



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2024) v. 11, n. 1, pp. 154–166
<https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n1.p154-166>

Análise da complementaridade de fontes intermitentes no nordeste brasileiro *Analysis of the complementarity of intermittent sources in the Brazilian northeast*

Stéfany Lopes da Silva^{1*}, Fabíola Maria Alexandre Linard², Aryfrance Rocha Almeida²,
Bartolomeu Ferreira dos Santos Junior²

¹ Aluna do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí – UFPI, campus Ministro Petrônio Portela, Teresina, PI, Brasil

² Professor(a) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí – UFPI, campus Ministro Petrônio Portela, Teresina, PI, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: stefanylopes@ufpi.edu.br

Received: 7 April 2024 | Accepted: 20 April 2024 | Published online: 5 June 2024

Resumo: Este estudo teve como objetivo gerar mapas de complementaridade entre as principais fontes intermitentes do nordeste brasileiro ao longo do ano característico, com base no cálculo de índices de correlação. Para isso, foi avaliado o potencial energético da região por meio da reprodução de mapas de potencial com fontes renováveis incluindo as geolocalizações de usinas eólicas, hidrelétricas e solares já existentes na região, além disso, foram verificadas as correlações sobre a existência de complementariedade entre os recursos eólicos, solares e hídricos, por meio da proposição de um ano característico para calcular os índices de correlação que seriam visualizados através dos mapas produzidos pelo *software* QGIS, visando demonstrar o efeito de complementaridade entre recursos renováveis na região. Os resultados obtidos mostram que a expansão da aplicação de fontes intermitentes deve ser encorajada, estimulando as combinações complementares de ativos visando aumentar a variedade e segurabilidade de geração de energia. Além disso, mostra-se que a região possui elevados índices de correlação capazes de contribuir nos estudos de expansão da matriz com a implantação de usinas híbridas que podem fornecer energia com mais equidade durante um determinado período. Observa-se ainda que, praticamente todas as usinas eólicas existentes na região podem ser facilmente integradas a usina solar fotovoltaica, além da possibilidade de construção de uma usina solar flutuante no reservatório da UHE Pedra do Cavalo, devido aos elevados índices de correlação que a região possui, utilizando assim a complementaridade como a principal aliada na oferta e geração de energia.

Palavras-chave: complementaridade, energias renováveis, geração de energia, mapas de complementaridade, nordeste brasileiro.

Abstract: This study has the objective of generating complementarity maps between the main intermittent sources in the Brazilian Northeast throughout the year, based on the calculation of correlation indices. For this, the study sought to evaluate the energy potential of the region by reproducing maps of potential with renewable sources, including the geolocations of wind, hydroelectric and solar plants already existing in the region, in addition to verifying the correlations on the existence of complementarity between eolian, photovoltaic and hydro resources, through the production of a characteristic year to calculate the correlation indexes that would be visualized through the maps produced by the QGIS software, aiming to demonstrate the complementarity effect between renewable resources in the region. Thus, when analyzing the potential of intermittent sources, it shows that their expansion should be encouraged, where complementary combinations of assets should be encouraged in order to increase the variety and insurability of energy generation. It was also possible to prove that the region has elevated correlation indices and that it can contribute to the expansion of the matrix with the implementation of hybrid plants that can provide energy with more equity during a certain period. And finally, it is observed that practically all existing wind farms can be easily integrated into the solar photovoltaic plant, in addition to the possibility of building a floating solar photovoltaic plant in the reservoir of the hydroelectric plant Pedra

do Cavalo, due to the high correlation indices that the region owns, thus using complementarity as the main ally in the supply and generation of energy.

Keywords: complementarity, renewable energy, power generation, complementarity maps, Brazilian northeast.

1 Introdução

A energia é um recurso indispensável e estratégico para a impulsão do desenvolvimento socioeconômico de um país, onde a sua demanda cresce por razões econômicas e sociais, como por exemplo: o crescimento industrial, a introdução de novas tecnologias no dia-a-dia das pessoas, os novos eletrodomésticos que facilitam a vida domiciliar, o uso progressivo da energia para veículos e sistemas de transportes, o aumento da população, etc.

No entanto, apesar do aumento da procura por eletricidade, a produção de energia está em processo de revolução interna com o objetivo de fornecer um fornecimento de qualidade a um custo acessível e de acordo com os objetivos ambientais internacionais. Essa revolução tem sido marcada pelo aumento da participação de fontes renováveis, especialmente não-hídricas nas matrizes elétricas. Isso porque estudos têm mostrado que é possível utilizar porcentagens elevadas de fontes renováveis, frente ao risco de os combustíveis fósseis chegarem ao limite de sua disponibilidade aliado às metas ambientais internacionais, especialmente no que diz respeito à diminuição das emissões de gases do efeito estufa. (Engeland et al., 2017).

Dentre as fontes renováveis consolidadas, há aquelas cujo suprimento é aproximadamente constante, como a energia geotérmica, hidrelétrica com regulação de reservatórios e biomassa. No entanto, há outras que dependem de variáveis meteorológicas, e por isso, têm variabilidade alta e são pouco previsíveis. É o caso da geração eólica, solar e hidrelétrica (quando desprovida de reservatório para armazenagem). Essas fontes são chamadas de intermitentes (Rosa, 2019).

A alta inserção de fontes intermitentes pode ser auxiliada pela utilização de possíveis complementaridades de forma a aumentar o equilíbrio entre a carga e geração de energia. Os estudos de complementaridade utilizam métodos diferentes de acordo com o objetivo relacionado. Alguns avaliam apenas o comportamento dos recursos naturais para diferentes períodos de tempo e estações do ano, fazendo uso principalmente de cálculos de correlações lineares. Há também trabalhos que não apenas avaliam correlações, mas vão além: buscam otimizar o conjunto das fontes estudadas, minimizando a variância do grupo ou minimizando custos de armazenagem ou demanda não atendida (Rosa, 2019).

Desta forma, a proposta deste estudo é mostrar que, a partir de dados disponíveis de estações meteorológicas localizadas no nordeste brasileiro, é possível gerar mapas de complementaridade das principais fontes intermitentes da região nordeste, por meio do cálculo de índices de correlação entre essas fontes. Os resultados auxiliariam na identificação dos locais energeticamente mais propícios para a instalação de usinas híbridas, que empregariam duas fontes complementares entre si.

2 Fundamentação

Segundo Beluco (2001), a complementaridade entre fontes de energia está associada à capacidade de duas ou mais fontes de apresentar disponibilidades complementares de energia entre si, considerando-se a ocorrência entre duas fontes semelhantes ou entre fontes diferentes.

A complementaridade entre duas fontes pode ocorrer em relação ao tempo, ao espaço ou a ambos. A complementaridade em relação ao espaço ocorre quando duas ou mais fontes de energia possuem disponibilidades complementares ao longo de uma região. A complementaridade em relação ao tempo está associada à existência de períodos complementares de disponibilidade de energia entre duas fontes ao longo do tempo em uma mesma região (Eifler Neto, 2012).

Também há a possibilidade de existência de complementaridade considerando-se a disponibilidade energética de apenas uma fonte ao longo de uma extensa região e ao longo do tempo. O Brasil é um exemplo desse tipo de complementaridade, uma vez que a grande produção de hidroeletricidade, derivada da abundância de mananciais ao longo de todo território nacional, depende de uma disponibilidade de energia hidráulica que varia conforme a região (Eifler Neto, 2012).

Tal variância, cuja causa está associada às diferenças nos regimes pluviométricos e de vazão conforme a região, sugere uma gestão de energia que realize o interligamento dos sistemas energéticos Sul-sudeste e Norte-nordeste, caracterizando uma complementaridade no tempo e no espaço (Eifler Neto, 2012).

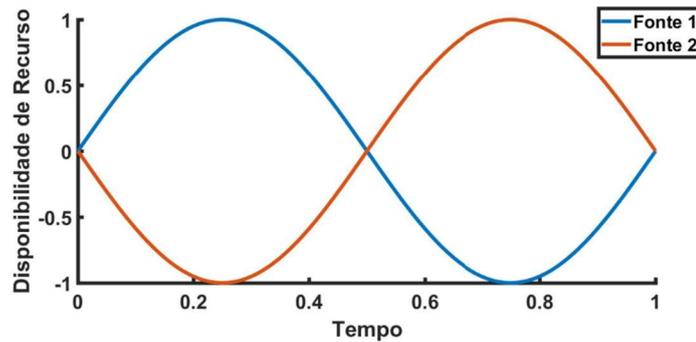


Figura 1. Representação de um sistema envolvendo uma complementaridade ideal.

A complementaridade entre fontes de energias renováveis pode ser apresentada como uma solução para reduzir a necessidade de armazenamento de energia. Este fenômeno tem sido estudado em várias partes do mundo, com o objetivo de aproveitar das vantagens que a complementaridade fornece.

A complementaridade sazonal entre os regimes hidrológico e de ventos encontra no nordeste do Brasil uma grande oportunidade de gestão sistêmica a ser explorada, devido ao potencial eólico que a região apresenta, o que pode contribuir significativamente no suprimento de energia nos âmbitos regional e nacional.

Métodos de correlação são empregados quando se deseja avaliar o grau de relacionamento entre duas ou mais variáveis, onde a associação dessas variáveis quantitativas é preferencialmente expressa por um coeficiente de correlação, como o coeficiente de correlação de *Pearson*, o qual é adequado à avaliação de relações lineares, e do coeficiente de correlação de *Spearman*, o qual avalia a intensidade e o sentido da relação monótona entre duas variáveis que estejam no mínimo numa escala ordinal, e pode ser aplicado tanto no caso de dados lineares como no caso de dados não lineares. Ambos os métodos de correlação variam entre -1 e +1 e não dependem das unidades de medida das variáveis, onde o valor do coeficiente gerado possui uma medida adimensional, o que facilita a interpretação dos dados.

3 Metodologia

A metodologia empregada nesta pesquisa contempla a busca e organização de dados referentes aos recursos naturais disponíveis na região nordeste brasileira.

Este levantamento de dados foi realizado com informações de velocidade do vento, radiação global e precipitação obtidas através de estações meteorológicas automáticas (EMA) disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Na primeira fase do estudo, analisou-se o potencial energético existente através da produção de mapas de recursos naturais na região Nordeste, com base em séries históricas, onde posteriormente foram acrescentados nestes mapas as geolocalizações de usinas já existentes em sua respectiva fonte de recurso natural.

E por fim, na segunda e última fase, procurou-se avaliar as correlações sobre a existência de complementariedade entre os recursos eólicos (vento), solares (radiação solar) e hídricos (precipitação). Para isso, foram organizadas planilhas com os dados levantados, produzindo um ano característico para calcular os índices de correlação que seriam visualizados através dos mapas.

Com base nos resultados obtidos pelo desenvolvimento das duas fases de estudo, o trabalho prosseguiu com a elaboração dos mapas de recursos naturais e de complementariedade entre as fontes intermitentes que visou entender a periodicidade da disponibilidade das fontes de energia existentes na região, e avaliar se de acordo com a tendência sazonal dos recursos, a região Nordeste possui complementariedade e quais são as fontes mais favoráveis na geração de energia de forma híbrida.

3.1 Coleta e organização de dados

Os dados horários referentes a precipitação pluviométrica total, velocidade do vento e radiação solar da região Nordeste, para o intervalo de Jan/2000 a Dez/2021, disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia, através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), foram organizados em 150 planilhas.

Na região nordeste existem 267 estações meteorológicas, que podem ser classificadas como automáticas e convencionais. Neste trabalho, são considerados apenas os dados das 150 estações automáticas, uma vez que, as estações convencionais não possuem dados de radiação global.

Para facilitar a organização das tabelas e destacar somente a seleção de variáveis que seriam necessárias para o trabalho, utilizou-se o *software* Power BI, onde devido a sua extensão do Editor Power Query, utilizado principalmente para extração, carregamento e transformação de dados, foi possível organizar as 150 planilhas em um único lugar e de forma mais prática.

3.2 Tratamento e análise de dados

Para ser possível a análise dos dados coletados das estações automáticas, foi necessário um tratamento para o preenchimento de falhas dos campos que apresentavam células de dados nulos das tabelas coletadas através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do INPE, que estavam representados pela denominação “*null*”. Com isso, foram substituídos os valores que possuíam dados nulos por células em branco, que facilitaram a análise posterior da criação de um ano característico, pois o *software* Excel® desconsidera os valores de células vazias para a análise de dados.

Após a substituição dos valores nulos, foram aplicadas tabelas dinâmicas da própria ferramenta Excel® para que fosse possível calcular, resumir e analisar os dados, e assim, permitiam-se ver as comparações, padrões e tendências dos dados divididos por categorias e subcategorias. Logo, com a tabela dinâmica foi possível condensar os dados para a criação de um ano característico, onde de acordo com cada informação de precipitação pluviométrica, velocidade do vento e radiação global, gerou-se uma nova tabela contendo as médias diárias ao longo de um ano característico de cada estação meteorológica para cada variável.

Para as correlações entre os dados pluviométricos, velocidade do vento e radiação solar, foram utilizadas ferramentas estatísticas, que proporcionem combinações de análises e comparações. Em especial, a aplicação de análises estatísticas utilizando o Coeficiente de Correlação de Pearson, amplamente utilizado para estudos de correlações entre séries lineares de recursos hídricos, eólicos e solar (Cantão et al., 2017; Schmidt et al., 2016; Prasad et al., 2017; Carta et al., 2013; De Jong et al.; 2013), medindo a intensidade de correlação variando de -1 à 1, em que para valores positivos e próximos a 1 indicam correlação de similaridade entre as séries, e para valores negativos e próximos a -1 indicam correlação de complementaridade entre as séries.

Desta forma, permite o estudo da correlação entre os recursos naturais, indicando a ocorrência de complementaridade e/ou similaridades. Tal análise é desenvolvida por meio da Equação 1.

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

Na Equação 1, pode-se observar que as variáveis x_i e y_i correspondem aos valores medidos ou coletados, enquanto as médias aritméticas dessas variáveis são designadas como \bar{x} e \bar{y} . Consequentemente, o coeficiente de correlação de Pearson ρ é obtido através da divisão entre a covariância e a raiz quadrada do produto entre as variâncias dessas duas variáveis. Com isso, caso o valor da intensidade de correlação seja próximo de 1, significa correlação positiva perfeita, indicando o efeito de similaridade entre as variáveis. Por outro lado, um valor de -1 indica uma correlação negativa perfeita, sugerindo que um aumento numa quantidade resulta numa diminuição na outra, conhecido como efeito de complementaridade. Finalmente, se o resultado for 0, significa que as duas variáveis não apresentam dependência linear entre si.

A intensidade da correlação é interpretada conforme Tabela 1. Em que para valores negativos há complementação entre os recursos já que eles se comportam de maneira oposta de forma que quando há diminuição da disponibilidade de um recurso haverá maior disponibilidade do outro. Já para valores positivos, os recursos possuem comportamentos similares, em que as curvas de disponibilidades tendem a se assemelhar.

A partir das informações obtidas na tabela de correlações, identificam-se quais são as cidades do Nordeste que possuem maior complementaridade. Desta forma, estabeleceu-se um cenário anual com as médias mensais a fim de desenvolver um ano característico para cada estação a fim de facilitar a visualização e a análise de complementaridade na elaboração dos mapas.

Tabela 1. Coeficiente da correlação de Pearson.

Valor de ρ (positivo ou negativo)	Correlação
0,00 a 0,19	Bem fraca
0,20 a 0,39	Fraca
0,40 a 0,69	Moderada
0,70 a 0,89	Forte
0,90 a 1,00	Muito forte

Os procedimentos de substituição de valores, organização da tabela para criação de um ano característico e aplicação de fórmula de correlação foram realizados através da ferramenta Macro no *software* Excel® que facilitou o cálculo desses valores de forma mais rápida através das 150 tabelas de estações automáticas que foram avaliadas.

3.3 Elaboração e produção de mapas

Através dos dados coletados obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi possível realizar a análise de complementaridade das 150 Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) existentes, para o período de Jan/2000 até Dez/2021 (no caso de a estação ter sido ativada após janeiro de 2000, utilizou-se os dados a partir da data de ativação) de velocidade do vento, precipitação pluviométrica e radiação solar. Foram utilizados os *softwares* Microsoft Excel®, Power BI e QGIS, no qual o Excel® e o Power BI serviram no auxílio da organização de dados e montagem de tabelas e o QGIS para a produção dos mapas.

Para filtrar os dados necessários, calculou-se uma média mensal das variáveis de recursos naturais de cada estação, elaborando assim um ano característico para cada estação, onde posteriormente aplicou-se a correlação de Pearson entre os recursos intermitentes, com o intuito de averiguar a dependência linear entre as variáveis.

Por fim, após descobrir o coeficiente de correlação de cada estação de forma anual, aplicou-se em um heat map (mapa de calor/mapa de kernel) para obter uma visualização espacial dos dados.

Para a elaboração de um mapa no *software* QGIS, primeiro obteve-se arquivos shapefile com as delimitações de cada cidade e estado da região Nordeste. Esses arquivos são facilmente encontrados no site do IBGE. Depois, selecionou-se qual seria o sistema de referência de coordenadas mais adequado ao trabalho, que depende do tamanho da região analisada e da forma que deseja visualizar os mapas. Neste trabalho, foi utilizado o SIRGAS 2000 que possui um sistema geocêntrico de referência unificado para todo o território sul-americano, no qual a visualização da região Nordeste se mostrou de forma mais uniforme e plana. Com isso, uniu-se os dados obtidos e tratados das estações meteorológicas com as cidades através do Códigos de Municípios do IBGE, onde apresenta a lista dos municípios brasileiros associados a um código composto de 7 dígitos, sendo os dois primeiros referentes ao código da Unidade da Federação (UF).

E por último, criou-se um ponto central de cada polígono que representava a delimitação da área de cada município, chamado de centroides, como mostrado na Figura 2 e, aplicou-se o mapa de kernel a partir desses centroides, no qual esses dados tratados da variável que estava sendo analisada expandiu-se em um raio de 230km, obtendo assim o mapa de calor mostrando quais eram as regiões que possuía maior ou menor magnitude e intensidade. Para as localizações de usinas eólicas, solares fotovoltaicas e hídricas, utilizou-se os dados do Google Earth.

No total, foram elaborados 6 mapas, sendo eles: 3 mapas com potencial dos recursos renováveis da região através de análises históricas das EMAs com adição de geolocalizações de usinas existentes na região de acordo com cada tipo de fonte; 1 mapa de complementaridade hidro-eólica com abrangência anual; 1 mapa de complementaridade hidro-solar com abrangência anual e 1 mapa de complementaridade eólica-solar com abrangência anual.

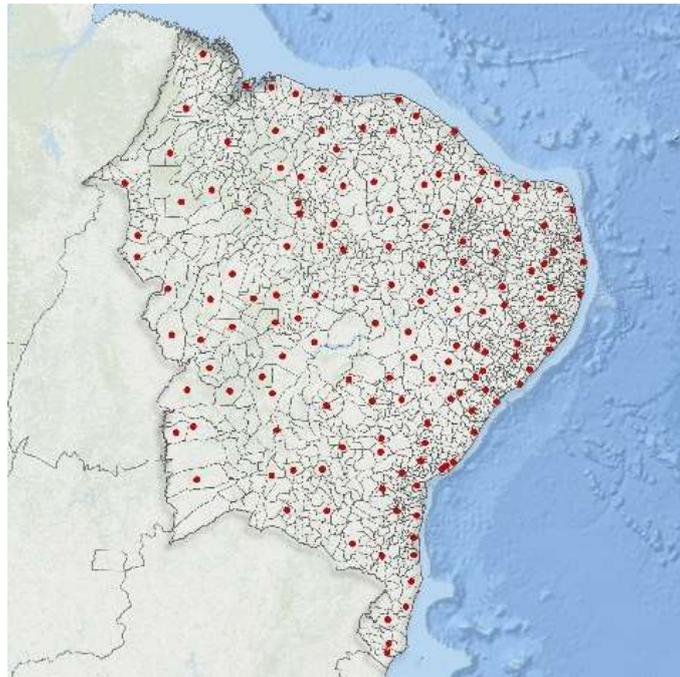


Figura 2. Localização dos centroides da região Nordeste.

4 Resultados e discussão

Através dos dados disponibilizados pelo INMET, confeccionou-se 6 (seis) mapas para a região nordeste, onde esses mapas estão divididos por período anual, e subdivididos por tipo de fonte de energia ou combinação de fontes, onde 3 (três) mapas são referentes aos recursos naturais e 3 (três) são mapas de complementaridade. Inicialmente, como mostrado nas Figuras 3, 4 e 5, pode-se observar os mapas referentes aos recursos intermitentes da região Nordeste, analisado através da formação de um ano característico com base no histórico das estações meteorológicas automáticas, com a adição das localizações de usinas hidrelétricas, usinas fotovoltaicas e usinas eólicas da região, onde cada fonte corresponde a um tipo de usina, ou seja, o mapa de precipitação possui localizações das UHE (Usinas Hidrelétricas), PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas) e CGH (Centrais Geradoras Hidrelétricas), o mapa de velocidade do vento tem a localização das UEE (Usinas de Energia Eólica), e por fim, o mapa de radiação conta com as localidades de UFV (Usinas Fotovoltaicas) distribuídas pela região. O principal objetivo foi identificar e esquematizar os locais ainda não explorados pelo setor elétrico e que possuem potencial de expansão.

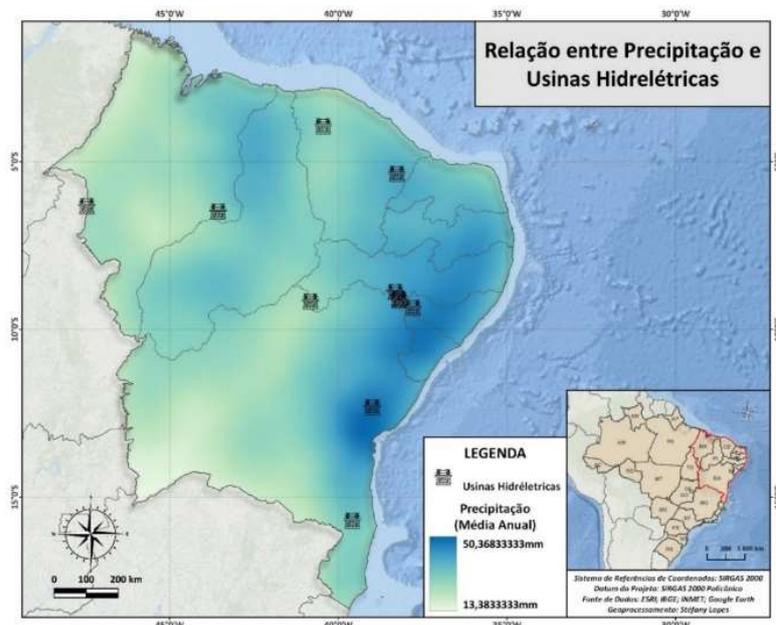


Figura 3. Mapa de relação entre a precipitação anual e as usinas hidrelétricas da região Nordeste.

Examinando a Figura 3, observa-se que os litorais dos estados mais ao leste, como Alagoas, Bahia, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe possuem uma média anual pluviométrica mais acentuada, mais especificamente na zona da mata e na zona do agreste da região nordestina, onde é possível analisar que existem várias usinas de fonte hídrica próximas desses locais que possuem um elevado índice pluviométrico. Porém, a construção de uma usina também é influenciada pela localização de rios, no qual recebem a chuva de vários pontos ao longo do seu leito, desde a nascente até a sua foz, e por isso, outras localidades mais afastadas podem influenciar na geração de energia daquela usina dependendo da sua localização.

Analisando a Figura 4, observa-se que os estados localizados no sertão nordestino, como a Bahia, Piauí, Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte possuem uma média anual de radiação solar mais acentuada, onde se observa que o semiárido possui uma forte correlação a intensidade de radiação solar na região. Também se destaca a existência de várias usinas solares fotovoltaicas próximas aos locais que possuem um elevado índice de radiação solar. Isso pode ser mais evidenciado nos estados do Ceará, Pernambuco, Piauí e Rio Grande do Norte, que atualmente estão localizados no cinturão solar e fortemente entrelaçado ao semiárido brasileiro. Porém, pelo o que está evidenciado no mapa, os estados ainda podem ser mais explorados, principalmente no Rio Grande do Norte, Paraíba, Ceará e Piauí.

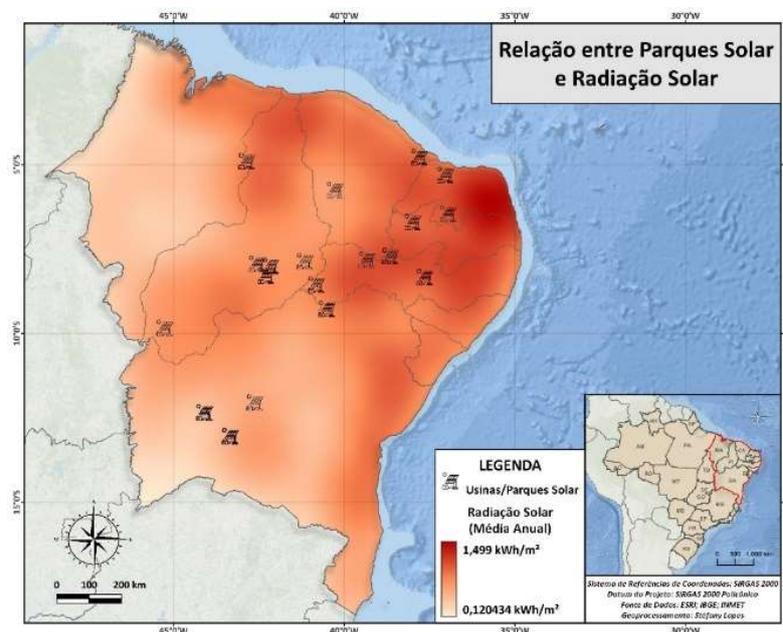


Figura 4. Mapa de relação entre a radiação solar anual e as usinas fotovoltaicas da região Nordeste.

Observando a Figura 5, nota-se que as faixas litorâneas de praticamente todo o Nordeste possuem um alto índice de velocidade do vento, com destaque especial para o estado de Rio Grande do Norte que possui ventos acima de 5m/s. Além disso, o sertão nordestino, como leste da Bahia, Piauí, Ceará, Paraíba e Pernambuco também se destaca na produção. Pelo mapa, nota-se que somente o estado do Maranhão e extremo sudoeste da Bahia possui o menor potencial na geração de energia eólica. Também é possível observar que já existem várias usinas eólicas nas localidades que possuem uma alta velocidade do vento, com destaque principalmente no litoral dos estados do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. Mas também se observa que existe um potencial inexplorado nos estados da Paraíba, do Pernambuco e Bahia.

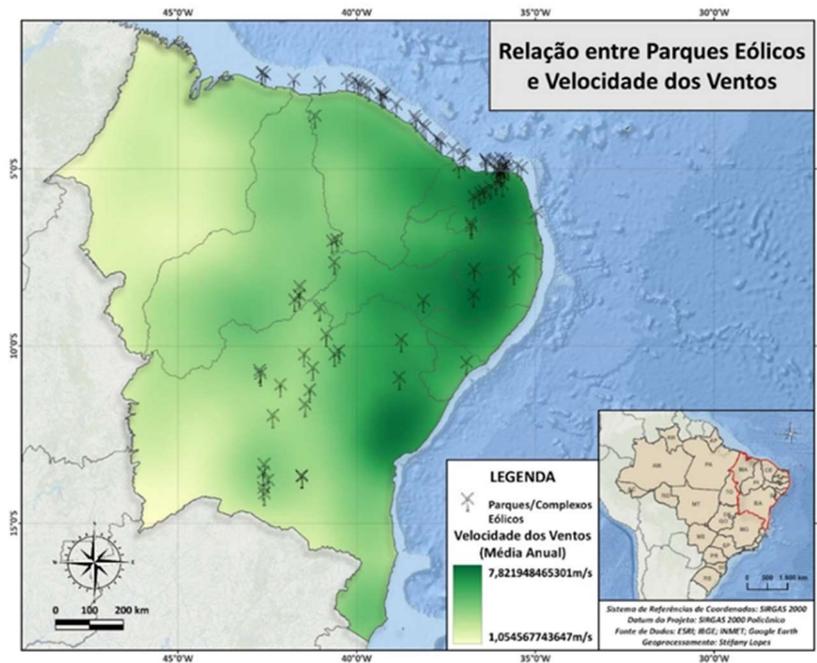


Figura 5. Mapa de relação entre a velocidade do vento anual e as usinas eólicas da região Nordeste.

A seguir, inicia-se os resultados de mapas de complementaridade obtidos através do *software* QGIS com auxílio dos valores obtidos do INMET, onde foram avaliados 3 tipos de correlações: hidro-eólica, hidro-solar e eólica-solar, onde cada correlação possui uma abrangência ao período anual.

4.1 Mapa de complementaridade hidro-eólica

Para o mapa de complementaridade hidro-eólica, o coeficiente de correlação indicado nas áreas em vermelho possui uma correlação negativa, ou seja, a medida em que a disponibilidade de um recurso natural aumenta, o outro diminui (complementaridade), e já as áreas esverdeadas mostram uma correlação positiva, no qual a disponibilidade de recursos ocorrem no mesmo período (similaridade). E por fim, as áreas mais esbranquiçadas mostram que essas duas variáveis não possuem qualquer tipo de correlação.

Como evidenciado na Figura 6, observa-se o mapa de complementaridade hidro-eólica durante os 12 meses de um ano característico gerado com as médias mensais de precipitação e velocidade do vento.

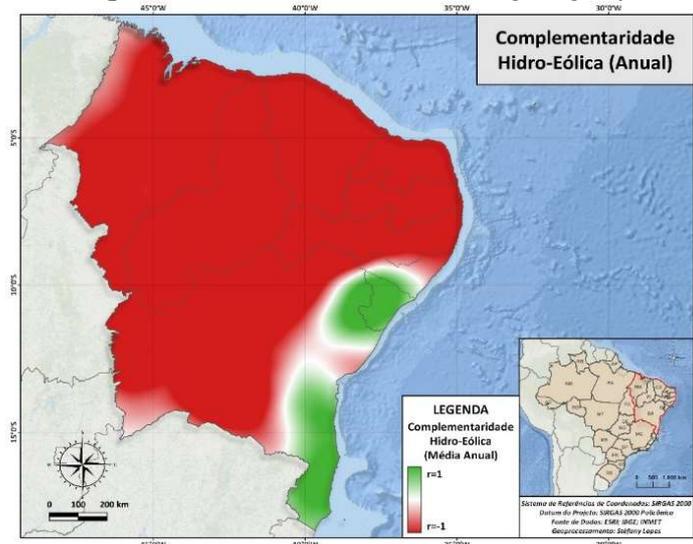


Figura 6. Mapa de complementaridade anual hidro-eólica da região Nordeste.

Na figura, destaca-se que o Nordeste possui um elevado índice de complementaridade se analisado ao longo do ano, principalmente nos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e no oeste da Bahia, além de mostrar uma alta similaridade do estado de Alagoas até o extremo sul da Bahia, comprovando assim que a região possui grande potencial de aproveitamento anual energético,

onde uma fonte de energia pode compensar a baixa (ou inexistência) da geração de outra energia, como já está ocorrendo na região, onde o primeiro semestre é predominante a geração de energia hídrica e no segundo semestre predomina a geração de energia eólica.

A seguir, observa-se através da Tabela 2 os principais índices de correlação hidro-eólica, evidenciando quais são as melhores regiões para se instalar uma usina integrada de energia hídrica e eólica com complementaridade através de um ano (correlação negativa), ou seja, onde o primeiro semestre focaria no recurso hídrico e o segundo semestre focaria na geração eólica. Além disso, as regiões que possuem alta similaridade podem operar de forma conjunta ao longo de todo o ano, ou seja, as duas produziriam de forma interligada.

Tabela 2. Principais índices de correlação hidro-eólica por EMA da região Nordeste.

Código EMA	Nome	UF	Índice de Correlação Hidro-Eólica
A360	Acaraú	CE	-0,933522356761
A217	Farol de Santana	MA	-0,923279396785
A224	Estreito	MA	-0,918383262320
A331	São Joao do Piauí	PI	-0,908068225675
A350	Serra Talhada	PE	-0,895501206192
A347	Campos Sales	CE	-0,877624368738
A354	Oeiras	PI	-0,866736362470
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
A405	Caravelas	BA	0,554149418187
A444	Valença	BA	0,559306550864
A450	Jeremoabo	BA	0,580446463426
A323	Pão de Açúcar	AL	0,618975991079
A419	Poco Verde	SE	0,625286230824
A445	Ipiaú	BA	0,637449825895
A447	Belmonte	BA	0,661433123796

4.2 Mapa de complementaridade hidro-solar

Para o mapa de complementaridade hidro-solar, o coeficiente de correlação indicado nas áreas em vermelho possui uma correlação negativa, ou seja, a medida em que a disponibilidade de um recurso natural aumenta, o outro diminui (complementaridade), e já as áreas azuladas mostram uma correlação positiva, no qual a disponibilidade de recursos ocorrem no mesmo período (similaridade). E por fim, as áreas mais esbranquiçadas mostram que essas duas variáveis não possuem qualquer tipo de correlação.

Como evidenciado na Figura 7, observa-se o mapa de complementaridade hidro-solar durante os 12 meses de um ano característico gerado com as médias mensais de precipitação e radiação solar. Nele, destaca-se que o Nordeste possui um elevado índice de complementaridade se analisado ao longo do ano, principalmente nos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte e litoral da Paraíba, além de mostrar uma alta similaridade do estado de Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e sul do Piauí, comprovando assim que a região possui grande potencial de aproveitamento anual energético, onde uma fonte de energia pode compensar a baixa (ou inexistência) da geração de outra energia, onde o primeiro semestre é predominante a geração de energia hídrica e no segundo semestre predomina a geração de energia solar. Mostrando assim, apesar de ocorrer de forma menos acentuada e abrangente do que a correlação hidro-eólica, a complementaridade dos recursos hídricos e solar que ocorre na região, possui potencial de aproveitamento anual energético bastante significativo com estas duas fontes de energia.

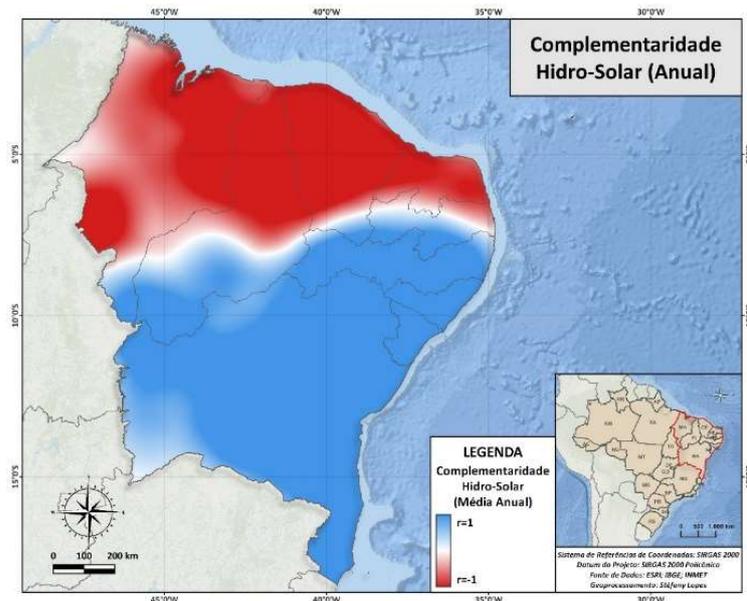


Figura 7. Mapa de complementaridade anual hidro-solar da região Nordeste.

A seguir, observa-se através da Tabela 3 os principais índices de correlação hidro-solar, evidenciando quais são as melhores regiões para se instalar uma usina integrada hidro-solar com complementaridade através de um ano (correlação negativa), ou seja, onde o primeiro semestre focaria no recurso hídrico e o segundo semestre focaria na geração solar. Além disso, mostra também as regiões que possuem alta similaridade, onde as usinas podem operar de forma conjunta ao longo de todo o ano.

Tabela 3. Principais índices de correlação hidro-solar por EMA da região Nordeste.

Código EMA	Nome	UF	Índice de Correlação Hidro-Solar
A360	Acaraú	CE	-0,942355034951
A224	Estreito	MA	-0,879744834856
A359	Itapipoca	CE	-0,812024348108
A325	Quixeramobim	CE	-0,764242243487
A203	São Luis	MA	-0,691133389506
A339	Jaguaruana	CE	-0,666403683664
A237	Caxias	MA	-0,644950506908
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
A450	Jeremoabo	BA	0,709507785299
A353	Arapiraca	AL	0,720771738371
A413	Feira de Santana	BA	0,732011072232
A408	Itaberaba	BA	0,734334607273
A440	Jacobina	BA	0,736967764240
A406	Cruz das Almas	BA	0,818687520164
A307	Petrolina	PE	0,852776849265

4.3 Mapa de complementaridade eólica-solar

Por último, para o mapa de complementaridade eólica-solar, o coeficiente de correlação indicado nas áreas em laranja possui uma correlação negativa, ou seja, a medida em que a disponibilidade de um recurso natural aumenta, o outro diminui (complementaridade), e já as áreas esverdeadas mostram uma correlação positiva, no qual a disponibilidade de recursos ocorrem no mesmo período (similaridade). E por fim, as áreas mais amareladas mostram que essas duas variáveis não possuem qualquer tipo de correlação.

Como evidenciado na Figura 8, observa-se o mapa de complementaridade eólica-solar durante os 12 meses de um ano característico gerado com as médias mensais de velocidade do vento e radiação solar.

Nele, destaca-se que o Nordeste possui um elevado índice de similaridade se analisado ao longo do ano, principalmente nos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Alagoas, Sergipe, parte de Pernambuco e leste da Bahia, além de mostrar uma elevada complementaridade no extremo oeste de Pernambuco e oeste da Bahia, abrangendo principalmente o leito do Rio São Francisco, comprovando assim que a região possui grande potencial de aproveitamento anual energético, onde uma fonte de energia pode compensar a baixa (ou inexistência) da geração de outra energia. Mostrando assim, a região possui potencial de aproveitamento anual energético bastante significativo com estas duas fontes de energia, pois em determinados períodos do ano esses recursos naturais possuem disponibilidade de forma simultânea, e assim, podem ser utilizados de forma conjunta em usinas híbridas, pois como a energia solar só está disponível para geração apenas em um horário específico, a energia eólica poderia suprir essa demanda energética no período em que não houvesse sol, já que é o período que mais necessita de energia para suprir a demanda por carga.

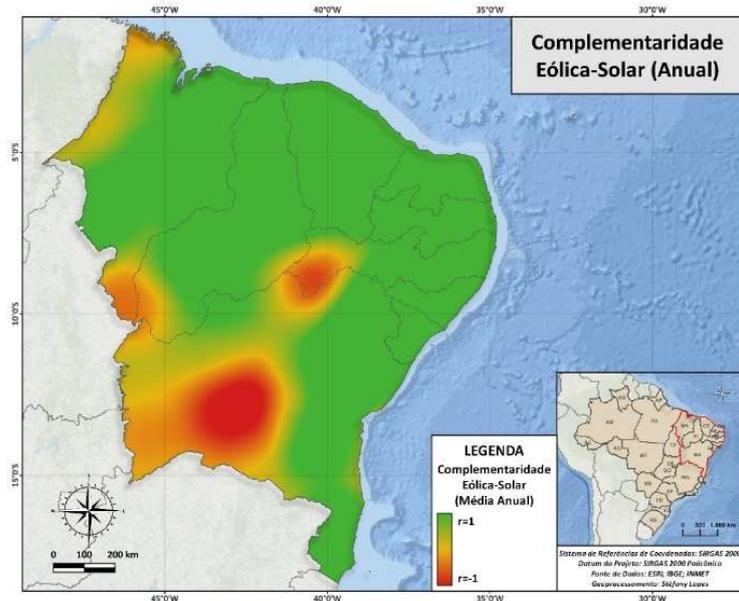


Figura 8. Mapa de complementaridade anual eólica-solar da região Nordeste.

A seguir, observa-se através da Tabela 4 os principais índices de correlação eólica-solar, evidenciando quais são as melhores regiões para se instalar uma usina integrada eólica-solar com complementaridade através de um ano (correlação negativa), e também evidenciar quais são as regiões que possuem alta similaridade (correlação positiva), onde essas usinas híbridas podem operar de forma conjunta ao longo de todo o ano, ou seja, as duas fontes de energia produziriam de forma interligada.

Tabela 4. Principais índices de correlação eólica-solar por EMA da região Nordeste.

Código EMA	Nome	UF	Índice de Correlação Eólica-Solar
A307	Petrolina	PE	-0,833336022809
A454	Macaúbas	BA	-0,695080711245
A403	Arembepe	BA	-0,689815134756
A434	Amargosa	BA	-0,603884242223
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
A419	Poço Verde	SE	0,940070674928
A420	Carira	SE	0,957323523027
A450	Jeremoabo	BA	0,967043107267
A327	Palmeira dos Índios	AL	0,969610404027
A323	Pão De Açúcar	AL	0,972662112398

Com isso, mostra-se que a região Nordeste possui um elevado potencial de complementaridade entre as fontes hídrica, eólica e solar, onde destaca-se principalmente a combinação de energia hidro-solar e

eólica-solar, que evidenciam várias regiões que podem ser mais exploradas com combinação de ativos de energia, como usinas híbridas, principalmente na implantação de usinas solar fotovoltaica flutuante em reservatórios de usinas hídricas e na construção de usinas eólica ou solar fotovoltaica em parques já existentes, considerando critérios técnicos, financeiros e aspectos locais das localidades apontadas.

5 Conclusão

Os resultados obtidos mostram que há mudanças temporais e espaciais óbvias entre os recursos naturais da região, e a expansão deve ser encorajada, mas combinações complementares de ativos devem ser estimuladas a fim de minimizar a intermitência na região e aumentar a variedade e segurabilidade de geração de energia. Entretanto, ao examinar os mapas de recursos naturais em relação as usinas existentes, nota-se que o norte do Piauí e os estados da Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte ainda possuem um grande potencial de expansão para a implantação de usinas fotovoltaicas, e que ainda existe um potencial inexplorado nos estados da Paraíba, do Pernambuco e o norte da Bahia na implantação de usinas eólicas.

Os recursos hídricos, embora estejam prejudicados devido ao esgotamento e à seca de longa duração que assolam a região, continuarão a ser a base da matriz elétrica do Nordeste, principalmente como armazenamento de energia, podendo assim contribuir com redução do efeito da intermitência das demais fontes. A energia térmica também possui grande relevância na geração, porém o seu despacho deve possuir menor variabilidade e deve-se minimizar grandes despachos emergenciais que acarretam custos altíssimos.

Através dos mapas de complementaridade gerados, foi possível analisar e comprovar que a região possui um elevado potencial para o aproveitamento de recursos intermitentes que possuem altos índices de correlação em praticamente toda região e que esses índices podem contribuir na expansão da matriz utilizando a combinação de ativos na geração de energia, onde a implantação de usinas híbridas podem fornecer energia com mais equidade durante um determinado período, como por exemplo uma usina solar fotovoltaica integrada a uma usina eólica, onde a última pode oferecer energia no período da noite, o que não é possível somente com uma usina solar, garantindo assim uma maior estabilidade em relação a oferta de energia, já que comumente utiliza-se mais energia no período da noite.

Na complementaridade hidro-eólica, somente duas estações meteorológicas apresentaram uma alta correlação negativa com possibilidade de integração de energia eólica a uma hidrelétrica já existente, foi a estação de Iguatu – CE que está localizada próxima a CGH Figueiredo e a estação de Floriano – PI, por sua vez localizada próxima a UHE Boa Esperança. No entanto, somente a CGH Figueiredo possui um elevado potencial eólico para a implantação de uma usina eólica.

Na complementaridade hidro-solar, destaca-se que as estações meteorológicas de Cruz das Almas – BA e Petrolina – PE apresentaram uma elevada similaridade entre os recursos hídricos e solar, onde essas estações estão justamente localizadas próximas a duas usinas hidrelétricas, UHE Pedra do Cavalo e UHE Sobradinho, respectivamente. Porém, a UHE de Sobradinho foi a primeira usina hidrelétrica do país a implantar uma usina solar fotovoltaica flutuante em seu reservatório, com capacidade de gerar de 1 MWp de energia, mostrando assim que essa usina possui ainda mais capacidade de expansão, com a garantia de fornecer uma energia hídrica e solar com mais segurabilidade em um mesmo período. A UHE Pedra do Cavalo é uma usina de reservatório, tal como Sobradinho, e que devido ao seu elevado índice de correlação positiva encontrada neste estudo, também tem a possibilidade de construção de uma usina solar flutuante em seu reservatório.

Por fim, na complementaridade eólica-solar, é possível destacar que as duas fontes de energia possuem correlação positiva em quase toda a região. Através das estações meteorológicas, observa-se que praticamente todas as usinas eólicas existentes podem ser facilmente integradas a usina solar fotovoltaica, ou vice-versa, devido aos elevados índices de similaridade que a região possui como demonstrado nesse estudo, e por isso, a região pode inserir várias usinas híbridas em seu subsistema.

Portanto, o estudo mostrou que a região pode obter uma autonomia energética ainda maior do que já possui, utilizando a complementaridade dos recursos de fontes intermitentes como a principal aliada na oferta e geração de energia, com a possibilidade de armazenamento de energia através dos reservatórios de energia hídrica que estão disponíveis na região, contribuindo com redução do efeito da intermitência das fontes eólica e solar, assim como na exportação de intercâmbios de energia para os outros subsistemas, auxiliando assim na matriz elétrica nacional, onde ocasiona numa redução na geração da energia térmica, e que pode resultar em uma maior sustentabilidade na região Nordeste brasileira.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Piauí (UFPI) pelo apoio e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelos dados fornecidos.

Referências bibliográficas

Beluco, A (2001) *Bases para uma metodologia de dimensionamento de aproveitamentos híbridos baseados em energias hidrelétrica e fotovoltaica*. Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Cantão, MP et al. (2017) ‘Evaluation of hydro-wind complementarity in the Brazilian territory by means of correlation maps’, *Renewable Energy*, v. 101, p. 1215, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.012>

Carta, JA et al. (2013) ‘A review of measure-correlate-predict (MCP) methods used to estimate long-term wind characteristics at a target site’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 27, p. 39, 2013. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.004>

De Jong, P et al. (2013) ‘Solar and wind energy production in relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil’. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, p. 526-535. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.050>

Eifler Neto, EE, (2012) *Estudo da complementaridade entre as disponibilidades de energia hídrica e eólica na região nordeste do Brasil*. Monografia (trabalho de conclusão de curso), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Engeland, K et al. (2017) ‘Space-time variability of climate variables and intermittent renewable electricity production – A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, pp. 600–617. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.046>

IBGE. Códigos dos Municípios. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/explica/codigos-dos-municipios.php> (acessado em: 10 out. 2022).

Peron, AM (2017) *Análise da complementaridade das gerações intermitentes no planejamento da operação eletro-energética da região nordeste brasileira*. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Prasad, AA et al. (2017) ‘Assessment of solar and wind resource synergy in Australia’. *Applied Energy*, v. 190, p. 354-367. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.135>

Rosa, COCS (2019) *Estudo de complementaridade entre as energias hidrelétrica, eólica e fotovoltaica nas regiões Sudeste e Centro-Oeste*. Dissertação de Mestrado, Curso de Ciência e Tecnologia, Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda.

Schmidt, J et al. (2016) ‘The role of wind power and solar PV in reducing risks in the Brazilian hydro-thermal power system’. *Energy*, v. 115, p. 1748-1757. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.059>