



**ESTUDO DO POTENCIAL DE EXPLORAÇÃO BASEADO NA COMPLEMENTARIEDADE
HIDRO-SOLAR NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL
STUDY OF EXPLORATION POTENTIAL BASED ON HYDRO-SOLAR
COMPLEMENTARITY IN THE NORTHEAST REGION OF BRAZIL**

Autores: Ana Beatriz Alves Azevedo¹, Stéfany Lopes da Silva², Fabíola Maria Alexandre Linard³,
Aryfrance Rocha Almeida⁴, Bartolomeu Ferreira dos Santos Junior⁵

¹UFPI – beatrizazevedo00@ufpi.edu.br; ²UFPI – stefanylopes@ufpi.edu.br; ³UFPI – fabiola.linard@ufpi.edu.br; ⁴UFPI –
aryfrance@ufpi.edu.br; ⁵UFPI – bartolomeuf@ufpi.edu.br

RESUMO

A região Nordeste do Brasil destaca-se como área estratégica para a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Tradicionalmente, a geração predominante é hidrelétrica, pois oferece controle operacional, flexibilidade e confiabilidade ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Contudo, crises hídricas recentes, associadas ao crescimento da demanda e à adoção de bandeiras tarifárias, têm gerado incertezas quanto ao suprimento e insatisfação dos consumidores diante dos custos elevados da energia. Esses fatores reforçam a necessidade de diversificação da matriz com alternativas renováveis, econômicas e seguras. Nesse contexto, a fonte solar surge como destaque no Nordeste, desempenhando papel central na transição energética brasileira. Entretanto, sua intermitência impõe desafios ao equilíbrio entre oferta e demanda, exigindo planejamento para a expansão e operação do SIN. O presente artigo analisa o potencial das fontes hídricas e solares no Nordeste, com foco na complementariedade entre elas. A metodologia utilizou dados meteorológicos da NASA, tratamento por scripts em Python, análise estatística pela correlação de Pearson e visualização em mapas de calor no software QGIS. Os resultados evidenciam alto potencial para geração solar em uma região caracterizada por baixos índices pluviométricos. O estudo de complementariedade revelou predominância desse comportamento entre hidrelétricas em operação, principalmente em função da sazonalidade climática. Tais achados ressaltam a importância de considerar condições locais para implantação de usinas híbridas, de forma a otimizar recursos, reduzir a intermitência, garantir a confiabilidade do sistema e minimizar o acionamento de fontes poluentes e de custo elevado.

Palavras-chave: Complementariedade; Correlação de Pearson; Energias Renováveis; Hidro-Solar; Intermittência.

ABSTRACT

The Northeast region of Brazil stands out as a strategic area for electricity generation from renewable sources. Traditionally, hydroelectric generation has predominated, as it offers operational control, flexibility, and reliability to the National Interconnected System (SIN). However, recent water crises, coupled with increased demand and the adoption of tariff flags, have generated uncertainty regarding supply and consumer dissatisfaction with high energy costs. These factors reinforce the need to diversify the energy mix with renewable, economical, and safe alternatives. In this context, solar energy is emerging as a key player in the Northeast, playing a central role in Brazil's energy transition. However, its intermittency poses challenges to balancing supply and demand, requiring planning for the expansion and operation of the SIN. This article analyzes the potential



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

of hydroelectric and solar sources in the Northeast, focusing on their complementarity. The methodology used NASA meteorological data, Python scripting, statistical analysis using Pearson's correlation coefficient, and heat map visualization in QGIS software. The results demonstrate high potential for solar generation in a region characterized by low rainfall. The complementarity study revealed a predominance of this behavior among operating hydroelectric plants, mainly due to climate seasonality. These findings highlight the importance of considering local conditions when implementing hybrid plants to optimize resources, reduce intermittency, ensure system reliability, and minimize the activation of polluting and costly sources. *Keywords: Complementarity; Pearson Correlation; Renewable Energy; Hydro-Solar; Intermittency.*

1 INTRODUÇÃO

No contexto do setor elétrico brasileiro, observa-se que a matriz de geração é predominantemente renovável, com destaque para as usinas hidrelétricas, uma vez que são despacháveis (produção controlada) de acordo com a necessidade (oferta e demanda) do Sistema Interligado Nacional (SIN), bem como possuem disponibilidade em nível nacional.

De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), para o período de setembro de 2025 a dezembro de 2029, a matriz hidrelétrica permanecerá como a principal fonte de geração de eletricidade do Brasil, porém a participação dessa fonte diminuirá ao longo dos próximos anos e fontes renováveis mais baratas e sustentáveis ganharão ainda mais proporção dentro do SIN, visto que as hidrelétricas estão apresentando limitações na capacidade de armazenamento e na regularização da vazão, em decorrência das variações nos períodos de chuva.

Além disso, o crescimento contínuo da demanda por eletricidade reforça a necessidade de alternativas para a geração de energia mais barata e sustentável. Nesse cenário, o processo de transição energética, com destaque para as fontes eólicas e solares, busca combater as mudanças climáticas e atender a toda a demanda energética e garantir a confiabilidade do SIN.

O ONS estima um crescimento significativo na capacidade instalada entre 2025 a 2029 das fontes intermitentes: eólica de 33.938 MW para 36.191 MW; solar centralizada de 17.221 MW para 24.055 MW; microgeração e minigeração distribuída (MMGD), de 43.462 MW para 64.920 MW (ONS, 2025b).

A região Nordeste do Brasil apresenta elevado potencial para a geração e exportação de energia solar fotovoltaica, em grande parte por abranger uma área denominada “cinturão solar”, caracterizada por elevados índices de irradiação ao longo do ano. Esse cinturão concentra-se especialmente no sertão da Bahia e em parte do estado de Minas Gerais, configurando-se como uma das zonas mais favoráveis para o aproveitamento da fonte solar no país. Nesse contexto, o processo de transição energética envolve não somente uma mudança na tecnologia de geração de eletricidade, mas também no comportamento da sociedade com relação aos padrões de consumo e políticas públicas e mercado de energia, visto que é caracterizada pela descarbonização, descentralização dos geradores e digitalização (EPE, 2019).

Por isso, é de fundamental importância o estudo para implementação dessas fontes em curto, médio e longo prazo, uma vez que são intermitentes e, portanto, suscetíveis às variações por irradiação solar. Isso ressalta a importância do planejamento da operação, com destaque a região Nordeste, por ser uma área com grande potencial de exploração durante todo



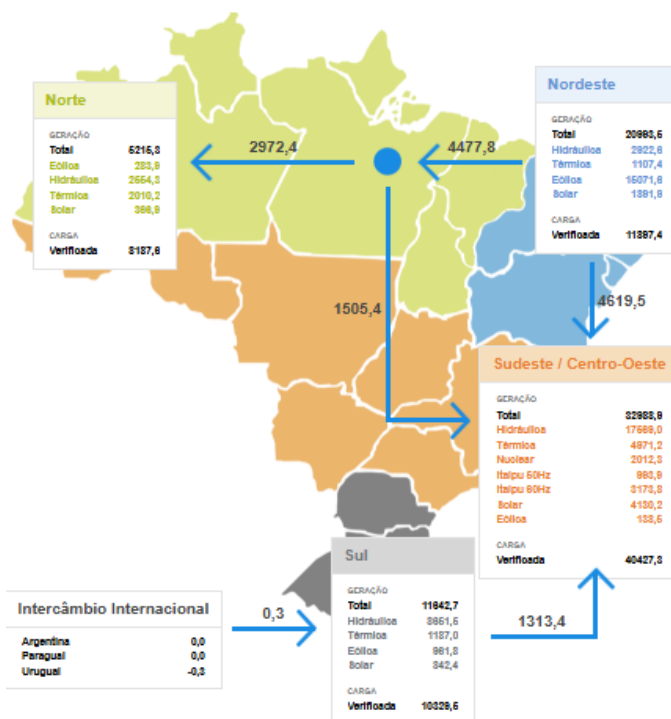
INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

o ano para os subsistemas Norte e Sudeste/Centro-Oeste devido às suas excelentes condições de geração eólica e solar (ONS, 2024).

A Figura 1 mostra o fluxo de energia entre os subsistemas no dia 2 de maio de 2025 e evidencia a capacidade do Nordeste de suprir outras regiões do país, além de atender à sua própria demanda no SIN.

Figura 1 - Balanço energético entre os subsistemas do Brasil em 14 de setembro de 2025



O estudo da complementariedade das fontes renováveis é fundamental para a ampliação da diversificação da geração de energia, de modo a otimizar o aproveitamento do potencial de cada fonte renovável e atender de forma mais eficiente às necessidades econômicas, sociais e ambientais, promovendo um sistema energético mais sustentável para a região Nordeste. Essa complementariedade entre as fontes intermitentes de energia na região representa uma oportunidade para uma integração mais eficiente dos diferentes tipos de geração e permite um planejamento energético mais adequado, visando a redução de impactos e a minimização do acionamento das termelétricas, que apesar de gerar estabilidade, apresentam custo elevado e são mais poluentes para o meio ambiente.

2 METODOLOGIA

O estudo do potencial exploratório no Nordeste do Brasil envolveu a coleta de dados meteorológicos e solares do portal Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) da NASA (NASA Langley Research Center, 2025). Os dados coletados foram médias mensais do período de 2003 a 2022 dos recursos precipitação e irradiação global. A área de estudo escolhida foi a região Nordeste do Brasil devido ao grande potencial de exploração para as gerações hídricas e solares. Além



disso, a análise e o tratamento dos dados aconteceu por meio de planilhas no software Microsoft Excel e por scripts em linguagem de programação Python para certificar a ausência de dados duplicados e para gerar uma média mensal entre os dados de 2003 a 2022 e garantir uma compreensão sobre o comportamento médio de cada variável ao longo de um ano.

Em seguida, foi realizado o estudo estatístico por meio da aplicação da Correlação de Pearson (r). Essa correlação permitiu quantificar a relação linear entre duas séries de dados (X e Y) em uma escala de -1 a 1 (Peron, 2017). A Equação 1 apresenta equação do coeficiente de correlação de Pearson.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (Eq. 1)$$

O resultado do coeficiente mostra que valores próximos a 1 indicam forte similaridade (ambas as variáveis aumentam ou diminuem juntas), valores próximos a -1 sugerem forte complementariedade (uma aumenta enquanto a outra diminui) e próximos a 0 indicam ausência de relação linear significativa. Nesse estudo, a correlação foi executada por meio da combinação das variáveis de precipitação e irradiação global. A aplicação da fórmula de correlação foi realizada através da ferramenta macro de automação de processos do software Excel.

Por fim, os dados foram visualizados no software Quantum GIS utilizando o sistema de coordenação SIRGAS 2000, uma vez que apresenta um sistema geocêntrico de referência unificado para todo o território sul-americano (IBGE, 2000). A área de estudo foi definida através de um shapefile GeoJSON obtido no portal Alagoas em Dados e Informações (Governo de Alagoas, 2025). A visualização dos dados aconteceu a partir da aplicação de um mapa de calor de densidade kernel com um raio de 280 km. Os dados das linhas de transmissão foram obtidos do site da Empresa de Pesquisa Energética e os dados das usinas foram extraídos do Sistema de Informações de Geração da ANEEL.

Foram elaborados dois mapas para mostrar o comportamento característico anual dos recursos em estudo e quatro mapas representando a complementariedade hídrica-solar para cada sazonalidade, incluindo a localização das linhas de transmissão e das usinas hídricas e solares, com o objetivo de avaliar o potencial exploratório da região. Além disso, esses mapas identificam áreas com elevado potencial para a implementação de sistemas híbridos de energia, contribuindo para uma maior eficiência e confiabilidade no fornecimento energético.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados meteorológicos coletados foram utilizados inicialmente para a visualização do comportamento da média mensal de um ano característico. A Figura 2 mostra a média de precipitação anual da região Nordeste do Brasil e evidencia o clima semiárido, períodos críticos e prolongados de estiagem que interferem diretamente na disponibilidade de água.



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Em seguida foi elaborado um mapa para a análise da média de irradiação global anual no Nordeste. Observou-se que a região apresenta elevados índices de irradiação e reforça sobre o potencial de expansão de produção de energia elétrica através da energia solar fotovoltaica, como mostrado na Figura 3.

Figura 2 – Mapa da média de precipitação anual na Região Nordeste do Brasil

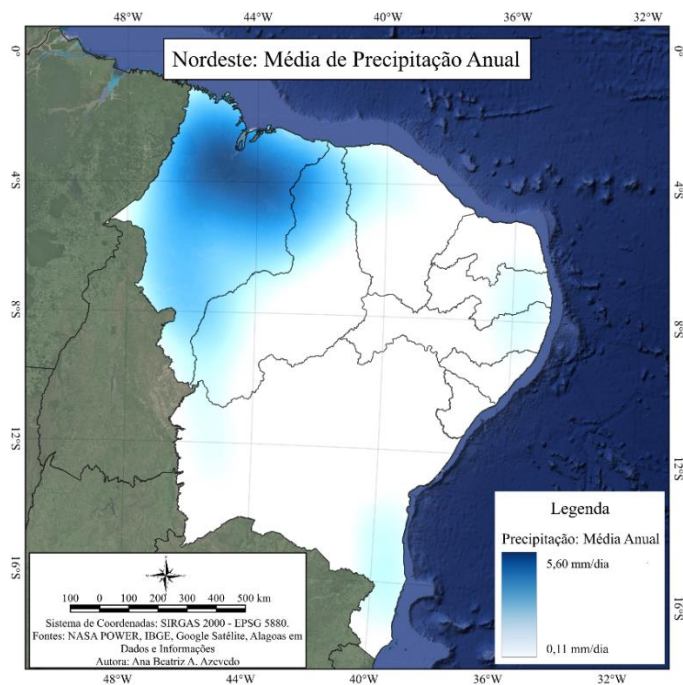
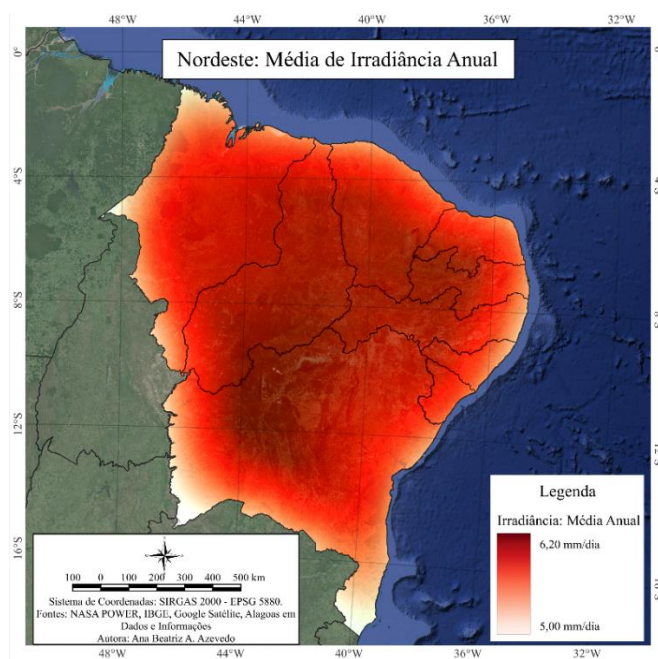


Figura 3 – Mapa da média irradiação global anual na Região Nordeste do Brasil



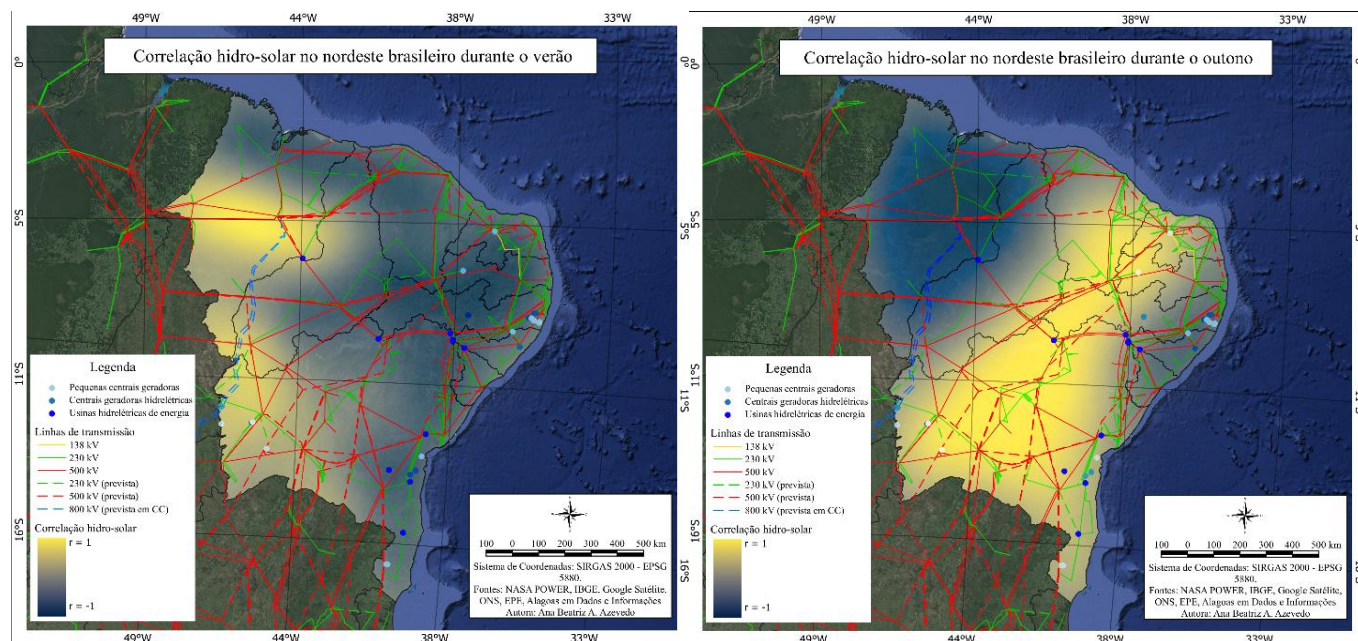


O estudo da correlação hidro-solar aconteceu a partir do estudo do comportamento desses recursos ao longo de cada época do ano. Sendo assim, a Figura 4 mostra a correlação entre os recursos dos dois primeiros trimestres do ano. Eles correspondem as estações verão e outono.

No primeiro trimestre do ano (verão), observou-se que apenas a região central do Maranhão e o oeste da Bahia apresentaram comportamento de similaridade significativa entre os recursos, enquanto os estados de Alagoas, Sergipe, Rio Grande do Norte, Paraíba e parte da Bahia se destacaram pela alta complementariedade, de modo que quando um recurso aumenta sua disponibilidade o outro tende a diminuir.

No segundo trimestre, verificou-se que no semiárido nordestino prevalece o comportamento similar, evidenciando o potencial de geração combinada a partir do uso simultâneo das fontes hídrica e solar.

Figura 4 – Correlação Hidro-Solar no Nordeste Brasileiro ao longo de cada sazonalidade

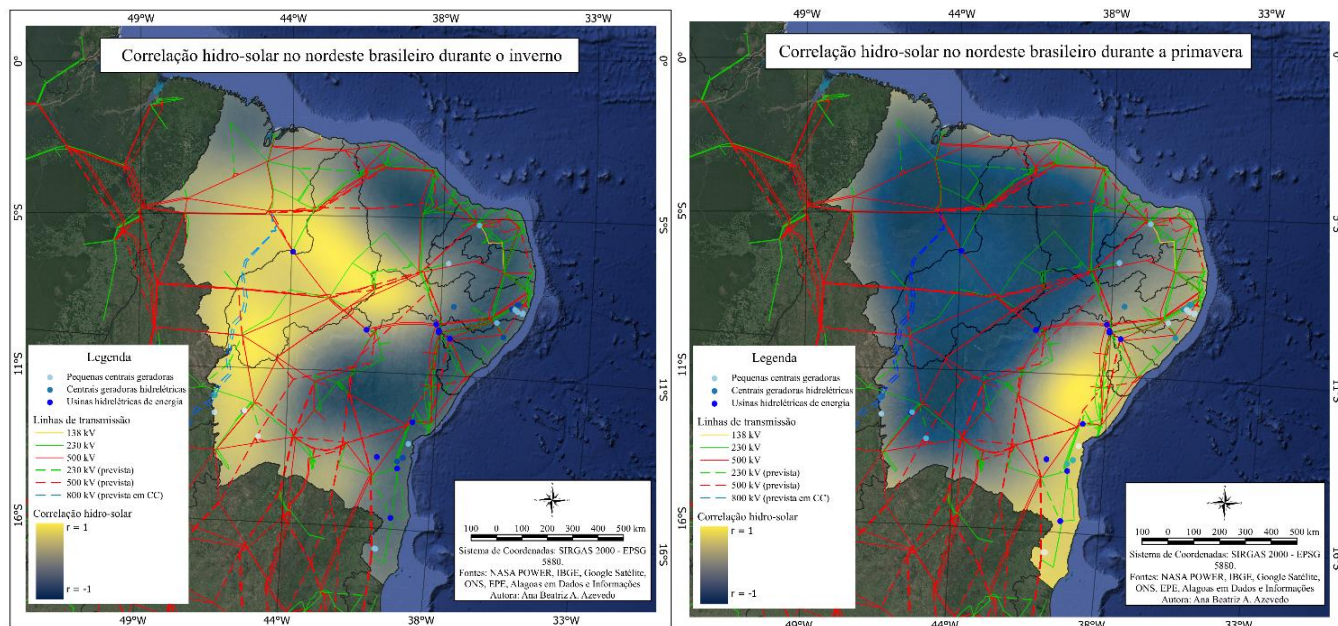


Em seguida, foram elaborados os mapas para os dois últimos trimestres do ano (inverno e verão) como mostrado na Figura 5.

No terceiro trimestre do ano (inverno), identificou-se maior similaridade no leste do Nordeste, enquanto as áreas litorâneas apresentaram complementariedade elevada, garantindo equilíbrio no aproveitamento dos recursos. Por fim, no quarto trimestre (primavera), período caracterizado por aumento da temperatura e redução das chuvas, Maranhão, Piauí, Ceará e áreas do oeste dos demais estados mostraram predominância de complementariedade, enquanto o leste e sul da Bahia, assim como regiões litorâneas vizinhas, revelaram comportamento mais similar entre as fontes, evidenciando a variabilidade espacial e temporal da correlação hidro-solar no Nordeste.



Figura 5 – Correlação Hidro-Solar no Nordeste Brasileiro ao longo de cada sazonalidade



Por conseguinte, elaborou-se uma tabela com algumas usinas da região, destacando o comportamento de complementariedade e similaridade. Dentre as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) se destacam as hidrelétricas de Gustavo Paiva localizada em Alagoas (AL), e as localizadas em Pernambuco (PE): Humayatá e Pé de Serra, uma vez que possuem alto grau de complementariedade (correlação negativa -1) entre os recursos analisados ao longo de todo o ano. Já entre as Pequenas Centrais Geradoras se destacam as usinas de Gindaí (PE), Oriental (AL) e Pau Sangue (PE) visto que elas apresentam correlação negativa o ano inteiro. Por fim, entre as Usinas Hidrelétricas se destacam as de Alto Fêmeas I (BA) e Boa Esperança (PI) por apresentarem um comportamento ora de complementariedade e ora de similaridade entre os recursos. Esses aspectos reforçam sobre a complexidade e importância do planejamento energético para o aproveitamento dos recursos disponíveis na região, considerando a sazonalidade e a complementariedade entre as fontes de energia para uma integração com confiabilidade.

Tabela 1 - Correlação Hidro-Solar em usinas hidrelétrica do Nordeste

Tipo de Usina	Nome	Estado	Verão	Outono	Inverno	Primavera
CGH	Gustavo Paiva	AL	- 0.952576	-0.999633	- 0.996903	-0.999866
CGH	Humayatá	PE	-0.920539	-0.994289	- 0.939607	-0.962801
CGH	Pé de Serra	PE	-0.798263	-0.999220	-0.924823	-0.958249
PCH	Gindaí	PE	-0.663066	-0.993349	-0.944539	-0.937409
PCH	Oriental	AL	-0.775046	-0.979471	-0.999988	-0.516008
PCH	Pau Sangue	PE	-0.663066	-0.993349	-0.944539	-0.937409
UHE	Alto Fêmeas I	BA	-0.635451	0.973657	0.592085	-0.961903
UHE	Boa Esperança	PI	0.876869	-0.848590	0.595983	-0.772886



4 CONCLUSÕES

Este estudo realizou uma análise de correlação entre os recursos naturais de precipitação e irradiação global no Nordeste do Brasil para o estudo da complementariedade e/ou similaridade entre eles de acordo com a média anual dos dados em sazonalidades e localização de algumas usinas hidrelétricas. Observou-se um importante aproveitamento nas usinas hidrelétricas e se destacou usinas com alto grau de complementariedade entre os recursos, ressaltando a importância de avaliar em cada localidade para um planejamento eficiente da geração de energia renovável na região. O reconhecimento desses padrões de complementariedade mostram alternativas que podem reduzir significativamente a intermitência e aumentar a confiabilidade da geração de energia renovável. Considerar as características climáticas únicas de cada região é essencial para otimizar o uso dos recursos naturais, reforçando a importância da adoção de estratégias como o armazenamento de energia, que pode aumentar a confiabilidade do sistema e aprimorar o planejamento energético diante da intermitência das fontes renováveis.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. SIGEL - Sistema de Gerenciamento de Informações de Usinas Elétricas. 2025. Acesso em: 16 mar. 2025. Disponível em: <<https://sigel.aneel.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=c1716d81d491426197bf497ace41db8d>>.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Mudanças Climáticas e Transição Energética. 2019. Acesso em: 3 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/clima-e-energia>>.
- Governo de Alagoas. Malha da Região Nordeste. 2025. Acesso em: 16 fev. 2025. Disponível em: <<https://dados.al.gov.br/catalogo/ro/dataset/malha-da-regiao-nordeste>>.
- NASA Power Project. Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). 2025. Acesso em: 16 de fev. de 2025. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/>>.
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. PAR/PEL 2024 – Sumário Executivo. 2024. <<https://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/suprimento-eletrico/parpel2024/sumario-executivo/index.html#mensagemDoDiretor>>. Acesso em: 3 maio 2025.
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Balanço de Energia. 2025. <<https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/balanco-de-energia>>. Acesso em: 14 set. 2025a.
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. O Sistema em Números. 2025. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 14 set. 2025b.
- Peron, A. M. Análise da complementariedade das gerações intermitentes no planejamento da operação eletro-energética da região nordeste brasileira. 119 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. QGIS, Q. D. T.
- QGIS, Q. D. T. QGIS - Free and Open Source Geographic Information System. 2025. Acesso em: 16 mar. 2025. Disponível em: <<https://qgis.org/>>.