultrapassa o MUST contratado. Caso o MUST seja ultrapassado, o corte é quantificado. Se não houver ultrapassagem, a geração solar é novamente incrementada e o processo de análise se repete.

Para os cenários em que ocorre um corte associado à geração híbrida, o corte é quantificado em relação à geração solar e comparado ao valor de corte de referência fornecido. Se o corte não ultrapassar o valor de referência, a produção solar é incrementada novamente. Caso contrário, a simulação é finalizada, e os resultados de cada cenário, onde a produção solar foi incrementada, são apresentados.

Os resultados incluem médias anuais, horárias e mensais das gerações eólica, solar e híbrida, assim como dos cortes gerados. Todos esses dados são organizados e exportados para um arquivo Excel, proporcionando uma análise detalhada e abrangente.

Figura 21 - Fluxograma do algoritmo.



Fonte: De autoria própria.

Com base na Figura 21, toma-se que:

1. Inserção de uma série temporal de produção eólica e solar, para um certo período (1 ano, 2 anos etc.) com uma certa granularidade (1 minuto, 5 minutos, horário etc.);
2. Incrementação da potência instalada solar;
3. Quantificação da geração associada;
4. Verificação se a potência gerada é superior ao MUST contratado:
    a. Se sim, quantifica o montante excedente da geração fotovoltaica, e segue para o passo 5;
    b. Se não, quantifica montante de produção da usina híbrida, e retorna para o passo 2.
5. Verificação se o corte da usina associada é maior que o corte de referência:
    a. Se sim, fim das simulações;
    b. Se não, retorna para o passo 2.

3.1.1 Bibliotecas

As bibliotecas *Pandas*, *NumPy* e *Matplotlib* são escolhas populares para análise e visualização de dados em Python devido à sua eficiência, flexibilidade e ampla funcionalidade. Pandas fornece estruturas de dados poderosas como *DataFrames* e Series, facilitando a manipulação e análise de dados. *NumPy* é fundamental para cálculos numéricos e científicos, oferecendo operações matemáticas eficientes. Para a visualização dos dados, Matplotlib é uma escolha popular, oferecendo uma ampla variedade de gráficos e *plots* personalizáveis.

3.1.1.1 Pandas

A biblioteca Pandas do *Python* é uma ferramenta poderosa e flexível para análise e manipulação de dados. Ela é amplamente utilizada em projetos de ciência de dados e pesquisas acadêmicas (MCKINNEY e PANDAS, 2022).

O Pandas fornece duas estruturas de dados principais: *Series* e *DataFrame*. Uma *Series* é um *array* unidimensional com rótulos, enquanto um *DataFrame* é uma estrutura bidimensional com linhas e colunas, semelhante a uma planilha. Essas estruturas permitem trabalhar com diferentes tipos de dados de forma eficiente.

A biblioteca permite a leitura e gravação de dados em diversos formatos, como CSV, Excel, TXT, entre outros. Isso facilita a importação e exportação de conjuntos de dados para análise.

Além disso, oferece uma ampla gama de funções para manipular dados, como filtrar, ordenar, agrupar, agregar e transformar os dados.

3.1.1.2 Numpy

O *Numerical Python* (*Numpy*) é uma biblioteca fundamental para computação científica em *Python*. Ela fornece uma estrutura de dados eficiente chamada de *array* multidimensional (*ndarray*), que permite realizar operações matemáticas e numéricas de forma rápida e eficiente (NUMPY).

Os *arrays* do *NumPy* são armazenados em um bloco contínuo de memória, ao contrário das listas nativas do *Python*. Isso permite que o *NumPy* acesse e modifique os dados de forma muito mais eficiente, conceito conhecido como "localidade de referência".

As operações disponíveis no *NumPy* são capazes de realizar processamentos complexos em conjuntos de dados sem a necessidade de loops, o que torna aplicações que utilizam essa biblioteca geralmente de 10 a 100 vezes mais rápidas do que aquelas que usam as estruturas nativas do *Python* (NUMPY).

O *NumPy* disponibiliza uma ampla variedade de operações matemáticas e estatísticas que podem ser aplicadas diretamente aos *arrays*, como adição, subtração, multiplicação, transposição, diferenciação, interpolação, entre outras. Isso o torna muito útil em áreas como aprendizado de máquina, processamento de imagens e rotinas matemáticas.

3.1.1.3 Matplotlib

O *Matplotlib* é uma biblioteca *Python* amplamente utilizada para a visualização de dados. Ela permite a criação de gráficos 2D e 3D de alta qualidade, incluindo gráficos estáticos, animados e interativos (MATPLOTLIB).

A biblioteca *Matplotlib* foi criada em 2003 e é uma extensão da biblioteca *NumPy*, outra ferramenta popular para computação científica em *Python*. O *Matplotlib* é uma biblioteca de código aberto e multiplataforma, o que significa que pode ser usada em diferentes sistemas operacionais (MATPLOTLIB).

Uma das principais vantagens do *Matplotlib* é sua versatilidade. Ela oferece uma ampla variedade de tipos de gráficos, como gráficos de linha, de barras, de dispersão, histogramas, gráficos de pizza, entre outros. Isso torna a biblioteca extremamente útil para a apresentação de insights em projetos de ciência de dados e análise de dados (MATPLOTLIB).

Além disso, o *Matplotlib* possui uma interface orientada a objetos, o que permite que os programadores personalizem os gráficos de maneira detalhada, ajustando aspectos como cores, rótulos, legendas e estilos. Essa flexibilidade é essencial para a criação de visualizações atraentes e informativas (MATPLOTLIB).

3.1.2 Funções

Este tópico apresenta as funções desenvolvidas para o funcionamento do algoritmo, detalhando seu funcionamento e estrutura.

3.1.2.1 Carregamento do arquivo base de entrada

A função “carregamento_arquivo_txt” é utilizada para carregar um arquivo de texto (.txt) em um *DataFrame* do pandas e executar transformações necessárias para sua análise subsequente. Possuindo a estrutura mostrada na Tabela 1.

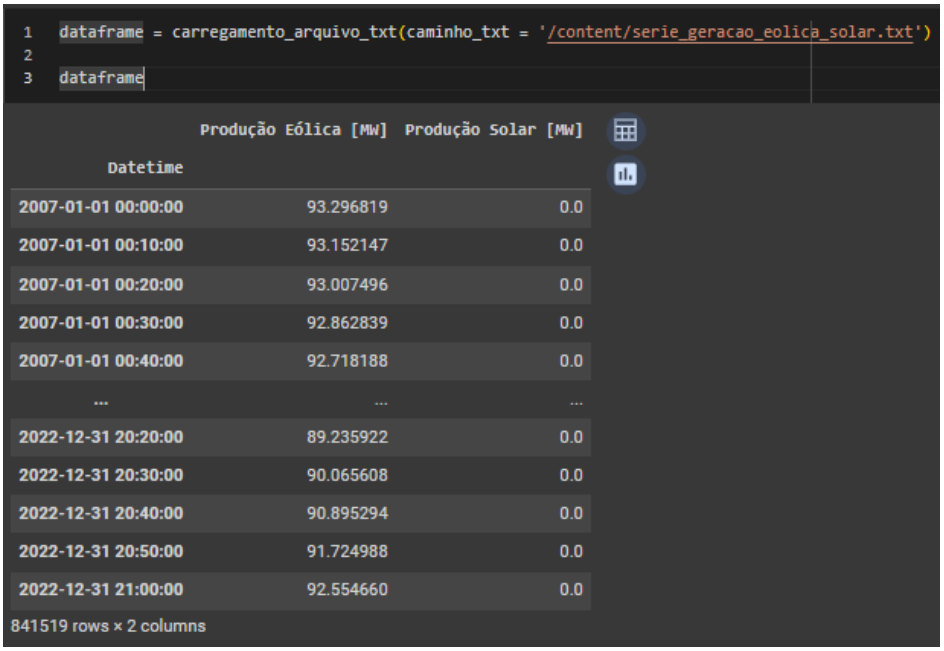
Tabela 1 - Descrição da função "carregamento_arquivo_txt".

Elemento	Descrição
Nome da Função	carregamento_arquivo_txt
Parâmetros de Entrada	caminho_txt: O caminho do arquivo de texto (.txt) que deseja ser carregado.
Processamento	1. Carrega o arquivo de texto em uma tabela do pandas. 2. Converte tipos de dados. 3. Formata a coluna de índice como uma série de data e hora.
Saída	dataframe: A tabela carregada e processada.

Fonte: De autoria própria.

Funcionamento da função “carregamento_arquivo_txt” mostrada na Figura 22.

Figura 22 - Funcionamento da função “carregamento_arquivo_txt”.



Datetime	Produção Eólica [MW]	Produção Solar [MW]
2007-01-01 00:00:00	93.296819	0.0
2007-01-01 00:10:00	93.152147	0.0
2007-01-01 00:20:00	93.007496	0.0
2007-01-01 00:30:00	92.862839	0.0
2007-01-01 00:40:00	92.718188	0.0
...	...	...
2022-12-31 20:20:00	89.235922	0.0
2022-12-31 20:30:00	90.065608	0.0
2022-12-31 20:40:00	90.895294	0.0
2022-12-31 20:50:00	91.724988	0.0
2022-12-31 21:00:00	92.554660	0.0

841519 rows × 2 columns

Fonte: De autoria própria.

3.1.2.2 Criação de tabelas com médias anuais

A função “criacao_tabelas_medias_anuais” é utilizada para criar e armazenar as tabelas com as médias anuais dos dados de geração de energia eólica, solar, híbrida e do corte de energia de um específico cenário simulado. Possuindo a estrutura mostrada na Tabela 2.

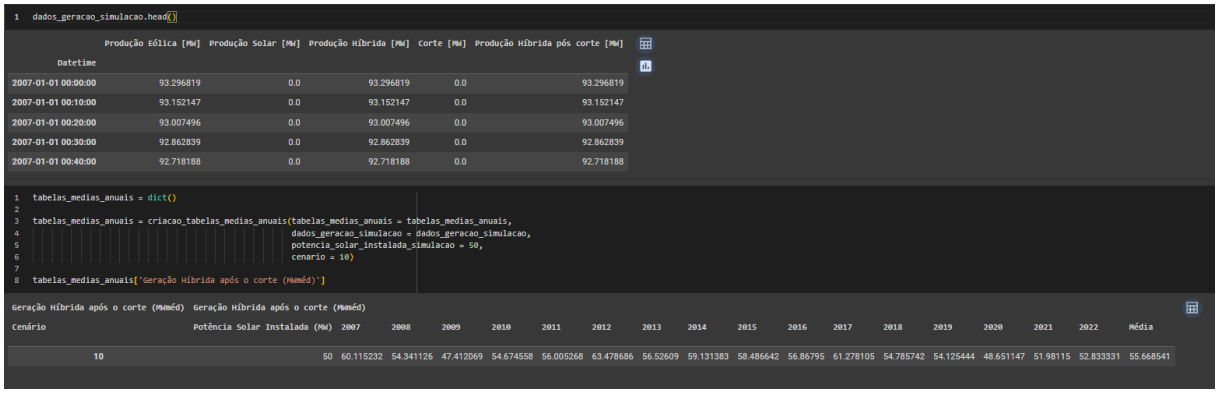
Tabela 2 - Descrição da função "criacao_tabelas_medias_anuais".

Elemento	Descrição
Nome da Função	criacao_tabelas_medias_anuais
Parâmetros de Entrada	1. tabelas_medias_anuais: O dicionário que armazena as tabelas com as médias anuais; 2. dados_geracao_simulacao: A tabela que contém os dados de geração de energia simulados; 3. potencia_solar_instalada_simulacao: A potência solar instalada simulada; 4. cenario: O cenário de simulação.
Processamento	1. Itera sobre as colunas especificadas da tabela dados_geracao_simulacao. 2. Cria uma tabela com as médias anuais para cada coluna. 3. Armazena as tabelas com as médias anuais em um único dicionário, contendo a potência solar instalada simulada e seu respectivo cenário.
Saída	tabelas_medias_anuais: O dicionário com as tabelas com as médias anuais calculadas.

Fonte: De autoria própria.

Funcionamento da função “criacao_tabelas_medias_anuais” mostrada na Figura 23.

Figura 23 - Funcionamento da função “criacao_tabelas_medias_anuais”.



Fonte: De autoria própria.

3.1.2.3 Criação de tabelas com médias horárias mensais

A função “criacao_tabelas_medias_horarias_mensais” é utilizada para criar e armazenas as tabelas com as medidas horárias mensais dos dados de geração de

energia eólica, solar, híbrida e do corte de energia de um específico cenário simulado. Possuindo a estrutura mostrada na Tabela 3.

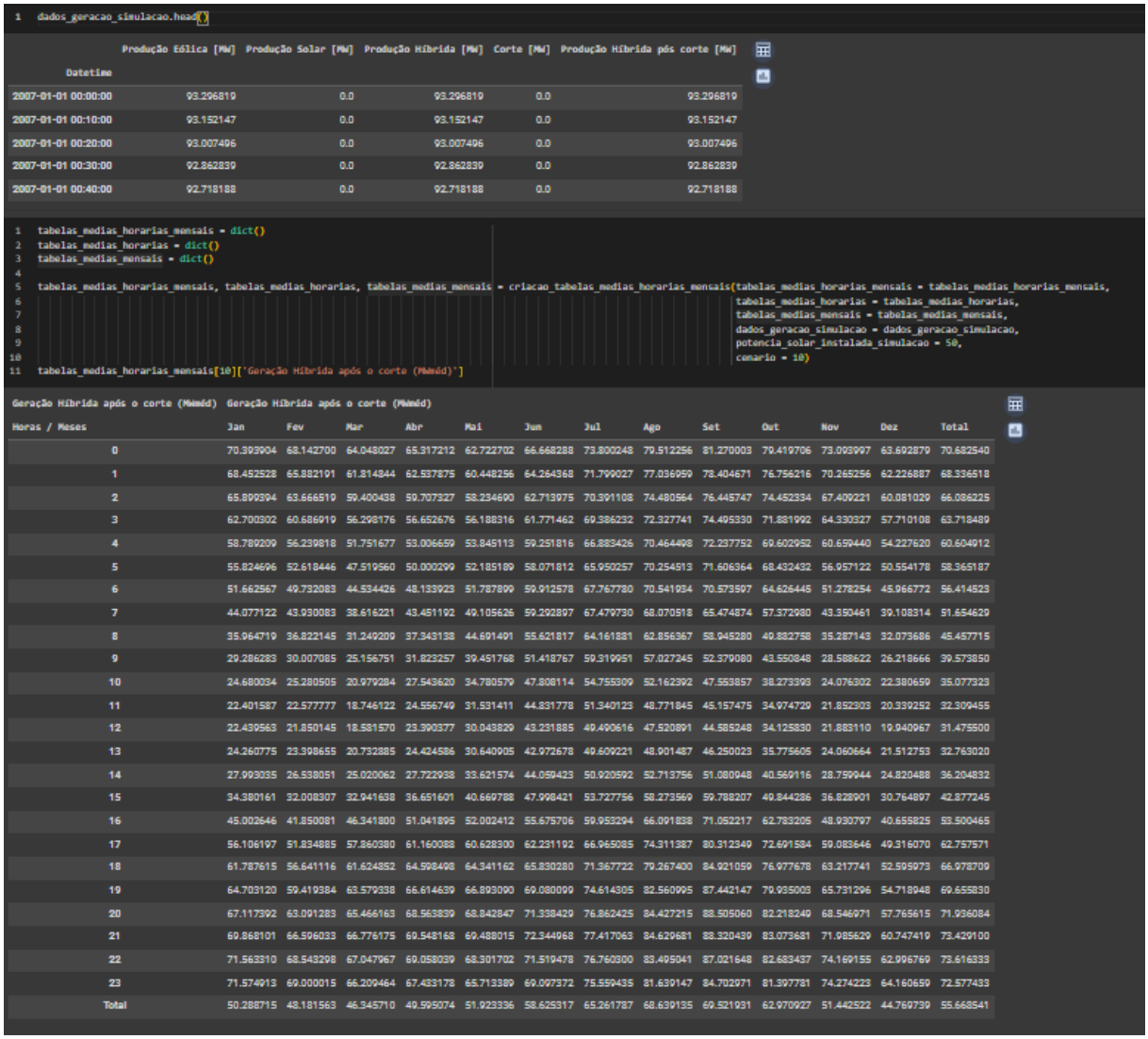
Tabela 3 - Descrição da função "criacao_tabelas_medias_horarias_mensais".

Elemento	Descrição
Nome da Função	criacao_tabelas_medias_horarias_mensais
Parâmetros de Entrada	1. tabelas_medias_horarias_mensais: O dicionário que armazena as tabelas com as médias horárias mensais; 2. tabelas_medias_horarias: O dicionário que armazena as tabelas com as médias horárias; 3. tabelas_medias_mensais: O dicionário que armazena as tabelas com as médias mensais; 4. dados_geracao_simulacao: A tabela que contém os dados de geração de energia simulados; 5. potencia_solar_instalada_simulacao: A potência solar instalada simulada; 6. cenario: O cenário de simulação.
Processamento	1. Itera sobre as colunas especificadas da tabela dados_geracao_simulacao. 2. Cria uma tabela com as médias horárias mensais para cada coluna. 3. Armazena as tabelas com as médias horárias mensais em três dicionários, contendo a potência solar instalada simulada e seu respectivo cenário.
Saída	1. tabelas_medias_horarias_mensais: O dicionário com as tabelas com as médias horárias mensais calculadas; 2. tabelas_medias_horarias: O dicionário com as tabelas com as médias horárias calculadas; 3. tabelas_medias_mensais: O dicionário com as tabelas com as médias mensais calculadas

Fonte: De autoria própria.

Funcionamento da função “criacao_tabelas_medias_horarias_mensais” mostrada na Figura 24.

Figura 24 - Funcionamento da função “criacao_tabelas_medias_horarias_mensais”.



```
dados_geracao_simulacao.head()
```

Datetime	Produção Eólica [MW]	Produção Solar [MW]	Produção Híbrida [MW]	Corte [MW]	Produção Híbrida pós corte [MW]
2007-01-01 00:00:00	93.296819	0.0	93.296819	0.0	93.296819
2007-01-01 00:10:00	93.152147	0.0	93.152147	0.0	93.152147
2007-01-01 00:20:00	93.007496	0.0	93.007496	0.0	93.007496
2007-01-01 00:30:00	92.862839	0.0	92.862839	0.0	92.862839
2007-01-01 00:40:00	92.718188	0.0	92.718188	0.0	92.718188

```
tabelas_medias_horarias_mensais = dict()
tabelas_medias_horarias = dict()
tabelas_medias_mensais = dict()

tabelas_medias_horarias_mensais, tabelas_medias_horarias, tabelas_medias_mensais = criacao_tabelas_medias_horarias_mensais(tabelas_medias_horarias_mensais = tabelas_medias_horarias_mensais,
                                                                                                                            tabelas_medias_horarias = tabelas_medias_horarias,
                                                                                                                            tabelas_medias_mensais = tabelas_medias_mensais,
                                                                                                                            dados_geracao_simulacao = dados_geracao_simulacao,
                                                                                                                            potencia_solar_instalada_simulacao = 50,
                                                                                                                            cenario = 10)
tabelas_medias_horarias_mensais[10]['Geração Híbrida após o corte (MWméd)']
```

Geração Híbrida após o corte (MWméd) Geração Híbrida após o corte (MWméd)

Horas / Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
0	70.393904	68.142700	64.048027	65.317212	62.722702	66.668288	73.800248	79.512256	81.270003	79.419706	73.003997	63.692879	70.682540
1	68.452528	65.882191	61.814844	62.537875	60.448256	64.264368	71.799027	77.036959	78.404671	76.756216	70.265256	62.226887	68.336518
2	65.899394	63.666519	59.400438	59.707327	58.234690	62.713975	70.391108	74.480564	76.445747	74.452334	67.409221	60.081029	66.086225
3	62.700302	60.686919	56.298176	56.652676	56.188316	61.771462	69.386232	72.327741	74.495330	71.881992	64.330327	57.710108	63.718489
4	58.789209	56.239818	51.751677	53.006659	53.845113	59.251816	66.883426	70.464498	72.237752	69.602952	60.659440	54.227620	60.604912
5	55.824696	52.618446	47.519560	50.000299	52.185189	58.071812	65.950257	70.254513	71.606364	68.432432	56.957122	50.554178	58.365187
6	51.662567	49.732083	44.534426	48.133923	51.787899	59.912578	67.767780	70.541934	70.573597	64.626445	51.278254	45.966772	56.414523
7	44.077122	43.930083	38.616221	43.451192	49.105626	59.292897	67.479730	68.070518	65.474874	57.372980	43.350461	39.108314	51.654629
8	35.964719	36.822145	31.249209	37.343138	44.691491	55.621817	64.161881	62.856367	58.945280	49.882758	35.287143	32.073686	45.457715
9	29.286283	30.007085	25.156751	31.823257	39.451768	51.418767	59.319951	57.027245	52.379080	43.550848	28.588622	26.218666	39.573850
10	24.680034	25.280505	20.979284	27.543620	34.780579	47.808114	54.755309	52.162392	47.553857	38.273393	24.076302	22.380659	35.077323
11	22.401587	22.577777	18.746122	24.556749	31.531411	44.831778	51.340123	48.771845	45.157475	34.974729	21.852303	20.339252	32.309455
12	22.439563	21.850145	18.581570	23.390377	30.043829	43.231885	49.490616	47.520891	44.585248	34.125830	21.883110	19.940967	31.479500
13	24.260775	23.398655	20.732885	24.424586	30.640905	42.972678	49.609221	48.901487	46.250023	35.775605	24.060664	21.512753	32.763020
14	27.993035	26.538051	25.020062	27.722938	33.621574	44.059423	50.920592	52.713756	51.080948	40.569116	28.759944	24.820488	36.204832
15	34.380161	32.008307	32.941638	36.651601	40.669788	47.998421	53.727756	58.273569	59.788207	49.844286	36.828901	30.764897	42.877245
16	45.002646	41.850081	46.341800	51.041895	52.002412	55.675706	59.953294	66.091838	71.052217	62.783205	48.930797	40.655825	53.500465
17	56.106197	51.834885	57.860380	61.160088	60.628300	62.231192	66.965085	74.311387	80.312349	72.691584	59.083646	49.316070	62.757571
18	61.787615	56.641116	61.624852	64.598498	64.341162	65.830280	71.367722	79.267400	84.921059	76.977678	63.217741	52.599973	66.978709
19	64.703120	59.419384	63.579338	66.614639	66.893090	69.080099	74.614305	82.560995	87.442147	79.935003	65.731296	54.718948	69.655830
20	67.117392	63.091283	65.466163	68.563839	68.842847	71.338429	76.862425	84.427215	88.505060	82.218249	68.546971	57.765615	71.936084
21	69.868101	66.596033	66.776175	69.548168	69.488015	72.344968	77.417063	84.629681	88.320439	83.073681	71.985629	60.747419	73.429100
22	71.563310	68.543298	67.047967	69.058039	68.301702	71.519478	76.760300	83.495041	87.021648	82.683437	74.169155	62.996769	73.616333
23	71.574913	69.000015	66.209464	67.433178	65.713389	69.097372	75.559435	81.639147	84.702971	81.397781	74.274223	64.160659	72.577433
Total	50.288715	48.181563	46.345710	49.595074	51.923336	58.625317	65.261787	68.639135	69.521931	62.970927	51.442522	44.769739	55.668541

Fonte: De autoria própria.

3.1.2.4 Criação do cabeçalho

A função “criacao_cabecalho” é utilizada para criar o cabeçalho da aba de cada cenário simulado da planilha em que os resultados serão exportados. Possuindo a estrutura mostrada na Tabela 4.

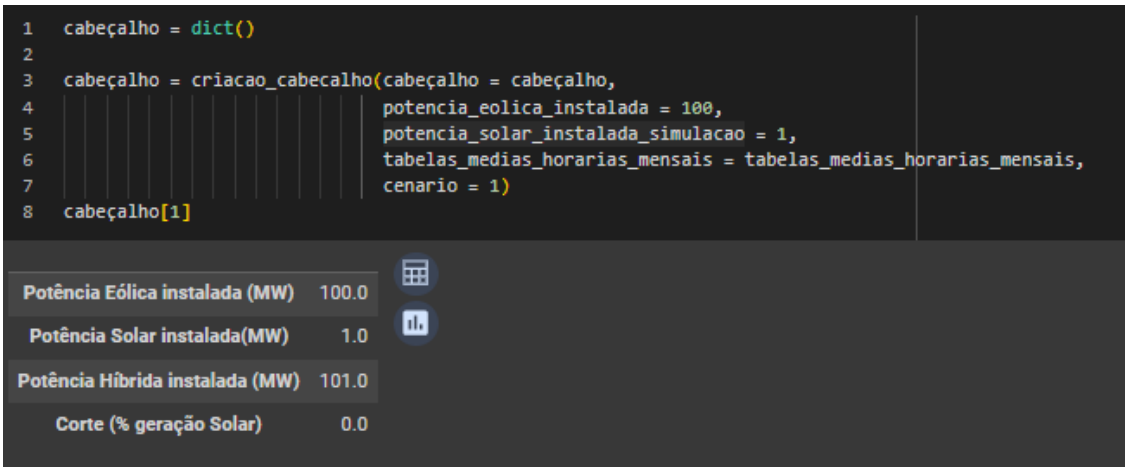
Tabela 4 - Descrição da função "criacao_cabecalho".

Elemento	Descrição
Nome da Função	criacao_cabecalho
Parâmetros de Entrada	1. cabeçalho: O dicionário que armazena o cabeçalho da aba de cada cenário simulado; 2. potencia_eolica_instalada: A potência eólica instalada; 3. potencia_solar_instalada_simulacao: A potência solar instalada simulada; 4. tabelas_medias_horarias_mensais: O dicionário que armazena as tabelas com as médias horárias e mensais; 5. cenario: O cenário de simulação.
Processamento	1. Cria o cabeçalho da aba do cenário especificado com as informações necessárias. 2. O cabeçalho inclui a potência eólica instalada, a potência solar instalada simulada, a potência híbrida instalada e o corte de energia em relação à geração solar.
Saída	cabeçalho: O dicionário com o cabeçalho da aba do cenário especificado.

Fonte: De autoria própria.

Funcionamento da função “criacao_cabecalho” mostrada na Figura 25.

Figura 25 - Funcionamento da função “criacao_cabecalho”.



Fonte: De autoria própria.

3.1.2.5 Criação do Excel

A função “criacao_excel” é responsável por criar um arquivo Excel com os resultados dos cenários simulados de associação de um parque eólico e um parque

solar. Ela organiza os dados em diferentes abas, cada uma com informações específicas. Possuindo a estrutura mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 - Descrição da função "criacao_excel".

Elemento	Descrição
Nome da Função	criacao_excel
Parâmetros de Entrada	1. dados_geracao: A tabela que contém os dados de geração de energia; 2. resultados_simulacao: A tabela que contém o resumo dos resultados dos cenários simulados; 3. tabelas_medias_anuais: O dicionário que contém as tabelas com as médias anuais dos cenários simulados; 4. tabelas_medias_horarias: O dicionário que contém as tabelas de médias horárias dos cenários simulados; 5. tabelas_medias_mensais: O dicionário que contém as tabelas de médias mensais dos cenários simulados; 6. tabelas_medias_horarias_mensais: O dicionário que contém as tabelas de médias horárias e mensais dos cenários simulados; 7. cabeçalho: O dicionário que contém o cabeçalho dos cenários simulados; 8. qtd_cenarios: A quantidade de cenários simulados; 9. caminho_salvamento: O caminho onde o arquivo Excel será salvo.
Processamento	1. Cria um arquivo Excel com as seguintes abas: - Resumo: Exibe o resumo dos resultados de cada cenário simulado em um formato tabular. - Médias Anuais: Exibe as tabelas de médias anuais de geração de energia eólica, solar, híbrida e do corte de energia. - Médias Horárias: Exibe as tabelas de médias horárias de geração de energia eólica, solar, híbrida e do corte de energia. - Médias Mensais: Exibe as tabelas de médias mensais de geração de energia eólica, solar, híbrida e do corte de energia. - Cenário [X]: Uma aba para cada cenário simulado, exibindo as tabelas de médias horárias mensais de geração de energia eólica, solar, híbrida e do corte de energia.
Saída	A função não retorna nada, apenas cria o arquivo Excel com os resultados dos cenários simulados no caminho especificado.

Fonte: De autoria própria.

3.1.2.6 Criação dos gráficos

A função “criacao_graficos” é utilizada para criar dois gráficos que mostram as produções em série temporal e médias horárias de um cenário específico. Possuindo a estrutura mostrada na Tabela 6.

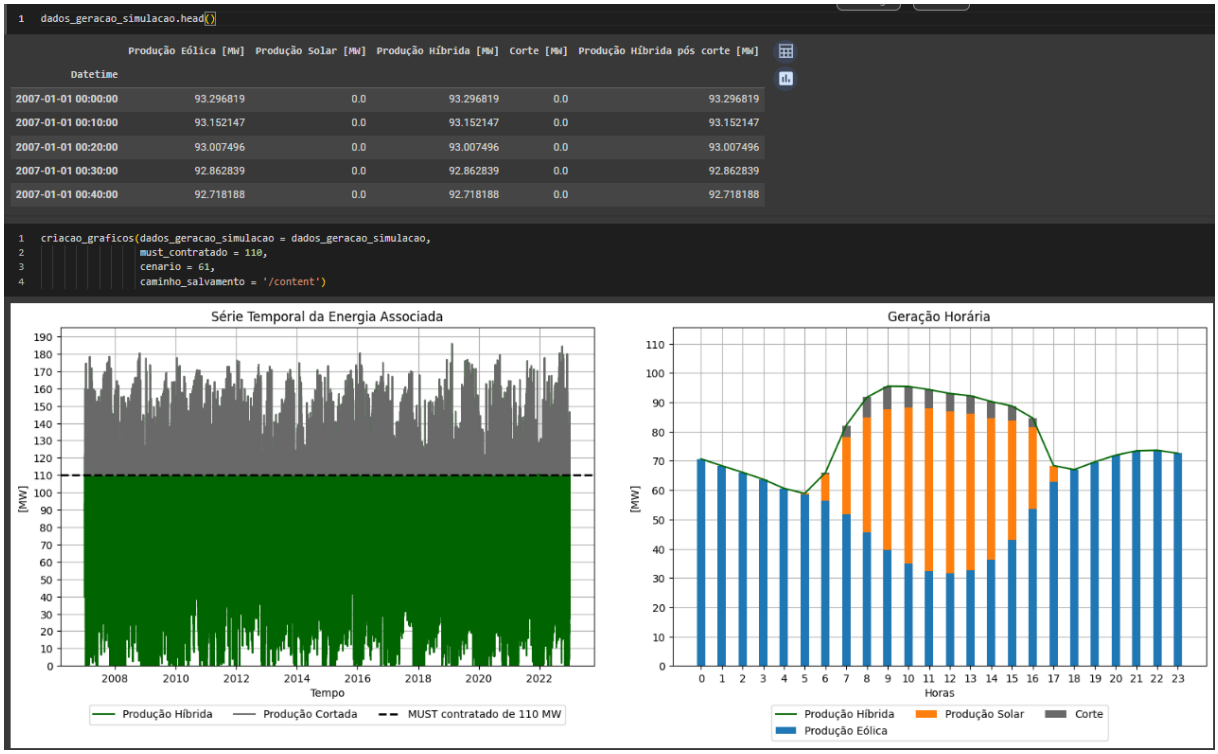
Tabela 6 - Descrição da função "criacao_graficos".

Elemento	Descrição
Nome da Função	criacao_graficos
Parâmetros de Entrada	1. dados_geracao_simulacao: A tabela que contém os dados de geração de energia simulados; 2. must_contratado: O MUST contratado; 3. cenario: O cenário de simulação; 4. caminho_salvamento: O caminho onde o gráfico será salvo.
Processamento	1. Utiliza as informações de geração da tabela dados_geracao_simulacao, do cenário especificado. 2. Gera dois gráficos: - Um gráfico com a série temporal da produção híbrida, do corte e o valor do MUST contratado. - Um gráfico com as médias horárias da geração eólica, solar, híbrida e do corte.
Saída	A função não retorna nada, apenas gera os gráficos em formato PNG e salva no caminho especificado contendo a numeração do cenário.

Fonte: De autoria própria.

Funcionamento da função “criacao_graficos” mostrada na Figura 26.

Figura 26 - Funcionamento da função “criacao_graficos”.



Fonte: De autoria própria.

3.1.2.7 Função principal

A função “main” contém a lógica para executar os cenários de associação de um parque eólico e um parque solar. Para cada cenário em que a geração solar é incrementada, utiliza-se as funções “carregamento_arquivo_txt”, “criacao_tabelas_medias_anuais”, “criacao_tabelas_medias_horarias_mensais”, “criacao_cabecalho”, “criacao_graficos” e “criacao_excel” para gerar todas as análises e exportação dos resultados. Possuindo a estrutura mostrada na Tabela 7.

Tabela 7 - Descrição da função "main".

Elemento	Descrição
Nome da Função	main
Parâmetros de Entrada	1. caminho_txt: O caminho do arquivo de texto (.txt) que contém as informações de geração eólica e solar; 2. label_geracao_eolica: Nome da coluna do arquivo txt que corresponde a geração eólica; 3. label_geracao_solar: Nome da coluna do arquivo txt que corresponde a geração solar; 4. potencia_eolica_instalada: A potência eólica instalada; 5. potencia_solar_instalada: A potência solar instalada; 6. quantidade_de_inversor_de_entrada: A quantidade de inversores de que foram utilizados para gerar a produção solar dada como entrada no arquivo txt; 7. incremento_de_inversor: Passo de incremento de inversores a cada cenário; 8. must_contratado: O MUST contratado; 9. corte_referencia_em_relacao_geracao_solar: O corte referência em relação à geração solar; 10. caminho_salvamento: O caminho onde o arquivo Excel será salvo.
Processamento	1. Carrega o arquivo .txt especificado, que contém os dados de geração. 2. Cria vários cenários, nos quais a potência solar instalada é incrementada gradualmente. 3. Em cada cenário, associa a produção eólica e solar, e identifica os momentos em que a geração combinada ultrapassa o MUST contratado. 4. Calcula e armazena as informações através de médias anuais, horárias e mensais tanto das gerações quanto dos cortes gerados. 5. Exporta os resultados para um arquivo Excel.
Saída	A função não retorna nada, apenas cria um arquivo Excel com os resultados dos cenários simulados no caminho especificado.

Fonte: De autoria própria.

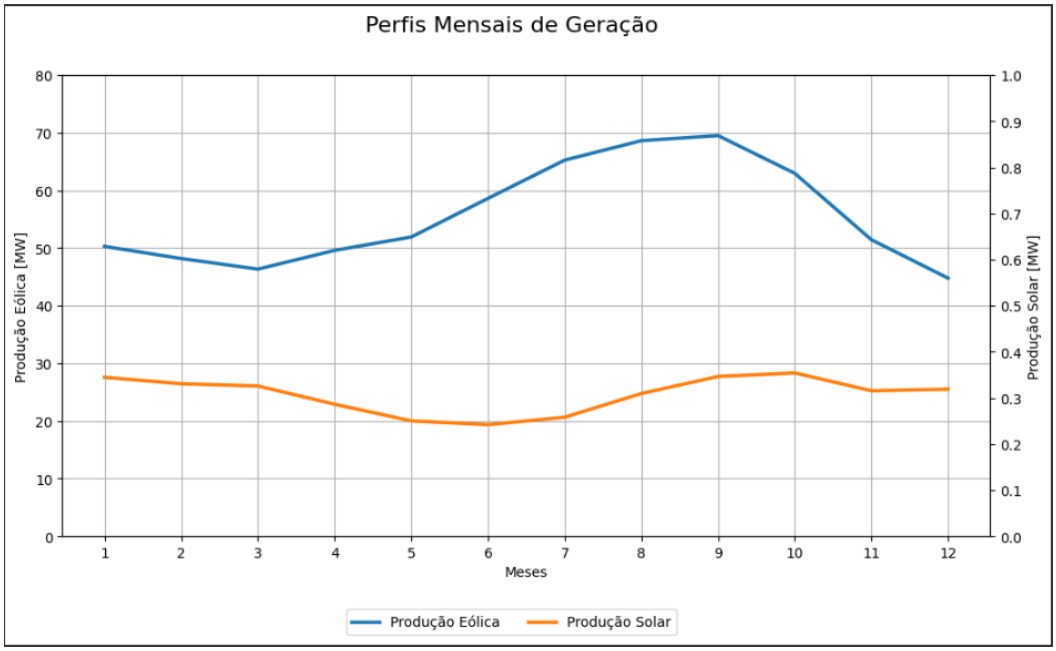
3.2 Aplicação do algoritmo

Este tópico apresenta a aplicação do algoritmo desenvolvido, abordando os dados de entrada utilizados e os resultados obtidos.

3.2.1 Dados de entrada

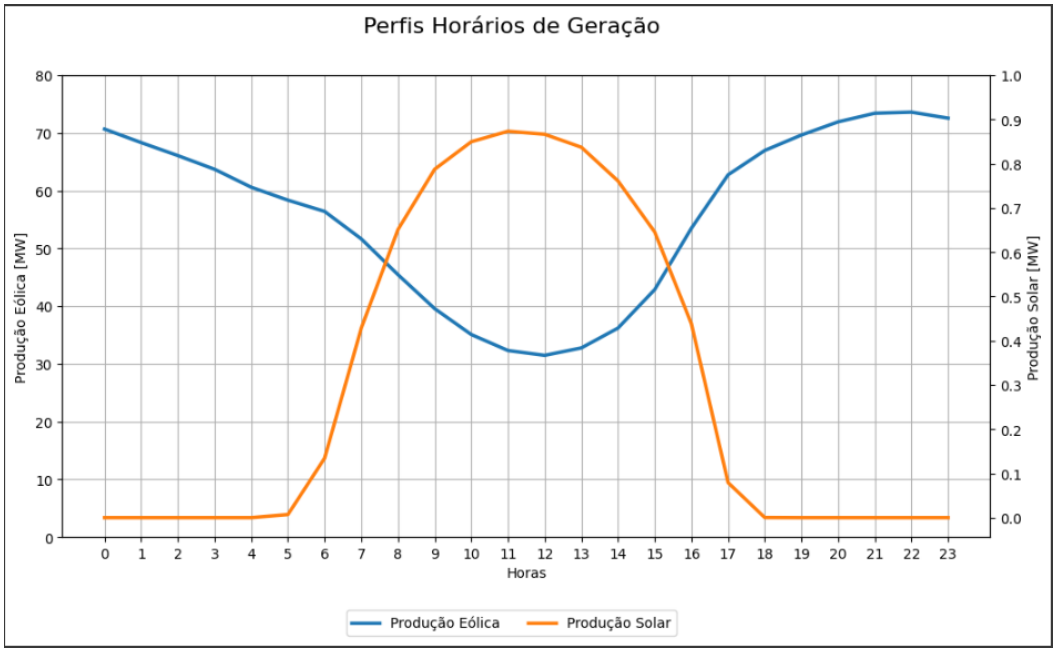
Para um estudo mais preciso e confiável, foram utilizados dados climatológicos e de produção em intervalos de 10 minutos ao longo de um período de 16 anos (de 01/01/2007 a 31/12/2022) de uma usina eólica localizada na Bahia, com uma potência instalada de 100 MW, e a simulação de produção de uma usina solar com uma potência instalada de 1 MW utilizando apenas um inversor de 1 MW e recursos primários do local. As séries podem ser observadas na Figura 27 e Figura 28.

Figura 27 - Perfis Mensais de Geração em MWmed.



Fonte: De autoria própria.

Figura 28 - Perfis Horários de Geração em MWmed.



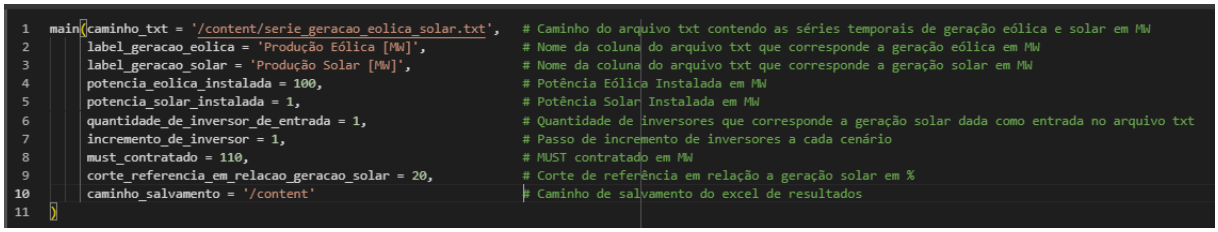
Fonte: De autoria própria.

Importante ressaltar que as séries de dados utilizadas como entrada para o algoritmo já consideram todas as perdas associadas aos modelos das respectivas usinas. No caso da usina eólica, inclui perdas por efeito de esteira e fatores ambientais. Para a usina fotovoltaica, foram levadas em consideração perdas por temperatura, sujeira e sombreamento. Além disso, também foram contabilizadas as perdas elétricas até o ponto de conexão (local onde as linhas de transmissão que conectam as fontes de geração de energia ao sistema de distribuição de energia elétrica).

Por fim, além das séries temporais de geração, é necessário fornecer como entrada o valor do MUST contratado pelo parque, que nesta análise corresponde a 110 MW, um corte de referência de 20% em relação à geração solar, e o incremento de um inversor por vez. O valor de 20% e o incremento de um inversor por vez, ou seja, de 1 MW em 1 MW, foram escolhidos para garantir uma quantidade suficiente de cenários simulados a serem analisados, permitindo uma avaliação mais detalhada das características energéticas e econômicas. Esses valores podem ser ajustados conforme necessário.

Levando essas informações para o algoritmo, como mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Inserção dos dados no algoritmo.



```
main(caminho_txt = '/content/serie_geracao_eolica_solar.txt',   # Caminho do arquivo txt contendo as séries temporais de geração eólica e solar em MW
     label_geracao_eolica = 'Produção Eólica [MW]',             # Nome da coluna do arquivo txt que corresponde a geração eólica em MW
     label_geracao_solar = 'Produção Solar [MW]',               # Nome da coluna do arquivo txt que corresponde a geração solar em MW
     potencia_eolica_instalada = 100,                           # Potência Eólica Instalada em MW
     potencia_solar_instalada = 1,                              # Potência Solar Instalada em MW
     quantidade_de_inversor_de_entrada = 1,                     # Quantidade de inversores que corresponde a geração solar dada como entrada no arquivo txt
     incremento_de_inversor = 1,                                # Passo de incremento de inversores a cada cenário
     must_contratado = 110,                                     # MUST contratado em MW
     corte_referencia_em_relacao_geracao_solar = 20,            # Corte de referência em relação a geração solar em %
     caminho_salvamento = '/content'                            # Caminho de salvamento do excel de resultados
)
```

Fonte: De autoria própria.

Com relação à análise econômica, para o cálculo do LCOE, são definidos os seguintes parâmetros (ANEEL, 2023) (EPE, 2021):

Tabela 8 - Parâmetros de entrada para análise econômica.

Informações		
EUST	TUST (SE Ibicoara) [R$/kW]	8,523
	MUST [MW]	110
Eólica	Potência Instalada [MW]	100
	CAPEX [R$/kW]	5500
	O&M [R$/kW]	90
	OPEX [R$/kW]	90,93753
	Desconto TUST (%)	0
Solar	Potência Instalada [MW]	VARIÁVEL
	CAPEX [R$/kW]	3000
	O&M [R$/kW]	50
	OPEX (R$/kW)	50,93753
	Desconto TUST (%)	0
Quantidade de anos		20

Fonte: De autoria própria.

Para as informações de CAPEX, O&M e OPEX, tanto para Eólica quanto para Solar, os valores apresentados correspondem a médias calculadas para o período de 20 anos.

3.2.2 Resultados

Ao executar a função mostrada na Figura 29, algumas informações são mostradas no terminal de execução, com as séries temporais de produção eólica e solar, mostrada na Figura 30.

Figura 30 - Série de geração utilizada no algoritmo.

Série de Geração

Datetime	Produção Eólica [MW]	Produção Solar [MW]
2007-01-01 00:00:00	93.296819	0.0
2007-01-01 00:10:00	93.152147	0.0
2007-01-01 00:20:00	93.007496	0.0
2007-01-01 00:30:00	92.862839	0.0
2007-01-01 00:40:00	92.718188	0.0
...	...	...
2022-12-31 20:20:00	89.235922	0.0
2022-12-31 20:30:00	90.065608	0.0
2022-12-31 20:40:00	90.895294	0.0
2022-12-31 20:50:00	91.724988	0.0
2022-12-31 21:00:00	92.554660	0.0

841519 rows × 2 columns

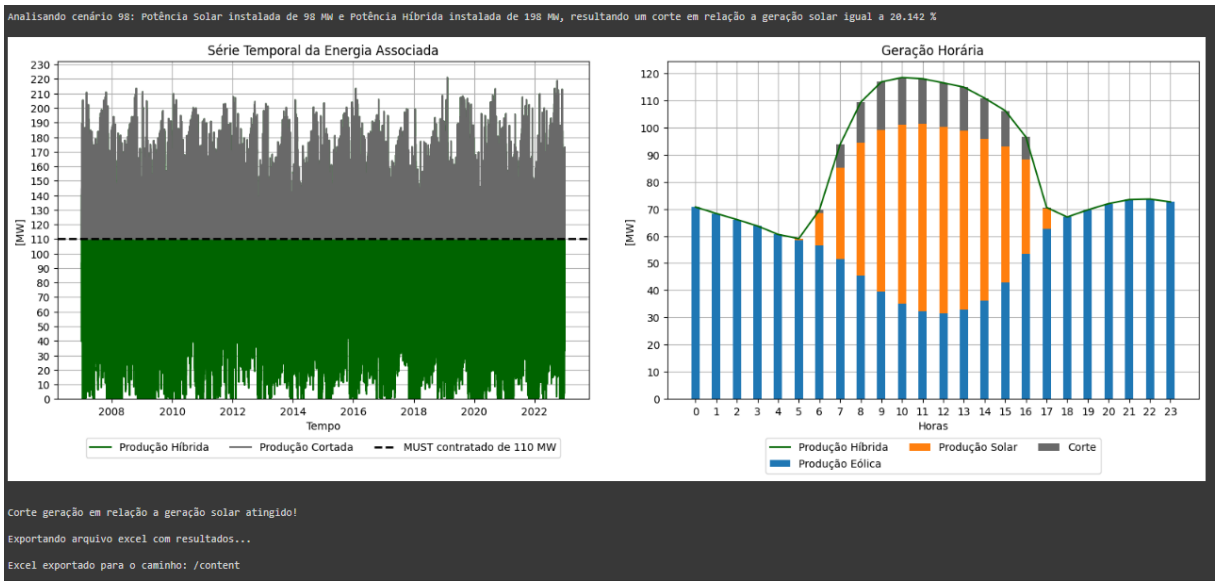
Fonte: De autoria própria.

Para cada cenário simulado é exibido no terminal um resumo contendo a potência solar e híbrida instalada, o corte relativo à geração solar, e os gráficos de saída da função criacao_graficos do cenário em análise, conforme ilustrado na Figura 27.

Foi necessário utilizar uma produção solar instalada de 98 MW, correspondente à produção de 98 inversores, para gerar um corte de pelo menos 20% em relação à geração solar. Esse foi o cenário 98, que resultou em um corte de aproximadamente 20,142%.

Ao alcançar esse valor de corte, as simulações foram finalizadas e exportado o Excel contendo as análises de cada cenário simulado para o caminho especificado, como mostrado na Figura 31.

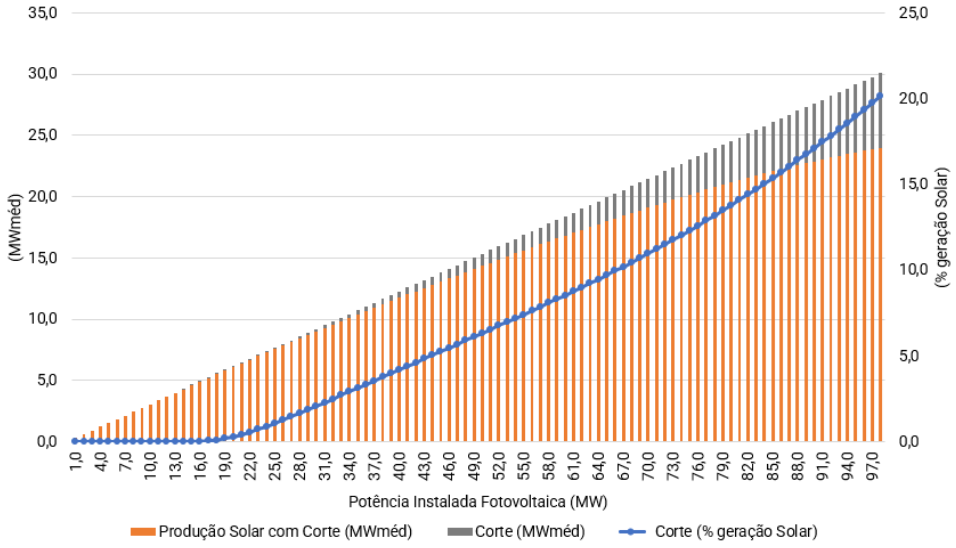
Figura 31 - Resultado prévio para o cenário 98 e finalização das simulações.



Fonte: De autoria própria.

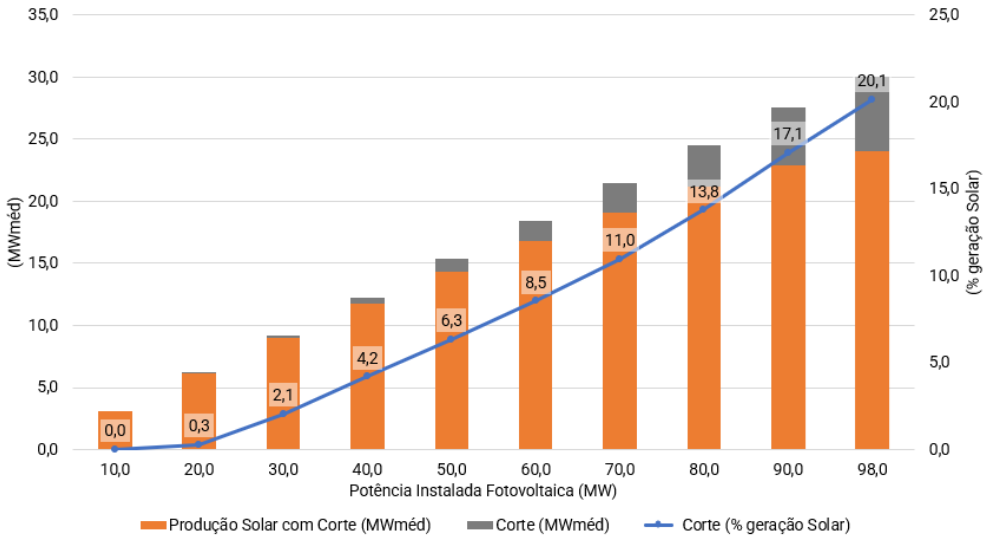
Analisando todos os cenários, os resultados do incremento de potência solar podem ser visualizados na Figura 32, enquanto uma visão mais concisa desse aumento, em incrementos de 10 MW, está representada de forma resumida na Figura 33.

Figura 32 - Incremento de Potência Instalada Solar x Geração Solar x Corte de Geração (% da geração Solar) (98 cenários).



Fonte: De autoria própria.

Figura 33 - Incremento de Potência Instalada Solar x Geração Solar x Corte de Geração (% da geração Solar).



Fonte: De autoria própria.

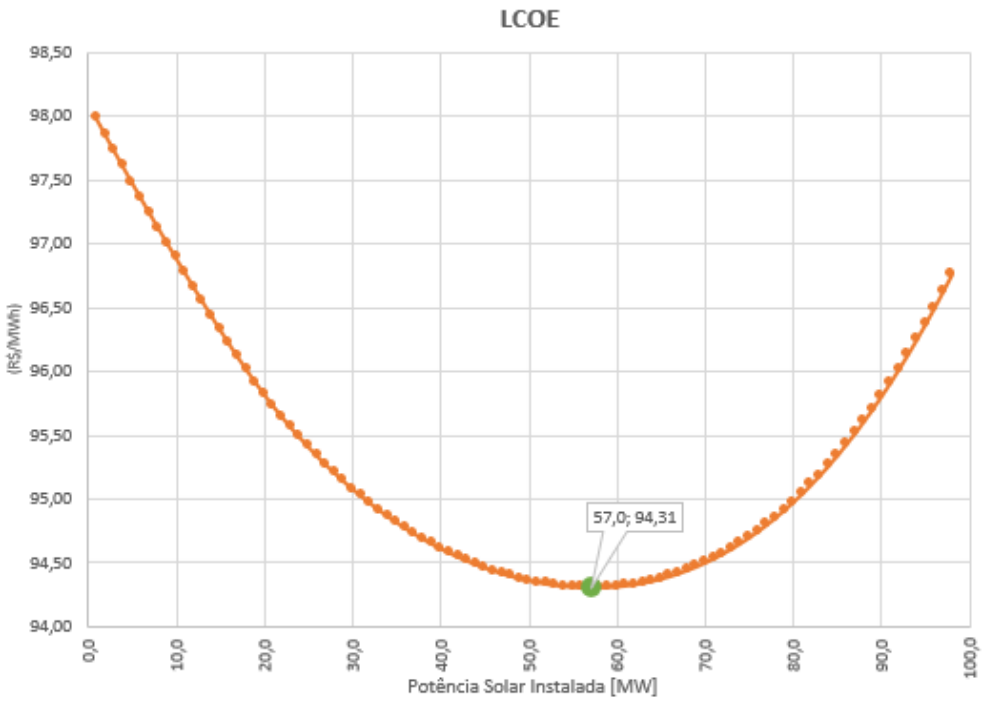
Utilizando os resultados da aba "Resumo" do Excel exportado dos 98 cenários, conforme ilustrado na Figura 34, e os parâmetros de entrada da análise econômica apresentados na Tabela 8, são calculados os valores de LCOE para cada cenário, mostrados na Figura 35, Figura 36 e Tabela 9.

Figura 34 - Resultados da aba Resumo para os cenários simulado.

Cenário	Quantidade de inversor	Incremento de inversor	Incremento de potência solar instalada (MW)	Potência Eólica Instalada (MW)	Potência Solar Instalada (MW)	Potência Híbrida Instalada (MW)	Geração Eólica (MWméd)	Geração Solar (MWméd)	Geração Híbrida (MWméd)		Corte	
									Antes do corte	Após o corte	(MWméd)	(% geração Solar)
1	1	1	1	100	1	101	55,669	0,307	55,975	55,975	0,000	0,000
2	2	1	1	100	2	102	55,669	0,613	56,282	56,282	0,000	0,000
3	3	1	1	100	3	103	55,669	0,920	56,589	56,589	0,000	0,000
4	4	1	1	100	4	104	55,669	1,227	56,895	56,895	0,000	0,000
5	5	1	1	100	5	105	55,669	1,534	57,202	57,202	0,000	0,000
6	6	1	1	100	6	106	55,669	1,840	57,509	57,509	0,000	0,000
7	7	1	1	100	7	107	55,669	2,147	57,816	57,816	0,000	0,000
8	8	1	1	100	8	108	55,669	2,454	58,122	58,122	0,000	0,000
9	9	1	1	100	9	109	55,669	2,761	58,429	58,429	0,000	0,000
10	10	1	1	100	10	110	55,669	3,067	58,736	58,736	0,000	0,000
11	11	1	1	100	11	111	55,669	3,374	59,043	59,043	0,000	0,000
12	12	1	1	100	12	112	55,669	3,681	59,349	59,349	0,000	0,000
13	13	1	1	100	13	113	55,669	3,988	59,656	59,656	0,000	0,000
14	14	1	1	100	14	114	55,669	4,294	59,963	59,963	0,000	0,000
15	15	1	1	100	15	115	55,669	4,601	60,270	60,269	0,000	0,003
16	16	1	1	100	16	116	55,669	4,908	60,576	60,576	0,001	0,016
17	17	1	1	100	17	117	55,669	5,215	60,883	60,880	0,003	0,050
18	18	1	1	100	18	118	55,669	5,521	61,190	61,184	0,006	0,107
19	19	1	1	100	19	119	55,669	5,828	61,497	61,485	0,011	0,191
20	20	1	1	100	20	120	55,669	6,135	61,803	61,785	0,018	0,299
21	21	1	1	100	21	121	55,669	6,441	62,110	62,083	0,027	0,426
22	22	1	1	100	22	122	55,669	6,748	62,417	62,378	0,039	0,571
23	23	1	1	100	23	123	55,669	7,055	62,723	62,672	0,052	0,732
24	24	1	1	100	24	124	55,669	7,362	63,030	62,964	0,067	0,904
25	25	1	1	100	25	125	55,669	7,668	63,337	63,254	0,083	1,085
26	26	1	1	100	26	126	55,669	7,975	63,644	63,542	0,102	1,274
27	27	1	1	100	27	127	55,669	8,282	63,950	63,829	0,122	1,469
28	28	1	1	100	28	128	55,669	8,589	64,257	64,114	0,143	1,669
29	29	1	1	100	29	129	55,669	8,895	64,564	64,397	0,167	1,872
30	30	1	1	100	30	130	55,669	9,202	64,871	64,679	0,191	2,079
31	31	1	1	100	31	131	55,669	9,509	65,177	64,960	0,218	2,288
32	32	1	1	100	32	132	55,669	9,816	65,484	65,239	0,245	2,497
33	33	1	1	100	33	133	55,669	10,122	65,791	65,517	0,274	2,708
34	34	1	1	100	34	134	55,669	10,429	66,098	65,793	0,305	2,920
35	35	1	1	100	35	135	55,669	10,736	66,404	66,068	0,336	3,132

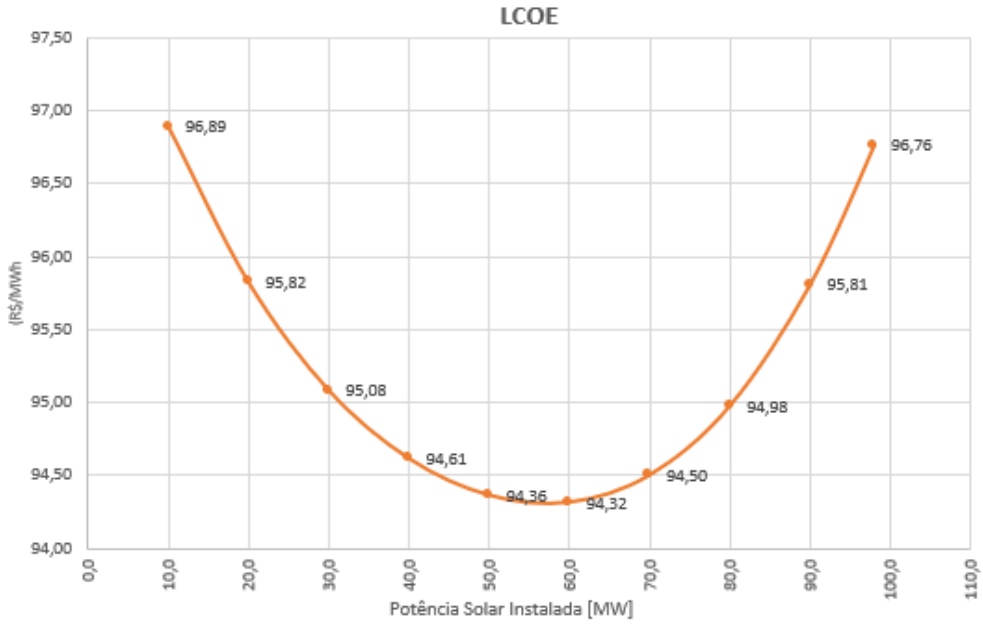
Fonte: De autoria própria.

Figura 35 - Potência Solar Instalada x LCOE dos 98 cenários.



Fonte: De autoria própria.

Figura 36 - Potência Instalada Solar x LCOE em passos de 10 cenários.



Fonte: De autoria própria.

Tabela 9 - Resultados de LCOE dos 98 cenários.

Cenário	Potência Instalada Solar (MW)	LCOE (R$/MWh)
1	1	97,98245086
2	2	97,85600505
3	3	97,73093003
4	4	97,60720362
5	5	97,48480412
6	6	97,36371031
7	7	97,2439014
8	8	97,12535706
9	9	97,00805735
10	10	96,89198279
11	11	96,77711428
12	12	96,66343313
13	13	96,55092241
14	14	96,43958107
15	15	96,32954995
16	16	96,22150677
17	17	96,11630153
18	18	96,01457899
19	19	95,91678735
20	20	95,82300876
21	21	95,73310529
22	22	95,647142
23	23	95,56498162
24	24	95,48637626
25	25	95,4111339
26	26	95,33914118
27	27	95,27033603
28	28	95,20449068
29	29	95,14154978
30	30	95,08139206
31	31	95,0239216
32	32	94,96897008
33	33	94,91651881
34	34	94,86647608
35	35	94,81872178
36	36	94,77320284
37	37	94,73001521
38	38	94,68910509
39	39	94,65042907
40	40	94,61396817
41	41	94,57963954
42	42	94,54743981

Cenário	Potência Instalada Solar (MW)	LCOE (R$/MWh)
43	43	94,51735303
44	44	94,48930107
45	45	94,46327455
46	46	94,43921299
47	47	94,41711231
48	48	94,39701225
49	49	94,37884149
50	50	94,36260929
51	51	94,34840283
52	52	94,33627039
53	53	94,32618287
54	54	94,318145
55	55	94,31217815
56	56	94,30841586
57	57	94,30678771
58	58	94,30735336
59	59	94,31012947
60	60	94,3151269
61	61	94,32237816
62	62	94,33197172
63	63	94,34408244
64	64	94,35872557
65	65	94,37584493
66	66	94,39561571
67	67	94,41808698
68	68	94,44325844
69	69	94,47116771
70	70	94,5018777
71	71	94,53537373
72	72	94,57172498
73	73	94,61108561
74	74	94,65354631
75	75	94,69928719
76	76	94,74825663
77	77	94,80039494
78	78	94,855778
79	79	94,91453823
80	80	94,97680748
81	81	95,04261062
82	82	95,11206874
83	83	95,18541059
84	84	95,26259915
85	85	95,3436011

Cenário	Potência Instalada Solar (MW)	LCOE (R$/MWh)
86	86	95,42846945
87	87	95,5172213
88	88	95,60991372
89	89	95,70664747
90	90	95,80753566
91	91	95,91256243
92	92	96,02181485
93	93	96,13516637
94	94	96,25265797
95	95	96,37438136
96	96	96,50028966
97	97	96,63035971
98	98	96,76443074

Fonte: De autoria própria.

Dessa forma, ao analisar a Figura 35, a Figura 36 e a Tabela 9 determina-se que o parque solar com uma potência instalada de 57 MW apresenta o menor LCOE calculado, representando a melhor opção de parque solar para associação com este empreendimento eólico.

4 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Diante dos resultados expostos, verificou-se a coerência do algoritmo proposto. A Figura 28 ilustrou a complementaridade entre as duas fontes de energia, os períodos de máxima produção solar, que ocorrem durante o dia, coincidem com os períodos de mínima produção eólica, que, em média, não atingem o MUST contratado. Dessa forma, percebeu-se que a associação entre as gerações da usina eólica e solar é factível.

Contudo, não é possível determinar exatamente a quantidade de energia solar que é viável associar a este empreendimento eólico para torná-lo um projeto economicamente viável. O algoritmo desempenhou um papel crucial nesta etapa, analisando um histórico de geração de ambas as fontes e incrementando gradualmente a geração solar para avaliar a produção combinada. Cada cenário de incremento foi examinado para identificar a quantidade de corte de energia solar, conforme mostrado na Figura 32 e Figura 33. A partir desses cenários simulados, foi possível realizar uma análise econômica, utilizando o LCOE, para determinar qual cenário de potência instalada solar é financeiramente viável.

Analisando a Figura 35, a Figura 36 e a Tabela 9, observou-se que o LCOE diminui à medida que a potência solar é incrementada, pois a geração solar associada à eólica tende a gerar um retorno que compensa o investimento inicial. No entanto, identificou-se um ponto ótimo na potência instalada de 57 MW, onde o LCOE atingiu o seu valor mínimo dentre todos os cenários. A partir desse ponto, o LCOE começa a aumentar, indicando que o corte de energia, ou seja, a energia desperdiçada, não justifica o investimento em uma planta solar maior.

Para projetos futuros, sugere-se a implementação no algoritmo de uma análise de sistema de armazenamento de energia em baterias, ou *Battery Energy Storage System* (BESS), para potências solares maiores. Isso permitiria avaliar se a energia desperdiçada pode ser economicamente viável com a instalação das baterias, que armazenariam a produção excedente durante o dia e a injetariam na rede, por exemplo, durante a noite, quando há possibilidade de maior demanda e ausência de geração solar.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. BRASIL PERMANECE EM 6º LUGAR NO RANKING MUNDIAL DE ENERGIA EÓLICA, 16 Abril 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/brasil-permanece-em-6o-lugar-no-ranking-mundial-de-energia-eolica/>. Acesso em: 09 Junho 2024.

ABEEÓLICA. EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA (em MW). Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 10 Junho 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Geração eólica ultrapassa os 20 GW de capacidade instalada no Brasil, 19 Novembro 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/geracao-eolica-ultrapassa-os-20-gw-de-capacidade-instalada-no-brasil>. Acesso em: 9 Junho 2024.

ANDRADE, Ricardo C. D. et al. SUNCLOUD-E: SOFTWARE PARA A LOCALIZAÇÃO DO EFEITO LENTE PRODUZIDO POR NUVENS NA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. VI, n. 2, p. 95-101, 2015.

ANEEL. RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 3.217, DE 4 DE JULHO DE 2023, 4 Julho 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20233217ti.pdf>. Acesso em: 24 Junho 2024.

ATLAS SOLAR GLOBAL. ATLAS SOLAR GLOBAL. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map>. Acesso em: 10 Junho 2024.

BASTOS, PAULO R. F. D. M.; MARTINEZ, LUCIANA; TAHIM, ANDRÉ P. N. VANTAGENS TÉCNICAS DA ENERGIA EÓLICA NO NORDESTE: COMPLEMENTAÇÃO HORÁRIA E ALTO FATOR DE CAPACIDADE. **Congresso Brasileiro de Automática**, v. 1, n. 1, 2020.

BREITENBACH, Guilherme. ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS, UTILIZANDO MÉTODO COMPUTACIONAL WASP. **Monografia**, 2016.

CAMPOS, Mayara S.; ALCANTARA, Licinius D. S. Interpretação dos Efeitos de Tempo Nublado e Chuvoso Sobre a Radiação Solar em Belém/PA Para Uso em Sistemas Fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 570-579, 2016.

CASTRO, ANDRÉ M. D. et al. CONTRATAÇÃO ÓTIMA DOS MONTANTES DE USO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO VIA EQUIVALENTES ESTÁTICOS FLEXÍVEIS E FLUXO DE POTÊNCIA ESTOCÁSTICO. **Congresso Brasileiro de Automática**, 30 Setembro 2020. 8.

CCEE. Cálculo do Desconto Aplicado à TUSD/TUST, 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren20231056_2_4.pdf>. Acesso em: 24 Junho 2024.

CUNHA, Paulo; TELES, Jãoa. Brasil Energia, 30 Julho 2020. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br/cenariossolar/as-fontes-renovaveis-e-a-hibridizacao/>. Acesso em: 10 Junho 2024.

CUSTÓDIO, Ronaldo D. S. **ENERGIA EÓLICA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**.

ENEL. Eólica é mais competitiva entre renováveis, 6 Novembro 2020. Disponível em: <https://www.enelenergialivre.com.br/conteudos/eolica-e-mais-competitiva-entre-renovaveis/>. Acesso em: 11 Junho 2024.

EPE. ESTUDOS DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO, 11 Junho 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-393/NT%20EPE-DEE-NT-011-2018-r0%20(Usinas%20h%C3%ADbridas).pdf>. Acesso em: 7 Julho 2024.

EPE. Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão, Janeiro 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno%20de%20Par%C3%A2metros%20de%20Custos%20-%20PDE%202030.pdf>. Acesso em: 24 Junho 2024.

FILIPPE, Marina. exame., 20 Abril 2022. Disponível em: <https://exame.com/esg/energia-solar-fotovoltaica-brasil-e-o-4o-pais-que-mais-cresceu-em-2021/>. Acesso em: 10 Junho 2024.

FLAMANT, Gilles. **Concentrating Solar Thermal Energy Fundamentals and Applications**.

GIACOMOLLI, Luan. OTIMIZAÇÃO DE MICROSITING DE PARQUES EÓLICOS: UMA ABORDAGEM METAHEURISTICA. **Monografia**, p. 1-3, 2018.

GREENVOLT. Módulos fotovoltaicos – A base do solar fotovoltaico, 4 Agosto 2019. Disponível em: <https://greenvolt.com.br/modulos-fotovoltaicos-a-base-do-solar-fotovoltaico/>. Acesso em: 18 Junho 2024.

LANE, André K. Efeito esteira em parques eólicos: modelos disponíveis e comparação com caso real. **Monografia**, p. 24-26, 2019.

LEUSIN, Matheus E.; VAZ, Caroline R.; MALDONADO, Mauricio U. Mapeamento Tecnológico de Patentes em Energia Eólica no Brasil. **FutureJournal**, v. 10, n. 2, p. 28, 2018.

MACHADO, Carolina T.; MIRANDA, Fabio S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015.

MATPLOTLIB. matplotlib. Disponível em: <https://matplotlib.org/stable/users/explain/quick_start.html>. Acesso em: 24 Junho 2024.

MATTEDE, Henrique. Mundo da Elétrica. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/qual-e-a-energia-do-futuro/>. Acesso em: 10 Junho 2024.

MCKINNEY, Wes; PANDAS. pandas: powerful Python data analysis toolkit, 31 Agosto 2022. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/pandas-docs/version/1.4.4/pandas.pdf>. Acesso em: 24 Junho 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023, 18 Setembro 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023>. Acesso em: 10 Junho 2024.

NUMPY. Numpy. Disponível em: <https://numpy.org/>. Acesso em: 24 Junho 2024.

NUNES, Kennedy L. LEIAUTE DE PARQUES EÓLICOS: ESTUDO DE CASO DO NORDESTE BRASILEIRO. **Trabalho de Conclusão de Curso**, p. 36-37, 2013.

OLIVEIRA, Juliana L.; COSTA, Alexandre A. ESTUDO DE VARIABILIDADE DO VENTO EM ESCALA SAZONAL SOBRE O NORDESTE BRASILEIRO UTILIZANDO O RAMS: OS CASOS DE 1973-1974 E 1982-1983. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 1, p. 53-66, 2010.

OLIVEIRA, RAFAEL P. D. BANCADA DIDÁTICA PARA SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID. **Monografia**, 2019.

ONS. Apuração dos Montantes de Uso do Sistema de Transmissão - Procedimental, 8 Dezembro 2020. Disponível em: <https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%206.8-PR_2020.12.pdf>. Acesso em: 11 Junho 2024.

ONS. Apuração dos Montantes de Uso do Sistema de Transmissão - Responsabilidades, 29 Novembro 2022. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/adsp20223424_2_1.pdf>. Acesso em: 11 Junho 2024.

ONS. MODELO CONTRATO DE USO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO, 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Modelo%20CUST%20P%20_DISTRIBUIDOR_%202022.pdf>. Acesso em: 7 Julho 2024.

ONS. Apuração mensal de serviços e encargos da transmissão e encargos setoriais, 1 Setembro 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/adsp20233245_2_4.pdf>. Acesso em: 23 Junho 2024.

ONS. GERAÇÃO E FATOR DE CAPACIDADE MÉDIOS MENSAIS. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-fator-capacidade-medios-mensais.aspx>. Acesso em: 12 Junho 2024.

ONS. ONS ATUALIZA INFOGRÁFICO COM DADOS CONSOLIDADOS DE GERAÇÃO SOLAR E EÓLICA. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20220511_ONS_atualiza_infografico_com_dados_consolidados_de_geracao_solar_e_eolica.aspx>. Acesso em: 19 Junho 2024.

PEREIRA, Enio B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar, Julho 2017. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_rev-01-compactado.pdf>. Acesso em: 17 Junho 2024.

PEREZ, RAQUEL C. Comparação entre diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos. **Monografia**, 2022.

POZZATTI, Luis F. CENTRAIS GERADORAS ASSOCIADAS: análise de viabilidade técnico-econômica de uma usina fotovoltaica associada a um parque eólico na região sul do Brasil. **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina**, p. 51-52, 2023.

PVLIB. Frequently Asked Questions. Disponível em: <https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/user_guide/faq.html?highlight=Multiple%20inverte#how-do-i-model-a-system-with-multiple-inverters>. Acesso em: 23 Junho 2024.

RAMPINELLI, Giuliano A.; KRENZINGER, Arno; ROMERO, Faustino C. Descrição e Análise de Inversores Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos. **Revista ciências exatas e naturais**, v. 15, n. 1, p. 25-30, 2013.

ROCA, William B. DIMENSIONAMENTO DE UM PARQUE EÓLICO E SUA SUBESTAÇÃO, COMPARANDO FERRAMENTAS DE CFD E ATLAS EÓLICOS. **Monagrafia**, 2015.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. Extraterrestrial Radiation. Disponível em: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/1-weather-design-inputs/irradiance-insolation/extraterrestrial-radiation/>. Acesso em: 17 Junho 2024.

SANTOS, Renan. Brasil de Fato, 12 Junho 2018. Disponível em: <https://www.brasildefatomg.com.br/2018/06/12/coluna-or-como-se-formam-os-ventos#>. Acesso em: 16 Junho 2024.

SILVA, Heitor M. F. D.; ARAÚJO, Francisco J. C. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação-REASE**, v. 8, n. 3, p. 859-870, 2022.

SILVA, José R. C. D. OTIMIZAÇÃO DA POSIÇÃO DE AEROGERADORES EM PARQUE EÓLICO. **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA**, p. 24-26, 2014.

SILVA, YURI C. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Trabalho de Conclusão de Curso**, 2022.

SOUSA, Welinagila G. D. Análise da Variabilidade do Vento no Estado da Paraíba. **Dissertação de Mestrado**, p. 20-24, 2020.

WEG. Inversor Monofásico SIW200G. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/M%C3%B3dulos-e-Inversores-Fotovoltaicos/Inversor-Monof%C3%A1sico-SIW200G/Inversor-Monof%C3%A1sico-SIW200G/p/MKT_WDC_BRAZIL_INVERTER1PHASE_SIW200>. Acesso em: 18 Junho 2024.