



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MAURÍLIO QUIRINO DA SILVA FILHO

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE ENTRE
ENERGIA SOLAR E EÓLICA EM USINAS HÍBRIDAS**

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA
MARÇO DE 2025

MAURÍLIO QUIRINO DA SILVA FILHO

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE ENTRE
ENERGIA SOLAR E EÓLICA EM USINAS HÍBRIDAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc. - UFCG
ORIENTADOR

EUBIS PEREIRA MACHADO, D.Sc. - UNIVASF
ORIENTADOR

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA.

MARÇO DE 2025

S586m

Silva Filho, Maurílio Quirino da.

Metodologia para análise da complementaridade entre energia solar e eólica em usinas híbridas / Maurílio Quirino da Silva Filho. – Campina Grande, 2025.

80 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2025.

"Orientação: Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior, Prof. Dr. Eubis Pereira Machado".

Referências.

1. Usinas Híbridas. 2. Energia Fotovoltaica. 3. Energia Eólica. 4. Análise Energética. 5. Análise da Realidade Operacional – Usinas Híbridas. 6. Otimização da Infraestrutura - Usinas Híbridas. 7. Fator de Capacidade – Usinas Híbridas. I. Fernandes Júnior, Damásio. II. Machado, Eubis Pereira. III. Título.

CDU 621.311.243+621.548(043)

MAURÍLIO QUIRINO DA SILVA FILHO

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE ENTRE
ENERGIA SOLAR E EÓLICA EM USINAS HÍBRIDAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

APROVADA EM: 25/03/2025

DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc. - UFCG
ORIENTADOR

EUBIS PEREIRA MACHADO, D.Sc. - UNIVASF
ORIENTADOR

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Dr. - UFCG
EXAMINADOR INTERNO

HUILMAN SANCA SANCA, D.Sc. - UFCG
EXAMINADOR INTERNO

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA.

MARÇO DE 2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1 - ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, REALIZADA EM
25 DE MARÇO DE 2025

(Nº 778)

CANDIDATO(A): **MAURILIO QUIRINO DA SILVA FILHO**. COMISSÃO EXAMINADORA: WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Dr., UFCG - Presidente da Comissão e Examinador Interno, DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG - Orientador, EUBIS PEREIRA MACHADO, D.Sc., UNIVASF - Orientador, HUILMAN SANCA SANCA, D.Sc., UFCG, Examinador Externo. TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE ENTRE ENERGIA SOLAR E EÓLICA EM USINAS HÍBRIDAS. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Energia. HORA DE INÍCIO: **08h00** – LOCAL: **Sala Virtual, conforme Art. 5º da PORTARIA SEI Nº 01/PRPG/UFCG/GPR, DE 09 DE MAIO DE 2022**. Em sessão pública, após exposição de cerca de 45 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua dissertação, obtendo o conceito APROVADO. Face à aprovação, declara o(a) presidente da Comissão, achar-se o examinado, legalmente habilitado a receber o Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o(a) mesmo(a) faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, LEANDRO FERREIRA DE LIMA, e os membros da Comissão Examinadora. Campina Grande, 25 de Março de 2025.

LEANDRO FERREIRA DE LIMA
Secretário

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Dr., UFCG
Presidente da Comissão e Examinador Interno

DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Orientador

EUBIS PEREIRA MACHADO, D.Sc., UNIVASF
Orientador

HUILMAN SANCA SANCA, D.Sc., UFCG
Examinador Externo

MAURILIO QUIRINO DA SILVA FILHO
Candidato

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado da candidato **MAURILIO QUIRINO DA SILVA FILHO**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários **certificam** que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA DE LIMA, SECRETÁRIO (A)**, em 25/03/2025, às 15:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **DAMASIO FERNANDES JUNIOR, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/03/2025, às 15:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maurilio Quirino da Silva Filho, Usuário Externo**, em 25/03/2025, às 15:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **HUILMAN SANCA SANCA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/03/2025, às 13:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/03/2025, às 17:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5332083** e o código CRC **B1768FAA**.

Caro Professor
Alexandre Jean René Serres
Coordenador do PPgEE/UFCG

Eu, **EUBIS PEREIRA MACHADO, D.Sc., UNIVASF** na qualidade de orientador da comissão examinadora da defesa de dissertação intitulada “Metodologia Para Análise da Complementaridade Entre Energia Solar e Eólica em Usinas Híbridas”, de **MAURILIO QUIRINO DA SILVA FILHO**, da qual participei por videoconferência, no dia 25 de Março de 2025, declaro ter recebido cópia da ata, que consta nos autos do processo nº [23096.016237/2025-52](#) como documento nº ([5332083](#)), a qual li e, embora não tenha podido assinar, é para todos os efeitos como se eu tivesse, pois está em perfeita conformidade com o que foi deliberado pela comissão e, portanto, estou de pleno acordo com seus termos.



Documento assinado digitalmente

EUBIS PEREIRA MACHADO

Data: 27/03/2025 09:07:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

EUBIS PEREIRA MACHADO, D.Sc., UNIVASF.

Dedico este trabalho àqueles que, com suas palavras, gestos e exemplos, me mostraram que o conhecimento é a chave para um futuro melhor.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão a todos que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Que estas palavras representem, ainda que de forma modesta, o reconhecimento sincero pelo apoio, incentivo e contribuições recebidas ao longo desta jornada.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Maurílio Quirino e Edneide Monteiro, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e por sempre acreditarem no meu potencial. Seu incentivo foi essencial para que eu mantivesse a determinação e o foco ao longo dessa trajetória.

Ao meu irmão, Luís Carlos Quirino, que, em vida, sempre me apoiou nos estudos e foi uma inspiração para que eu seguisse em frente. Sua memória continua sendo uma força impulsionadora na minha caminhada acadêmica e pessoal.

Aos meus amigos Rivanildo Alves e Paulo Vitor, que estiveram sempre ao meu lado, compartilhando momentos de descontração e me incentivando a dar o meu melhor. Sua amizade foi um suporte essencial para que eu enfrentasse os desafios do mestrado com mais leveza e motivação.

Aos colegas que conheci ao longo desses dois anos de pós-graduação, agradeço pela colaboração, pelo companheirismo e pelas trocas de conhecimento que enriqueceram não apenas este trabalho, mas também minha formação acadêmica e profissional. Suas contribuições foram valiosas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Sou imensamente grato aos meus orientadores, Prof. Damásio Fernandes e Prof. Eubis Pereira Machado, pela orientação precisa, pelos esclarecimentos indispensáveis e pela disponibilidade ao longo de todo o processo. Sua experiência e dedicação foram fundamentais para a construção deste trabalho, proporcionando direcionamento e conhecimento essenciais para que ele alcançasse o nível desejado.

Agradeço também ao secretário da COPELE, Leandro, por sua presteza e apoio na resolução de questões administrativas. Sua atenção e dedicação foram essenciais para garantir o bom andamento deste trabalho, facilitando inúmeros processos ao longo dessa jornada.

Meus sinceros agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro concedido por meio da bolsa de estudos, possibilitando a realização desta pesquisa e contribuindo para meu crescimento acadêmico.

Por fim, expresso minha gratidão à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), instituição que me proporcionou uma base acadêmica sólida ao longo dos cinco anos de graduação e dos dois anos de mestrado. A todos os profissionais que fazem parte dessa universidade, meu reconhecimento pelo suporte e pela dedicação ao ensino e à pesquisa.

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para determinar a capacidade ótima de uma usina fotovoltaica (UFV) a ser integrada a uma usina eólica (EOL), maximizando a complementaridade entre as fontes e minimizando perdas por cortes ou redução de geração (*curtailments*). A metodologia proposta utiliza dados reais de fator de capacidade de usinas solares e eólicas operacionais, disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), permitindo uma avaliação baseada em dados horários ao longo de um ano inteiro. Para desenvolver os tratamentos dos dados, foi utilizado o ambiente *Python*. Inicialmente, o pré-processamento dos dados horários disponibilizados pelo ONS incluiu a limpeza, padronização e filtragem dos registros para assegurar a consistência e qualidade das informações. Em seguida, por meio da metodologia proposta, empregou-se o Método de Brent Modificado, um método de otimização que, sem depender de derivadas, permite determinar de forma precisa o valor da capacidade instalada fotovoltaica que minimiza os cortes de geração. Para a avaliação da acurácia e confiabilidade dos dados utilizados na metodologia, foram aplicadas métricas estatísticas, como o coeficiente de Pearson, MSE (*Mean Squared Error*), RMSE (*Root Mean-Square Error*) e R^2 . Essa estrutura metodológica possibilitou uma análise detalhada e embasada da realidade operacional das usinas híbridas estudadas, garantindo maior precisão na definição das condições ótimas de integração entre as fontes solar e eólica. Foram analisados dez pares de usinas híbridas, considerando métricas estatísticas para quantificar a complementaridade entre as fontes e definir o dimensionamento ótimo da UFV. Os resultados demonstraram que a hibridização pode aumentar significativamente o fator de capacidade das usinas, reduzindo a intermitência da geração e otimizando o uso da infraestrutura existente. Para determinadas configurações, foi possível dobrar a capacidade instalada da EOL sem que os cortes de geração ultrapassem 10%, tornando a hibridização viável do ponto de vista energético. Além disso, os resultados evidenciaram que pares de usinas com maior correlação negativa entre as fontes apresentaram melhor desempenho, reforçando a importância da seleção estratégica das usinas híbridas. A metodologia proposta pode ser aplicada no planejamento da expansão do setor elétrico, otimizando a alocação de recursos, a utilização da infraestrutura de transmissão, bem como ser utilizada para pesquisas futuras sobre viabilidade econômica, integração de armazenamento de energia e impactos regulatórios da geração híbrida.

Palavras-Chave: Análise energética; complementaridade de fontes de energia; energia eólica; energia fotovoltaica; fator de capacidade; usinas híbridas.

ABSTRACT

This work presents a methodology to determine the optimal capacity of a photovoltaic plant (UFV) to be integrated with a wind plant (EOL), maximizing the complementarity between the sources and minimizing losses due to curtailment or generation reduction. The proposed methodology uses real capacity factor data from operational solar and wind plants, provided by the National Electric System Operator (ONS), enabling an evaluation based on hourly data over an entire year. To develop the data processing, the Python environment was used. Initially, the preprocessing of the hourly data provided by the ONS included cleaning, standardization, and filtering of the records to ensure the consistency and quality of the information. Next, through the proposed methodology, the Modified Brent Method was employed, an optimization method that, without relying on derivatives, efficiently determines the value of the installed photovoltaic capacity that minimizes generation curtailment. Statistical metrics such as the Pearson coefficient, MSE (Mean Squared Error), RMSE (Root Mean-Square Error), and R^2 were applied to assess the accuracy and reliability of the data used in the methodology. This methodological framework enabled a detailed analysis grounded in the operational reality of the hybrid plants studied, ensuring greater precision in defining the optimal integration conditions between solar and wind sources. Ten pairs of hybrid plants were analyzed, considering statistical metrics to quantify the complementarity between the sources and define the optimal sizing of the UFV. The results demonstrated that hybridization can significantly increase the capacity factor of the plants, reducing generation intermittency and optimizing the use of existing infrastructure. For certain configurations, it was possible to double the installed capacity of the EOL without generation curtailment exceeding 10%, making hybridization energetically viable. Furthermore, the results showed that pairs of plants with a higher negative correlation between the sources exhibited better performance, reinforcing the importance of strategic selection of hybrid plants. The proposed methodology can be applied in the planning of electric sector expansion, optimizing resource allocation and the use of transmission infrastructure, as well as serving for future research on economic viability, integration of energy storage, and regulatory impacts of hybrid generation.

Keywords: Capacity factor; complementarity of energy sources; energy analysis; hybrid plants; photovoltaic energy; wind energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipologia de usinas híbridas.	21
Figura 2 – Tipologia de usinas associadas.	22
Figura 3 – Fluxograma de etapas da metodologia proposta.....	45
Figura 4 – Localização dos pares de usinas eólicas e solares na Paraíba.	51
Figura 5 – Localização dos pares de usinas eólicas e solares no Rio Grande do Norte.	51
Figura 6 – Localização do par de usinas eólica e solar na Bahia.	52
Figura 7 – Médias horárias mensais da simulação da geração horária híbrida na UH-2 em 2023.....	54
Figura 8 – Médias horárias mensais da simulação da geração horária híbrida na UH-3 em 2023.....	55
Figura 9 – Cortes na geração em função da capacidade instalada da UFV.	57
Figura 10 – Curvas de permanência para o conjunto UH-2.....	59
Figura 11 – Curvas de permanência para o conjunto UH-3.....	59
Figura 12 – Ganho Energético [%] versus <i>Curtailment</i> [%].....	63
Figura 13 – Ganho Energético [%] versus Capacidade Instalada da UFV [MW].	64
Figura 14 – Comparação do fator de capacidade da usina eólica e do conjunto híbrido para diferentes <i>curtailments</i> (UH-2: Areia Branca + Serra do Mel C).	66
Figura 15 – Comparação do fator de capacidade da usina eólica e do conjunto híbrido para diferentes <i>curtailments</i> (UH-3: Brotas de Macaúbas + Sol do Sertão).	67
Figura 16 – Fator de capacidade médio mensal das usinas fotovoltaicas Conj. Serra do Mel C e Conj. Floresta.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese das abordagens metodológicas para análise da complementaridade entre fontes renováveis.....	37
Tabela 2 – Dados das usinas.	50
Tabela 3 – Coeficiente de Pearson para cada conjunto de usinas.	53
Tabela 4 – Dados energéticos das UHs	60
Tabela 5 – Capacidade instalada da UFV determinada pelo critério da curvatura máxima das curvas de ganho energético versus capacidade instalada.	64
Tabela 6 – Capacidade instalada da UFV determinada pelo critério da curvatura máxima das curvas de ganho energético versus <i>curtailments</i>	65
Tabela 7 – Valores das métricas estatísticas calculadas.	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CGA	Centrais Geradoras Associadas
CGH	Centrais Geradoras Híbridas
CI	Capacidade Instalada
CP	Coefficiente de Correlação Pearson
CUSD	Contrato de Uso do Sistema de Distribuição
CUST	Contrato de Uso do Sistema de Transmissão
EOL	Usina Eólica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FC	Fator de Capacidade
FVF	Usinas Fotovoltaicas Flutuantes
MSE	Erro Quadrático Médio ou MSE (do inglês: <i>Mean Squared Error</i>)
MUST	Montante de Uso do Sistema de Transmissão
MW	Megawatts
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
R ²	Coefficiente R ²
RMSE	A Raiz do Erro Quadrático Médio ou RMSE (do inglês: <i>Root Mean-Square Error</i>)
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFV	Usina Fotovoltaica
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UH	Usina Híbrida

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
a	Limite inferior do intervalo de busca	-
b	Limite superior do intervalo de busca	-
α	Valor máximo de <i>curtailments</i> preestabelecido	%
ϕ	Proporção áurea	-
$\emptyset$	Latitude	rad
ψ	Longitude	rad
C	Valor do corte total	GWh
$C_{\%}$	Valor do corte percentual	%
CI_{UFV}	Capacidade instalada da UFV	MW
d	Distância entre usinas	km
FC_{UFV_i}	Fator de Capacidade da UFV no intervalo de tempo i	-
G	Ganho Energético	GWh
G_{EOL_i}	Geração EOL no intervalo de tempo i	MW
G_H	Geração híbrida total	GW
G_{H_i}	Geração híbrida no intervalo de tempo i	MW
G_{UFV_i}	Geração UFV no intervalo de tempo i	MW
n	Número de observações	-
r	Raio da Terra	km
x_1	Primeiro ponto interno a ser calculado no método de Brent	-
x_2	Segundo ponto interno a ser calculado no método de Brent	-
x_i	Fator de capacidade eólico no intervalo de tempo i	-
y_i	Fator de capacidade solar no intervalo de tempo i	-
$\bar{z}$	Valor médio verdadeiro	-
z_i	Valor verdadeiro	-
$\hat{z}_i$	Valor estimado	-

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 CONTRIBUIÇÕES	18
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 USINAS HÍBRIDAS E ASSOCIADAS	20
2.1.1 Usinas Híbridas	21
2.1.2 Usinas Associadas.....	21
2.1.3 Usinas Adjacentes e Portifólios Comerciais	22
2.2 MUST E CAPACIDADE INSTALADA	23
2.3 FATOR DE CAPACIDADE	24
2.4 MÉTRICAS ESTATÍSTICAS.....	25
2.4.1 Coeficiente de Person.....	25
2.4.2 Erro Quadrático Médio	26
2.4.3 Raiz do Erro Quadrático Médio	27
2.4.4 Coeficiente de Determinação (R^2).....	27
2.5 PONTO DE CURVATURA MÁXIMA DE UMA CURVA	28
2.5.1 Curvatura de uma Função Contínua.....	28
2.5.2 Curvatura para Dados Discretos	29
2.6 MÉTODO DE BRENT MODIFICADO PARA SOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO.....	30
2.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO	32
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
3.1 PRINCIPAIS TRABALHOS.....	34
3.2 COMPARATIVO DA METODOLOGIA DOS TRABALHOS ANALISADOS ..	37
3.3 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
4. METODOLOGIA PROPOSTA	40
4.1 REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DAS FIGURAS DE MÉRITO.....	40
4.1.1 Distâncias entre Usinas	40
4.1.2 Geração Fotovoltaica	41
4.1.3 Geração Híbrida	41

4.1.4 <i>Curtailments</i>	42
4.1.5 Capacidade Instalada da UFV	42
4.1.5.1 Formulação do Problema de Otimização pelo Método de Brent.....	43
4.1.6 Ganho Energético.....	44
4.2 ETAPAS DA METODOLOGIA	44
4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO	48
5. RESULTADOS E ANÁLISES.....	49
5.1 ANÁLISE DE COMPLEMENTARIEDADE ENTRE AS FONTES.....	49
5.1.1 Coeficiente de Pearson.....	52
5.1.2 Geração Média Mensal	54
5.2 ANÁLISE ENERGÉTICA	56
5.2.1 Curva de Permanência	58
5.2.2 Ganho energético	60
5.2.2.1 Valor Ótimo da Capacidade Instalada da UFV	62
5.2.3 Comparação do Fator de Capacidade da Usina Eólica e das Usinas Híbridas ...	66
5.3 AVALIAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES.....	68
5.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO	70
6. CONCLUSÕES.....	72
6.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	74
6.2 PUBLICAÇÕES	77
7. REFERÊNCIAS.....	78

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor elétrico brasileiro tem testemunhado uma mudança significativa em sua matriz de geração, impulsionada pela crescente adoção de fontes renováveis, notadamente a energia eólica e a solar. Essa transição, embora promissora em termos de sustentabilidade e diversificação da matriz elétrica, tem suscitado desafios consideráveis, especialmente no que diz respeito à capacidade de transmissão da rede básica de energia elétrica. A integração de fontes intermitentes, como solar e eólica, exige uma abordagem cuidadosa para garantir a estabilidade e a confiabilidade do sistema, uma vez que a geração dessas fontes está sujeita a variações climáticas e sazonais (EPE, 2017).

O Brasil, por sua vez, possui um dos sistemas elétricos mais renováveis do mundo, com mais de 80% de sua matriz energética proveniente de fontes como hidrelétricas, eólica, solar e biomassa. No entanto, a expansão acelerada das energias eólica e solar tem exposto limitações na infraestrutura de transmissão, especialmente no Nordeste, região que concentra a maior parte da capacidade instalada (CI) de energia eólica do país (EPE, 2019).

Diante do horizonte temporal discrepante entre o desenvolvimento de parques eólicos e solares, com um ciclo médio de 2 a 3 anos desde o planejamento até a entrada em operação, aliados aos prazos longos para a expansão da capacidade de transmissão, estimados em 5 a 10 anos, torna-se evidente a urgência de avaliar problemas relacionados à implementação de estratégias eficientes para diminuir barreiras existentes, buscando melhorar a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico nacional, especialmente em regiões como o Nordeste do Brasil, onde a penetração de fontes renováveis é mais acentuada. Esta região concentra mais de 90% dos parques eólicos brasileiros e tem se destacado também no desenvolvimento de projetos solares fotovoltaicos (EPE, 2017).

A hibridização de usinas fotovoltaicas é um tema de crescente interesse e relevância no setor de energia. A combinação de diferentes fontes alternativas, como solar e eólica, oferece uma série de benefícios. Estudos complementares realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicam que a hibridização de fontes pode otimizar a utilização da capacidade disponível do sistema de transmissão, reduzir os custos de operação, otimizar o uso do terreno, obter ganhos em logística e planejamento da implantação das usinas, além de contribuir para a redução dos custos de manutenção e operação. Além disso, a hibridização pode mitigar a intermitência das fontes renováveis, uma vez que a geração solar e eólica tende a ser complementar em termos de sazonalidade e horários de pico de produção (EPE, 2018).

No cenário brasileiro, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou em novembro de 2021 a Resolução Normativa ANEEL nº 954/2021, que estabelece tratamento regulatório para a implementação de Centrais Geradoras Híbridas (CGH) e Centrais Geradoras Associadas (CGA). Tal regulamentação permite a combinação de diferentes fontes de geração, como usinas fotovoltaicas, eólicas, hidrelétricas (grandes e pequenas) e termelétricas. Essa iniciativa representa um avanço significativo no sentido de promover a integração de fontes renováveis e ampliar a flexibilidade do sistema elétrico, contribuindo para a segurança energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa (ANEEL, 2021).

A previsão precisa da geração de energia solar e eólica é crucial para o planejamento e suprimento à demanda dos sistemas elétricos. Vários estudos têm explorado o uso de modelos de aprendizado de máquina e abordagens estatísticas para prever a geração de energia solar e eólica. Alguns estudos também propuseram modelos híbridos que combinam dados numéricos do tempo e imagens de satélite para desenvolver modelos precisos de previsão da geração de energia solar. Esses modelos híbridos podem levar em consideração tanto fatores temporais quanto espaciais para prever a geração de energia solar. Por exemplo, dados numéricos do tempo podem refletir fatores temporais, como a hora do dia e a época do ano, enquanto imagens de satélite podem fornecer informações sobre características espaciais, como a direção do vento, a quantidade de nuvens e a presença de material particulado (VENNILA *et al.*, 2022).

A complementaridade entre as fontes solar e eólica tem sido amplamente estudada em diferentes contextos geográficos. Estudos internacionais demonstram que a combinação dessas fontes pode aumentar a eficiência global do sistema, reduzindo a necessidade de armazenamento de energia e minimizando os custos associados à intermitência (REN21, 2021). No caso do Brasil, a complementaridade é particularmente relevante no Nordeste, onde a geração eólica é mais intensa durante a noite e a geração solar atinge seu pico durante o dia, criando uma sinergia natural entre as duas fontes (EPE, 2022).

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A transição gradual para fontes de energia renovável no setor elétrico brasileiro tem sido uma resposta crucial às demandas contemporâneas por sustentabilidade e diversificação da matriz energética. No entanto, essa mudança traz consigo desafios significativos, especialmente no que diz respeito à integração eficiente das diferentes fontes de energia, a exemplo da eólica e solar, bem como à gestão adequada da infraestrutura de transmissão de energia. A crescente participação dessas fontes intermitentes na matriz energética nacional exige soluções

inovadoras para garantir a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico, ao mesmo tempo em que se promove a descarbonização e a segurança energética.

A necessidade de explorar e desenvolver estratégias para a integração e otimização da geração de energia eólica e solar é latente no cenário atual do setor energético. A proposta deste trabalho surge como uma resposta a essa necessidade, buscando apresentar uma metodologia para estimar a capacidade de geração de usinas fotovoltaicas associadas a usinas eólicas existentes, com o objetivo de avaliar a viabilidade do ponto de vista energético de implantação de usinas híbridas e associadas eólico-solares no Nordeste do Brasil.

A adoção de sistemas híbridos eólico-solares oferece benefícios substanciais, tais como a melhor utilização das redes de transmissão, redução de custos operacionais, uso eficiente do solo e maior estabilidade do sistema elétrico. A justificativa para este estudo é multifacetada e fundamenta-se em três pilares principais:

- I. Complementaridade Energética e Otimização de Recursos: A complementaridade entre as fontes eólica e solar é um dos principais motivos para a hibridização dessas tecnologias. Enquanto a geração eólica tende a ser mais intensa durante a noite e em períodos de ventos fortes, a geração solar atinge seu pico durante o dia, especialmente em regiões com alta incidência de radiação solar, como o Nordeste do Brasil. Essa sinergia natural permite uma produção de energia mais estável e contínua, reduzindo a necessidade de armazenamento de energia e minimizando os custos associados à intermitência das fontes renováveis. Além disso, a hibridização permite o uso mais eficiente da infraestrutura de transmissão existente, otimizando investimentos e reduzindo impactos ambientais associados à expansão da rede (EPE, 2019).
 - II. Regulamentação e Oportunidades de Mercado: A recente aprovação da Resolução Normativa ANEEL nº 954/2021, que estabelece tratamento regulatório para a implementação de CGH e CGA, representa um marco importante para o setor energético brasileiro. Essa regulamentação não apenas facilita a integração de diferentes fontes de geração, como também cria um ambiente propício para investimentos em usinas híbridas, impulsionando a inovação e a competitividade no setor (ANEEL, 2021). Nesse contexto, a metodologia proposta neste trabalho alinha-se diretamente às necessidades do mercado, oferecendo ferramentas para o planejamento e a avaliação de projetos híbridos, que são cada vez mais relevantes no cenário energético atual.
-

- III. Precisão e Confiabilidade no Planejamento Energético: A aplicação de metodologias robustas e baseadas em dados reais é fundamental para garantir a confiabilidade e a eficiência de projetos de energia renovável. A utilização de dados fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a validação rigorosa dos resultados obtidos são etapas essenciais para assegurar que as decisões de planejamento e investimento sejam baseadas em informações sólidas e precisas.

No contexto socioeconômico e ambiental, expansão de usinas híbridas no Nordeste do Brasil pode gerar empregos, impulsionar o desenvolvimento regional e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o cumprimento das metas brasileiras no Acordo de Paris (IPCC, 2021). Adicionalmente, a hibridização de usinas eólicas e solares pode reduzir os custos de operação e manutenção, tornando a energia renovável mais acessível e competitiva no mercado (EPE, 2018).

O trabalho, ora proposto, não apenas aborda uma lacuna técnica no planejamento de usinas híbridas, mas também contribui para a transição energética sustentável no Brasil, alinhando-se às demandas globais por fontes de energia limpa e resiliente. A metodologia desenvolvida baseada em dados reais com validações rigorosas, mostra-se atrativa como uma ferramenta valiosa para agentes do setor elétrico, governos e investidores, contribuindo para a evolução das estratégias de planejamento energético e para consolidação de um sistema elétrico mais sustentável, resiliente e economicamente viável.

Com base nos pilares supracitados, o presente trabalho propõe-se a investigar a complementaridade entre energia solar e eólica, utilizando dados fornecidos pelo ONS do Brasil, com o intuito de avaliar a capacidade ótima de geração de uma usina fotovoltaica a ser instalada de forma híbrida ou associada a uma usina eólica já em operação. A metodologia proposta visa não apenas contribuir para o planejamento de usinas híbridas, mas também oferecer *insights* valiosos para a otimização da geração de energia e a promoção de um sistema energético mais sustentável e resiliente.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral propor uma metodologia de estimação da capacidade de geração de uma usina fotovoltaica (UFV) a ser instalada em uma usina eólica (EOL), a partir de dados reais de geração fornecidos pelo ONS de usinas conectadas ao SIN (Sistema Interligado Nacional), visando avaliar a viabilidade da implantação de usinas híbridas

e associadas eólico-solares no Nordeste do Brasil. Por meio dessa análise, busca-se identificar padrões e sinergias entre essas fontes, o que é fundamental para o planejamento e desenvolvimento de usinas híbridas no Brasil.

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são necessários:

- I. Avaliar a complementariedade entre as fontes de geração eólica e solar no Nordeste;
- II. Avaliar a relação entre os valores de potência instalada da UFV com os cortes ou redução de geração (*curtailments*), aos quais a usina híbrida (UH) estará sujeita ao longo de um ano;
- III. Determinar a potência instalada da UFV a ser associada a uma EOL existente, de modo que o MUST (Montante de Uso do Sistema de Transmissão) previamente contratado pelo parque não sofra alterações, bem como que as restrições por ultrapassagem não resultem *curtailments* maiores que valores preestabelecidos;
- IV. Determinar a composição ótima do valor da UH eólico-solar que maximize a geração líquida no local;
- V. Verificar a eficiência da metodologia proposta por meio de métricas estatísticas.
- VI. Desenvolver uma rotina computacional em *Python* que automatize as análises descritas nos itens anteriores, fornecendo uma ferramenta útil para o estudo energético e a simulação de CGHs eólico-solares, facilitando a tomada de decisão no planejamento dessas usinas.
- VII. Aplicar a metodologia proposta em um caso real, utilizando dados históricos de geração, para validar seu desempenho e avaliar os benefícios práticos da hibridização e da complementariedade das fontes.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Considerando os objetivos estabelecidos, este estudo propicia a trazer as seguintes contribuições científicas, técnicas e computacionais:

- I. Proposição de uma nova metodologia para estudos de complementariedade entre fontes alternativas de energia, a fim de estimar a capacidade de geração de uma UFV a ser associada a uma EOL
-

- II. Desenvolvimento de uma ferramenta computacional em *Python*, de código aberto, para simulação e estudo energético de usinas híbridas e associadas no Nordeste do Brasil, permitindo que pesquisadores, planejadores do setor elétrico e investidores possam realizar análises detalhadas sobre a viabilidade dessas usinas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A dissertação está organizada em uma estrutura de seis capítulos que inclui, além desse capítulo introdutório:

Capítulo 2: Trata os fundamentos teóricos que darão suporte a esta pesquisa.

Capítulo 3: Apresenta um levantamento bibliográfico dos trabalhos atuais relacionados a hibridização de usinas eólico-solares.

Capítulo 4: Contempla a metodologia proposta.

Capítulo 5: Delineia os resultados e as análises, propiciando uma avaliação do desempenho e precisão dos dados utilizados na metodologia proposta.

Capítulo 6: Refere-se às conclusões da pesquisa e aos trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos teóricos essenciais para a compreensão das etapas desenvolvidas neste trabalho, bem como a base metodológica que sustenta a análise da complementaridade entre energia eólica e solar em usinas híbridas. A fundamentação teórica é estruturada de forma a fornecer uma visão abrangente sobre os principais temas relacionados à integração de fontes renováveis, métricas de desempenho e ferramentas estatísticas utilizadas para validação dos resultados.

Os conceitos de usinas híbridas, associadas, adjacentes e portfólios comerciais, conforme definidos pela EPE, serão inicialmente abordados. Essas tipologias de integração entre fontes geradoras de energia são fundamentais para entender as diferentes configurações possíveis e seus impactos na eficiência e na estabilidade do sistema elétrico.

Em seguida, são explorados os conceitos gerais relacionados a uma usina de geração de energia elétrica, com foco no FC e no MUST. O primeiro é uma métrica crucial para avaliar a eficiência de uma usina, representando a razão entre a energia gerada e a energia máxima que poderia ser gerada em condições ideais. Já o MUST é um indicador que reflete a utilização máxima da capacidade de transmissão disponível, sendo particularmente relevante em contextos em que a infraestrutura de transmissão é um obstáculo para a expansão de fontes renováveis.

Por fim, são apresentadas as métricas estatísticas utilizadas na análise de dados, que são essenciais para avaliar a precisão e a confiabilidade da metodologia proposta. Entre as métricas discutidas estão o coeficiente de Pearson, o erro quadrático médio, a raiz do erro quadrático médio e o coeficiente de determinação (R^2). Essas métricas permitem quantificar o desempenho da metodologia, comparando as previsões ou estimativas com os valores reais, sendo amplamente utilizadas em estudos de planejamento energético e análise de dados (HYNDMAN; KOEHLER, 2006). Logo, permitem uma validação rigorosa dos resultados, garantindo que as conclusões sejam baseadas em dados confiáveis e metodologias robustas.

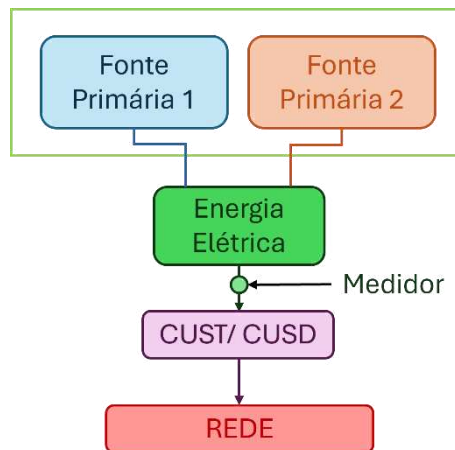
2.1 USINAS HÍBRIDAS E ASSOCIADAS

Os conceitos de usinas híbridas, associadas, adjacentes e portfólios comerciais são abordados pela EPE (2018), os quais são essenciais para classificar e entender as diversas tipologias de integração entre fontes geradoras de energia. Tais definições são cruciais para a organização e o aprofundamento do debate sobre a geração de energia elétrica.

2.1.1 Usinas Híbridas

Uma usina híbrida é aquela em que diferentes fontes de energia podem se combinar ainda no processo de produção de energia elétrica, tendo assim uma única ou distintas medições para cada fonte geradora, compartilhando física e contratualmente a infraestrutura de conexão e uso do sistema, por meio de um único CUST (Contrato de Uso do Sistema de Transmissão) ou CUSD (Contrato de Uso do Sistema de Distribuição), além de ter outorga única (ANEEL, 2021). Exemplos incluem uma planta solar heliotérmica que utiliza biomassa para produzir vapor, aproveitado na mesma turbina, ou uma usina fotovoltaica que compartilha os conversores dos aerogeradores, eliminando a necessidade de inversores fotovoltaicos. Nesses exemplos de arranjos, as fontes de energia são tão integradas tornando-se impossível distinguir qual fonte primária foi responsável pela produção da energia elétrica (EPE, 2018). Na Figura 1, exibe-se o fluxograma desse tipo de tipologia, destacando a integração das fontes primárias antes da etapa de medição. Nessa configuração, a energia produzida pelas diferentes fontes é combinada em um único ponto de medição e conexão à rede, dificultando a distinção individualizada da contribuição energética de cada fonte primária.

Figura 1 – Tipologia de usinas híbridas.



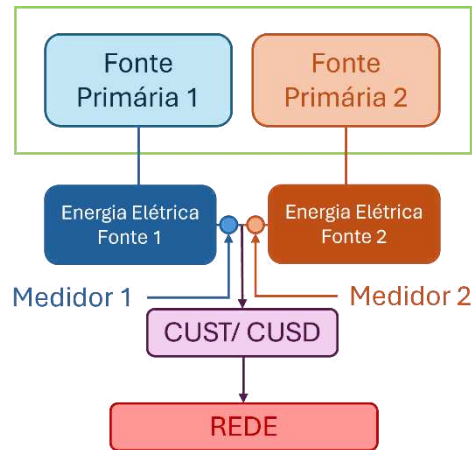
Fonte: (EPE, 2017).

2.1.2 Usinas Associadas

As usinas associadas envolvem duas ou mais usinas de fontes energéticas distintas. Elas, além de estarem localizadas próximas umas das outras e, possivelmente, compartilharem o mesmo terreno, dividem a infraestrutura de conexão e acesso à rede de distribuição ou rede básica. Além disso, cada fonte de geração tem outorga individual e compartilham o mesmo CUST ou CUSD (ANEEL, 2021). Apesar de se beneficiarem de uma capacidade de uso da rede menor do que a soma das potências nominais das usinas individuais, cada usina mantém

independência em seus equipamentos de geração e medidores individuais (EPE, 2018). Na Figura 2 é ilustrado o fluxograma da tipologia das usinas associadas. Nessa configuração, a energia elétrica gerada por cada fonte primária é medida separadamente, porém a infraestrutura de conexão é compartilhada entre as fontes, o que possibilita uma capacidade contratada inferior à soma das potências nominais individuais das usinas.

Figura 2 – Tipologia de usinas associadas.



Fonte: (EPE, 2017).

2.1.3 Usinas Adjacentes e Portifólios Comerciais

Usinas adjacentes são aquelas localizadas em proximidade física, podendo até compartilhar o mesmo terreno, embora mantenham infraestrutura e contratos independentes. Essa abordagem, embora possa reduzir custos operacionais e de manutenção, não é considerada uma usina híbrida, pois as fontes de energia não se integram no processo de geração, permanecendo distintas (EPE, 2018).

Portfólios comerciais, por sua vez, diferem das categorias anteriores por sua natureza puramente comercial-contratual, não requerendo, necessariamente, proximidade física ou compartilhamento de equipamentos entre os projetos. Esses portfólios são formados para mitigar riscos contratuais e exposições a preços de curto prazo, especialmente em contratos baseados em quantidade. Esses portfólios não sofrem influência entre si na contratação de uso da rede de transmissão ou distribuição e também não se configuram como usinas híbridas, uma vez que as fontes de energia permanecem independentes e não integradas no processo de geração (EPE, 2018).

No contexto deste trabalho, a partir das definições supracitadas, será explorado o conceito de usinas híbridas e associadas, que envolvem uma agregação entre fontes de energia, resultando em arranjos onde a geração de energia elétrica apresenta os maiores benefícios do

ponto de vista de aproveitamento da capacidade disponível do sistema de transmissão, otimização do uso da área disponível, compartilhamento de equipamentos, entre outros (EPE, 2018).

2.2 MUST E CAPACIDADE INSTALADA

O MUST refere-se à quantidade de potência média contratada pelos usuários do sistema de transmissão, medida em megawatts (MW). Essa potência é integralizada em intervalos de 15 minutos, considerando cada ponto de conexão e o horário específico de contratação. Os valores de MUST são determinados conforme as regulamentações estabelecidas pela ANEEL (ONS, 2025b).

Matematicamente, o MUST pode ser expresso como:

$$MUST = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i . \quad (1)$$

Em que,

P_i : Potência medida em cada intervalo de 15 minutos (em MW);

n : Número de intervalos de 15 minutos no período considerado.

A CI de uma usina geradora representada em MW é a soma da potência nominal dos geradores individuais da usina. No entanto, a CI não necessariamente reflete a quantidade de energia que a usina gera continuamente. A produção real pode ser influenciada por diversos fatores, como:

- Manutenção: Paradas programadas ou emergenciais para manutenção dos equipamentos;
 - Eficiência dos equipamentos: Perdas técnicas e degradação ao longo do tempo;
 - Condições climáticas: No caso de usinas solares e eólicas, a geração depende diretamente da irradiância solar e da velocidade do vento;
 - Disponibilidade de combustível: Para usinas térmicas, a geração pode ser limitada pela disponibilidade de combustível;
 - Restrições operacionais: Limitações impostas pela rede de transmissão ou por questões de despacho energético (ONS, 2025a).
-

No contexto deste trabalho, dada a proximidade entre os valores de MUST contratado e a CI das usinas eólicas (EOL), optou-se considerá-los iguais. Essa simplificação é justificada pelo fato de que, na prática, os valores de MUST contratados para parques eólicos são, frequentemente, próximos de sua capacidade instalada, refletindo a intenção de maximizar a utilização da infraestrutura de transmissão disponível. Essa abordagem permite uma análise mais direta e simplificada, sem comprometer a precisão dos resultados, uma vez que a diferença entre MUST e capacidade instalada é mínima para usinas eólicas em operação (ANEEL, 2024).

2.3 FATOR DE CAPACIDADE

O FC é obtido pela relação entre a geração da usina (G_i) ao longo de um determinado período (Hora, dia, mês ou ano) e a CI da usina (ONS, 2025a). Matematicamente, o FC é definido por:

$$FC = \frac{G_i}{CI}. \quad (2)$$

Sendo:

FC: Fator de capacidade (adimensional, expresso em porcentagem ou fração decimal);

G_i : Geração real da usina no período considerado (em MWh ou kWh);

CI: Capacidade instalada da usina (em MW ou kW).

Com base em (2), pode-se inferir que o FC é capaz de representar o potencial de geração na região sob análise, uma vez que ele carrega todos os fatores que são usados para previsão de geração como, temperatura, velocidade dos ventos, irradiância, eficiência dos painéis, entre outros. Logo, o FC pode variar significativamente dada a dependência dos insumos de geração. Por exemplo, em usinas fotovoltaicas, o FC é influenciado pela irradiância solar e pela eficiência dos painéis, enquanto em usinas eólicas, a velocidade do vento é o fator predominante (EPE, 2021).

Além de representar o potencial de geração de uma usina, o FC também é uma ferramenta útil para comparar o desempenho de diferentes tecnologias de geração de energia. Por exemplo, usinas eólicas no Nordeste do Brasil frequentemente apresentam fatores de capacidade superiores a 50%, enquanto usinas fotovoltaicas na mesma região podem variar entre 20% e 30%, dependendo da localização e da tecnologia utilizada (ANEEL, 2021).

A análise do FC é essencial para o planejamento e a operação de usinas híbridas, pois permite avaliar a complementaridade entre fontes de energia e otimizar a utilização da

infraestrutura de transmissão. Além disso, o FC é amplamente utilizado em estudos de viabilidade econômica e técnica de projetos de geração de energia renovável

2.4 MÉTRICAS ESTATÍSTICAS

Para avaliação da metodologia e acurácia dos dados utilizados nesta proposta de dissertação, é essencial a utilização de métricas estatísticas, uma vez que elas fornecem uma medida quantitativa de quão bem as previsões ou estimativas da metodologia correspondem aos valores reais.

2.4.1 Coeficiente de Person

O coeficiente de correlação de Pearson (CP) é uma das métricas mais amplamente utilizadas para avaliar o grau de complementaridade entre variáveis, como a geração de energia eólica e solar. De acordo com Correa (2003), o coeficiente de Pearson varia entre -1 e 1, em que:

- 1: Indica uma correlação positiva perfeita, em que ambas as variáveis aumentam ou diminuem juntas de maneira linear;
- -1: Indica uma correlação negativa perfeita, em que uma variável aumenta enquanto a outra diminui de maneira linear;
- 0: Indica ausência de correlação linear entre as variáveis.

No contexto deste trabalho, quanto mais próximo o valor do CP estiver de -1, maior será o grau de complementaridade entre as usinas eólica e solar, indicando que os períodos de alta geração de uma fonte coincidem com os períodos de baixa geração da outra.

Utilizando os dados do FC eólico e solar de cada usina, os CP foram obtidos por (3).

$$CP = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] * [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}. \quad (3)$$

Em que,

CP: Coeficiente de Pearson (adimensional, varia entre -1 e 1);

n: Número de observações;

x_i: FC eólico a cada instante *i*;

y_i: FC solar a cada instante *i*.

Segundo Schober *et al.* (2018), em termos de valores absolutos, CP entre 0 e 0,39 podem ser interpretados como uma fraca correlação, os valores entre 0,40 e 0,69, como uma correlação moderada e os valores de 0,70 a 1, como uma forte correlação.

2.4.2 Erro Quadrático Médio

O Erro Quadrático Médio ou MSE (do inglês: *Mean Squared Error*), conforme definido por (4), é a média dos quadrados dos erros entre os valores originais e os valores preditos pelo modelo, tratando-se de uma métrica amplamente utilizada para avaliar a precisão de modelos de previsão ou estimativa. De acordo com Carmo *et al.* (2023) e Correa (2003), o MSE indica um bom ajuste dos dados estimados quando o valor é próximo do zero.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (z_i - \hat{z}_i)^2. \quad (4)$$

Sendo,

MSE : Erro Quadrático Médio (mesma unidade dos valores ao quadrado, e.g., MW² ou kWh²);

n : número de observações;

z_i : Valor verdadeiro (observado) a cada instante i ;

$\hat{z}_i$: Valor estimado (preditivo) a cada instante i .

O MSE é uma medida que penaliza erros maiores de forma mais significativa, uma vez que as diferenças entre os valores observados e preditos são elevadas ao quadrado. Isso faz com que o MSE seja particularmente sensível a *outliers* ou grandes desvios, tornando-o uma métrica robusta para avaliar a qualidade de modelos de previsão. De acordo com Carmo *et al.* (2023), um valor de MSE próximo de zero indica um bom ajuste do modelo aos dados, ou seja, as previsões estão próximas dos valores reais. Por outro lado, valores elevados de MSE sugerem que o modelo apresenta erros significativos e pode não ser adequado para a aplicação em questão.

No contexto deste trabalho, o MSE será utilizado para avaliar a precisão da metodologia proposta na estimativa da geração de energia em usinas híbridas, permitindo a comparação entre diferentes cenários e a identificação de possíveis melhorias no modelo.

2.4.3 Raiz do Erro Quadrático Médio

A Raiz do Erro Quadrático Médio ou RMSE (do inglês: *Root Mean Squared Error*), como o próprio nome sugere, é a raiz quadrada do MSE e fornece uma interpretação intuitiva do erro médio de predição em relação à escala dos dados. Matematicamente definido por (5), um RMSE expressa o desvio médio das predições do modelo na unidade original dos dados. Por exemplo, caso a variável observada seja medida em uma escala na ordem de dezenas, um RMSE de 0,1 indicaria um erro muito pequeno e excelente precisão. Entretanto, se os dados estiverem em uma escala maior, como na ordem de milhares, um RMSE de 0,1 representaria um erro ainda mais insignificante em termos relativos, demonstrando excelente qualidade preditiva (CORREA, 2003).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (z_i - \hat{z}_i)^2}. \quad (5)$$

Em que,

RMSE: Raiz do Erro Quadrático Médio (mesma unidade dos valores originais, e.g., MW ou kWh);

n: número de observações;

z_i : Valor verdadeiro (observado) a cada instante *i*;

$\hat{z}_i$: Valor estimado (preditivo) a cada instante *i*.

O RMSE é amplamente utilizado em estudos de previsão e modelagem, pois oferece uma medida direta do desvio médio entre os valores observados e os valores preditos. Uma das vantagens do RMSE em relação ao MSE é que ele está na mesma escala dos dados originais, o que facilita a interpretação dos resultados. No entanto, assim como o MSE, o RMSE é sensível a *outliers* e grandes desvios, o que pode distorcer a métrica em casos extremos (CORREA, 2003).

2.4.4 Coeficiente de Determinação (R^2)

O coeficiente de determinação R^2 , conforme definido em (6) representa a proporção da variância explicada pelo modelo (CARMO et al., 2023).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}. \quad (6)$$

Em que,

R^2 : Coeficiente de Determinação (adimensional, varia entre 0 e 1).

n : número de observações;

z_i : Valor verdadeiro (observado) a cada instante i ;

$\hat{z}_i$: Valor estimado (preditivo) a cada instante i .

$\bar{z}$: Média dos valores verdadeiros.

O R^2 é uma métrica amplamente utilizada para avaliar a qualidade do ajuste de um modelo, em que:

- $R^2 = 1$: Indica que o modelo explica 100% da variabilidade dos dados, ou seja, as previsões são perfeitas.
- $R^2 = 0$: Indica que o modelo não explica nenhuma variabilidade dos dados, sendo equivalente a um modelo que sempre prevê a média dos valores observados.

Por exemplo, um valor de R^2 igual a 0,95 indica que o modelo é capaz de explicar cerca de 95% da variabilidade nos dados, sugerindo um ajuste forte entre as previsões e os dados reais. No entanto, é importante ressaltar que um R^2 elevado não necessariamente implica que o modelo seja adequado para todas as aplicações, pois ele não considera a complexidade do modelo (CARMO *et al.*, 2023).

2.5 PONTO DE CURVATURA MÁXIMA DE UMA CURVA

A análise da curvatura de uma função é essencial para identificar pontos críticos que representam mudanças significativas na tendência de uma curva. Em diversas áreas da engenharia e ciências aplicadas, a determinação do ponto de curvatura máxima desempenha um papel importante na interpretação de fenômenos físicos e matemáticos. Esse conceito é particularmente relevante no estudo de séries temporais, como é o caso de análises de geração de energia eólica e solar.

2.5.1 Curvatura de uma Função Contínua

Matematicamente, a curvatura $k(x)$ de uma função $f(x)$ é definida como uma medida da taxa de variação da direção da curva em relação ao comprimento do arco (KREYSZIG, 2011). Para uma função contínua, a curvatura pode ser calculada por (7).

$$k(x) = \frac{|f''(x)|}{(1 + [f'(x)]^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (7)$$

em que,

$k(x)$: Curvatura da função no ponto;

$f'(x)$: Primeira derivada de $f(x)$, representando a inclinação da curva no ponto x ;

$f''(x)$: Segunda derivada de $f(x)$, representando a concavidade da curva no ponto x ;

A curvatura é máxima quando a função apresenta uma mudança abrupta na direção, como em pontos de inflexão ou picos. Para determinar o ponto de curvatura máxima, podem ser executados seguintes passos:

1. Derivar a equação da curvatura em relação a x e igualar a zero para encontrar os pontos críticos, conforme estabelece (8).

$$\frac{d}{dx} k(x) = 0. \quad (8)$$

2. Verificar a segunda derivada da curvatura para confirmar se o ponto crítico corresponde a um máximo local:

$$\frac{d^2}{dx^2} k(x) < 0. \quad (9)$$

Se condição em (9) for satisfeita, o ponto representa o local onde a curvatura é máxima.

2.5.2 Curvatura para Dados Discretos

Na análise de séries temporais, os dados são discretos e obtidos em intervalos regulares, por exemplo, medições horárias. Nesses casos, a curvatura pode ser estimada utilizando diferenças finitas. Para um conjunto de pontos discretos (x_i, y_i) , a curvatura k_i no ponto i é dada por (10) (KREYSZIG, 2011).

$$k_i = \frac{|y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}|}{\left(1 + \left[\frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}}\right]^2\right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (10)$$

Sendo,

k_i : Curvatura no ponto i ;

y_{i+1}, y_{i-1}, y_i : Valores discretos da função nos pontos x_{i+1}, x_{i-1}, x_i ;

O numerador é uma aproximação da derivada de segunda ordem utilizando diferenças finitas. O denominador ajusta a normalização da curvatura, considerando a inclinação local. Para determinar o ponto de máxima curvatura em uma série de dados discretos, basta identificar o índice i onde k_i atinge seu maior valor. Essa abordagem é amplamente utilizada em análises de séries temporais, engenharia de controle e processamento de sinais para detectar pontos de inflexão ou mudanças abruptas em tendências de dados (KREYSZIG, 2011).

No contexto deste trabalho, a análise da curvatura é utilizada para identificar padrões no comportamento das curvas de ganho energético em função da capacidade instalada e em função dos *curtailments*, permitindo a detecção de pontos críticos onde a acentuação dos ganhos energéticos é mais significativa. Por exemplo, o ponto de curvatura máxima pode indicar o momento em que os ganhos energéticos começam a decrescer, enquanto os *curtailments* aumentam. Essa abordagem contribui para o planejamento e a otimização de usinas híbridas, permitindo a maximização dos ganhos energéticos e a minimização das perdas associadas aos *curtailments*.

2.6 MÉTODO DE BRENT MODIFICADO PARA SOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

A otimização matemática desempenha um papel fundamental na modelagem e solução de problemas em diversas áreas da engenharia e ciências aplicadas. No contexto desta dissertação, a otimização é utilizada para determinar a capacidade instalada ótima UFV em função do nível de *curtailment* imposto à usina híbrida. Esse problema pode ser formulado como um problema de minimização da função objetivo, sujeito a restrições que garantem a viabilidade da solução.

De acordo com Kagan et al. (2017), um problema de otimização pode ser expresso, genericamente, por (11).

$$\min_x f(x) \quad (11)$$

Sujeito a:

$$g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (12)$$

$$h_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, p. \quad (13)$$

Em que,

$f(x)$: Função objetivo a ser minimizada.

$g_i(x)$: Restrições de desigualdade, que delimitam a região factível;

$h_i(x)$: Restrições de igualdade, garantindo que certas condições sejam sempre satisfeitas;

x : Variável de decisão, que neste caso corresponde à capacidade instalada da UFV.

Um dos métodos amplamente utilizados para a minimização escalar é o Método de Brent Modificado, que combina a eficiência da interpolação quadrática com a robustez da busca áurea (KAGAN *et al.*, 2017). No contexto deste trabalho, o Método de Brent Modificado foi implementado utilizando a função *minimize_scalar* da biblioteca *SciPy*, com a opção *method='bounded'*. Essa abordagem permite a minimização de funções unidimensionais dentro de um intervalo fechado, garantindo alta precisão e rápida convergência.

A minimização de funções unidimensionais pode ser realizada por diferentes abordagens, dependendo da suavidade e comportamento da função objetivo. Métodos baseados em derivadas, como o Gradiente Descendente e o Método de Newton, exigem que a função seja diferenciável. No entanto, em muitos problemas práticos, a função pode ser não diferenciável ou apresentar múltiplos pontos de descontinuidade. Para lidar com tais cenários, métodos que não utilizam derivadas são preferidos.

O Método de Brent Modificado pertence à classe de algoritmos que não exigem o cálculo de derivadas, sendo particularmente útil para minimizar funções dentro de um intervalo fechado. Esse intervalo alterna, dinamicamente, entre a Seção Áurea e a Interpolação Quadrática Inversa, dependendo da confiabilidade da previsão do mínimo (BRENT, 1973).

A Seção Áurea divide o intervalo de busca $[a, b]$ em duas partes, mantendo a proporção áurea $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1,618$. A cada iteração, o intervalo é reduzido com base na comparação dos valores da função nos pontos internos x_1 e x_2 , definidos por (14) e (15).

$$x_1 = b - \frac{b - a}{\phi}. \quad (14)$$

$$x_2 = a + \frac{b - a}{\phi}. \quad (15)$$

Se $f(x_1) < f(x_2)$, o novo intervalo de busca será $[a, x_2]$, caso contrário, o novo intervalo será $[x_1, b]$.

A Interpolação Quadrática Inversa utiliza três pontos x_0 , x_1 e x_2 , escolhidos dentro do intervalo de busca $[a, b]$, para ajustar uma parábola e estimar o mínimo da função, o qual pode ser computado por (BRENT, 1973).

$$x^* = x_1 - \frac{1}{2} \left(\frac{(x_1 - x_0)^2(f_1 - f_2) - (x_1 - x_2)^2(f_1 - f_0)}{(x_1 - x_0)(f_1 - f_2) - (x_1 - x_2)(f_1 - f_0)} \right), \quad (16)$$

em que,

x^* : é o valor que minimiza a função;

f_i : é o valor da $f(x)$ no ponto x_i .

Se o ponto x^* estiver dentro do intervalo de busca e for uma estimativa confiável, ou seja, x^* tem que estar no intervalo de busca e o valor de $f(x^*)$ tem que ser menor que f_0 , f_1 e f_2 , dessa forma x^* substitui o x_i em que a f_i é maior. Caso contrário, o método recorre à Seção Áurea.

O Método de Brent Modificado segue os seguintes passos:

1. Inicialização: Define-se o intervalo de busca $[a,b]$ e os pontos iniciais x_0, x_1, x_2 ;
2. Interpolação Quadrática: Calcula-se o mínimo estimado x^* usando a Interpolação Quadrática Inversa.
3. Verificação de Confiabilidade: Se x^* estiver dentro do intervalo e for uma estimativa confiável, atualiza-se o intervalo. Caso contrário, utiliza-se a Seção Áurea.
4. Convergência: O processo é repetido até que o intervalo de busca seja suficientemente pequeno ou o número máximo de iterações seja atingido

2.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram abordados os principais conceitos necessários ao desenvolvimento da metodologia proposta. Entre eles, as definições de usinas híbridas, associadas e adjacentes, os conceitos de MUST e capacidade instalada, o fator de capacidade e as métricas estatísticas, como o coeficiente de Pearson, o erro quadrático médio e o coeficiente de determinação, foram apresentados para validar a precisão da metodologia. O conceito de ponto de curvatura máxima foi explorado para identificar padrões em curvas de ganho energético, e o Método de Brent Modificado foi detalhado como uma abordagem eficiente para a minimização de funções escalares. Esses elementos forneceram a base teórica para a análise da complementaridade entre energia eólica e solar e a determinação da capacidade ótima de geração de energia elétrica de usinas fotovoltaicas em sistemas híbridos.

No próximo capítulo, apresenta-se uma revisão de literatura, em ordem cronológica, que permitirá compreender o estado da arte no âmbito de complementaridade de usinas híbridas, contextualizando a contribuição deste trabalho no cenário atual de transição energética.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem por objetivo proporcionar uma visão abrangente sobre os estudos e pesquisas existentes na literatura que abordam a geração de energia híbrida, especialmente focando nas usinas híbridas e associadas. A revisão bibliográfica realizada aqui visa contextualizar o estado da arte no campo, destacando as metodologias, abordagens e resultados mais relevantes, e como eles contribuem para o avanço do conhecimento na área. Os trabalhos revisados são essenciais para embasar a metodologia proposta neste trabalho, fornecendo *insights* e direcionamentos a partir de experiências e achados prévios.

3.1 PRINCIPAIS TRABALHOS

Em um estudo realizado pela EPE em 2017, é sugerida uma metodologia para avaliação de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas, sob a ótica energética. Nesse estudo é levado em consideração alguns critérios para seleção dos locais a serem avaliados, como a necessidade de medições anemométricas e solarimétricas *in loco*, por período não inferior a 12 meses consecutivos, disponibilidade de medições com alta resolução temporal (sub-horária) e proximidade das regiões. O estudo revela a importância de avaliação dos dados discretizados devido às características estocásticas das fontes. Além disso, constatou-se que para uma mesma região, pode-se obter resultados diferentes, a depender do dimensionamento considerado das usinas (EPE, 2017).

Vega-Sánchez *et al.* (2017) aplicaram técnicas de processamento de imagem a mapas de alta resolução de recursos eólicos e solares no México para avaliar a possibilidade de uso combinado de fontes de energia renovável. Foi aplicado o conceito de CP para obter novos mapas que mostram o grau de correlação entre os recursos eólicos e solares. Os resultados obtidos mostraram um bom grau de complementaridade entre as fontes de energia, em locais específicos do país, em diferentes estações do ano. Os mapas gerados podem ser úteis em projetos relacionados à instalação de sistemas híbridos de geração de energia elétrica.

Jurasz *et al.* (2019) apresentaram uma revisão das técnicas de avaliação da complementariedade entre sistemas de energia eólica e solar. Foi demonstrado que o CP é amplamente utilizado para realização das análises de complementariedade. As bases de dados comumente utilizadas são as relacionadas a fatores climáticos (Velocidade, direção do vento e irradiância), sendo a escala temporal horária amplamente utilizada. Como principal

contribuição, os autores apresentaram uma percepção dos caminhos e desafios que ainda podem ser propostos em trabalhos futuros.

Kim e Suh (2020) desenvolveram um modelo híbrido de previsão da geração fotovoltaica, combinando dados meteorológicos numéricos e imagens de satélite para melhorar a precisão da previsão. O estudo realizado em uma usina solar na Coreia do Sul utilizou métodos de inteligência artificial, como ARIMAX, SVR e redes neurais (ANN e DNN), demonstrando que a incorporação de informações espaciais, como movimentação de nuvens e material particulado, melhora significativamente a acurácia da previsão. A principal contribuição do trabalho é a abordagem inovadora que integra aprendizado de máquina com análise de imagens para prever flutuações na geração solar. No entanto, o estudo se limita a um único local, foca apenas em previsões de curto prazo (1 hora à frente) e não considera impactos econômicos ou ambientais. Os autores sugerem que futuras pesquisas expandam a aplicação do modelo para diferentes regiões e períodos mais longos.

Couto e Estanqueiro (2021) apresentaram análises de complementariedade em Portugal, a partir de dados de radiação solar e velocidade do vento. Os autores utilizaram técnicas de otimização para determinar as combinações ótimas dos valores de capacidade instalada de cada fonte geradora e montar cenários com *curtailments* de 5% e 10%. Tais combinações levaram em consideração as demandas energéticas de Portugal e não, necessariamente, as limitações físicas e elétricas de cada empreendimento. Foi demonstrada a sinergia entre as fontes e que o estudo fornece uma metodologia que pode ser aplicada em outras regiões.

Gonçalves (2021) avaliou a complementariedade local nos estados de Pernambuco e no Rio Grande do Sul por meio da variação temporal e espacial do vento e da radiação solar. Foi avaliada a sensibilidade dos resultados à variação do período e resolução temporal dos dados, sendo demonstrado que, para intervalos de até três horas, os índices de desempenho utilizados no trabalho tiveram baixo impacto, como é o caso do erro médio absoluto abaixo de 10%. O estudo verificou que, para combinações eólico-solares com potencial híbrido instalado igual para todas as combinações, onde a participação solar é de 20% ou 80%, os montantes de corte em caso de restrição de despacho são menores, quando comparados com outras frações solares.

Croce (2023) realizou análises técnico-econômicas na implantação de usinas híbridas no Brasil com o auxílio do *software Homer Pro*. O *software* importa os dados médios dos recursos energéticos de cada local para realização dos cálculos do valor de geração de cada fonte primária de energia elétrica. De acordo com as simulações realizadas, o estudo demonstrou que as regiões Sul e Centro-Oeste apresentam incertezas sobre a viabilidade, o Sudeste é viável, o Norte totalmente inviável e o Nordeste é atrativo economicamente.

Luz et al. (2023) analisaram a complementaridade entre fontes renováveis no Brasil, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson para identificar sinergias entre as fontes e suas respectivas regiões. Os dados foram processados em médias diárias e mensais, permitindo a caracterização dos padrões de geração e a seleção de regiões representativas. Foram definidas cinco regiões solares, quatro eólicas, três hídricas e uma de biomassa, revelando correlações significativas, como -0,97 entre regiões hídricas e -0,86 entre eólica e hidrelétrica. O estudo propôs um cenário 100% renovável para 2050, destacando que a diversificação geográfica e tecnológica pode minimizar impactos sazonais e garantir estabilidade no fornecimento elétrico. No entanto, limita-se por não abordar aspectos operacionais e viabilidade econômica, além de não considerar cenários futuros de mudanças climáticas. Ainda assim, a pesquisa reforça a importância da complementaridade para aumentar a resiliência do sistema elétrico brasileiro.

Oliveira Silva *et al.* (2024) apresentaram um estudo robusto sobre a complementaridade entre energia eólica e solar no estado de Alagoas, Brasil. Utilizando modelos atmosféricos avançados, como o WRF-Solar, os pesquisadores mapearam o potencial eólico e solar da região, identificando áreas promissoras para instalação de usinas renováveis. Além disso, foram exploradas simulações para entender a viabilidade e eficiência da geração híbrida, considerando diferentes cenários de combinação de recursos e a influência sazonal. Os resultados destacam a importância da integração de fontes renováveis para garantir um suprimento estável de energia, especialmente em regiões propensas a variações climáticas, como o semiárido de Alagoas.

Freitas et al. (2024) propõem uma metodologia para o dimensionamento de usinas fotovoltaicas flutuantes (FVF) utilizando a capacidade ociosa de subestações de usinas hidrelétricas (UHEs). O estudo investiga a complementaridade entre a geração solar e hidrelétrica, otimizando o uso da infraestrutura existente para melhorar a eficiência na geração de eletricidade. A metodologia empregada avalia dados hidrológicos e elétricos das UHEs para determinar a viabilidade da instalação de plantas FVF nos reservatórios, garantindo que a área ocupada pelas usinas solares seja compatível com a disponibilidade hídrica. O estudo utiliza o FC mensal de usinas fotovoltaicas próximas às hidrelétricas para prever a geração das plantas flutuantes. Aplicado às usinas de Belo Monte e Itaipu, o modelo identificou um potencial de 59,81 GWp e 55,35 GWp, respectivamente, para geração solar flutuante. Os resultados indicam que a operação conjunta de hidrelétricas e usinas FVF pode melhorar a segurança energética, reduzir perdas por evaporação e permitir um uso mais eficiente dos reservatórios, funcionando como "baterias virtuais" para armazenamento de energia.

Outro aspecto relevante é a resolução temporal dos dados utilizados. Muitos estudos se baseiam em dados meteorológicos médios diários ou mensais, o que pode não refletir

adequadamente a variabilidade horária da geração solar e eólica. Além disso, grande parte das pesquisas foca na análise estatística da complementaridade, sem considerar aspectos operacionais como perdas na transmissão, despacho energético ou restrições regulatórias. O presente trabalho preenche essas lacunas ao utilizar dados reais de fator de capacidade de usinas solares operacionais com resolução horária ao longo de um ano inteiro. Diferente de estudos que utilizam apenas estimativas meteorológicas, essa abordagem permite uma análise mais precisa da geração solar e sua interação com a geração eólica em diferentes cenários. Além disso, são considerados cenários distintos de ganho energético e *curtailments*, possibilitando uma avaliação completa do ponto de vista energético das usinas híbridas. Dessa forma, este estudo avança no entendimento da complementaridade renovável e oferece uma ferramenta mais realista para o planejamento energético.

3.2 COMPARATIVO DA METODOLOGIA DOS TRABALHOS ANALISADOS

A Tabela 1 apresenta uma síntese das metodologias adotadas nos estudos revisados, destacando seus objetivos, métodos, resultados e limitações. Essa análise permite compreender as diferentes abordagens utilizadas na avaliação da complementaridade entre energia eólica e solar em usinas híbridas, bem como as principais lacunas ainda existentes na literatura.

Tabela 1 – Síntese das abordagens metodológicas para análise da complementaridade entre fontes renováveis.

Referência	Contribuições e Limitações
EPE (2017)	Contribuições: Sugestão de metodologia para avaliação de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas. Estabelece critérios de seleção de locais e dados para o dimensionamento das usinas. Necessidade de medições anemométricas e solarimétricas de alta resolução.
	Limitações: Curta duração do período de avaliação dos dados (menos de 1 ano).
Vega-Sánchez et al. (2017)	Contribuições: Processamento de imagens de mapas de recursos eólicos e solares no México. Utilização do CP para avaliar complementaridade. Boa complementaridade entre recursos eólicos e solares em locais específicos. Mapas de correlação se mostram úteis para projetos híbridos.
	Limitações: Os mapas de recursos representam médias da região e não variações em alta resolução temporal.
Jurasz et al. (2019)	Contribuições: Revisão das técnicas de avaliação da complementaridade entre sistemas de energia eólica e solar. Uso do CP para análise comparativa. <i>Insights</i> sobre análises de complementaridade. Aponta desafios e oportunidades futuras.
	Limitações: Não avalia qual técnica é mais eficiente para análise de complementaridade.

Kim e Suh (2020)	Contribuições: Desenvolvimento de modelo híbrido de previsão da geração fotovoltaica combinando dados meteorológicos numéricos e imagens de satélite por meio de inteligência artificial. Melhora na acurácia da previsão fotovoltaica ao integrar dados espaciais e séries temporais. Modelos de redes neurais mostraram melhor desempenho.
	Limitações: Estudo focado em previsões de curto prazo (1 hora) e limitado a uma única usina solar.
Couto e Estanqueiro (2021)	Contribuições: Análise da complementariedade e otimização da capacidade instalada em Portugal, considerando cenários com <i>curtailments</i> de 5% e 10%. Demonstrou sinergia entre fontes em Portugal. Metodologia aplicável a outras regiões.
	Limitações: Não considera limitações físicas e elétricas na otimização da capacidade instalada.
Gonçalves (2021)	Contribuições: Avaliação da complementariedade local em Pernambuco e Rio Grande do Sul, com análise de sensibilidade ao período e à resolução dos dados. Baixo impacto para o período e resolução dos dados de até três horas na análise de complementariedade. Redução de cortes no despacho em combinações eólico-solares.
	Limitações: Aspectos econômicos e regulatórios não foram abordados. Além disso, o estudo considera simultaneamente a geração eólica e solar na análise de complementariedade, o que pode introduzir um nível maior de incerteza nos resultados. Ao estimar ambas as fontes juntas, há um acúmulo de erros associados às variações individuais de cada uma, diferentemente de abordagens que analisam cada fonte separadamente antes de integrar os resultados.
Croce (2023)	Contribuições: Análise técnico-econômica de usinas híbridas no Brasil utilizando o <i>software Homer Pro</i> para modelagem. Demonstra viabilidade econômica regional para diferentes configurações de usinas híbridas. Algumas regiões mais atrativas que outras.
	Limitações: Uso de dados médios dos recursos, sem avaliação de variações horárias.
Luz et al. (2023)	Contribuições: Análise da complementariedade entre fontes renováveis no Brasil usando o CP e séries temporais diárias e mensais. Identificação de fortes correlações entre fontes renováveis e algumas regiões do Brasil (-0,97 entre regiões hídricas e -0,86 entre eólica e hidrelétrica). Proposta de um sistema 100% renovável para 2050.
	Limitações: Não avalia restrições operacionais do sistema elétrico, apenas correlações estatísticas.
Oliveira Silva et al. (2024)	Contribuições: Estudo da complementariedade entre energia eólica e solar no estado de Alagoas, usando modelos atmosféricos avançados (WRF-Solar). Mapeamento de potenciais renováveis no estado de Alagoas. Eficiência da geração híbrida em diferentes cenários.
	Limitações: Resolução temporal de 3 horas pode ser aprimorada. Simulações poderiam incluir mais cenários.
Freitas et al. (2024)	Contribuições: Metodologia para o dimensionamento de usinas FVF utilizando capacidade ociosa de subestações hidrelétricas. Potencial de geração fotovoltaica flutuante de 59,81 GWp em Belo Monte e 55,35 GWp em Itaipu. Complementariedade entre solar e hidrelétrica melhora estabilidade.
	Limitações: Modelo utiliza dados médios de FC.

Este trabalho	Contribuições: Estudo da complementaridade no Nordeste do Brasil utilizando dados reais de fator de capacidade de usinas fotovoltaicas operacionais, algo inédito nos estudos anteriores. Diferente de abordagens baseadas apenas em estimativas meteorológicas ou simulações, este trabalho incorpora valores reais de desempenho das usinas, permitindo uma análise mais precisa da viabilidade da geração híbrida e sua interação com outras fontes energéticas. Realiza análises de complementariedade e como se comporta energeticamente as usinas hibridizadas para vários valores de CI e os <i>curtailments</i> que a usina está sujeita a ter. As métricas estatísticas utilizadas para aferir o método apresentaram valores satisfatórios.
	Limitações: Não incorpora modelos meteorológicos para comparação. Não realiza análises financeiras, deixando margem para estudos futuros que possam integrar custos de implementação e impacto econômico da complementaridade energética.

Fonte: Autoria própria.

3.3 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos revisados mostram que a complementaridade entre energia solar e eólica pode melhorar a confiabilidade e a estabilidade do sistema elétrico, reduzindo a intermitência das fontes renováveis. As abordagens metodológicas incluem análises estatísticas, modelagens de otimização, previsões baseadas em inteligência artificial e estudos técnico-econômicos. No entanto, a maioria das pesquisas baseiam-se em dados meteorológicos médios diários ou mensais para estimar a geração de energia, o que pode resultar em discrepâncias quando comparado à operação real das usinas. Alguns trabalhos, como Freitas et al. (2024), utilizaram dados reais de fator de capacidade, mas com valores médios mensais, o que não permite capturar variações intra-horárias da geração.

Este estudo avança na literatura ao empregar dados reais de fator de capacidade de usinas solares com resolução horária ao longo de um ano inteiro, proporcionando uma estimativa mais precisa da geração solar e sua interação com a geração eólica. Além disso, considera diferentes cenários de ganho energético e *curtailments*, oferecendo uma avaliação detalhada do desempenho energético das usinas híbridas. Assim, esta pesquisa contribui para um entendimento mais realista da complementaridade das fontes supracitadas e fornece informações essenciais para o planejamento e operação do setor elétrico.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo descreve a metodologia desenvolvida para determinar o valor ótimo da capacidade instalada de uma UFV a ser utilizada em conjunto com uma EOL já implantada. A metodologia proposta visa avaliar a complementaridade entre as fontes eólica e solar, considerando dados reais de geração fornecidos pelo ONS e métricas estatísticas para validação dos resultados. O delineamento dos desenvolvimentos foi dividido em etapas claras e sequenciais, que incluem a coleta e o processamento de dados, a aplicação de equações fundamentais para cálculo de parâmetros energéticos e a avaliação da complementaridade entre as fontes. Além disso, a metodologia incorpora ferramentas de código aberto para simulação e análise, garantindo transparência e reprodutibilidade.

4.1 REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DAS FIGURAS DE MÉRITO

Nesta seção, serão apresentadas as definições e as equações fundamentais que proporcionarão clareza e rigor nos processos de cálculo e interpretação dos resultados preliminares obtidos nesta proposta. As métricas abordadas são essenciais para a modelagem, análise e validação dos dados, permitindo uma avaliação precisa e quantitativa do desempenho das usinas híbridas e associadas.

4.1.1 Distâncias entre Usinas

Nos dados abertos disponibilizados pelo ONS, é possível obter a localização geográfica (latitude e longitude) das usinas. Com base nessas coordenadas, a distância entre os pares de usinas foi calculada pela fórmula de Haversine, conforme exhibe (17), a qual é amplamente utilizada para calcular distâncias entre dois pontos na superfície da Terra (BASYIR et al., 2017).

$$d = 2 * r * \arcsen \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) * \cos(\phi_2) * \sin^2 \left(\frac{\psi_2 - \psi_1}{2} \right)}. \quad (17)$$

Sendo,

d : Distância entre as usinas em km;

r : Raio da terra, com 6371 km;

ϕ_1, ϕ_2 : Latitudes das usinas 1 (UFV) e 2 (EOL), respectivamente, em radianos;

ψ_1, ψ_2 : Longitude das usinas 1 (UFV) e 2 (EOL), respectivamente, em radianos.

4.1.2 Geração Fotovoltaica

A geração fotovoltaica, G_{UFV_i} , em um intervalo de tempo i pode ser computada pelo produto do fator de capacidade fotovoltaico, FC_{UFV_i} , e da capacidade instalada fotovoltaica, CI_{UFV} , conforme (18).

$$G_{UFV_i} = FC_{UFV_i} * CI_{UFV}. \quad (18)$$

Em que,

G_{UFV_i} : Geração fotovoltaica em MW no intervalo de tempo i ;

FC_{UFV_i} : Fator de capacidade fotovoltaico no intervalo de tempo i (adimensional, expresso em porcentagem ou fração decimal).

CI_{UFV} : Capacidade instalada fotovoltaica em MW.

4.1.3 Geração Híbrida

A geração híbrida, G_{H_i} , no intervalo de tempo i é definida pela soma da geração eólica, G_{EOL_i} , verificada no intervalo de tempo i com a geração fotovoltaica, G_{UFV_i} , conforme (19).

$$G_{H_i} = G_{EOL_i} + G_{UFV_i}. \quad (19)$$

Sendo,

G_{H_i} : Geração híbrida em MW no intervalo de tempo i ;

G_{EOL_i} : Geração eólica em MW no intervalo de tempo i ;

G_{UFV_i} : Geração fotovoltaica em MW no intervalo de tempo i .

Substituindo (18) em (19), tem-se:

$$G_{H_i} = G_{EOL_i} + FC_{UFV_i} * CI_{UFV}, \quad (20)$$

a qual permite quantificar a geração total de uma usina híbrida em um determinado intervalo de tempo, considerando a contribuição conjunta das fontes eólica e fotovoltaica. A análise da geração híbrida é fundamental para avaliar a complementaridade entre as fontes, otimizar o dimensionamento das usinas e garantir a estabilidade do sistema elétrico.

4.1.4 Curtailments

O valor de *curtailment*, C , é todo energético que ultrapassa o $MUST$. Em outras palavras, é o excedente de geração que não pode ser injetado no sistema devido a restrições técnicas ou operacionais. Logo, o excedente de geração em um período é determinado pelo somatório das diferenças entre G_{Hi} e o $MUST$, conforme (21).

$$C = \sum_{G_{Hi} > MUST} (G_{Hi} - MUST). \quad (21)$$

Em que,

C : Valor total de *curtailment* no período analisado em MW;

G_{Hi} : Geração híbrida em MW no intervalo de tempo i ;

$MUST$: Capacidade máxima de transmissão contratada pela EOL em MW.

Do ponto de vista energético, as restrições que podem ser incididas sobre a UH podem ser realizadas tanto na EOL quanto na UFV. Neste trabalho, o valor do corte em forma de percentual é obtido em relação ao valor energético da UFV a ser instalada. O percentual de *curtailment* em relação à UFV pode ser computado por:

$$C_{\%} = \frac{\sum_{G_{Hi} > MUST} (G_{Hi} - MUST)}{\sum FC_{UFV_i} * CI_{UFV}}, \quad (22)$$

em que:

FC_{UFV_i} : Geração híbrida em MW no intervalo de tempo i ;

CI_{UFV} : Capacidade instalada fotovoltaica em MW.

4.1.5 Capacidade Instalada da UFV

O valor da CI da UFV é determinado de modo a obter um valor máximo de *curtailments* preestabelecido. A partir de (18), (19), (20) e (21), o valor da capacidade instalada da UFV pode ser determinado por (23). Porém, como se pode inferir, a equação fica condicionada a $G_{Hi} > MUST$, o que dificulta a computação da CI da UFV.

$$CI_{UFV} = \frac{C - \sum_{G_{H_i} > MUST} (G_{EOL_i} - MUST)}{\sum_{G_{H_i} > MUST} FC_{UFV_i}}. \quad (23)$$

Como o *curtailment* é expresso, comumente, em valores percentuais, outra forma para determinar o CI_{UFV} é por meio do rearranjo algébrico de (22) como é apresentado em (24). Todavia, a equação também fica condicionada a $G_{H_i} > MUST$.

$$CI_{UFV} = \frac{\sum_{G_{H_i} > MUST} G_{H_i} - MUST}{\sum FC_{UFV_i} * C_{\%}}. \quad (24)$$

Para contornar o problema, uma rotina computacional por meio do método de otimização de Brent Modificado, foi desenvolvida para encontrar o valor de CI_{UFV} , cuja formulação do problema segundo esse método é descrita na seção 4.1.5.1, enquanto a organização geral da metodologia adotada encontra-se na seção 4.2.

4.1.5.1 Formulação do Problema de Otimização pelo Método de Brent

O objetivo central é determinar CI_{UFV} que minimize os valores de *curtailments* até um limite aceitável. Assim, de acordo com o que foi apresentado na seção 2.5, define-se primeiramente a função objetivo a ser minimizada conforme (25).

$$\min_x f(CI_{UFV}) = |C(CI_{UFV}) - C_{m\acute{a}x}|. \quad (25)$$

Sujeito a:

$$0 \leq CI_{UFV} \leq CI_{m\acute{a}x}, \quad (26)$$

sendo,

$C(CI_{UFV})$: função que descreve o valor percentual de *curtailment*, calculado após a simulação horária do sistema híbrido para cada CI_{UFV} ;

$C_{m\acute{a}x}$: o *curtailment* máximo (em percentual) admitido no projeto (por exemplo, 5% ou 10% da energia fotovoltaica);

$CI_{m\acute{a}x}$: a capacidade instalada máxima que a UFV pode assumir.

A $CI_{m\acute{a}x}$ no escopo deste trabalho foi definida como sendo duas vezes a capacidade instalada da usina eólica.

Com a função objetivo estabelecida, aplica-se o Método de Brent Modificado, o qual foi descrito na Seção 2.6. Esse método possibilita encontrar o mínimo de uma função

unidimensional sem depender de derivadas, combinando a robustez da busca pela Seção Áurea com a interpolação quadrática inversa (BRENT, 1973).

A cada iteração do algoritmo, é determinado um valor de CI_{UFV} dentro do intervalo $[0, CI_{m\acute{a}x}]$. Em seguida, efetua-se a simulação horária da geração eólica e fotovoltaica combinadas, obtendo-se o *curtailment* percentual $C(CI_{UFV})$. O algoritmo vai refinando o intervalo de busca até convergir para o ponto de CI_{UFV} que satisfaz $|C(CI_{UFV}) - C_{m\acute{a}x}| \approx 0$, respeitando uma tolerância de convergência pré-estabelecida de 10^{-15} e um número máximo de 100 iterações.

4.1.6 Ganho Energético

O ganho energético representa o valor líquido de geração determinado pelo valor líquido de geração híbrida produzida, sendo este a diferença da geração híbrida total, G_H , e dos *curtailments*, C , conforme (27).

$$G = \sum (G_{H_i}) - C. \quad (27)$$

Em que,

G : Ganho energético líquido em MW;

G_{H_i} : Geração híbrida em MW no intervalo de tempo i ;

C : Valor total de *curtailment* no período analisado em MW.

Alternativamente, o ganho também pode ser obtido por meio de (28), em que os valores da geração híbrida não ultrapassem o MUST contratado.

$$G = \sum_{G_{H_i} \leq MUST} G_{H_i}. \quad (28)$$

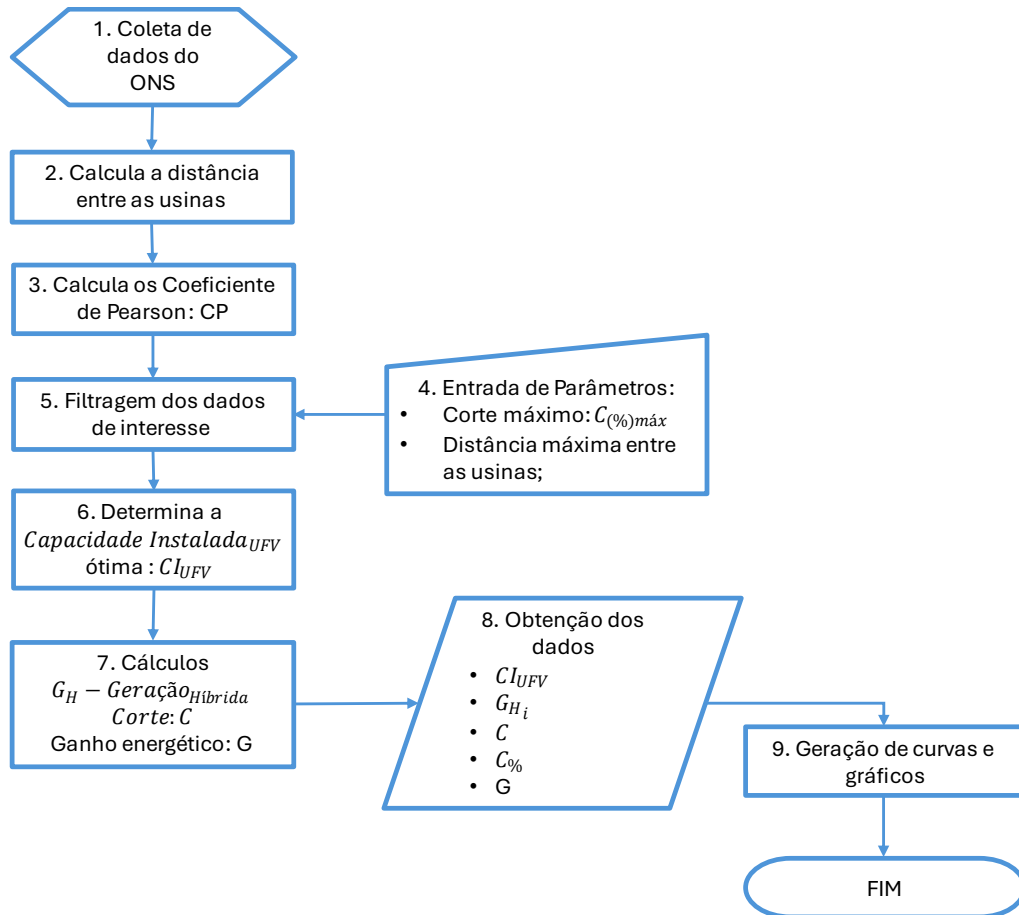
Essa abordagem elimina a necessidade de calcular o *curtailment* explicitamente, pois considera apenas a geração que pode ser totalmente injetada no sistema sem restrições.

4.2 ETAPAS DA METODOLOGIA

As análises de complementariedade energética foram realizadas utilizando os dados de geração verificada da EOL, FC da EOL e os dados do FC da UFV fornecidos pelo ONS. A sintetização da metodologia empregada para a determinação dos parâmetros foi desenvolvida

em ambiente de programação na linguagem *python*, cuja estrutura na forma de um fluxograma é apresentada na Figura 3 e as descrições apresentadas a seguir:

Figura 3 – Fluxograma de etapas da metodologia proposta.



Fonte: Autoria Própria.

1. Coleta e preparação dos dados

- Os dados utilizados são os de nome “Fator de Capacidade de Geração Eólica e Solar” fornecido pelo ONS, disponível no portal de dados públicos (dados.ons.org.br);
- Os dados são organizados e processados para garantir consistência e qualidade, removendo possíveis inconsistências e *outliers* que possam comprometer a análise;
- São extraídas as informações referentes à geração eólica e ao FC solar, considerando a resolução horária ao longo do período de um ano inteiro.

2. Cálculo das distâncias entre as usinas

- a. Utilizando as coordenadas geográficas (latitude e longitude) das usinas eólicas e solares, as distâncias entre os pares de usinas são calculadas por meio da fórmula de Haversine;
 - b. A distância máxima estabelecida para análise foi de 35 km, um valor definido com base na influência das condições climáticas locais na geração de energia. Em distâncias maiores, as condições meteorológicas podem variar significativamente, impactando as análises. Essa escolha visa garantir que os dados reflitam a realidade operacional das usinas.
 3. Cálculo do coeficiente de Pearson
 - a. O CP é calculado para avaliar o grau de complementaridade entre as usinas eólicas e solares.
 - b. São selecionados apenas os pares de usinas com $CP < 0$, indicando uma correlação inversa e, portanto, um potencial de complementaridade.
 4. Entrada de parâmetros
 - a. O parâmetro de distância máximo é fornecido nesta etapa. Os dados são filtrados com base na distância máxima pré-estabelecida (35 km) e nos $CP < 0$;
 - b. Os valores percentuais de *curtailments* variam de 0% a 50% para realização das análises.
 - c. Determina-se a usina eólica como ponto de hibridização, utilizando-se a usina solar correspondente para estimativa da capacidade instalada da usina solar a ser instalada.
 5. Filtragem dos dados de interesse e associação das usinas
 - a. Com base na distância máxima estabelecida e com coeficientes de Pearson negativos, os pares de usinas eólico-solares são determinados, onde a EOL corresponde ao ponto de hibridização e a UFV é utilizada como parâmetro do fator de capacidade solar da região.
 6. Determinação da capacidade instalada ótima
 - a. A capacidade instalada ótima da UFV é determinada por meio de métodos de otimização baseados na maximização da eficiência energética do sistema
-

híbrido, logo a capacidade instalada ótima é encontrada de modo a minimizar os *curtailments* na geração;

- b. Essa etapa considera diferentes configurações de dimensionamento da UFV, avaliando o impacto da variação da capacidade solar na redução do *curtailment* e no aumento do aproveitamento energético;
- c. O objetivo é definir uma proporção ideal entre a geração solar e eólica, garantindo maior estabilidade e menor desperdício de energia.

7. Cálculos dos dados energéticos

- a. Após a definição da capacidade instalada ótima, são calculados os principais indicadores energéticos do sistema híbrido, incluindo:
 - i. Energia gerada pela usina híbrida ao longo do período de um ano;
 - ii. Percentual de *curtailment* da geração eólica e solar em diferentes cenários;
 - iii. Ganho energético resultante da complementaridade entre as fontes.
- b. As equações utilizadas para esses cálculos são apresentadas na Seção 4.1, garantindo rigor técnico e precisão nas análises.

8. Obtenção e organização dos resultados

- a. Todos os dados gerados são organizados em tabelas para análise detalhada da performance do sistema híbrido;
- b. São armazenados os valores dos cenários simulados, incluindo diferentes proporções de capacidade instalada e variações nos níveis de *curtailment*;
- c. Os resultados são preparados para visualização gráfica e interpretação, permitindo uma melhor compreensão dos impactos da complementaridade energética.

9. Verificação do *curtailment*

- a. São gerados gráficos representativos dos resultados obtidos, incluindo:
 - i. Curvas de complementaridade entre as fontes eólica e solar;
 - ii. Distribuição da geração híbrida ao longo do período analisado;
 - iii. Impacto do *curtailment* em diferentes cenários de capacidade instalada.
-

- b. Os resultados gráficos são essenciais para interpretar a viabilidade e eficiência das usinas híbridas, fornecendo subsídios para a tomada de decisão no planejamento energético.

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi apresentada a metodologia desenvolvida para determinar o valor ótimo da capacidade instalada de uma UFV integrada a uma EOL, com o objetivo de maximizar a complementaridade energética e minimizar os *curtailments*. A metodologia foi estruturada em etapas sequenciais, abrangendo desde a coleta e processamento de dados reais do ONS até a obtenção dos cenários ótimos de capacidade instalada.

O processo foi implementado em *Python* e incluiu a análise da correlação entre fontes renováveis, a filtragem dos pares de usinas eólico-solares, a determinação da capacidade instalada ótima e a avaliação dos ganhos energéticos em diferentes cenários. A abordagem adotada permite uma avaliação detalhada da viabilidade das usinas híbridas, utilizando dados reais com resolução horária ao longo de um ano inteiro.

No próximo capítulo, serão apresentados os resultados e análises dos dados obtidos, permitindo avaliar o desempenho da metodologia proposta e validar a viabilidade das configurações híbridas analisadas.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia proposta no Capítulo 4, com foco na análise da complementaridade entre as fontes eólica e solar e na viabilidade energética das usinas híbridas. A análise dos resultados é estruturada em três partes principais, permitindo uma avaliação abrangente da complementaridade entre as fontes eólica e solar e da viabilidade energética das usinas híbridas.

Na primeira parte, é realizada uma análise de complementariedade, utilizando o CP para avaliar a correlação entre as fontes eólica e solar e discutir como essa relação impacta a estabilidade e a eficiência do sistema híbrido. Em seguida, é feita uma análise energética, com a quantificação dos *curtailments*, do ganho energético e da capacidade instalada ótima da UFV, considerando diferentes cenários baseados em dados reais e modelagens analíticas. Por fim, é realizada uma avaliação dos dados, verificando a qualidade e a consistência das informações utilizadas, com destaque para a comparação de diferentes cenários de geração e identificando possíveis valores atípicos que possam influenciar os resultados.

A análise desses aspectos permitirá uma compreensão detalhada dos benefícios e desafios associados à hibridização de usinas eólicas e solares, contribuindo para o planejamento e a operação de sistemas híbridos no Brasil. Além disso, serão discutidas as limitações do estudo e sugeridas direções para pesquisas futuras, como a integração de sistemas de armazenamento e a análise de viabilidade econômica.

5.1 ANÁLISE DE COMPLEMENTARIEDADE ENTRE AS FONTES

Após a implementação da rotina computacional descrita no Capítulo 4, foram selecionados dez pares de usinas para análise, considerando a distância entre elas e a disponibilidade de dados ao longo de todo o ano de 2023. Essa seleção visa garantir a precisão e a representatividade dos resultados. A determinação da capacidade de geração da UFV será feita considerando diferentes porcentagens de *curtailment*, cujo limite de corte é a capacidade instalada da EOL, o que garante a não violação do MUST contratado de cada EOL. Além disso, como as UFV são utilizadas para obter a capacidade de geração solar, não se faz necessário verificar a capacidade instalada dessas usinas, mas sim a caracterização do seu desempenho energético.

A análise geográfica desses pares é fundamental para compreender a influência das condições climáticas locais na complementaridade entre as fontes renováveis. As usinas foram escolhidas de acordo com a proximidade máxima de 35 km, garantindo que ambas as fontes operem sob condições meteorológicas semelhantes e minimizando impactos de variações climáticas regionais.

Após a análise dos critérios estabelecidos na metodologia, foram filtrados pares de usinas eólicas e solares em três estados brasileiros: Paraíba, Rio Grande do Norte e Bahia. A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos pares de usinas na Paraíba, enquanto na Figura 5 e na Figura 6 é ilustrado a localização das usinas no Rio Grande do Norte e na Bahia, respectivamente.

Tabela 2, são descritos os dados das usinas selecionadas para a análise, formando um conjunto de UH. Esses dados incluem a distância entre as usinas e a capacidade instalada da EOL, que também corresponde ao MUST contratado.

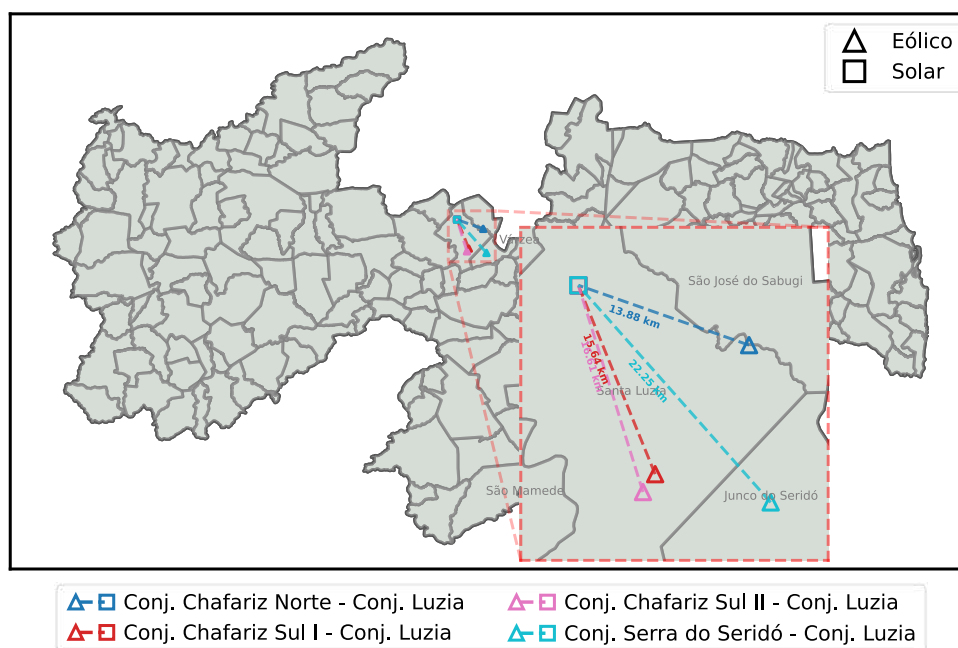
Tabela 2 – Dados das usinas.

UH	EOL	UFV	Distância (km)	Capacidade Instalada EOL ou MUST (MW)
1	Conj. Amazonas	Conj. Floresta	6,31	250,48
2	Conj. Areia Branca	Conj. Serra do Mel C	27,74	50,40
3	Conj. Brotas de Macaúbas	Conj. Sol do Sertão	30,11	95,19
4	Conj. Carcará II	Conj. Floresta	9,05	90,00
5	Conj. Chafariz Norte	Conj. Luzia	13,88	159,39
6	Conj. Chafariz Sul I	Conj. Luzia	15,64	142,06
7	Conj. Chafariz Sul II	Conj. Luzia	16,61	169,78
8	Conj. Serra do Mel A	Conj. Floresta	23,74	287,19
9	Conj. Serra do Mel II A	Conj. Serra do Mel C	17,17	211,36
10	Conj. Serra do Seridó	Conj. Luzia	22,25	242,00

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4, observa-se que os pares de usinas selecionados na Paraíba estão concentrados em uma região central do estado. Essa disposição possibilita avaliar a sinergia entre a geração solar e eólica dentro desse local específico, levando em consideração as condições climáticas regionais e a proximidade das usinas.

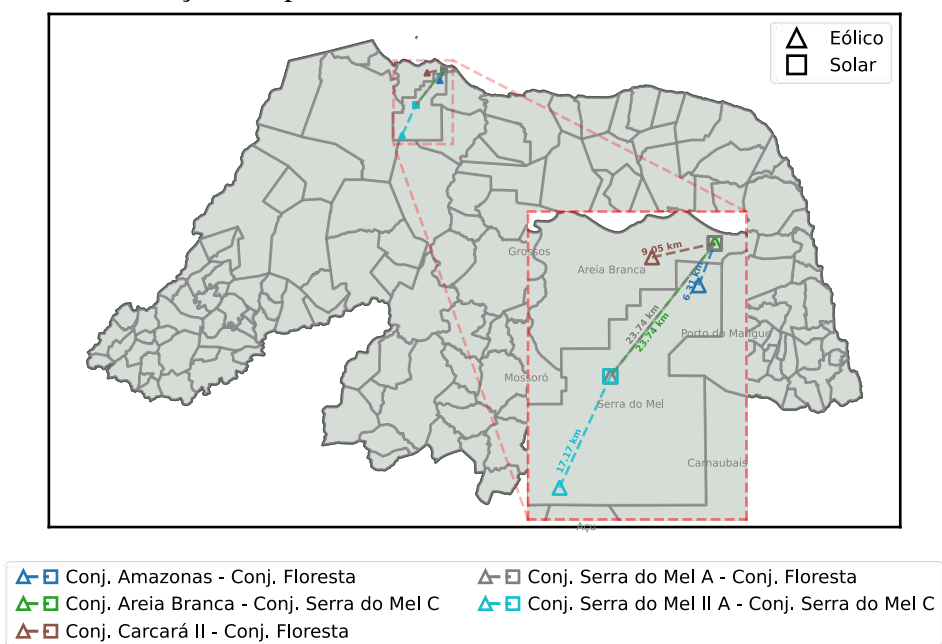
Figura 4 – Localização dos pares de usinas eólicas e solares na Paraíba.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5, observa-se uma concentração de cinco pares de usinas, formados por 7 usinas distintas, número superior ao dos outros estados analisados. Esse fato reflete a relevância do estado devido ao seu elevado potencial eólico e solar.

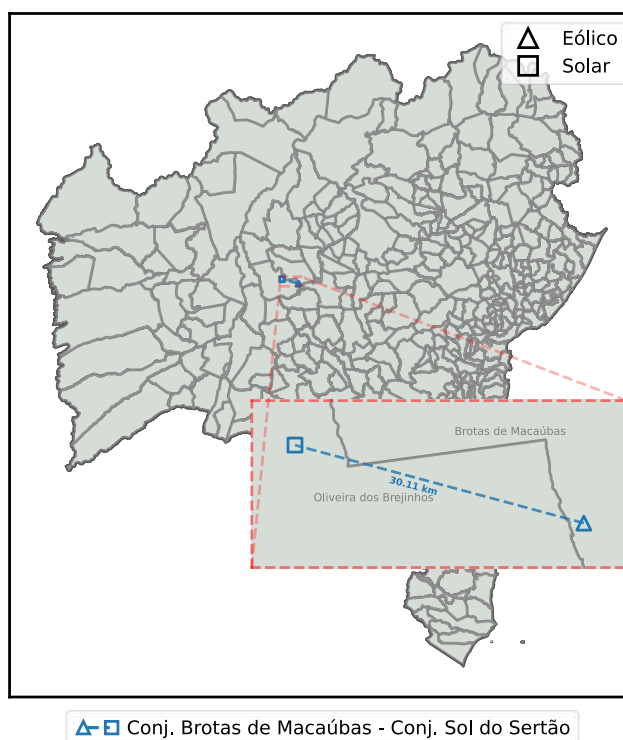
Figura 5 – Localização dos pares de usinas eólicas e solares no Rio Grande do Norte.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, a Figura 6 ilustra os pares selecionados na Bahia, um estado que apresenta grande potencial para ambas as fontes e se destaca pela alta irradiância solar.

Figura 6 – Localização do par de usinas eólica e solar na Bahia.



Fonte: Autoria própria.

A disposição dessas usinas nos diferentes estados possibilita uma análise comparativa da complementaridade energética sob distintas condições climáticas e geográficas, contribuindo para uma avaliação mais abrangente da viabilidade da hibridização no Brasil.

5.1.1 Coeficiente de Pearson

Os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados para cada conjunto de usinas apresentados na Tabela 2. Os resultados obtidos estão exibidos na Tabela 3, juntamente com sua classificação de acordo com os critérios estabelecidos por Schober (2018). Os coeficientes de correlação de Pearson obtidos variam de -0.23 a -0.49, indicando uma correlação negativa entre os fatores de capacidade das usinas eólicas e solares para todos os conjuntos analisados. Isso significa que, em geral, há um grau de complementaridade entre as duas fontes de energia, ainda que com intensidades distintas.

A maioria dos conjuntos analisados apresentou correlações classificadas como fracas, com coeficientes variando entre -0.23 e -0.37, conforme a classificação proposta por Schober

et al. (2018). Esses resultados indicam que, embora exista uma relação inversa entre a geração solar e eólica, essa relação não é muito expressiva, ou seja, que a variação da produção de uma fonte tem impacto limitado na compensação da outra. No entanto, mesmo uma correlação fraca ainda contribui para a estabilidade do sistema híbrido, reduzindo a intermitência da geração quando comparado ao uso isolado de uma única fonte.

Tabela 3 – Coeficiente de Pearson para cada conjunto de usinas.

UH	CP	Classificação (Schober, 2018)
1	-0,28	Fraca
2	-0,26	Fraca
3	-0,49	Moderada
4	-0,26	Fraca
5	-0,31	Fraca
6	-0,37	Fraca
7	-0,31	Fraca
8	-0,27	Fraca
9	-0,36	Fraca
10	-0,23	Fraca

Fonte: Autoria própria.

O destaque da análise é o conjunto Brotas de Macaúbas – Sol do Sertão, que apresentou um coeficiente de -0.49, sendo classificado como correlação moderada. Esse resultado indica que a complementaridade entre as usinas desse par é mais significativa, ou seja, quando a geração eólica diminui, a solar tende a aumentar em um grau mais expressivo e vice-versa. Esse tipo de correlação é altamente desejável em usinas híbridas, pois melhora a estabilidade da geração ao longo do tempo, reduzindo a necessidade de armazenamento ou despacho complementar de outras fontes.

Mesmo para os pares com correlação fraca, a relação inversa entre as gerações eólica e solar sugere que, em determinados períodos, a produção de uma fonte pode ajudar a compensar a queda da outra, ainda que em menor grau. Essa característica é fundamental para sistemas híbridos, pois contribui para um fornecimento de energia mais estável e previsível, reduzindo impactos causados por flutuações bruscas na geração individual das fontes.

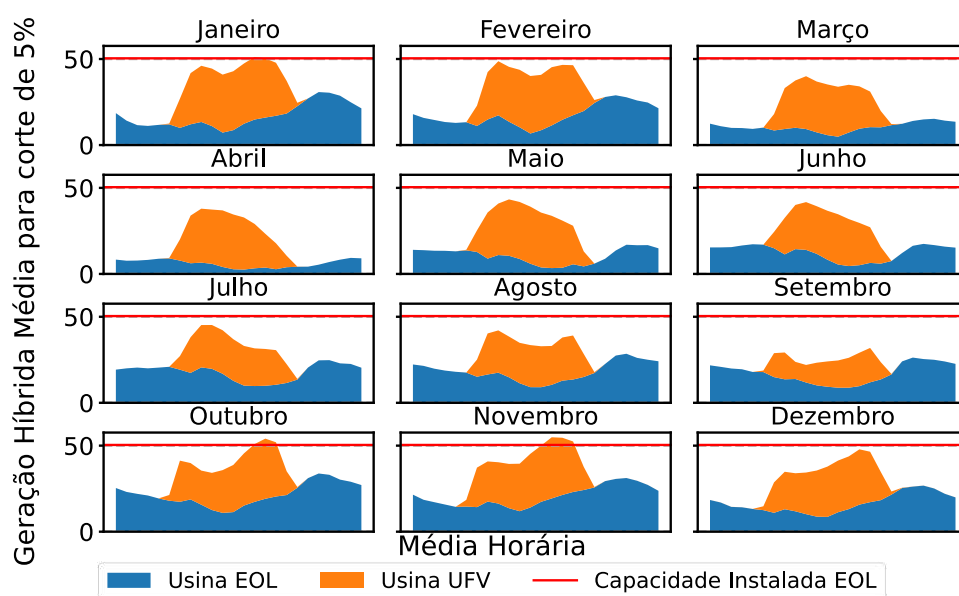
A análise dos CP confirma que a complementaridade entre energia eólica e solar não é uniforme e pode variar significativamente de acordo com a localização e as características específicas de cada conjunto de usinas. Essa variabilidade reforça a importância de um planejamento estratégico na escolha das usinas híbridas, considerando não apenas a proximidade geográfica, mas também a intensidade da relação entre as fontes. A correta seleção de pares de usinas eólico-solares pode otimizar o aproveitamento energético, reduzindo desperdícios e melhorando a eficiência do sistema.

5.1.2 Geração Média Mensal

Foram obtidos os valores de geração média horária para cada mês considerando um *curtailment* de 5%. Para melhor análise temporal, foram gerados gráficos que permitem visualizar a variação mensal da geração eólica e solar ao longo do ano, evidenciando o nível de complementaridade entre as fontes. Essa análise possibilita identificar os períodos do ano em que cada fonte predomina, permitindo avaliar a estabilidade da geração híbrida em comparação com a capacidade instalada das usinas eólicas.

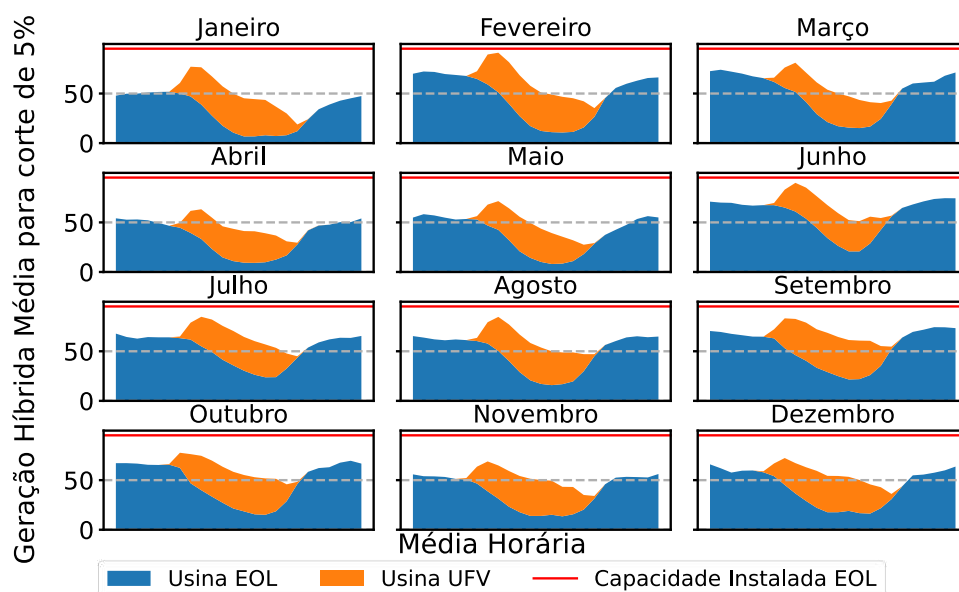
As gerações médias horárias mensais das usinas híbridas UH-2 e UH-3 são apresentadas nas Figuras 7 e Figura 8, respectivamente. Nos gráficos, a geração eólica está representada em azul, enquanto a geração fotovoltaica é ilustrada em laranja. A faixa vermelha indica a capacidade instalada da EOL, servindo como referência para análise do despacho energético.

Figura 7 – Médias horárias mensais da simulação da geração horária híbrida na UH-2 em 2023.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8 – Médias horárias mensais da simulação da geração horária híbrida na UH-3 em 2023.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 7 é apresentada a geração média horária mensal da UH-2, composta pela usina eólica Areia Branca e a usina fotovoltaica Serra do Mel C. Essa UH apresentou o menor coeficiente de correlação negativa em termos absolutos, conforme indicado na Tabela 3, sugerindo baixa complementaridade entre as fontes. No entanto, ao analisar o comportamento das curvas de geração, observa-se que, mesmo com menor correlação estatística, a presença da geração solar ainda contribui para reduzir a intermitência da geração eólica, especialmente nos meses de menor produção eólica.

A Figura 8 exibe os resultados para a UH-3, formada pela usina eólica Brotas de Macaúbas e a usina fotovoltaica Sol do Sertão. Esse conjunto apresentou o maior coeficiente de correlação negativa em termos absolutos, indicando maior grau de complementaridade entre as fontes. Observa-se que, nos horários em que a geração eólica se encontra em seu pico, a geração solar é reduzida, enquanto nos períodos de baixa geração eólica, há um aumento significativo da geração solar, evidenciando o efeito compensatório da hibridização.

Os presentes resultados reforçam a importância de analisar não apenas os coeficientes de correlação estatísticos, mas também o comportamento temporal das curvas de geração, pois mesmo em casos de menor correlação negativa, a presença da geração solar contribui para reduzir a intermitência da geração eólica, demonstrando o potencial da hibridização para aumentar a estabilidade do sistema elétrico.

5.2 ANÁLISE ENERGÉTICA

Nesta seção, são analisados os principais parâmetros energéticos das usinas híbridas estudadas, considerando diferentes configurações de capacidade instalada da UFV e seus impactos sobre a geração combinada. O objetivo é avaliar como a hibridização entre as fontes eólica e solar influencia a eficiência do sistema e a maximização do aproveitamento energético.

Para este estudo, eficiência está associada à capacidade de utilizar de forma mais constante e elevada a infraestrutura instalada (geradores eólicos, fotovoltaicos e linhas de transmissão), reduzindo períodos de baixa geração de uma das fontes pela compensação da outra. Por sua vez, a maximização do aproveitamento energético remete ao incremento efetivo de produção líquida ao longo do período de análise, ou seja, à quantidade de energia efetivamente injetada na rede depois de consideradas eventuais restrições de despacho. A operação conjunta de fontes com perfis de geração complementares expande as janelas de geração ativa, reduz sobreposições de picos e, conseqüentemente, aumenta o volume total de energia aproveitada, sem demandar grandes ampliações na rede de transmissão.

As análises incluem:

1. *Curtailments* em função da capacidade instalada da UFV, para quantificar as perdas energéticas associadas ao aumento da penetração solar e avaliar a relação entre dimensionamento e desperdício de energia;
2. Curvas de permanência da geração híbrida, permitindo visualizar o perfil de geração e o comportamento da disponibilidade de potência ao longo do tempo;
3. Ganho energético em função da capacidade instalada da UFV, para determinar o ponto ótimo de dimensionamento e o impacto da complementaridade na produção total de energia;
4. Ganho energético em função dos cortes de geração, possibilitando a análise da relação entre as perdas impostas por *curtailments* e os benefícios obtidos na estabilidade do fornecimento energético.

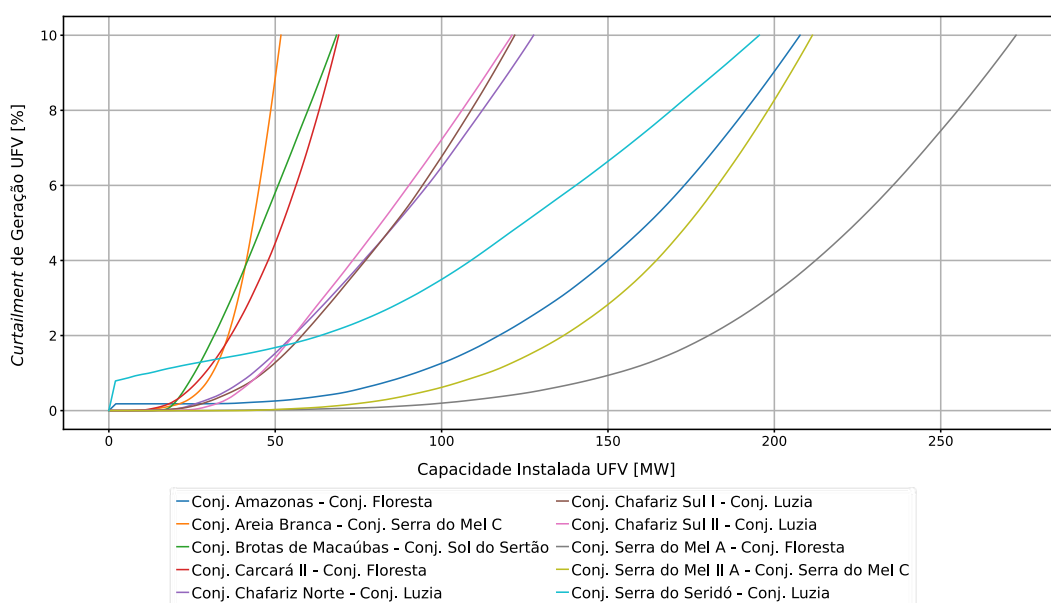
A avaliação desses fatores possibilita compreender a viabilidade operacional da hibridização e os limites técnicos do sistema híbrido, oferecendo uma visão detalhada sobre o potencial de otimização do uso das fontes renováveis.

Após as análises dos CP e das formas gráficas de complementariedade, faz-se necessário quantificar a capacidade de geração da usina solar a ser integrada ao sistema eólico existente. Para isso, na Figura 9 é apresentada a relação entre a capacidade instalada da UFV e os cortes

de geração (*curtailments*), evidenciando as perdas energéticas associadas ao aumento da penetração solar no sistema híbrido. Os *curtailments* foram calculados com base nos valores horários de geração, ao invés de médias mensais, proporcionando uma análise mais precisa das flutuações energéticas. Os valores percentuais de cortes na geração foram considerados em relação à UFV, uma vez que ela representa a expansão do sistema híbrido.

A partir dos resultados apresentados e das informações contidas na Tabela 2, observa-se que é possível dobrar a capacidade instalada da EOL e ainda manter os *curtailments* abaixo de 10%, relativamente ao novo montante energético adicionado ao sistema. Esse resultado indica um potencial significativo de expansão da geração solar sem perdas excessivas, o que reforça a viabilidade da hibridização.

Figura 9 – Cortes na geração em função da capacidade instalada da UFV.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que, à medida que a capacidade instalada da UFV aumenta, os *curtailments* crescem de maneira não linear. Isso indica que há um ponto a partir do qual a adição de capacidade solar começa a impactar significativamente a eficiência do sistema, devido a períodos de superávit de geração. Algumas usinas híbridas apresentam uma taxa de *curtailment* mais acentuada que outras, evidenciando que a escolha do local para instalação da UFV é um fator determinante para minimizar perdas. Isso está relacionado à variação dos perfis de geração eólica e solar entre os locais analisados.

Usinas híbridas que apresentaram maiores coeficientes de correlação negativa (melhor complementaridade) tendem a ter menores *curtailments*, uma vez que a geração eólica e solar

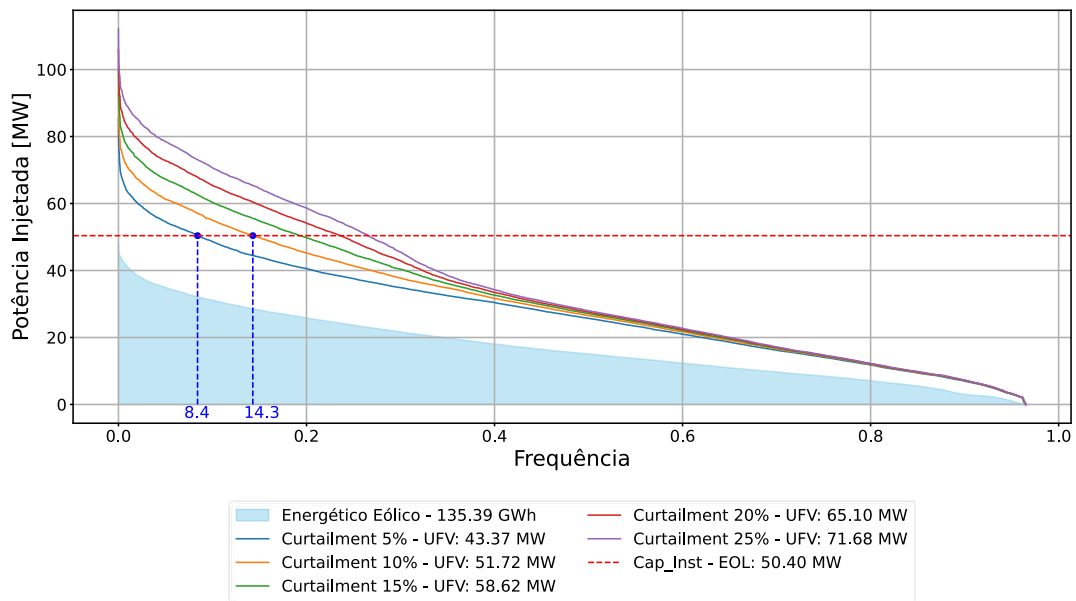
se compensam ao longo do tempo. Isso reforça a importância da seleção de pares de usinas com maior sinergia energética para otimizar a capacidade instalada, pois elas devem maximizar a geração e minimizar os cortes. Embora os resultados indiquem um limite técnico para a ampliação da capacidade instalada, a viabilidade econômica da adição de geração fotovoltaica depende de outros fatores, como custo de implementação, políticas tarifárias e incentivos regulatórios, que não são abordados neste trabalho.

5.2.1 Curva de Permanência

A curva de permanência permite inferir a vacância deixada pelo sistema eólico, o ganho energético e os cortes na geração resultantes da hibridização com a UFV. Esse tipo de análise é fundamental para compreender o aproveitamento da capacidade instalada e a frequência com que ocorrem os cortes de geração. Nas figuras 10 e 11 são apresentadas as curvas de permanência para os conjuntos UH-2 (Areia Branca + Serra do Mel C) e UH-3 (Brotas de Macaúbas + Sol do Sertão), respectivamente. Nessas figuras, o eixo das ordenadas representam a potência injetada no sistema, enquanto o eixo das abcissas representa a frequência de ocorrência dos valores das potências ao longo do período analisado, organizada em ordem decrescente. Dessa forma, é possível identificar rapidamente a porcentagem do tempo em que a geração alcança ou ultrapassa determinado valor de potência. A área azul clara corresponde à energia gerada pela EOL antes da hibridização. As linhas coloridas representam a geração híbrida sob diferentes valores de *curtailment*, permitindo visualizar como diferentes capacidades instaladas da UFV influenciam o comportamento energético. A linha horizontal pontilhada em vermelho representa a capacidade instalada da EOL, funcionando como referência visual para identificar períodos em que a potência gerada excede ou fica abaixo desse limite.

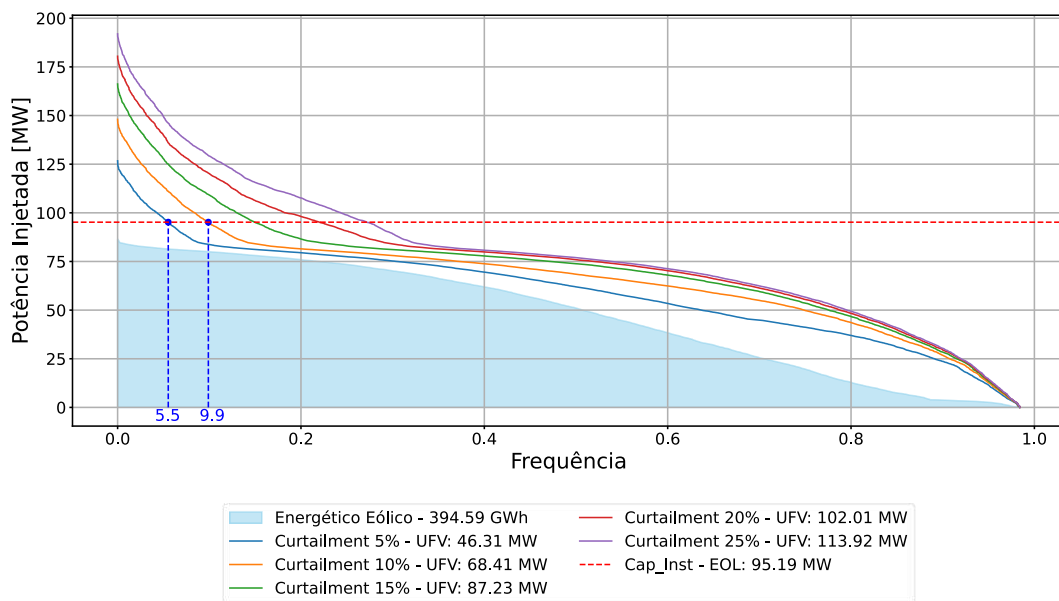
A curva de permanência do conjunto UH-2 evidencia que a usina eólica opera abaixo de 50% da sua capacidade instalada na maior parte do tempo, o que confirma uma vacância significativa no sistema. Quando a usina solar é integrada ao sistema híbrido, observa-se um aumento expressivo na potência entregue à rede, reduzindo os períodos de baixa geração. *Curtailements* de 5% resultam em cortes de geração durante aproximadamente 8,4% do tempo de operação, enquanto para *curtailements* de 10%, os cortes ocorrem em aproximadamente 14,3% do tempo. Como a UH-2 apresenta menor coeficiente de correlação negativa (em termos absolutos), os períodos de geração máxima da EOL e da UFV tendem a se sobrepor com maior frequência, o que leva a um aumento no *curtailment* conforme a capacidade da UFV cresce.

Figura 10 – Curvas de permanência para o conjunto UH-2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 – Curvas de permanência para o conjunto UH-3.



Fonte: Autoria própria.

Similarmente à UH-2, a EOL do conjunto UH-3, também opera com potência inferior a 50% da capacidade instalada na maior parte do tempo. No entanto, devido ao maior coeficiente de correlação negativa, a geração híbrida apresenta menores perdas por *curtailment*, uma vez que os picos de geração das fontes ocorrem em períodos distintos. Para um *curtailment* de 5%, os cortes de geração ocorrem durante aproximadamente 5,5% do tempo de operação, enquanto para 10% de *curtailment*, essa taxa sobe para 9,9%. A sinergia mais forte entre eólica e solar

resulta em um aumento mais gradual nos cortes de geração, indicando que essa configuração híbrida tem maior eficiência energética em comparação a UH-2.

Os resultados demonstram que, mesmo quando o CP indica uma correlação fraca, a hibridização ainda pode melhorar a estabilidade da geração elétrica. No entanto, a escolha do par de usinas influencia significativamente os cortes energéticos. Sistemas com maior correlação (UH-3) apresentam menor incidência de *curtailments*, enquanto pares com menor complementaridade (UH-2) enfrentam maiores perdas por sobreposição de geração. Dessa forma, a definição da capacidade instalada ótima da UFV deve considerar não apenas o coeficiente de correlação, mas também a curva de permanência, garantindo que a geração híbrida seja dimensionada para minimizar perdas e maximizar o aproveitamento energético.

5.2.2 Ganho energético

O ganho energético refere-se ao aumento da geração líquida de energia obtido a partir do conjunto híbrido, desconsiderando os valores que ultrapassam o MUST. O ganho energético percentual é definido como a relação entre o aumento da geração líquida e a geração do sistema eólico. Esse parâmetro é essencial para avaliar a eficiência da hibridização e o impacto dos *curtailments* na expansão do sistema.

Os resultados referentes aos ganhos energéticos para três valores de capacidade instalada da UFV são exibidos na Tabela 4. Considerando *curtailments* compreendidos entre 5% e 10% como aceitáveis, a capacidade instalada da UFV seria próxima da capacidade instalada do sistema eólico e, devido à sua complementariedade, esses valores não se somam de forma direta, elevando o aproveitamento das instalações, os ganhos energéticos ainda apresentam valores expressivos, indicando que há espaço para expansão fotovoltaica sem perdas excessivas.

Tabela 4 – Dados energéticos das UHs .

UH	<i>Curtailement</i>	Capacidade UFV [MW]	Ganho Energético [GWh]	Ganho Energético [%]
1	0%	25,66	54,58	5,59
	5%	162,25	328,45	33,67
	10%	207,72	398,37	40,83
2	0%	3,51	7,94	5,86
	5%	43,37	93,16	68,81
	10%	51,42	105,25	77,74
3	0%	4,00	10,23	2,59
	5%	46,31	112,50	28,51
	10%	68,41	157,43	39,90

4	0%	4,28	9,13	2,49
	5%	452,29	105,85	28,87
	10%	69,06	132,45	36,12
5	0%	6,47	13,27	2,15
	5%	86,44	168,37	27,25
	10%	127,66	235,562	38,12
6	0%	9,67	19,83	3,46
	5%	86,09	167,69	29,26
	10%	121,98	225,08	39,27
7	0%	12,42	25,76	3,61
	5%	81,87	159,47	22,61
	10%	121,16	223,58	31,70
8	0%	19,85	42,29	4,36
	5%	224,66	454,79	46,87
	10%	272,64	522,89	53,89
9	0%	20,14	45,55	6,51
	5%	174,34	374,52	53,50
	10%	211,44	430,29	61,47
10	0%	0,06	0,12	0,02
	5%	124,63	242,76	33,19
	10%	195,47	360,70	49,31

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os dados da Tabela 4, para *curtailments* compreendidos entre 5% e 10%, os ganhos percentuais são bastante expressivos, o que demonstra que a complementaridade entre as fontes solar e eólica contribui, significativamente para aumentar a geração líquida do conjunto híbrido. Na UH-2, ao elevar o *curtailment* de 0% para 5%, o ganho energético percentual salta de aproximadamente 5,86% para 68,81%, indicando que a instalação da UFV com cerca de 43,37 MW traz benefícios notáveis à eficiência operacional do conjunto híbrido.

Outro aspecto relevante que se destaca nos resultados é o comportamento diferenciado entre as usinas híbridas avaliadas. Enquanto algumas apresentam ganhos energéticos elevados com capacidades instaladas de UFV próximas à da EOL, como são os casos das UHs 1 e 8, que chegam a ultrapassar 40% de ganho com *curtailment* de 10%, outras já exibem valores elevados mesmo com capacidade instalada significativamente inferior à eólica, como são os casos das UHs 2, 9 e 10. Isso sugere que as características específicas de cada localização influenciam diretamente a definição da capacidade ideal da UFV.

A comparação entre as UHs também evidencia importantes diferenças. A UH-10, por exemplo, apresenta ganhos percentuais bastante expressivos, 33,19% e 49,31%, respectivamente, com capacidades fotovoltaicas relativamente altas, 124,63 MW e 195,47 MW, apesar de ter praticamente nenhum ganho com a capacidade inicial mínima (0,02% com 0,06 MW). Fica evidente que valores muito baixos de *curtailment*, próximos de 0%, limitam

severamente os ganhos energéticos possíveis pela restrição imposta à geração excedente. Já valores intermediários de *curtailment* (entre 5% e 10%) representam um ponto de equilíbrio, permitindo um incremento substancial de capacidade instalada da UFV e garantindo ganhos energéticos percentuais relevantes.

5.2.2.1 Valor Ótimo da Capacidade Instalada da UFV

A definição da capacidade instalada da UFV que integra um sistema híbrido deve ser feita considerando não apenas o ganho energético total, mas também os impactos dos *curtailments*. A expansão da geração solar deve ser dimensionada de forma a maximizar a energia útil aproveitada, evitando perdas excessivas que comprometam a viabilidade do sistema.

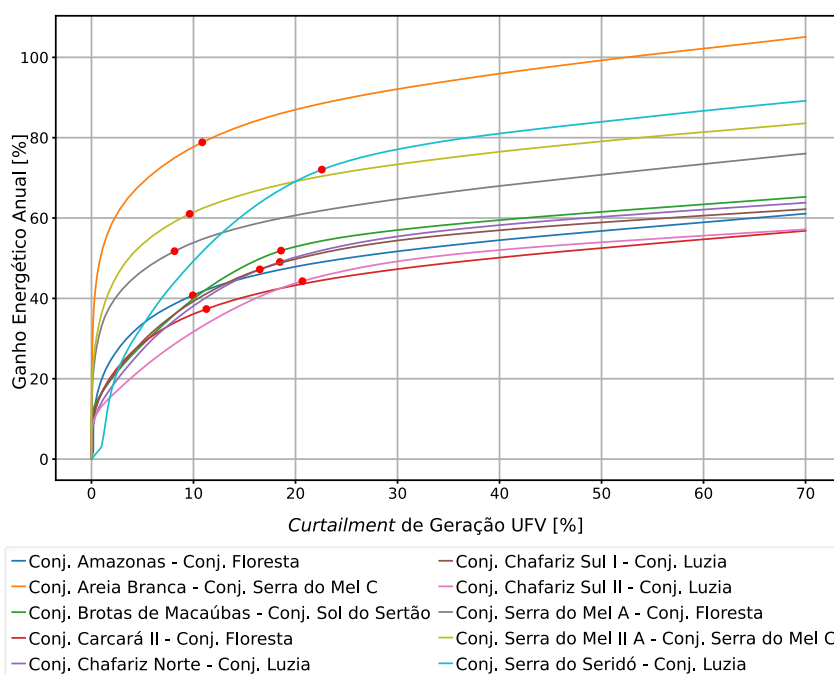
Outras análises foram realizadas considerando duas relações fundamentais, ganho energético em função dos *curtailments* e do ganho energético em função da capacidade instalada da UFV. A partir desses gráficos, é possível identificar pontos de curvatura máxima, que representam mudanças na direção da curva e indicam limiares críticos de saturação do ganho energético. Esses pontos são fundamentais para determinar a capacidade instalada ótima da UFV, pois indicam que acréscimos adicionais de capacidade resultam em ganhos marginais cada vez menores, tornando-se menos vantajosos do ponto de vista energético.

Na Figura 12, está representado o Ganho energético [%] versus *Curtailment* [%], onde se avalia como o aumento das restrições de corte afeta o aproveitamento do sistema híbrido. Observa-se que para valores de *curtailment* abaixo de 20%, o ganho energético cresce de forma acentuada. No entanto, a partir desse limite, a taxa de crescimento do ganho energético começa a se estabilizar, indicando que o aumento dos cortes de geração não resulta mais em ganhos proporcionais. Isso ocorre porque, à medida que mais capacidade solar é adicionada, os períodos de sobreposição entre geração solar e eólica aumentam, levando a um crescimento acentuado do *curtailment* e limitando o ganho líquido do sistema. Os pontos de curvatura máxima evidenciam que, além de determinado patamar de *curtailment*, a adição de novas UFVs não é mais energeticamente eficiente, pois grande parte da energia adicional gerada é desperdiçada devido às restrições operacionais.

Na Figura 13 apresenta-se o comportamento do Ganho energético [%] versus Capacidade Instalada da UFV [MW], demonstrando a relação entre a expansão da UFV e a maximização da energia gerada. Nota-se que, inicialmente, o ganho energético cresce proporcionalmente à capacidade instalada da UFV. No entanto, após um determinado ponto crítico (marcado em

vermelho no gráfico), a taxa de crescimento do ganho energético se reduz consideravelmente. Esse ponto indica o limiar em que a derivada do ganho energético em relação à capacidade instalada da UFV é constante, ou seja, a partir desse valor, acréscimos adicionais de capacidade resultam em ganhos marginais cada vez menores. Capacidades instaladas acima desses pontos críticos devem ser reavaliadas, pois, conforme observado na Figura 12, os cortes de geração aumentam enquanto os ganhos se estabilizam, reduzindo a efetividade da expansão fotovoltaica.

Figura 12 – Ganho Energético [%] versus *Curtailment* [%].

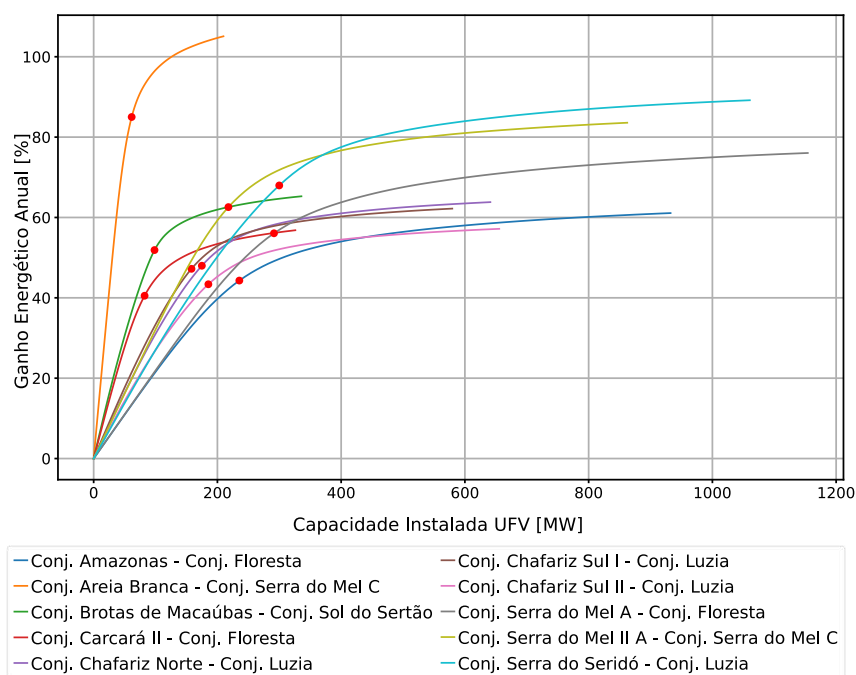


Fonte: Autoria própria.

Em alguns casos, como na UH-8 e UH-9, os ganhos energéticos ultrapassam 50%, demonstrando alta eficiência da hibridização. Ainda assim, a análise do *curtailment* é essencial para evitar desperdícios. Já para sistemas com baixos coeficientes de correlação entre as fontes, como a UH-2, o ganho energético atinge um limite rapidamente, evidenciando que a escolha dos pares de usinas influencia diretamente na eficiência da expansão fotovoltaica.

A partir dos resultados apresentados, constata-se que os ganhos são expressivos, no entanto, a expansão da UFV não deve ser feita de forma indiscriminada, pois há um ponto ótimo de capacidade instalada, além do qual os *curtailments* aumentam significativamente e o ganho energético passa a crescer de forma marginal. Além do mais, os cortes na geração podem ser minimizados adicionando bancos de bateria ou contratando um adicional de MUST, o que exigiria a realização de estudos de margem de escoamento de geração na região de interesse.

Figura 13 – Ganho Energético [%] versus Capacidade Instalada da UFV [MW].



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos ao considerar a capacidade da UFV considerando o ponto de curvatura máxima das curvas de ganho energético versus capacidade instalada (Ver Figura 13), enquanto a Tabela 6 exibe os resultados considerando o ponto de curvatura máxima das curvas de ganho energético versus *curtailments* (Ver Figura 12). Comparando ambas as abordagens, observa-se que a definição da capacidade instalada, quando definida estritamente pelo critério de maior ganho energético, resulta em cortes mais elevados, o que pode reduzir a eficiência operacional da usina híbrida.

Tabela 5 – Capacidade instalada da UFV determinada pelo critério da curvatura máxima das curvas de ganho energético versus capacidade instalada.

UH	Capacidade Instalada UFV [MW]	Ganho Energético [%]	<i>Curtailments</i> [%]	Energético Total [GWh]	<i>Curtailments</i> [GWh]	Saldo Energético [GWh]
1	235,45	44,30%	13,86%	1.338,31	69,54	1.268,77
2	61,43	85,00%	17,16%	226,64	23,84	202,80
3	98,34	51,89%	18,58%	552,61	46,73	505,88
4	82,30	10,52%	15,28%	488,45	26,80	461,65
5	174,85	47,99%	17,28%	852,54	61,93	790,61
6	158,07	47,22%	16,50%	790,26	53,48	736,78
7	185,40	43,38%	19,52%	936,95	74,21	862,74
8	291,45	56,06%	12,42%	1.437,07	77,12	1.359,95

9	217,77	62,58%	11,04%	1.083,64	54,58	1.029,06
10	299,94	67,97%	19,15%	1.110,90	114,79	996,11

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Capacidade instalada da UFV determinada pelo critério da curvatura máxima das curvas de ganho energético versus *curtailments*.

UH	Capacidade Instalada UFV [MW]	Ganho Energético [%]	<i>Curtailments</i> [%]	Energético Total [GWh]	<i>Curtailments</i> [GWh]	Saldo Energético [GWh]
1	207,19	40,76%	9,93%	1.343,33	43,86	1.299,47
2	52,96	78,85%	10,86%	242,15	13,01	229,14
3	98,35	51,89%	18,58%	599,33	46,43	552,90
4	72,42	37,35%	11,26%	503,62	17,38	486,24
5	181,33	49,05%	18,47%	921,08	68,66	852,42
6	158,07	47,21%	16,50%	843,74	53,48	790,26
7	192,02	44,28%	20,68%	1.017,54	81,40	936,14
8	256,48	51,74%	8,14%	1.472,30	44,49	1.427,81
9	209,06	61,03%	9,63%	1.127,19	45,50	1.081,69
10	332,07	72,06%	22,58%	1.258,59	153,77	1.104,82

Fonte: Autoria própria.

Observando a Tabela 5, os resultados indicam que, para algumas usinas híbridas, como UH-2 e UH-9, é possível alcançar altos ganhos energéticos (acima de 60%) sem que os *curtailments* se tornem excessivos. No entanto, outras configurações, como UH-10, apresentam ganhos expressivos (67,97%), mas com *curtailments* elevados (19,15%), indicando que a adição da capacidade instalada da UFV pode não ser vantajosa.

Ao definir a capacidade da UFV com base na curvatura máxima das curvas de ganho versus *curtailments*, observa-se que os *curtailments* são reduzidos de forma significativa para algumas usinas, enquanto o ganho energético permanece elevado (Ver Tabela 6). A UH-1, por exemplo, ao ter sua capacidade ajustada de 235,45 MW para 207,19 MW, reduz os cortes de 13,86% para 9,93%, sem comprometer drasticamente o ganho energético. Esse comportamento demonstra que um dimensionamento otimizado da UFV pode proporcionar um melhor equilíbrio entre geração e eficiência operacional.

Outro fator relevante na análise é o saldo energético, que representa a energia útil líquida gerada após os cortes. Embora, na prática, os *curtailments* não resultem em perdas diretas de energia, eles representam um uso subótimo da infraestrutura da UFV, uma vez que os equipamentos permanecem ociosos em momentos de excesso de geração. Assim, a avaliação

do saldo energético permite determinar qual configuração de capacidade instalada da UFV maximiza o aproveitamento da geração híbrida sem desperdiçar recursos de investimento.

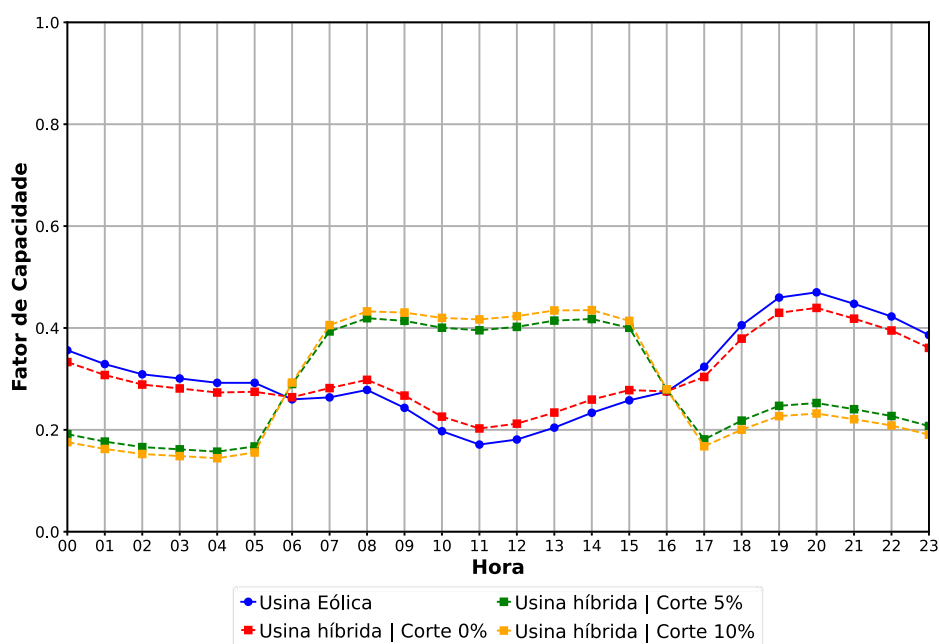
Os resultados reforçam que não há um valor único ideal para a capacidade instalada da UFV, mas sim um intervalo no qual o sistema híbrido se torna mais eficiente. A adoção de um critério baseado na curvatura máxima das curvas de ganho versus corte se mostrou mais eficiente em minimizar desperdícios e equilibrar a geração híbrida. Essa abordagem evita o sobredimensionamento da UFV e reduz os impactos do *curtailment*, garantindo um sistema mais otimizado do ponto de vista energético.

5.2.3 Comparação do Fator de Capacidade da Usina Eólica e das Usinas Híbridas

A análise do fator de capacidade das usinas híbridas permite avaliar o impacto da hibridização na disponibilidade energética do sistema. Para isso, foram geradas curvas comparativas do comportamento horário médio entre o fator de capacidade da usina eólica isolada e do conjunto híbrido, considerando os cenários de *curtailment* de 0%, 5% e 10%.

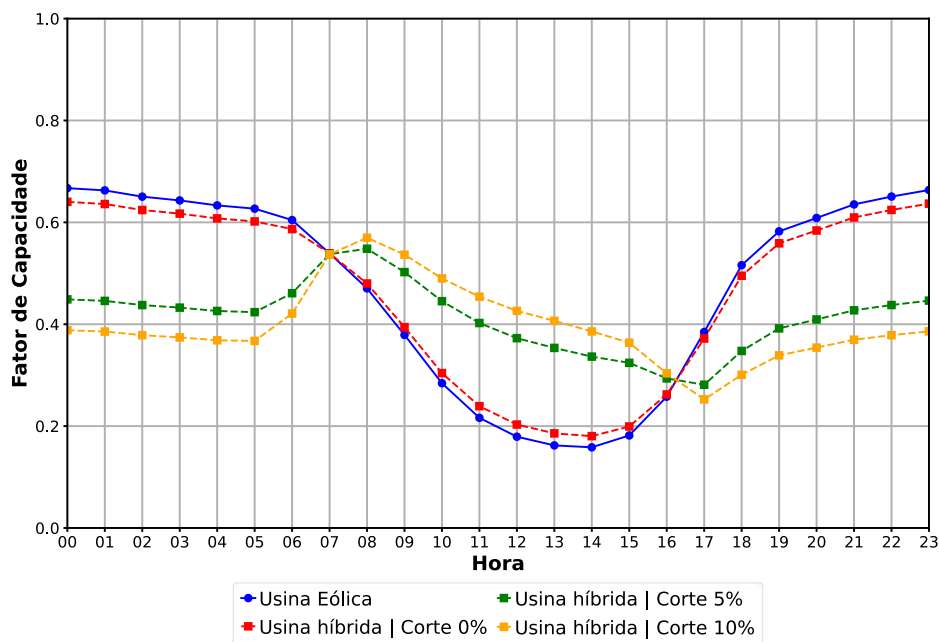
As figuras 14 e 15 apresentam os resultados para os conjuntos UH-2 (Areia Branca + Serra do Mel C) e UH-3 (Brotas de Macaúbas + Sol do Sertão), respectivamente. Essas análises são fundamentais para verificar como a adição de uma UFV afeta a eficiência do sistema híbrido e se a complementaridade entre as fontes reduz a intermitência da geração.

Figura 14 – Comparação do fator de capacidade da usina eólica e do conjunto híbrido para diferentes *curtailments* (UH-2: Areia Branca + Serra do Mel C).



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Comparação do fator de capacidade da usina eólica e do conjunto híbrido para diferentes *curtailments* (UH-3: Brotas de Macaúbas + Sol do Sertão).



Fonte: Autoria própria.

As curvas do FC da UH-2 indicam que, apesar da baixa correlação entre as fontes nessa localidade, o conjunto híbrido preenche de forma moderada a vacância deixada pela EOL. Observa-se que a adição da UFV ainda resulta em um impacto positivo na disponibilidade energética, garantindo um leve aumento no fator de capacidade do sistema híbrido. Para 0% de *curtailment*, o ganho do fator de capacidade é pouco expressivo, pois a complementaridade entre as fontes é baixa. A partir de *curtailments* de 5% e 10%, os ganhos tornam-se mais significativos, como evidenciado na Tabela 4, demonstrando que mesmo sem complementaridade forte, a adição da UFV aumenta o fator de capacidade do conjunto híbrido.

Para o caso da UH-3, conforme ilustrado na Figura 15, o fator de capacidade do conjunto híbrido apresenta um comportamento mais otimizado, evidenciando a forte complementaridade entre as fontes. Diferente da UH-2, a geração fotovoltaica consegue preencher exatamente a lacuna deixada pelo sistema eólico ao longo do dia, reduzindo significativamente os períodos de baixa geração. Para 0% de *curtailment*, o ganho no fator de capacidade do conjunto híbrido ainda é modesto, mas se torna mais expressivo para *curtailments* de 5% e 10%, conforme observado na Tabela 4. Com *curtailment* de 5% e 10%, a curva indica que o conjunto híbrido se mantém eficiente na compensação da intermitência da geração eólica, permitindo valores mais altos de capacidade instalada fotovoltaica sem que os ganhos marginais se reduzam abruptamente. A redução dos ganhos marginais na UH-3 é menos acentuada do que na UH-2,

pois a melhor complementaridade entre as fontes minimiza os períodos de sobreposição máxima, reduzindo a necessidade de cortes de geração. Esse comportamento indica que a UH-3 possui um potencial maior de expansão da UFV com menores perdas, enquanto na UH-2 os *curtailments* aumentam rapidamente à medida que a capacidade fotovoltaica cresce.

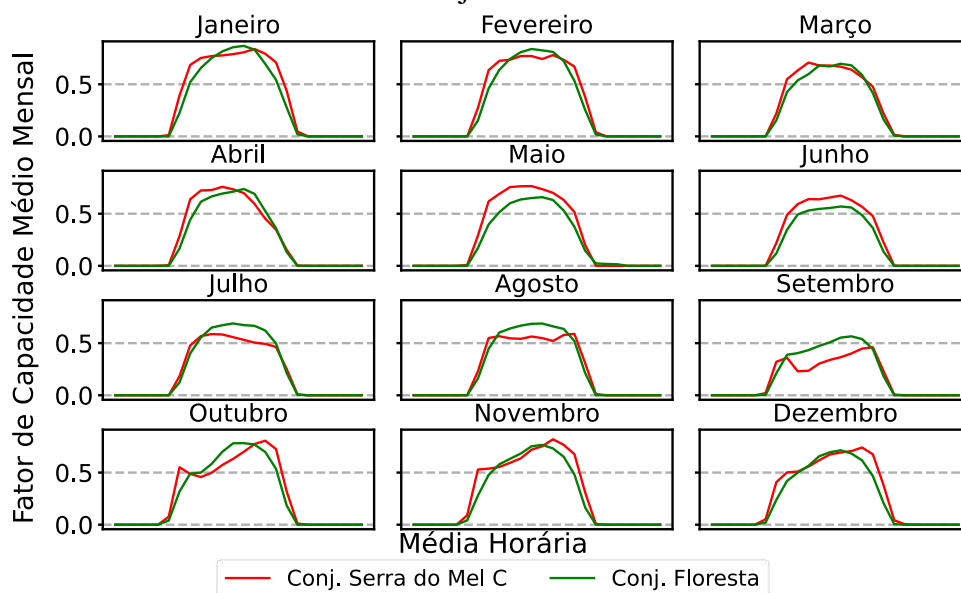
É importante destacar que o fator de capacidade do conjunto híbrido é calculado dividindo-se a soma da geração eólica e solar pela soma das capacidades instaladas de ambas as fontes. Assim, em períodos noturnos ou de baixa irradiância, a parcela solar da geração é praticamente nula, mas a capacidade instalada da usina fotovoltaica permanece no denominador do FC. Isso faz com que, nesses horários, o fator de capacidade do sistema híbrido possa ser inferior ao fator de capacidade da usina eólica isolada, pois o numerador (geração total) se aproxima apenas da geração eólica, enquanto o denominador (capacidade total) inclui tanto a usina eólica quanto a solar. Por outro lado, durante o dia, quando a radiação solar é mais intensa, há um acréscimo significativo no fator de capacidade híbrido, pois a geração fotovoltaica adiciona potência ao numerador, elevando o índice e compensando as reduções pontuais da noite. Portanto, o mais relevante é observar o aumento do fator de capacidade nos períodos em que há geração solar, demonstrando que a hibridização contribui para um melhor aproveitamento global do sistema ao longo do dia.

5.3 AVALIAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES

A confiabilidade dos dados utilizados na determinação da capacidade de geração da UFV é um fator essencial para garantir a precisão das análises. Para verificar a qualidade e aderência dos dados empregados, foi realizada uma comparação entre os fatores de capacidade do Conj. Floresta e do Conj. Serra do Mel C ao longo do ano de 2024. A usina Serra do Mel C está localizada na mesma região geográfica da Serra do Mel A, tornando-a uma referência adequada para avaliar a consistência dos dados utilizados na determinação da capacidade instalada da UFV.

A Figura 16 ilustra os fatores de capacidade médios mensais de ambas as usinas. Por inspeção, observa-se uma forte similaridade entre os conjuntos de dados, confirmando que as séries temporais utilizadas para a análise possuem características estatísticas semelhantes. Contudo, de julho a dezembro, os fatores de capacidade do Conj. Serra do Mel C apresentam valores atípicos que não seguem o padrão das demais observações. Esse comportamento pode ter sido causado por erros na coleta dos dados, falhas operacionais, restrições de despacho da usina ou mesmo intervenções técnicas para evitar sobrecarga na rede elétrica da região.

Figura 16 – Fator de capacidade médio mensal das usinas fotovoltaicas Conj. Serra do Mel C e Conj. Floresta.



Fonte: Autoria própria.

A fim de quantificar a aderência dos conjuntos de dados e mensurar o impacto de possíveis discrepâncias, foram calculadas métricas estatísticas, apresentadas na Tabela 7. As métricas estatísticas obtidas indicam uma boa correspondência entre os dados do fator de capacidade do Conj. Floresta e do Conj. Serra do Mel C, corroborando a adequação dos dados utilizados para a modelagem da UFV. O MSE de 0,0217 sugere que as diferenças entre os valores observados e preditos são relativamente pequenas, indicando um nível moderado de erro. O RMSE de 0,1474 reforça essa interpretação, demonstrando que a magnitude dos desvios individuais não compromete a confiabilidade do conjunto de dados como um todo. O R^2 (Coeficiente de Determinação) de 0,8101 revela que 81,01% da variabilidade dos dados de um conjunto pode ser explicada pelo outro, evidenciando um alto grau de aderência entre as séries temporais analisadas.

Tabela 7 – Valores das métricas estatísticas calculadas.

MSE	Valor
MSE (Erro Quadrático Médio)	0,0217
RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio)	0,1474
R² (Coeficiente de Determinação)	0,8101

Fonte: Autoria própria.

A análise dos resultados confirma que os dados utilizados na determinação da capacidade instalada da UFV possuem qualidade satisfatória para as análises energéticas realizadas. No entanto, os valores atípicos entre julho e dezembro afeta a precisão das métricas, e um tratamento de dados mais preciso, poderia resultar em estimativas mais confiáveis. Assim, técnicas de tratamento de dados, como a remoção de *outliers* ou a interpolação estatística, podem ser aplicadas para aprimorar ainda mais a acurácia das projeções.

A avaliação estatística dos dados utilizados reforça a robustez das análises realizadas e demonstra que as informações empregadas são representativas da realidade operacional do sistema híbrido em estudo.

5.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

No presente capítulo, foram apresentados os principais resultados sobre a complementaridade entre energia eólica e solar, bem como sobre a viabilidade energética de usinas híbridas distribuídas na Paraíba, Rio Grande do Norte e Bahia. A análise de dez pares de UH contemplou diferentes níveis de *curtailment* e CI fotovoltaicas, demonstrando a existência de correlação entre as fontes de geração eólica e solar, com variações entre -0,23 e -0,49, o que evidencia uma sinergia, ainda que em distintos graus de intensidade. Em geral, verificou-se ser possível dobrar a capacidade solar, em muitos casos, sem ultrapassar 10% de cortes relativos à nova geração adicionada, o que sinaliza um espaço considerável para a expansão da fonte fotovoltaica em parques eólicos existentes.

A análise das curvas de permanência evidenciou que os parques eólicos operam, em boa parte do tempo, abaixo de 50% de sua capacidade, sugerindo uma ociosidade aproveitável pela geração solar, sobretudo em horários de pico que não se sobrepõem aos picos eólicos. Todavia, em situações em que a correlação entre as fontes é menor, há maior sobreposição de picos, resultando em cortes de geração mais expressivos. Em contrapartida, pares com complementaridade moderada, como Brotas de Macaúbas – Sol do Sertão, apresentaram menor incidência de *curtailments* e maior ganho energético.

As avaliações de ganho, tanto em função do corte quanto da CI solar, mostraram pontos de curvatura máxima que servem de limiares para um dimensionamento ótimo. Acima desses pontos, o crescimento do *curtailment* ofusca os ganhos marginais de energia, requerendo um balanceamento rigoroso na escolha da potência fotovoltaica a adicionar. Em algumas combinações, os ganhos chegaram a ultrapassar 50% de incremento energético, comprovando

o potencial da integração eólica-solar, embora, em certas situações, a expansão excessiva da UFV mostre-se ineficiente devido aos cortes elevados.

A qualidade dos dados foi atestada pela comparação entre conjuntos fotovoltaicos próximos, que apresentaram boa aderência estatística, mesmo com valores atípicos pontuais. Essa confiabilidade reforçou a solidez das análises e a aplicabilidade dos resultados. Concluiu-se, assim, que a integração solar-eólica pode elevar significativamente a produção de energia renovável no Nordeste brasileiro sem demandar grandes ampliações na rede de transmissão, desde que se faça uma seleção criteriosa das usinas a serem hibridizadas e um dimensionamento equilibrado dos parques solares, evitando perdas operacionais que possam comprometer a eficiência do sistema.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para a avaliação da complementaridade entre geração eólica e solar no Nordeste do Brasil, utilizando dados reais de geração e fator de capacidade disponibilizados pelo ONS. Os desenvolvimentos permitiram determinar a capacidade ótima de uma usina fotovoltaica (UFV) a ser hibridizada com uma usina eólica (EOL), levando em conta diferentes cenários de *curtailments* e ganho energético. Ao longo deste estudo, foram analisados dez pares de usinas eólico-solares, proporcionando uma visão detalhada da sinergia entre essas fontes e do potencial da geração híbrida no sistema elétrico nacional.

A análise dos dados revelou que a complementaridade entre geração eólica e solar é altamente significativa no Nordeste do Brasil, evidenciando o grande potencial da integração dessas fontes para melhorar a estabilidade da geração renovável. Os resultados demonstraram que a energia solar atinge seu pico durante o dia, como deveria de ser, enquanto a energia eólica tem maior predominância à noite, favorecendo um uso otimizado dos recursos naturais disponíveis e reduzindo a intermitência da geração. Essa característica torna a hibridização uma estratégia essencial para aumentar a confiabilidade e eficiência do sistema elétrico brasileiro, reduzindo a necessidade de acionamento de usinas térmicas e minimizando impactos ambientais. A avaliação das curvas de permanência revelou que, em diversos cenários, as usinas eólicas operam abaixo da capacidade instalada na maior parte do tempo, reforçando a importância de um dimensionamento preciso da UFV para melhor aproveitamento da infraestrutura elétrica existente.

Os resultados obtidos demonstraram que, para determinadas configurações híbridas, é possível dobrar a capacidade instalada de uma usina eólica sem que os *curtailments* ultrapassem 10%, tornando a expansão fotovoltaica viável do ponto de vista energético. No entanto, também foi constatado que o aumento indiscriminado da capacidade da UFV pode resultar em perdas energéticas significativas, tornando essencial a escolha de um ponto ótimo de instalação, no qual a geração híbrida seja maximizada sem comprometer a eficiência operacional do sistema. A seleção estratégica dos pares de usinas revelou que conjuntos com maior coeficiente de correlação negativa apresentam melhor desempenho, pois as fontes geram em momentos complementares, reduzindo a incidência de sobreposição de picos e minimizando os cortes de geração.

Dentre as principais contribuições deste estudo, destaca-se a proposição de um critério otimizado para a definição da capacidade instalada da UFV, baseado na curvatura máxima das curvas de ganho energético versus corte. Esse critério demonstrou ser mais eficiente do que simplesmente maximizar o ganho energético, pois equilibra a expansão fotovoltaica e minimiza desperdícios devido a *curtailments* elevados.

A qualidade dos dados empregados foi um fator crucial na confiabilidade das análises. A comparação entre séries históricas de fator de capacidade revelou boa aderência estatística, com coeficiente de determinação (R^2) superior a 80%, garantindo que as estimativas de geração fotovoltaica utilizadas no modelo são representativas da realidade operacional do sistema elétrico. No entanto, observou-se a presença de valores atípicos nos meses de julho a dezembro, os quais podem estar relacionados a erros na medição, restrições operacionais da usina ou limitações de despacho para evitar sobrecarga da rede. A identificação dessas discrepâncias sugere que futuras pesquisas possam aprimorar ainda mais a precisão dos modelos por meio do uso de técnicas avançadas de tratamento de dados e interpolação estatística.

Embora os resultados energéticos sejam promissores, a viabilidade da implementação prática de usinas híbridas em larga escala requer uma análise econômica detalhada. Aspectos como investimentos iniciais, custos operacionais e retorno financeiro precisam ser considerados para determinar a atratividade desse modelo de geração para investidores e operadores do setor elétrico. A integração estratégica de fontes renováveis não apenas maximiza a eficiência energética, mas também pode gerar benefícios financeiros substanciais. O balanceamento adequado da geração ao longo do dia reduz a necessidade de capacidade de reserva, evita sobrecargas na infraestrutura de transmissão e melhora a eficiência do despacho energético, resultando em menores custos operacionais e uso mais eficiente dos ativos do setor elétrico.

Os resultados deste estudo reforçam que a hibridização de usinas eólicas e solares pode ser uma solução viável e eficiente para o planejamento da expansão do setor elétrico brasileiro, desde que a capacidade instalada das UFVs seja definida com base em critérios técnicos bem fundamentados. A abordagem desenvolvida mostrou-se energeticamente eficiente e alinhada com os desafios atuais do setor, contribuindo para um planejamento mais inteligente da matriz elétrica nacional. A crescente participação das energias renováveis no sistema elétrico torna essencial o uso de metodologias robustas para avaliar a complementaridade entre fontes e definir estratégias para mitigar os desafios da intermitência.

Com base nos resultados obtidos, algumas perspectivas podem ser exploradas em estudos futuros. A análise econômica detalhada da viabilidade da hibridização é um aspecto essencial para consolidar essa estratégia no planejamento energético do país. A integração de sistemas de

armazenamento de energia, como baterias, poderia ser investigada para avaliar seu impacto na redução dos *curtailments* e no aproveitamento da energia gerada em momentos de baixa demanda. Além disso, a consideração das restrições operacionais da rede elétrica permitiria avaliar de forma mais abrangente os desafios técnicos e regulatórios associados à implantação de usinas híbridas. Estudos adicionais poderiam expandir a análise para diferentes regiões do Brasil, incorporando variações climáticas e particularidades do despacho energético em cada submercado.

Dessa forma, este trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre a integração eficiente de fontes renováveis no sistema elétrico brasileiro, propondo uma solução tecnicamente embasada e energeticamente viável para a expansão da geração híbrida. A metodologia desenvolvida pode servir como base para pesquisas futuras e para a formulação de políticas energéticas que incentivem a implementação de usinas híbridas no país. Com a crescente demanda por fontes renováveis e os desafios impostos pela intermitência da geração, abordagens como a aqui desenvolvida serão essenciais para garantir um sistema elétrico mais estável, confiável e sustentável.

6.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas observações feitas ao longo deste estudo, identificam-se diversas oportunidades para aprimorar e expandir a pesquisa sobre hibridização de usinas eólico-fotovoltaicas. A seguir, são sugeridos trabalhos futuros que podem contribuir para o desenvolvimento e a otimização desse modelo energético:

1. Análise da Viabilidade Econômica da Hibridização:
 - a. Realizar um estudo detalhado sobre custos de implantação, operação e manutenção de usinas híbridas;
 - b. Comparar diferentes modelos de negócios para usinas híbridas, considerando regimes regulatórios, incentivos fiscais e contratos de compra de energia;
 - c. Avaliar o impacto financeiro dos *curtailments* e a relação custo-benefício da expansão da UFV em diferentes cenários.
 2. Integração de Sistemas de Armazenamento de Energia:
 - a. Investigar o uso de baterias estacionárias para mitigar perdas por *curtailment* e melhorar a confiabilidade da geração híbrida;
-

- b. Avaliar o dimensionamento ideal do armazenamento, levando em conta fatores como tempo de carga e descarga, degradação das baterias e custos de investimento;
 - c. Simular cenários em que a energia armazenada pode ser utilizada para reduzir a dependência da geração térmica, contribuindo para a descarbonização do setor elétrico.
 - 3. Consideração das Restrições da Rede Elétrica:
 - a. Incorporar as limitações operacionais do sistema de transmissão e distribuição na modelagem da capacidade instalada da UFV;
 - b. Avaliar os impactos da hibridização na estabilidade da rede elétrica, considerando a capacidade de escoamento da energia gerada;
 - c. Estudar a viabilidade de medidas de flexibilização da rede, como tecnologias de controle inteligente e gerenciamento dinâmico do despacho energético.
 - 4. Expansão da Análise para Diferentes Regiões do Brasil:
 - a. Aplicar a metodologia desenvolvida para avaliar a hibridização em outros submercados do Sistema Interligado Nacional (SIN), considerando variações climáticas e meteorológicas regionais;
 - b. Investigar o impacto da sazonalidade da geração eólica e solar em regiões com padrões de vento e radiação solar distintos;
 - c. Identificar potenciais polos para implantação de usinas híbridas, levando em conta a infraestrutura elétrica e os recursos energéticos disponíveis.
 - 5. Aprimoramento da Modelagem Estatística e Tratamento de Dados:
 - a. Desenvolver técnicas mais avançadas para remoção e correção de outliers em séries temporais de geração solar e eólica;
 - b. Explorar o uso de modelos preditivos baseados em aprendizado de máquina e inteligência artificial para prever a geração híbrida com maior precisão;
 - c. Incorporar análises de incerteza e confiabilidade dos dados meteorológicos, avaliando o impacto dessas variações na tomada de decisão sobre a hibridização.
-

6. Avaliação dos Benefícios Ambientais e Regulatórios:

- a. Analisar os ganhos ambientais proporcionados pela hibridização, considerando redução de emissões de CO₂, diminuição do uso de combustíveis fósseis e menor necessidade de despacho térmico;
- b. Estudar mudanças regulatórias e políticas públicas que possam incentivar a implantação de usinas híbridas no Brasil;
- c. Comparar diferentes modelos tarifários e mecanismos de incentivo adotados em outros países para o setor de energias renováveis.

7. Investigação sobre a Operação de Usinas Híbridas em Tempo Real:

- a. Desenvolver estratégias de despacho otimizado para usinas híbridas, considerando condições meteorológicas em tempo real e previsões de curto prazo;
- b. Implementar sistemas de controle inteligentes para ajuste dinâmico da geração e mitigação de flutuações na rede elétrica;
- c. Avaliar o impacto da hibridização na confiabilidade do suprimento energético, considerando diferentes cenários de intermitência das fontes renováveis.

A inclusão de estudos econômicos detalhados permitiria aprofundar a avaliação da viabilidade financeira dessas usinas, ajudando na tomada de decisões estratégicas de investimentos. A integração de sistemas de armazenamento é promissora, podendo solucionar desafios importantes relacionados aos *curtailments* e à intermitência, além de colaborar para a estabilidade operacional do sistema. Expandir a aplicação da metodologia para diferentes regiões e cenários climáticos no Brasil tornaria os resultados mais abrangentes, contribuindo para uma maior generalização e adaptação dos modelos propostos. O aprimoramento das técnicas estatísticas e dos modelos de previsão, utilizando inteligência artificial, seria uma evolução metodológica valiosa, aumentando a precisão das análises e o suporte à decisão em tempo real. A avaliação dos benefícios ambientais e regulatórios reforça o papel estratégico da hibridização na transição energética nacional, ao mesmo tempo em que auxilia a formulação de políticas públicas mais assertivas. Por fim, investigar estratégias operacionais em tempo real possibilitaria uma gestão mais eficiente e segura das usinas híbridas, reforçando sua relevância para o futuro sustentável do setor elétrico brasileiro.

6.2 PUBLICAÇÕES

Os resultados desta pesquisa foram divulgados por meio da publicação dos seguintes artigos em congressos tecnocientíficos:

SILVA FILHO, M. Q.; DIAS, P. V.; SOARES, R. A.; FERNANDES Jr., D.; MACHADO, E. P.. Análise de Complementaridade Solar em Usinas Híbridas: Utilização do Fator de Capacidade de Usinas Fotovoltaicas Vizinhas. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2024, Rio de Janeiro. XXV Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2024, 2024.

SILVA FILHO, M. Q.; FERNANDES Jr., D.; DIAS, P. V.; SOARES, R. A.; MACHADO, E. P.. Metodologia e Análise de Complementaridade Solar em Usinas Híbridas: Utilização do Fator de Capacidade de Usinas Fotovoltaicas Vizinhas. In: Brazil Windpower, 2024, São Paulo. Brazil Windpower 2024, 2024.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Regulamentação para o funcionamento de Centrais Geradoras Híbridas (UGH) e centrais geradoras associadas. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-954-de-30-de-novembro-de-2021-364715864>. Acesso em: 25 fev. 2025.

ANEEL. Regras dos serviços de transmissão de energia elétrica. Módulo 5 – Acesso ao Sistema. Agência Nacional de Energia Elétrica 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/regras-de-transmissao>. Acesso em: 20 jun. 2024.

BASYIR, M., NASIR, M., SURYATI, S., MELLYSSA, W. Determination of Nearest Emergency Service Office using Haversine Formula Based on Android Platform. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 5(2), 270-278. Disponível em: <https://doi.org/10.24003/emitter.v5i2.220>. Acesso em: 25 fev. 2025.

BRENT, R. P. *Algorithms for Minimization without Derivatives*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1973. 195 p. (Prentice-Hall Series in Automatic Computation, edited by George Forsythe).

CARMO, C. R. S., SILVA, J. R. M. Aprendizado de Máquina e Prestação de Serviços de Armazenamento de Dados: Métricas Para Análise e Validação de Algoritmos Previsores. *GETEC Gestão, Tecnologia e Ciências*. Monte Carmelo: v. 12 n. 38, p.123-144, 2023.

CORREA, S. M. B. B. Probabilidade e estatística. 2 ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual: 2003.

COUTO, A., ESTANQUEIRO, A. Assessment of wind and solar PV local complementarity for the hybridization of the wind power plants installed in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128728>. Acesso em: 25 fev. 2025.

CROCE, L. F. Análise da Atratividade da Geração Híbrida de Energia Elétrica de Acordo com o Atual Cenário do Mercado Brasileiro. 2023. 137f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e gestão de sistemas energéticos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2023.

EPE. Avaliação da Geração de usinas Híbridas Eólico-Fotovoltaicas: Proposta metodológica e estudos de caso. Empresa de Pesquisa Energética. 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-usinas-hibridas-no-contexto-do-planejamento-energetico>. Acesso em: 25 fev. 2025.

EPE. Usinas Híbridas: uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento. Empresa de Pesquisa Energética. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Usinas-Hibridas-uma-analise-qualitativa-de-temas-regulatorios-e-comerciais-relevantes-ao-planejamento>. Acesso em: 25 fev. 2025.

EPE. Usinas híbridas no contexto do planejamento energético. Empresa de Pesquisa Energética. 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-usinas-hibridas-no-contexto-do-planejamento-energetico>. Acesso em: 10 fevereiro. 2025.

FREITAS, B. B.; BEZERRA, B. R. A.; TEIXEIRA JÚNIOR, C. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, C. F.; ASSIS, D. P.; QUEIROZ FILHO, E. de S.; NASCIMENTO, F. T. do; OLIVEIRA, F. W. S. de; ALVES, G. F.; ALVES, J. V. T.; SILVA, M. F. de A.; SILVA, M. C. da; COSTA, M. de S.; NUNES, O. J. de M.; CARVALHO, P. C. M.; PEREIRA, R. C.. Methodology using idle capacity of hydroelectric substations for sizing floating photovoltaic plants. *IEEE Latin America Transactions*, v. 22, p. 771-777, 2024. DOI: 10.1109/TLA.2024.10669249.

GONÇALVES, A. R. Hibridização de Usinas Solares e Eólicas e Sua Complementariedade no Brasil. 2021. 175f. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

HYNDMAN, R.J. and Koehler, A.B. Another Look at Measures of Forecast Accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22, 679-688, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

JURASZ, J., CANALES, F. A., KIES, A., GUEZGOUZ, M., BELUCO, A. A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. *Solar Energy*, v.195, 703-724, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>. Acesso em: 25 fev. 2025.

KAGAN, N., SCHMIDT, H. P., BARIONI DE OLIVEIRA, C. C., KAGAN, H.. Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência. São Paulo, Brasil: Blucher, 2017. ISBN 9788521204725.

KIM, B., SUH, D. A Hybrid Spatio-Temporal Prediction Model for Solar Photovoltaic Generation Using Numerical Weather Data and Satellite Images. *Remote Sens*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12223706>. Acesso em 25 fev. 2025.

KREYSZIG, Erwin. *Advanced Engineering Mathematics*. 10. ed. New York: John Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-45836-5.

LUZ, T. J. da; UNSIHUAY VILA, C.; AOKI, A. R.. Complementarity between renewable energy sources and regions – Brazilian case. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 66, 2023. DOI: 10.1590/1678-4324-2023220442.

OLIVEIRA SILVA, L. S., SILVA JUNIOR, R. S., LYRA, R. F. F., MARTINS, F. R., MOURA, M. A. L., LEAL JUNIOR, J. B. V., MUNIZ, E. S., VASCONCELOS, L. N. Avaliação da complementaridade entre os recursos eólico-solar e considerações sobre estabilidade no setor elétrico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 1942–1960, 2024. Disponível em: doi: 10.26848/rbgf.v17.3.p1942-1960. Acesso em: 25 fev. 2025.

ONS. Dados Abertos, 2025a. Disponível em: <https://dados.ons.org.br/>. Acesso em: 25 fev. 2025.

ONS. Glossário, 2025b. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/glossario>. Acesso em: 25 fev. 2025.

SCHOBER P., BOER C., SCHWARTE, L. A. Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 2018. Disponível em: doi: 10.1213/ANE.0000000000002864. Acesso em 25 fev. 2025.

VEGA-SANCHEZ, M. A., CASTAÑEDA-JIMÉNEZ, P. D., PEÑA-GALLARDO, R., RUIZ-ALONSO, A., MORALES-SALDAÑA, J. A., PALACIOS-HERNÁNDEZ, E. R. Evaluation of complementarity of wind and solar energy resources over Mexico using an image processing approach. *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2017. Disponível em: doi: 10.1109/ROPEC.2017.8261637. Acesso em 25 fev. 2025.

VENNILA, C., TITUS, A., SUDHA, T. S., SREENIVASULU, U., REDDY, N. P. R., JAMAL, K., LAKSHMAIAH, D., JAGADEESH, P., BELAY, A. Forecasting Solar Energy Production Using Machine Learning. V. Mohanavel. *International Journal of Photoenergy*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/7797488>. Acesso em 25 fev. 2025.
