



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Avaliação da complementaridade entre os recursos eólico-solar e considerações sobre estabilidade no setor elétrico

Luan Santos de Oliveira Silva¹, Rosiberto Salustiano da Silva Junior², Roberto Fernando da Fonseca Lyra³, Fernando Ramos Martins⁴, Marcos Antônio Lima Moura⁵, João Bosco Verçosa Leal Junior⁶, Ewerton de Souza Muniz⁷, Luana do Nascimento Vasconcelos⁸

¹ Graduado em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9676-1327>

² Professor Nível Associado da Universidade Federal de Alagoas e Doutor em Meteorologia pela Universidade de São Paulo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7152-0095>

³ Professor Nível Associado da Universidade Federal de Alagoas e Doutor em Física da Atmosfera (micrometeorologia) pela "Université Paul Sabatier". ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4066-7451>

⁴ Professor Nível Associado na Universidade Federal de São Paulo (campus Baixada Santista) e Doutor em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7618-4462>

⁵ Professor Nível Associado da Universidade Federal de Alagoas e Doutor em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1523-7647>

⁶ Professor Nível Associado na Universidade Estadual do Ceará e Doutor em Física pela Universidade Federal do Ceará. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7636-7050>

⁷ Graduando em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7913-9813>

⁸ Graduando em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7001-5287>

Artigo recebido em 08/05/2023 e aceito em 04/04/2024

RESUMO

A expansão das fontes renováveis de energia impulsiona o interesse dos investidores, promove a inovação científica e cria empregos, ao mesmo tempo em que diminui as emissões de gases de efeito estufa e reforça a estabilidade da matriz elétrica. No entanto, a natureza variável dessas fontes requer uma estratégia híbrida para mitigar seus efeitos. Assim, objetivo deste estudo foi realizar o mapeamento do potencial eólico e solar no estado de Alagoas, Nordeste do Brasil, visando o desenvolvimento da geração combinada dessas fontes. Foi utilizado o modelo Weather Research Forecast (WRF) com aproximações de estabilidade atmosférica e declividade do terreno para o maior refinamento de grade (resolução de 250m). Já o WRF-Solar, uma extensão do WRF, foi selecionado devido ao fator de ser uma ferramenta aprimorada com melhorias físicas, desenvolvida para atender às exigências e aplicações específicas relacionadas à análise do recurso solar. As simulações atmosféricas foram executadas diariamente por um período de 8 anos (2008 - 2015). Quanto ao recurso eólico, os resultados mostraram ventos a 100m com intensidades de 8 m/s e persistentes de Leste/Sudeste para as cidades de Poço Branco, Palmeira dos Índios e Feliz Deserto. Quanto ao recurso solar, destaca-se todo o território alagoano propício à geração fotovoltaica pela abundante irradiação solar, em média de 6,5 kWh/m², ultrapassando os limites mínimos atrativos para investimentos na produção de energia. Quanto a geração híbrida, os cenários da produtividade combinada apresentam uma sazonalidade inversa à disponibilidade hídrica em relação a Usina Hidrelétrica de Xingó, o que contribui para diversificar a oferta de energia na rede elétrica durante os períodos de estiagem. Além disso, a maior segurança energética é estabelecida através de um sistema de energia híbrido com maior predominância da geração fotovoltaica.

Palavras-chave: Energia Eólica, Energia Solar, Complementaridade, Equilíbrio de energia, Geração de Energia Híbrida.

Evaluation of the complementarity between wind and solar resources and considerations about stability in the electricity sector

ABSTRACT

The expansion of renewable energy sources drives investor interest, promotes scientific innovation, and creates jobs, while simultaneously reducing greenhouse gas emissions and reinforcing the stability of the electrical grid. However, the variable nature of these sources requires a hybrid strategy to mitigate their effects. Thus, the objective of this study was to map the wind and solar potential in the state of Alagoas, northeastern Brazil, aiming at developing combined generation from these sources. The Weather Research Forecast (WRF) model was used with atmospheric stability and terrain slope approximations for finer grid refinement (250m resolution). The WRF-Solar, an extension of WRF, was selected due to its enhanced physical improvements, developed to meet specific requirements and applications related to solar resource analysis. Atmospheric simulations were run daily for a period of 8 years (2008 - 2015). Regarding the wind resource, the

results showed winds at 100m with intensities of 8 m/s and persistent from the East/Southeast for the cities of Poço Branco, Palmeira dos Índios, and Feliz Deserto. As for the solar resource, the entire territory of Alagoas is suitable for photovoltaic generation due to abundant solar irradiation, averaging 6.5 kWh/m², surpassing the minimum attractive limits for investments in energy production. Regarding hybrid generation, combined productivity scenarios exhibit a seasonality inverse to the availability of water resources in relation to the Xingó Hydroelectric Plant, which contributes to diversifying energy supply on the grid during dry periods. Furthermore, greater energy security is established through a hybrid energy system with a higher predominance of photovoltaic generation.

Keywords: Wind Energy, Solar Energy, Complementarity, Energy Balance, Hybrid Power Generation.

Introdução

O aumento da população e o crescimento das cidades trouxeram uma série de novos problemas associados ao crescente consumo de energia. A preocupação mundial com as mudanças climáticas demonstra a necessidade de substituição de combustíveis fósseis por fontes mais sustentáveis para construir um sistema de energia econômico e ecologicamente correto para o futuro (Dranka e Ferreira, 2020). O Acordo de Paris de 2015 apresenta ambições globais para alcançar um equilíbrio entre as emissões antropogênicas pelas fontes e remoção de gases ditos como causadores do efeito estufa, para a segunda metade deste século. Uma solução para cumprir esses desafios seria reduzir as emissões oriundas da queima de combustíveis fósseis, implantando a diversificação as fontes de geração de energia em larga escala. Isso corresponde ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU n.º 7, cuja meta seria trabalhar por energia acessível e limpa para todos com o objetivo de aumentar substancialmente a participação de energia renovável na matriz energética global até 2030. Além disso, a inclusão de estratégias de mitigação da mudança climática pela inclusão no desenvolvimento de geração de energia elétrica 100% por fontes renováveis e no apoio à infraestrutura, contribuem para o cumprimento dos ODS n.º 6 (água potável e saneamento), n.º 9 (indústria, inovação e infraestrutura), n.º 11 (cidades e comunidades sustentáveis), n.º 12 (produção e consumo responsáveis) e n.º 13 (ação climática) (Hansen et al., 2019). Com isso, o conceito de um sistema de energia renovável tem se tornado prioridade nos países como a Suécia, onde a ambição do governo é atingir a geração de energia elétrica 100% renovável até 2040 (Zhong et al., 2021), a Dinamarca, onde estabelece a meta para atingir um sistema de energia 100% renovável até 2050 (Korberg et al., 2020), a Filipinas, que busca diversificar o setor de geração de energia a partir das fontes renováveis para melhorar a segurança energética (Mondal et al., 2018) e, o Brasil, que visa a transição energética com a penetração das fontes renováveis e o uso do gás natural até 2050 (Brasil et al., 2020).

O Setor Elétrico Brasileiro é o sexto maior do mundo em termos de geração de energia elétrica (Bp, 2022), sendo 190 gigawatts (GW) de capacidade instalada centralizada na matriz elétrica cuja base principal é composta por um sistema de energia hidrotérmica de grande porte, com 51% de usinas hidrelétricas, 24% de usinas termelétricas, 14% de usinas eólicas e 5% de usinas solares (ANEEL, 2024). O Setor Elétrico Brasileiro é responsável regulação plurianual e intra-anual dos reservatórios hidrelétricos, permitindo a geração desta fonte em épocas secas, bem como, a flexibilização dos reservatórios hidrelétricos para acomodar (armazenar) a variabilidade horária a diária (incerteza) dos ventos (Silva et al., 2016) e em virtude do Sistema Interligado Nacional (SIN) o país permite a troca de energia elétrica em longas faixas territoriais, com mais de 179.766 km de linhas de transmissão de alta tensão (MME, 2023).

Embora com potencial relativamente alto para exploração da energia renovável, o país sofre com interrupções ou escassez de energia elétrica em virtude da forte dependência do regime pluviométrico e do fluxo de água nas bacias hidrográficas. Atualmente as bacias hidrográficas localizadas no Nordeste têm sofrido intensa restrição hídrica ocasionando perdas de produtividade das hidrelétricas devido estiagem prolongada (Campos et al., 2021; Santos et al., 2020). A escassez de energia tem impactos prejudiciais para o crescimento econômico do Brasil, e no sentido de tentar mitigar esses impactos o governo brasileiro promove leilões de energia renováveis afim de fomentar a competição entre os agentes de geração na contratação de energia elétrica, atendendo princípios de segurança no abastecimento, com aquisição pelo menor preço e garantia de atendimento ao mercado consumidor. Vale destacar ainda, que os leilões realizados no Brasil visam conciliar a economia do país aos mercados de eletricidade e viabilizar uma estrutura institucional e política mais ampla para garantir o sucesso a longo prazo (Tolmasquim et al., 2021).

Devido à notável variabilidade espacial e temporal das fontes de energia influenciadas pelas condições atmosféricas, uma solução frequentemente sugerida para lidar com a

discrepância entre demanda e oferta na geração renovável é a hibridização de duas ou mais fontes de energia em uma única estação (como eólica-solar, solar-hídrica ou solar-eólica-hídrica) (Jurasz et al., 2020). É essencial avaliar e analisar as condições meteorológicas, como radiação solar, temperatura, umidade, precipitação, velocidade e direção do vento, e nebulosidade. Além disso, a avaliação da topografia, uso/cobertura do solo, presença de corpos d'água, áreas protegidas, florestas, aeroportos e regiões urbanas e costeiras é crucial, pois esses fatores podem influenciar as condições meteorológicas e até mesmo afetar diversos aspectos (Pedruzzi et al., 2023). Entretanto, as previsões da irradiação e dos padrões do vento não são suficientes para os operadores do sistema de energia. A conversão dos recursos eólico e solar em produção real de energia é uma etapa necessária, frequentemente subestimada em termos das grandes incertezas que podem surgir quando as características detalhadas dos sistemas eólicos e fotovoltaicos não são levadas em consideração (Reindl et al., 2017). Portanto, torna-se crucial empregar a combinação de técnicas meteorológicas e aplicá-las para atender às exigências de operadores de sistemas de energia e proprietários de instalações de fontes de energias renováveis.

A maneira mais eficaz de avaliar os recursos solares é através da disponibilidade de dados de alta qualidade sobre a radiação solar medida localmente, o que representa o cenário ideal para reforçar a viabilidade financeira de um grande projeto solar. Contudo, tais medições estão limitados a um período bastante curto ou representam apenas pequenas áreas dentro de um campo de visão limitado (Luiz et al., 2018). A única opção é utilizar bancos de dados preexistentes de irradiação derivada por satélite ou modelagem atmosférica. Os modelos atmosféricos utilizam leis matemáticas e físicas bem estabelecidas que descrevem as numerosas dinâmicas e fenômenos da atmosfera para estimar as variáveis meteorológicas - como temperatura, velocidade e direção do vento, radiação solar, precipitação e cobertura de nuvens - bem como, empregam parametrizações físicas para representar os processos químicos e físicos que ocorrem nas interações terra-atmosfera (Pedruzzi et al., 2023). Nota-se limitações em reproduzir de forma assertiva a nebulosidade e a profundidade óptica dos aerossóis (Ahmed et al., 2020). Geralmente, a representação dos aerossóis em modelos atmosféricos é bastante simplificada e, ocasionalmente, tende a superestimar o recurso solar. A fim de solucionar essas limitações, o

modelo WRF-Solar, que é uma extensão do WRF, foi projetado para cobrir as demandas de aplicações de energia solar capaz de representar com precisão e alta resolução espacial o sistema nuvem-aerossol-radiação (Jimenez et al., 2016). D'Isidoro et al. (2020) notaram o bom desempenho do WRF-Solar na reprodução da irradiação solar no solo em comparação as observações locais permitindo estimar o potencial fotovoltaico de Lesoto (África do Sul). Novas alternativas surgiram para melhorar a representação dos aerossóis no modelo de mesoescala, a título de exemplo, a utilização de produto da profundidade óptica do aerossol (AOD) por satélite meteorológico geoestacionário, que fornece imagem de satélite completa da região específica a cada instante. Cheng et al. (2022) e Jain et al. (2021) observaram que a inclusão de dados de AOD baseados em satélite no WRF-Solar é eficaz para diminuição no erro sistemático causado pelas propriedades ópticas do aerossol e sua variabilidade espaço-temporal.

A modelagem atmosférica também é essencial para a prospecção do setor eólico, pois é usada a longo prazo no planejamento de parques eólicos, a médio prazo para manutenção e resolução de problemas, e a curto prazo para ajustes na capacidade de reserva e despacho, visando reduzir a instabilidade causada pela energia eólica na rede elétrica (Tsai et al., 2023). Os métodos adotados para determinação das áreas promissoras, fazem uso de padrões do vento como intensidade e predominância para realizar estimativas do potencial eólico de uma dada região de interesse (Dayal et al., 2021) e, aliado a isso, também são consideradas as características do terreno (topografia, obstáculos e rugosidade) (Siewert e Kroszczynski, 2023).

Novos desafios são gerados pela intermitência e a variabilidade, juntamente com a crescente penetração das fontes renováveis de energia no nordeste brasileiro que provoca perdas de corte devido ao congestionamento do sistema de transmissão, mas também criam oportunidades no planejamento da matriz elétrica nacional. Campos et al. (2020) apontaram que uma combinação baseada em 40% de energia eólica e 60% de energia solar exigiria o equivalente a apenas 6% de sua geração anual em capacidade de armazenamento. Alguns esforços surgiram de modo a quantificar a complementaridade dos recursos eólico e solar com base na porcentagem de horas, em que a disponibilidade mínima de geração dos recursos são opostas de modo a caracterizar a complementaridade (Prasad et al., 2017). Já Tan et al. (2021) ao avaliarem a geração hidrelétrica sugerem um ajuste para atingir a geração total de

energia, de modo que o sistema híbrido eólico-fotovoltaico-hídrico reduz a variabilidade das gerações eólica e solar que, por sua vez, aumenta a eficiência do despacho de energia nas linhas de transmissão, propiciando mais estabilidade na rede elétrica.

Sendo assim, surgem dúvidas se a combinação dos recursos eólico e solar proporciona maior garantia de suprimento em comparação a utilização de apenas uma das fontes, tendo em vista que haja uma produção não correlacionada decorrente da diversificação. Muitos estudos vão na direção de utilizar o coeficiente de correlação de Pearson como métrica para avaliar a relação entre a disponibilidade de recursos solares e eólicos com o propósito de compensar as desvantagens derivadas da intermitência das fontes renováveis de energia (Gallardo et al., 2020; Monforti et al., 2014; Soukissian et al., 2021). Algumas limitações são implícitas a este método conforme apontado por Cantor et al. (2022): a correlação negativa não implica automaticamente complementaridade entre variáveis; as dimensões das variáveis devem ser consideradas para determinar a complementaridade

real; análises de correlação são limitadas a apenas duas séries, o que pode ser uma limitação em cenários mais complexos.

Com o intuito de viabilizar a exploração da energia eólica e solar em todo o estado de Alagoas, os objetivos deste trabalho são: 1) conceder uma estimativa do potencial eólico e solar para o território alagoano, 2) identificar e avaliar as áreas promissoras a complementaridade desses recursos e 3) verificar diferentes cenários de geração de energia híbrida capaz de reduzir a variabilidade diária ao longo do ano.

Material e Métodos

Área de Estudo

O estado de Alagoas limita-se a Sudoeste com os estados da Bahia e Sergipe e a Norte com o estado de Pernambuco. A malha rodoviária que cobre o território tem aproximadamente 915 km extensão, dos quais 81,4% são pavimentadas. O sistema de transmissão no estado de Alagoas está conectado ao SIN através das linhas de transmissão de 230 e 500 kV e reúne 6 subestações de energia elétrica (Figura 1).

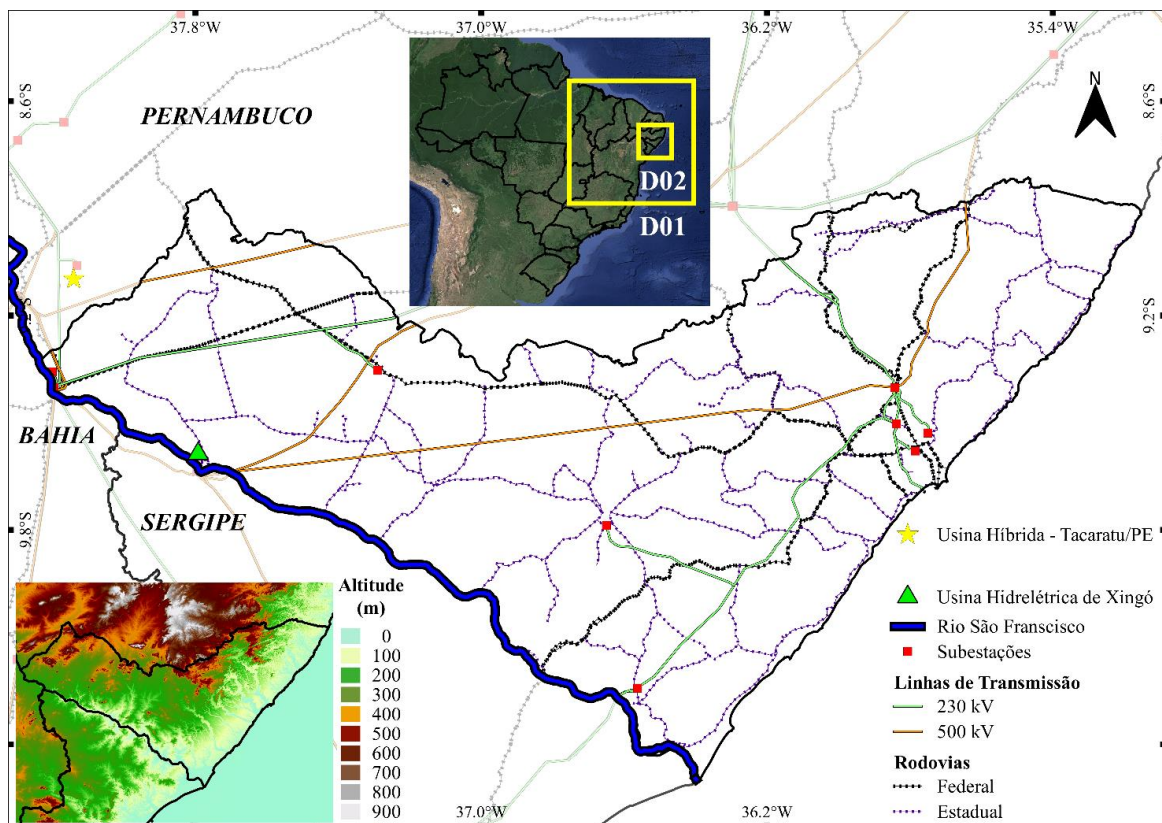


Figura 1: Localização e georreferenciamento da área de estudo, com destaque para configuração dos domínios utilizados nas simulações (D01 e D02), descrição da topografia (m), Rio São Francisco. Abordagem sobre energia elétrica (Usina Hidroelétrica de Xingó (AL-SE), Usina Híbrida localizada em Tacaratu/PE e subestações) e informações logísticas de implantação (Rodovias e Linhas de Transmissão).

Ferramentas Utilizadas - Modelos Atmosféricos WRF e WRF-Solar

As simulações atmosféricas foram realizadas a partir do modelo atmosférico Weather Research Forecast (WRF) desenvolvido no National Center for Atmospheric Research (Skamarock et al., 2005, 2008), versão 4.4.1, tendo como dados de entrada a reanálise climática global “ECMWF Reanalysis v5” (ERA5 - <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmw-f-reanalysis-v5>) com resolução espacial de 30 km e temporal de 3 horas. Nas duas versões do modelo atmosférico foram configurados com 2 domínios, sendo o primeiro domínio com resolução espacial de 20 km e o segundo domínio de 5 km. O domínio 1 abrange parte da região do Nordeste Brasileiro (NEB), enquanto o domínio 2 compreende o estado de Alagoas. Em ambos os domínios foram adotados 38 níveis verticais para o perfil atmosférico. A validação desses modelos se deu a partir dos pontos de grade contidos no domínio 2.

O modelo atmosférico WRF-Solar conforme descrito por Ramos et al. (2020) com base nas contribuições de Jimenez et al. (2016), apresenta as principais melhorias e novidades desenvolvidas para essa ferramenta: a) disponibilidade das componentes de irradiância solar global horizontal (GHI), direta normal (DNI) e difusa horizontal (DHI); b) parametrização de efeito direto do aerossol com melhorias na representação radiação solar – aerossol e radiação – nuvem (Ruiz-Arias et al., 2014); c) parametrização do efeito indireto do aerossol, que considera os processos físicos entre formação de nuvem e as propriedades higroscópicas de aerossol (Thompson et al., 2016); d) parametrização de

nuvens de subgrade com tratamento híbrido, resolvendo nuvens rasas e profundas e seus efeitos na radiação de onda curta (Deng et al., 2014); e) implementação do algoritmo FARMS – Fast All-sky Radiation Model for Solar Applications (Xie et al., 2016).

A Tabela 1 mostra as principais parametrizações físicas utilizadas em ambos os domínios. Para investigar o mecanismo seguido pelos inputs do modelo do esquema de radiação de ondas curtas na afetação da precisão da simulação da irradiância solar na superfície, foram mantidas todas as outras configurações físicas iguais para ambos os esquemas, exceto para o esquema de radiação de ondas curtas. Os dados climatológicos mensais de profundidade óptica de aerossol (AOD) foram incorporados às simulações do WRF-Solar a partir do produto de reanálise de aerossóis da análise retrospectiva da era moderna para pesquisa e aplicações, versão 2 (MERRA-2). Esse produto incorpora AOD corrigido de viés derivado de instrumentos orbitais, como o espectrorradiômetro de resolução moderada (MODIS) e o radiômetro avançado de alta resolução (AVHRR), bem como recuperações de aerossóis do espectrorradiômetro de imagem de múltiplos ângulos (MISR) sobre superfícies brilhantes, junto com observações em solo da rede robótica de aerossóis (AERONET) e do sistema de modelagem GEOS 5-GOCART totalmente acoplado (Randles et al., 2017). A resolução horizontal do produto de aerossóis do MERRA-2 é de 0,5 grau de latitude por 0,625 grau de longitude. A AOD em 550 nm do MERRA foi convertido para um formato netCDF, que é reconhecido pelo WRF.

Tabela 1: Esquemas de configuração e parametrização utilizados no WRF e no WRF-Solar.

Parâmetros	Esquema 1 (WRF)	Esquema 2 (WRF-Solar)
Esquema de radiação de ondas longas	RRTMG (Iacono et al., 2008)	RRTMG (Iacono et al., 2008)
Esquema de radiação de ondas curtas	RRTMG (Iacono et al., 2008)	Goddard (Chou e Suarez, 1994)
Microfísica	Purdue Lin (Lin et al., 1983)	Purdue Lin (Lin et al., 1983)
Cumulus	Grell-Devenyi (Grell e Dévényi, 2002)	Grell-Devenyi (Grell e Dévényi, 2002)
Camada Limite Atmosférica	ACM2 (Pleim, 2007)	ACM2 (Pleim, 2007)
Camada Limite Superficial	Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (Monin e Obukhov, 1954)	Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (Monin e Obukhov, 1954)
Turbulência Atmosférica	Mellor-Yamada (Mellor e Yamada, 1974)	Mellor-Yamada (Mellor e Yamada, 1974)
Modelo de superfície terrestre	Noah (Chen e Dudhia, 2001)	Noah (Chen e Dudhia, 2001)
AOD	-	MERRA AOD a 550 nm

A variável velocidade do vento é formada pelas componentes de vento meridional (v_{10}) e zonal (u_{10}) a 10 metros em m/s e, posteriormente, extrapolada para a altura de 100m utilizando o perfil logarítmico. Para a variável de direção do vento, os dados foram extraídos diretamente das saídas do modelo WRF para a altura de 10m de altura e assumido que não ocorrem mudanças significativas entre as alturas de 10 a 100m (Silva Junior et al., 2010). A radiação solar global na superfície terrestre, dada em W/m^2 , é usada para avaliar o potencial solar fotovoltaico.

Diminuição de grade da saída do modelo WRF

A partir dos resultados gerados com as simulações realizadas com o modelo atmosférico WRF para o estado de Alagoas (domínio mais refinado d02), foram realizados os ajustes de declividade baseado em Solano et al. (2021), sendo determinado a partir dos dados de topografia SRTM (“*Shuttle Radar Topography Mission*”) com resolução espacial de 30m. As aproximações e os tratamentos de subgrade, foram realizados para melhoria da resolução do modelo atmosférico WRF, para estimativa da velocidade do vento à 100m de altura, considerando a declividade e os

parâmetros de estabilidade de Monin-Obukov, conforme Silva et al. (2023).

Os dados de uso do solo (tipo de cobertura do solo) utilizados para determinar os parâmetros de rugosidade Z_0 (Dorval et al., 2017; Ramos, 2012; Troen e Lundtang Petersen, 1989) foram obtidos com base no projeto MapBiomas (<http://mapbiomas.org>). Os mapas demonstram os principais tipos de cobertura do solo para o período entre 1985 e 2020 dos principais biomas brasileiros com resolução espacial de 30m produzidos com base em imagens de satélite do Landsat usando um tratamento randômico para interferência de nuvens utilizadas pelo “*Google Earth Engine*”. O esquema de classificação apresenta 20 categorias definidas para todo o Brasil (Mas et al., 2019).

Complementaridade entre as fontes eólica-solar para os pontos de grade

Mais formalmente, dadas as séries das médias diárias dos valores da produtividade eólica $P_{w,i}(x, y, t)$ e valores da produtividade fotovoltaica $P_{s,i}(x, y, t)$ onde as coordenadas x e y definem a localização geográfica e $t = 1, \dots, 2922$ a t -ésima dia da série temporal de 2008-2015, o coeficiente de correlação Pearson diário entre os recursos eólico e solar no ponto de grade é calculado como:

$$r = \frac{\sum_{t=1}^N (P_{w,i}(x, y, t) - \overline{P_{w,i}}(x, y)) (P_{s,i}(x, y, t) - \overline{P_{s,i}}(x, y))}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (P_{w,i}(x, y, t) - \overline{P_{w,i}}(x, y))^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N (P_{s,i}(x, y, t) - \overline{P_{s,i}}(x, y))^2}} \quad (1)$$

Estimativa do parâmetro de produtividade dos sistemas fotovoltaico e eólico

Para o cálculo da geração fotovoltaica foi utilizada a relação de potência solar instantânea ($P_{s,i}$) em função da potência nominal ($P_{0,s}$) sugerida por (Lorenzo, 2002):

$$P_{s,i} = P_{0,s} \cdot \frac{GHI}{G^*} \cdot FS \cdot PR \quad (2)$$

Onde: GHI representa a média dos dados de irradiação solar global ($kWh/m^2.dia$), G^* é a irradiância de referência para capacidade nominal dos módulos em condições de teste padrão, sendo $1 kW/m^2$; PR representa o índice de desempenho do sistema, sendo adotado 0,75% e FS é o fator de sombreamento, sendo adotado o valor igual 1 (sem sombreamento).

A obtenção da potência eólica instantânea a partir da conversão de energia cinética do vento, envolve considerações específicas sobre o aerogerador escolhido e sua curva de potência. Optou-se por empregar a curva de um aerogerador comercial da marca Vestas com uma potência eólica nominal de 2300 kWp e um diâmetro de pá de 101 metros. Este aerogerador inicia sua

operação a uma velocidade de partida (V_{cut-in}) de 3,0 m/s, atingindo a velocidade nominal de 12,0 m/s quando alcança sua potência máxima. A velocidade de corte deste aerogerador é estabelecida em 25 m/s. Considerou-se uma altura do cubo estabelecida em 100 metros. A curva de potência eólica é representada pela seguinte equação:

$$P_{w,i} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot V_{100}^3 \quad (3)$$

Onde: ρ denota a densidade do ar, sendo $1,225 kg/m^3$ e C_p representa o coeficiente de potência do aerogerador, igual a 44%.

Conforme observado na literatura (Haffaf et al., 2021; Khalid et al., 2016; Velloso et al., 2019), a determinação da produtividade (“*Final Yield*” - YF, em inglês) representa um indicador conveniente para comparar o desempenho dos sistemas eólico e solar em diferentes condições operacionais, independentemente da sua capacidade instalada e localidade. Este índice de desempenho usado, é definido pela razão entre a potência instantânea (kWh) por um período

específico (diário, mensal e anual) e a potência nominal da planta (kWp) conforme equação:

$$YF = \frac{P_i}{P_n} \quad (4)$$

Cenários de hibridização

Neste trabalho, uma abordagem proposta por Bett e Thornton (2016) e adaptada por Gonçalves (2021), é empregada para avaliar a diversas combinações de geração eólica e solar. Para isso, define-se a fração eólica (λ_w) como a relação entre a potência eólica nominal ($P_{0,w}$) e a potência total da planta híbrida. A fração eólica varia de 0 a 1, conforme indicado pela equação:

$$\lambda_w = \frac{P_{0,w}}{P_{0,w} + P_{0,s}} \quad (5)$$

Assim, o cálculo da produtividade híbrida consiste essencialmente em uma média ponderada pelos valores da fração eólica entre os fatores de capacidade individuais, eólico e solar, conforme a equação:

$$YF_{w,s} = \lambda_w \cdot YF_w + (1 - \lambda_w) \cdot YF_s \quad (6)$$

Variabilidade na produção de energia híbrida

A variabilidade do recurso tem um impacto significativo no planejamento de um parque híbrido e no financiamento do projeto, pois os investidores geralmente preferem uma receita estável. Como resultado, a variabilidade temporal do recurso e sua evolução são extremamente importantes para o futuro do empreendimento. Desse modo, a variabilidade temporal do recurso é estudada através do coeficiente de variação (COV) da geração de energia híbrida, calculado para cada mês no período de 8 anos. O COV pode ser definido como a razão do desvio padrão (σ) para o valor médio ($\bar{X}$) de uma amostra estatística:

$$COV_m = \frac{\sigma_m}{\bar{X}_m} \quad (7)$$

Complementaridade da produção eólica-fotovoltaica e hidroelétrica

A vazão afluyente da Usina Hidrelétrica de Xingó, localizada na bacia do Rio São Francisco, foi escolhida como referência para identificação de curvas distintas entre a disponibilidade do recurso hídrico e a produção combinada (eólica/solar) a partir da produtividade em cada cenário de estabilidade. A abordagem empregada visa impulsionar a expansão e a diversificação do setor elétrico, a fim de compensar a geração anual de energia. A série temporal foi obtida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e analisadas as médias mensais da vazão afluyente no período de 01/01/2008 a 31/12/2015.

Resultados e discussão

A Figura 2 apresenta o mapa da velocidade média do vento a 100 metros, proveniente das simulações atmosféricas com redução de grade. Nota-se a presença de áreas promissoras com velocidade do vento acima de 7 m/s nas cidades de Feliz Deserto, Palmeira dos Índios e Poço Branco. Vale destacar ainda que em regiões do nordeste do estado - onde está situado o Planalto da Borborema - na cidade de Girau do Ponciano (centro-sul) e a oeste do estado alagoano apresentam valores de aproximadamente 6,5 m/s, cujas maiores intensidades são devidas as altitudes mais elevadas, bem como, diminuição do efeito da rugosidade nestas regiões. Vale ressaltar que em terrenos acidentados não é comum a instalação de aerogeradores no território brasileiro, devido aos altos custos que demanda tal atividade. Por outro lado, essas localidades detêm a vantagem pela proximidade com as linhas de transmissões de energia elétrica e rodovias, juntamente ao elevado aproveitamento eólico em virtude da intensidade do vento variando entre 7 e 9 m/s. O menor potencial eólico observa-se em áreas de vales cujo escoamento atmosférico é reduzido, como é o caso de Arapiraca e da região metropolitana de Maceió. Essas áreas têm um alto índice de rugosidade devido a presença de áreas urbanas, cujas intensidades giram em torno de 3 m/s.

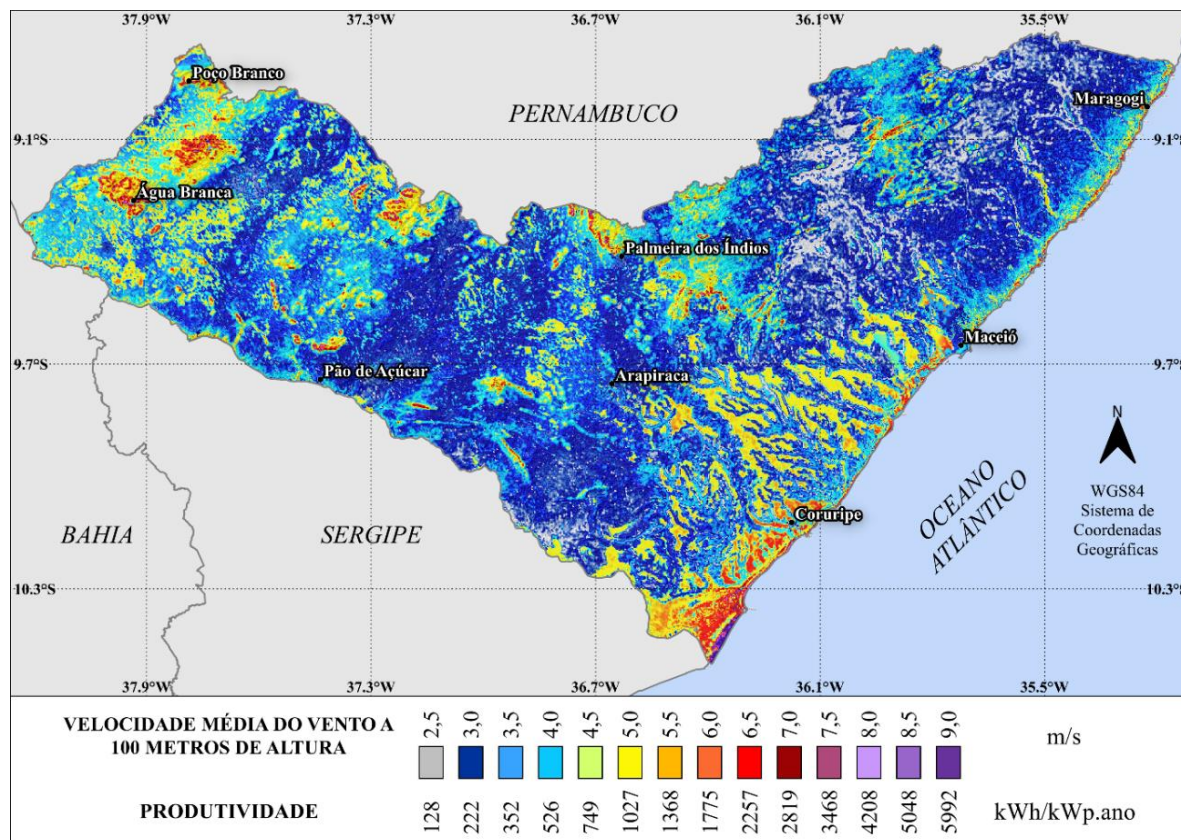


Figura 2: Mapeamento da velocidade do vento a 100 metros e da produtividade eólica no estado de Alagoas para 100 metros de altura, utilizando o modelo WRF com refinamento de grade (resolução espacial de 250 metros), abrangendo o período de 2008 a 2015.

Rodrigo et al. (2017) destacaram que existe uma forte ligação entre áreas de forçamentos topográficos e ventos mais intensos, sendo explicado principalmente pela tendência do perfil logaritmo do vento, ou simplesmente pela diminuição da influência da rugosidade superficial com a altura, fato este também melhor representado quando ocorre o aumento da resolução espacial do vento. Silva et al. (2023) observaram o maior detalhamento espacial da intensidade do vento, evidenciando o melhor ajuste do escoamento horizontal na atmosfera. Logo, os resultados demonstram uma maior representatividade em áreas acidentadas devido ao refinamento da grade a partir dos parâmetros de estabilidade atmosférica e declividade. Isso revela os efeitos da presença de terrenos complexos, bem como, a variação adequada dos comprimentos de rugosidade, os quais, em resoluções espaciais grosseiras, são

suavizados e incompatíveis com as características locais.

Os resultados apresentados na Figura 3 mostra a frequência relativa da direção do vento para as cidades sinalizadas como promissoras para exploração da energia cinética do vento para geração de energia eólica e busca avaliar a constância do vento, além de definir a direção predominante. Em média, os ventos foram predominantemente nas direções Leste e Sudeste para as três localidades alagoanas avaliadas (Poço Branco, Palmeira dos Índios e Feliz Deserto). Os resultados aqui encontrados corroboram com Costa e Lyra (2012) que também identificaram baixa variabilidade na direção do vento entre as mesorregiões alagoanas do sertão, agreste e litoral.

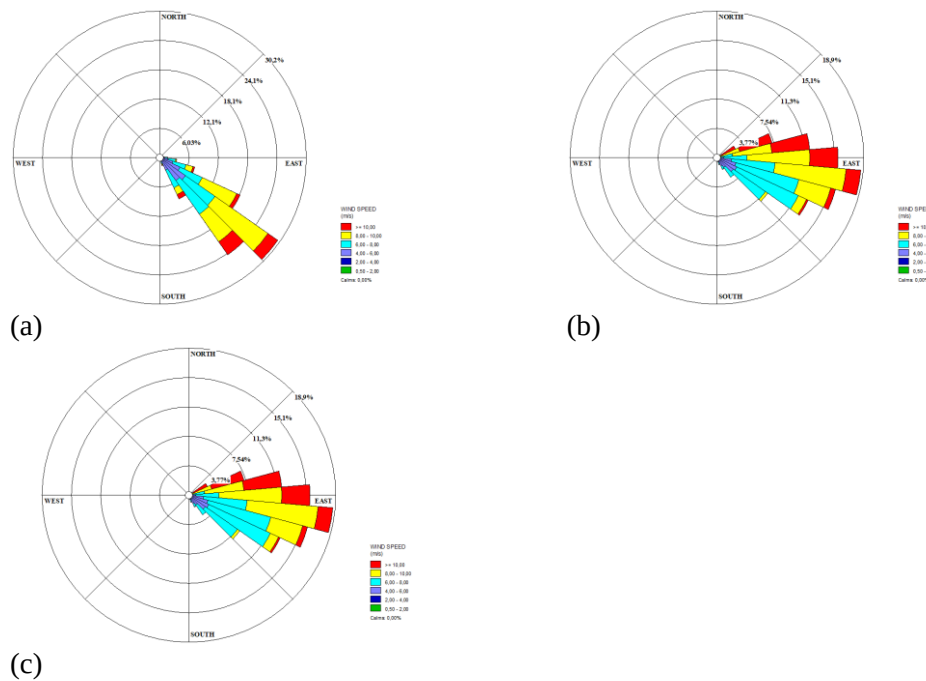


Figura 3: Distribuição da direção do vento para as cidades de Poço Branco (a), Palmeira dos Índios (b) e Feliz Deserto (c), utilizando o modelo WRF durante o período de 2008 a 2015.

Na Figura 4 a média anual da irradiação solar incidente no estado de Alagoas é espacialmente heterogênea, em especial, devido aos diversos sistemas meteorológicos atuantes na região que afetam esta localidade ao longo do ano. Os valores mais baixos de irradiação solar ocorrem na faixa litorânea por consequência de fenômenos meteorológicos como os Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN), os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), as brisas marítimas e os ventos alísios (Lima et al., 2016; Silva et al., 2023), e ainda o fator continentalidade que proporciona maior nebulosidade na região litorânea e diminuição no interior do continente. Os maiores valores de irradiação solar incidente ocorrem no sertão, abrangendo as cidades de Pão de Açúcar, Água Branca e Poço Branco, que detém valores em torno de 6,8 kWh/m². Isto é explicado pela presença do Planalto da Borborema na região em transição com a zona da mata que age como barreira topográfica promovendo a convergência dos ventos alísios de sudeste-leste, proporcionando menos chuvas no sertão (menor nebulosidade) e mais chuvas no litoral alagoano (maior nebulosidade) (Barros et al., 2012; Moura et al., 2020). Já o menor potencial fotovoltaico é encontrado na região litorânea. No entanto, os valores da irradiação solar para o território alagoano estão de acordo aos limites

mínimos de atratividade para investimentos (SECTI, 2018). Verifica-se também que as cidades de Feliz Deserto, Palmeira dos Índios e Poço Branco são identificadas como promissoras para o aproveitamento de energia eólica e solar. Portanto, essas áreas são capazes de oferecer um menor custo logístico, podendo aumentar a competitividade do projeto.

Em linhas gerais, o estado de Alagoas apresenta um bom potencial anual para produção de energia solar, variando entre 1558 e 1916 kWh/kWp. Os resultados estão de acordo com as expectativas conforme o elevado potencial solar já pronunciado na literatura e as condições climáticas que favorecem à maior duração de horas de sol em todo estado. Para fins de comparação, os valores médios obtidos foram confrontados com os de alguns sistemas fotovoltaicos: a produtividade média diária na Índia é de 4,81 kWh/kWp/dia (Sundaram e Babu, 2015), em Lesoto de 4,17 kWh/kWp/dia (Mpholo et al., 2015), na França de 3,75 kWh/kWp/dia (Haffaf et al., 2021) e em Bangladesh de 2,53 kWh/kWp/dia. Assim, é possível afirmar que a produtividade média está em conformidade com outros sistemas fotovoltaicos ao redor do mundo, bem como, acentua o potencial solar para exploração em todo território.

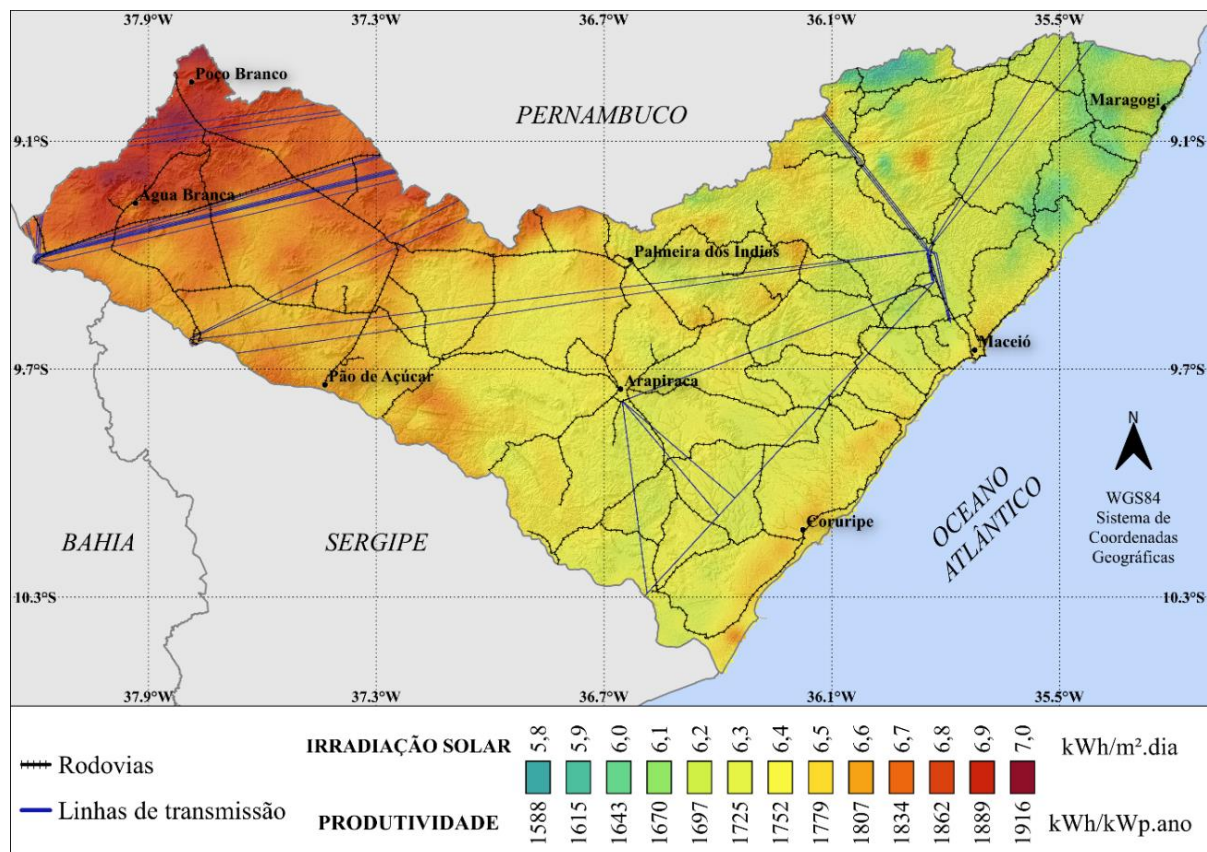


Figura 4: Mapeamento da irradiação solar e da produtividade fotovoltaica no estado de Alagoas, utilizando o modelo WRF-Solar durante o período de 2008 a 2015.

A Figura 5 ilustra a distribuição espacial do coeficiente de correlação de Pearson, calculado com base na soma diária da irradiância solar e da velocidade do vento. Esse coeficiente atinge um mínimo em torno de -0.1 na escala diária. Observa-se que os recursos solares e eólicos estão em antifase ao longo das regiões costeiras, como também, na cidade de Poço Branco que detém alto potencial para exploração desses recursos. No

entanto, áreas onde os valores de correlação se aproximam de zero indicam uma baixa eficácia na complementaridade da geração híbrida de energia (Guezgouz et al., 2021). Por outro lado, uma correlação positiva moderada ($r = 0.7$) dos recursos solares e eólicos é sinalizada as cidades Girau do Ponciano e Palmeira dos Índios. Nessas regiões, os recursos apresentam moderada similaridade.

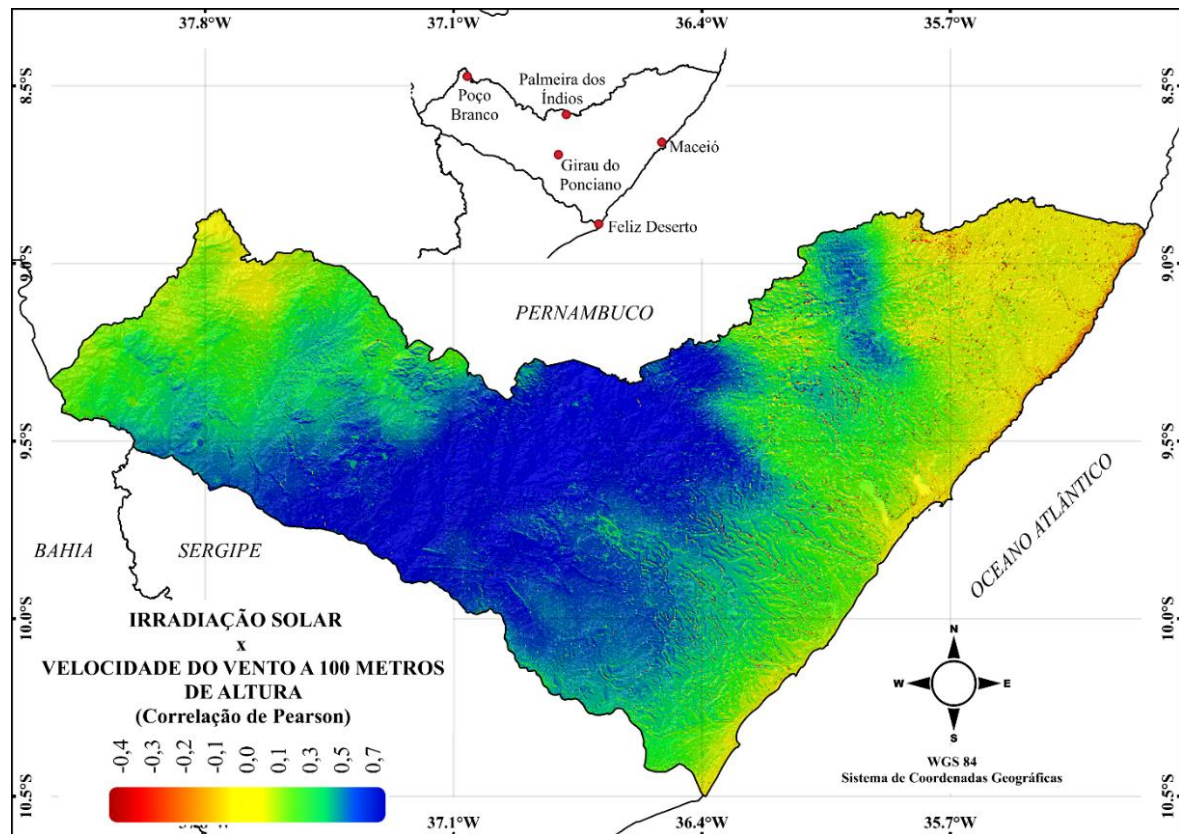


Figura 5: Mapa do o coeficiente de correlação de Pearson diário entre os recursos eólico e solar para o estado de Alagoas, obtido através dos modelos WRF e WRF-Solar durante o período de 2008 a 2015.

A estimativa da geração híbrida de uma usina eólica-solar hipotética foi realizada para as cidades de Poço Branco (Figura 6a), Palmeira dos Índios (Figura 6b) e Feliz Deserto (Figura 6c). Durante esta simulação, os cenários de hibridização, ou fração eólica (λ_w), varia de 0 a 1 em incrementos de 0.1. Com isso, na Figura 6 é apresentado o coeficiente de variação mensal de modo a investigar os níveis de hibridização (complementaridade entre energia eólica-solar) que levam a menor variabilidade temporal da geração combinada. Em outras palavras, quanto mais próximo de 0.5 (representando 50% das energias eólica e solar), e menor for a variação mensal do COV (Coeficiente de Variação), melhor será o cenário de complementaridade. Os resultados sinalizam que a incorporação de energia

solar fotovoltaica, ou seja, diminuição na fração eólica (λ_w), reduz a variabilidade da geração combinada ao longo do ano. Em geral, a menor instabilidade da geração combinada para cada mês é mais eficiente em torno das frações 0.0 a 0.3, ou seja, entre 100-70% da geração na planta híbrida sendo energia solar fotovoltaica. Nota-se que para λ_w maiores, isso resulta em uma variabilidade mais elevada devido à predominância da geração eólica. Sendo esse impacto, especialmente, nos meses de março, abril e maio. Além do mais, o pior cenário que resulta em maior variabilidade no sistema elétrico para os meses analisados, ocorre na tendência de geração 100% eólica ($\lambda_w = 1.0$). Em geral, as três mesorregiões do estado de Alagoas - sertão, agreste e litoral - demonstram características semelhantes.

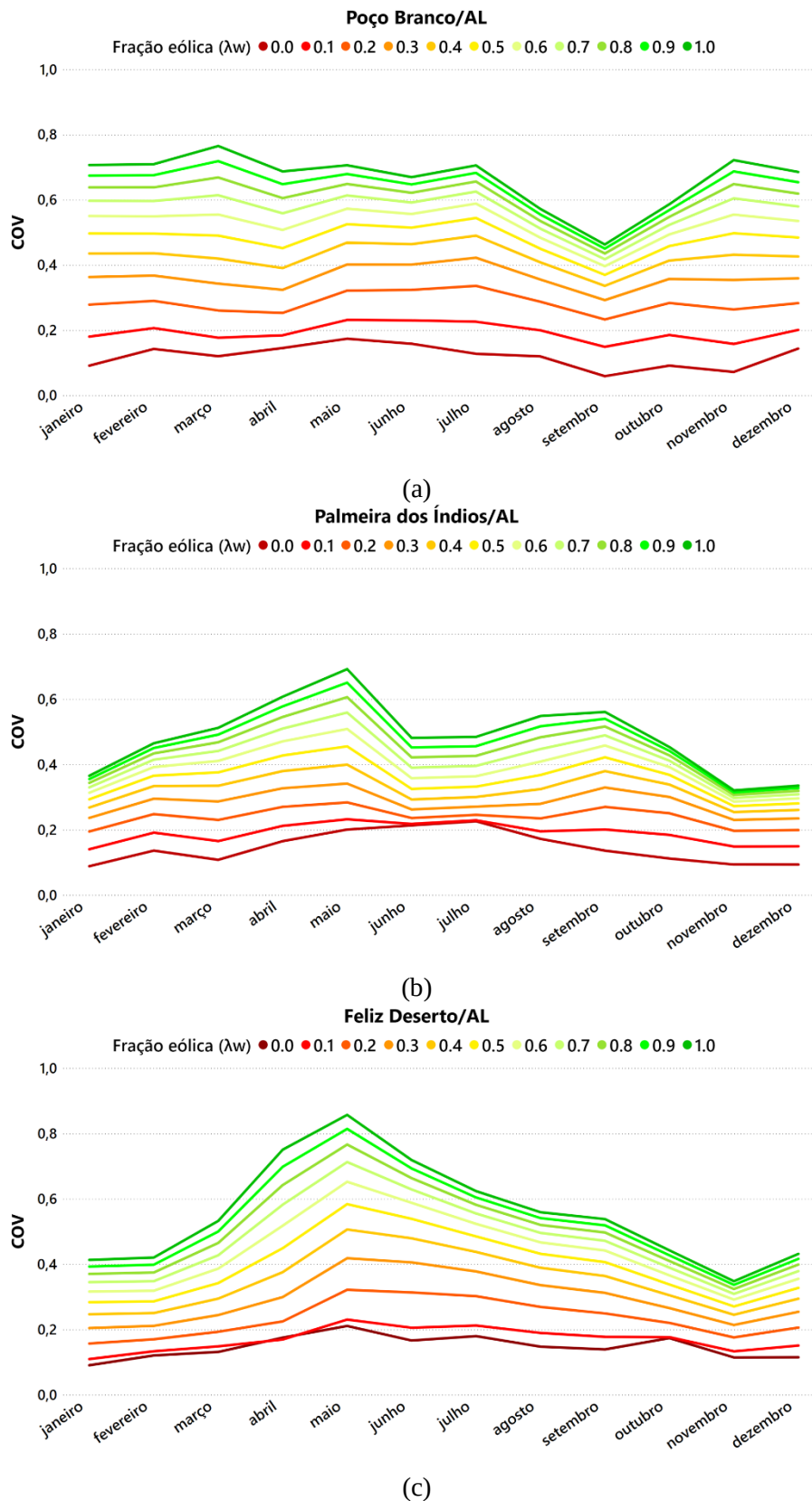


Figura 6: Coeficiente de Variação (COV) referente a geração híbrida para as cidades de Poço Branco/AL (a), Palmeira dos Índios/AL (b) e Feliz Deserto (c). Cada linha representa um cenário de hibridização, variando de 0 (geração 100% solar) a 1 (geração 100% eólica), com intervalos de 0.1.

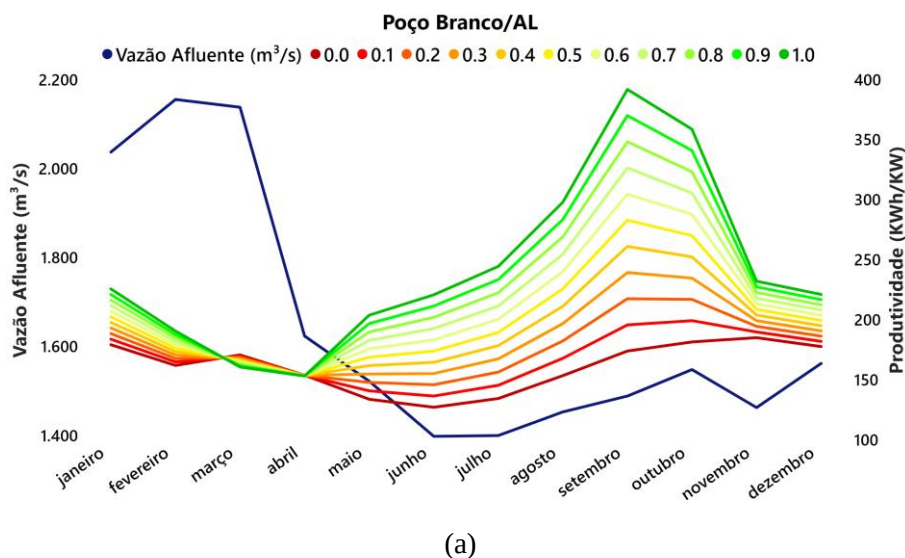
A Figura 7 mostra a produtividade para cada cenário de hibridização juntamente com a vazão afluyente do rio São Francisco, visando a

investigação da viabilidade de uma localidade apresentar regimes não correlacionados entre a geração combinada (eólica-solar) e a vazão da

Usina Hidrelétrica de Xingó. Como pode ser visto durante os meses de menor disponibilidade hídrica, a produtividade das fontes de energia eólica ($\lambda_w = 1.0$) e solar ($\lambda_w = 0.0$) é maior e sendo o contrário também verdadeiro, com exceção de Palmeira dos Índios. A geração fotovoltaica está diretamente relacionada a irradiação solar de forma que a curva da sazonalidade tem o comportamento influenciado pelas condições locais, de clima e nebulosidade da região, ou seja, os valores mínimos são encontrados durante a estação chuvosa (maio, junho e julho), enquanto as máximas são pronunciadas na estação seca (novembro, dezembro e janeiro). Quanto ao desempenho da geração eólica, observa-se um aumento significativo durante a estação chuvosa, atingindo sua máxima produtividade nos terceiro e quarto trimestres. Para Palmeira dos Índios, esse pico ocorre especificamente no quarto trimestre. O ciclo sazonal das gerações eólica e fotovoltaica, especialmente para as cidades de Feliz Deserto e Poço Branco, representa uma oportunidade para complementar a rede elétrica, especialmente devido aos níveis mais baixos de vazão entre maio a dezembro. Porém, quando combinada as produtividades de energia eólica e solar, a variação sazonal média é equilibrada nos cenários com maior predominância da geração fotovoltaica. Vale salientar que, a licitação de geração não despacháveis (eólica/solar) é puramente baseada na geração prevista e está sujeita a erros de previsão (Jurasz et al., 2020). Devido à capacidade da hidrelétrica em gerar energia e armazenar água, permite sua atuação como uma "bateria" para

ajustar as gerações eólica e fotovoltaica. Ou seja, nos casos em que a produção real de energia eólica e fotovoltaica exceder a previsão, a hidrelétrica reduz sua produção, retendo mais água no reservatório para uso futuro; ao passo que, se a produção real for inferior à previsão, a hidrelétrica aumenta sua produção, liberando mais água (Tan et al., 2021).

Os investimentos simultâneos nas fontes eólica e fotovoltaica tornam-se atrativas tendo em vista que nos meses de estiagem (custo elevado da energia elétrica) há maior disponibilidade de ambas as fontes, como também fortalece a diversificação da matriz elétrica, protegendo-a contra os efeitos das secas (De Jong et al., 2013). Além do mais, a hibridização é importante tanto para amenizar os impactos as redes de transmissão, como também, o dimensionamento ideal do parque faz-se necessário de modo a obter menores desvios possíveis já que a produção dessas fontes pode ser afetada por sua sazonalidade. Destaca-se a viabilidade para desenvolvimento de fontes renováveis híbridas (eólica e solar) na região do semiárida de Alagoas, tomando como referência a iniciativa pioneira nas proximidades do sertão alagoano, especificamente na cidade de Tacaratu/PE. Nesta localidade, foi instalado o primeiro parque híbrido do Brasil, integrando a geração de energia eólica e fotovoltaica, denominado Parque Fontes Solar e Fontes dos Ventos. Este empreendimento produz aproximadamente 340 GWh de energia por ano, quantidade suficiente para abastecer anualmente cerca de 170 mil residências brasileiras (Trannin, 2016).



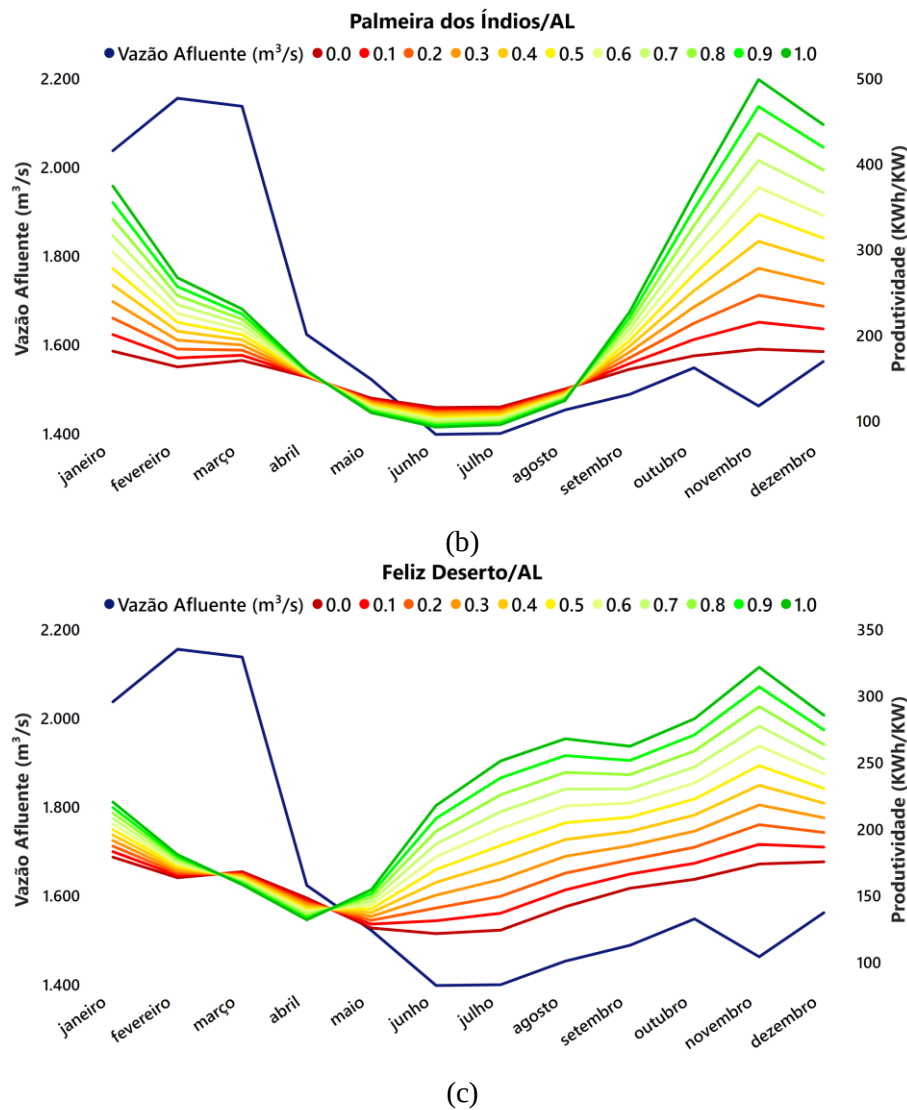


Figura 7: Variabilidade mensal média da vazão afluente da Usina Hidrelétrica de Xingó e da produtividade para cada cenário de hibridização no período de 2008-2015 para as cidades de Poço Branco/AL (a), Palmeira dos Índios/AL (b) e Feliz Deserto (c).

Conclusão

As simulações utilizando o modelo atmosférico WRF, com processo de redução de grade a partir dos parâmetros de estabilidade e declividade, resulta no mapeamento eólico estado de Alagoas com maior detalhamento espacial, amplificando as áreas com elevada rugosidade aerodinâmica e de terreno complexo. O potencial eólico é consideravelmente ampliado em áreas bem expostas que eram subestimadas por modelos de baixa resolução, resultando em uma melhor identificação das áreas de alto potencial à exploração da energia eólica. Os resultados mostram áreas de intensidades anuais entre 7 m/s a 9 m/s e persistência da direção do vento de Leste/Sudeste, nas cidades de Feliz Deserto/AL, Palmeira dos Índios/AL e Poço Branco/AL. Em geral, o aproveitamento eólico é acentuado em

regiões há a canalização do vento e topografia elevada.

A análise da irradiação solar do WRF-Solar mostrou-se uma fonte de informação essencial para o levantamento do potencial solar, possibilitando a identificação de áreas promissoras para a instalação de usinas solares. Os resultados mostraram que o estado de Alagoas possui um elevado potencial para a exploração do recurso solar durante o ano, variando entre 1558 e 1916 kWh/kWp. Superando valores de plantas de energia solar em várias regiões ao redor do mundo. Entretanto, ainda há espaço para aprimoramentos nas simulações. Sugere-se a necessidade de melhoria da representação da cobertura de nuvens tendo em vista que as configurações físicas inseridas não reproduzem com assertividade os processos convectivos e a microfísica das nuvens locais ao longo do ano.

A utilização do coeficiente de Pearson como medida estatística possibilitou a investigação da complementaridade entre os recursos eólico e solar. Dessa maneira, o mapeamento da complementaridade desses recursos revelou uma leve anticorrelação na escala temporal diária nas cidades de Poço Branco/AL e Feliz Deserto/AL, indicando que essas áreas são atrativas para a geração combinada.

Os resultados dos cenários de produtividade combinada mostram que a geração eólica apresenta elevada variabilidade em relação ao ciclo sazonal médio, enquanto a geração solar apresenta maior estabilidade. Entretanto, surge como opção a inclusão do recurso hídrico para tornar a geração híbrida mais equilibrada. Essa integração possibilitaria uma operação mais flexível dos reservatórios de água durante a estação seca, mitigando os déficits energéticos esperados,

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da FAPEAL - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Alagoas e CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Referências

- Ahmed, R., Sreeram, V., Mishra, Y., & Arif, M. D. (2020). A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: Techniques and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124(June 2019), 109792. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109792>
- ANEEL. (2024). *Agência Nacional de Energia Elétrica* (ANEEL). <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/record-na-expansao-da-geracao-matriz-eletrica-brasileira-teve-aumento-de-10-3-gw-em-2023>
- Barros, A. H. C., Filho, J. C. de A., Silva, A. B. da, & Santiago, G. A. C. F. (2012). Climatologia do Estado de Alagoas. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, EMBRAPA Solos*, 211, 32. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/950797>
- Bett, P. E., & Thornton, H. E. (2016). The climatological relationships between wind and solar energy supply in Britain. *Renewable Energy*, 87, 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.006>
- Bp. (2022). bp Statistical Review of World Energy 2022 (71st edition). In *71st edition*. [https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-](https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf)
- visto que o potencial eólico e solar podem ser melhor explorados.
- Neste estudo a abordagem do COV em cada cenário de geração híbrida permitiu avaliar a estabilidade elétrica entre a produtividade eólica e solar ao longo do ano. A menor flutuabilidade sazonal na geração de energia combinada é obtida através de uma planta majoritariamente solar, em escala diária até uma razão de capacidade de aproximadamente 70:30 entre solar e eólica, respectivamente.
- Outra característica importante a ser considerada é a acessibilidade das áreas promissoras a complementaridade eólica e fotovoltaica, destaca-se a cidade de Poço Branco/AL, com a rodovia federal (BR-316) e a linha de transmissão (500 kV), que lhe confere uma condição logística favorável para instalação de usinas híbridas.
- 2022-full-report.pdf
- Brasil, MME, & EPE. (2020). Plano Nacional de Energia - PNE 2050. *Plano Nacional de Energia - PNE 2050*.
- Campos, É. F. de, Pereira, E. B., van Oel, P., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., & Costa, R. S. (2021). Hybrid power generation for increasing water and energy securities during drought: Exploring local and regional effects in a semi-arid basin. *Journal of Environmental Management*, 294(June). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112989>
- Campos, R. A., Nascimento, L. R. do, & Rüther, R. (2020). The complementary nature between wind and photovoltaic generation in Brazil and the role of energy storage in utility-scale hybrid power plants. *Energy Conversion and Management*, 221(July), 113160. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113160>
- Cantor, D., Ochoa, A., & Mesa, O. (2022). Total Variation-Based Metrics for Assessing Complementarity in Energy Resources Time Series. *Sustainability (Switzerland)*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/su14148514>
- Chen, F., & Dudhia, J. (2001). Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4), 569–585. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- Cheng, X., Ye, D., Shen, Y., Li, D., & Feng, J. (2022). Studies on the improvement of modelled solar radiation and the attenuation effect of aerosol using the WRF-Solar model with satellite-based AOD data over north China.

- Renewable Energy*, 196, 358–365. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.141>
- Chou, M.-D., & Suarez, M. J. (1994). An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. *Nasa Tech. Memo*, 3, 85. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.26.4850>
- Costa, G. B., & Lyra, R. F. da F. (2012). Análise dos padrões de vento no Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(1), 31–38. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862012000100004>
- D'Isidoro, M., Briganti, G., Vitali, L., Righini, G., Adani, M., Guarnieri, G., Moretti, L., Raliselo, M., Mahahabisa, M., Ciancarella, L., Zanini, G., & Fino, E. (2020). Estimation of solar and wind energy resources over Lesotho and their complementarity by means of WRF yearly simulation at high resolution. *Renewable Energy*, 158, 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.106>
- Dayal, K. K., Bellon, G., Cater, J. E., Kingan, M. J., & Sharma, R. N. (2021). High-resolution mesoscale wind-resource assessment of Fiji using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Energy*, 232, 121047. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121047>
- De Jong, P., Sánchez, A. S., Esquerre, K., Kalid, R. A., & Torres, E. A. (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*, 23, 526–535. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.050>
- Deng, A., Gaudet, B., Dudhia, J., & Alapaty, K. (2014). Implementation and Evaluation of a New Shallow Convection Scheme in WRF. *26th Conf. on Weather Analysis and Forecasting/22nd Conf. on Numerical Weather Prediction*. <https://ams.confex.com/ams/94Annual/videoagateway.cgi/id/26017?recordingid=26017>
- Dorval, J., Masson, C., & Gagnon, Y. (2017). On the Improvement of Wind Power Predictions Based on Terrain Characteristics and Measurements of the Annual Energy Production. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 05(01), 1–20. <https://doi.org/10.4236/jfcmv.2017.51001>
- Dranka, G. G., & Ferreira, P. (2020). Towards a smart grid power system in Brazil: Challenges and opportunities. *Energy Policy*, 136, 111033. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111033>
- Gallardo, R. P., Ríos, A. M., & Ramírez, J. S. (2020). Analysis of the solar and wind energetic complementarity in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122323>
- Gonçalves, A. R. (2021). *Hibridização de usinas solares e eólicas e sua complementariedade no Brasil*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Grell, G. A., & Dévényi, D. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14), 10–13. <https://doi.org/10.1029/2002GL015311>
- Guezgouz, M., Jurasz, J., Chouai, M., Bloomfield, H., & Bekkouché, B. (2021). Assessment of solar and wind energy complementarity in Algeria. *Energy Conversion and Management*, 238(April), 114170. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114170>
- Haffaf, A., Lakdja, F., Ould Abdeslam, D., & Meziane, R. (2021). Monitoring, measured and simulated performance analysis of a 2.4 kWp grid-connected PV system installed on the Mulhouse campus, France. *Energy for Sustainable Development*, 62, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.03.006>
- Hansen, K., Breyer, C., & Lund, H. (2019). Status and perspectives on 100% renewable energy systems. *Energy*, 175, 471–480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092>
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, 113. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Jain, S., Singh, C., & Tripathi, A. K. (2021). A Flexible and Effective Method to Integrate the Satellite-Based AOD Data into WRF-Solar Model for GHI Simulation. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(11), 2797–2813. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01425-3>
- Jimenez, P. A., Hacker, J. P., Dudhia, J., Haupt, S. E., Ruiz-Arias, J. A., Gueymard, C. A., Thompson, G., Eidhammer, T., & Deng, A. (2016). WRF-Solar: Description and Clear-Sky Assessment of an Augmented NWP Model for Solar Power Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(7), 1249–1264. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00279.1>
- Jurasz, J., Canales, F. A., Kies, A., Guezgouz, M., & Beluco, A. (2020). A review on the

- complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. *Solar Energy*, 195(October 2019), 703–724. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>
- Khalid, A. M., Mitra, I., Warmuth, W., & Schacht, V. (2016). Performance ratio – Crucial parameter for grid connected PV plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1139–1158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.066>
- Korberg, A. D., Skov, I. R., & Mathiesen, B. V. (2020). The role of biogas and biogas-derived fuels in a 100% renewable energy system in Denmark. *Energy*, 199, 117426. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117426>
- Lima, F. J. L., Martins, F. R., Pereira, E. B., Lorenz, E., & Heinemann, D. (2016). Forecast for surface solar irradiance at the Brazilian Northeastern region using NWP model and artificial neural networks. *Renewable Energy*, 87, 807–818. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.005>
- Lin, Y.-L., Farley, R. D., & Orville, H. D. (1983). Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(6), 1065–1092. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2)
- Lorenzo, E. (2002). La energía que producen los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: El mito del 1300 y “el cascabel del gato.” *Era Solar*, 107, 22–28.
- Luiz, E. W., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., & Pereira, E. B. (2018). Analysis of intra-day solar irradiance variability in different Brazilian climate zones. *Solar Energy*, 167(December 2017), 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.005>
- Mas, J.-F., Nogueira de Vasconcelos, R., & Franca-Rocha, W. (2019). Analysis of High Temporal Resolution Land Use/Land Cover Trajectories. *Land*, 8(2), 30. <https://doi.org/10.3390/land8020030>
- Mellor, G. L., & Yamada, T. (1974). A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(7), 1791–1806. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2)
- MME. (2023). *Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro*. http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico?_20_displayStyle=descriptive&p_p_id=20
- Mondal, M. A. H., Rosegrant, M., Ringler, C., Pradesha, A., & Valmonte-Santos, R. (2018). The Philippines energy future and low-carbon development strategies. *Energy*, 147, 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.039>
- Monforti, F., Huld, T., Bódis, K., Vitali, L., D’Isidoro, M., & Lacal-Arántegui, R. (2014). Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy. A Monte Carlo approach. *Renewable Energy*, 63(2014), 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.028>
- Monin, A. S., & Obukhov, A. M. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 151, 163–187.
- Moura, G. B. D. A., Brito, J. I. B. de, Sousa, F. de A. S. de, Cavalcanti, E. P., Silva, J. L. B. da, Nascimento, C. R., & Lopes, P. M. O. (2020). Identificação de Preditores Para as Chuvas do Setor Leste do Nordeste do Brasil Utilizando Análise de Correlação Canônica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(4), 1463. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1463-1482>
- Mpholo, M., Nchaba, T., & Monese, M. (2015). Yield and performance analysis of the first grid-connected solar farm at Moshoeshoe I International Airport, Lesotho. *Renewable Energy*, 81(2015), 845–852. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.001>
- Pedruzzi, R., Silva, A. R., Soares dos Santos, T., Araujo, A. C., Cotta Weyll, A. L., Lago Kitagawa, Y. K., Nunes da Silva Ramos, D., Milani de Souza, F., Almeida Narciso, M. V., Saraiva Araujo, M. L., Medrado, R. C., Camilo Júnior, W. O., Neto, A. T., de Carvalho, M., Pires Bezerra, W. R., Costa, T. T., Bione de Melo Filho, J., Bandeira Santos, A. Á., & Moreira, D. M. (2023). Review of mapping analysis and complementarity between solar and wind energy sources. *Energy*, 283(July). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129045>
- Pleim, J. E. (2007). A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(9), 1383–1395. <https://doi.org/10.1175/JAM2539.1>
- Prasad, A. A., Taylor, R. A., & Kay, M. (2017). Assessment of solar and wind resource synergy in Australia. *Applied Energy*, 190, 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.135>
- Ramos, D. N. da S. (2012). *Mapeamento Eólico do Estado de Alagoas utilizando ferramentas*

- computacionais e dados observados* (Issue 9). Universidade Federal de Alagoas.
- Ramos, D. N. da S., Lima, F. J. L. de, Casagrande, M. S. G., Goncalves, A. R., Costa, R. S., Pereira, E. B., & Vendrasco, E. P. (2020). Avaliação preliminar do modelo wrf-solar para previsão de curto prazo das irradiâncias global horizontal e direta normal. *VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. <https://doi.org/10.59627/cbens.2020.760>
- Randles, C. A., da Silva, A. M., Buchard, V., Colarco, P. R., Darmenov, A., Govindaraju, R., Smirnov, A., Holben, B., Ferrare, R., Hair, J., Shinozuka, Y., & Flynn, C. J. (2017). The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation. *Journal of Climate*, 30(17), 6823–6850. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0609.1>
- Reindl, T., Walsh, W., Yanqin, Z., & Bieri, M. (2017). Energy meteorology for accurate forecasting of PV power output on different time horizons. *Energy Procedia*, 130, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.415>
- Ruiz-Arias, J. A., Dudhia, J., & Gueymard, C. A. (2014). A simple parameterization of the short-wave aerosol optical properties for surface direct and diffuse irradiances assessment in a numerical weather model. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1159–1174. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1159-2014>
- Santos, J. A. F. de A., de Jong, P., Alves da Costa, C., & Torres, E. A. (2020). Combining wind and solar energy sources: Potential for hybrid power generation in Brazil. *Utilities Policy*, 67(April 2019), 101084. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101084>
- SECTI. (2018). *Atlas solar: Bahia*. Siewert, J., & Kroszczynski, K. (2023). Evaluation of High-Resolution Land Cover Geographical Data for the WRF Model Simulations. *Remote Sensing*, 15(9), 2389. <https://doi.org/10.3390/rs15092389>
- Silva, A. R., Pimenta, F. M., Assireu, A. T., & Spyrides, M. H. C. (2016). Complementarity of Brazil's hydro and offshore wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 413–427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.045>
- Silva Junior, R. S. da, Lyra, R. F. da F., Silva, A. R., Marchi, A. C. de, Ramos, D. N. da S., & Rabelo, F. D. (2010). Análise da variação do potencial eólico utilizando o modelo WASP. *Primeiro Seminário Nacional Sobre Engenharia Do Vento*.
- Silva, L. S. de O., Junior, R. S. da S., Querino, C. A. S., Júnior, J. M. L., & Moura, M. A. L. (2023). Impactos das mudanças de cobertura vegetal no saldo de radiação e fluxo de calor no solo nos tabuleiros costeiros de Alagoas. *Geografia*, 48(1983–8700).
- Silva, L. S. de O., Silva Junior, R. S. da, Lyra, R. F. da F., Martins, F. R., Moura, M. A. L., Leal Junior, J. B. V., & Cardoso, K. R. A. (2023). Avaliação de métodos para atualização do mapeamento eólico do Estado de Alagoas. *Research, Society and Development*, 12(2). <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i2.40053>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF version 3. *National Center for Atmospheric Research*.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). A Description of the Advanced Research WRF Version 2. *University Corporation for Atmospheric Research*, June.
- Solano, J. C., Montaña, T., Maldonado-Correa, J., Ordóñez, A., & Pesantez, M. (2021). Correlation between the wind speed and the elevation to evaluate the wind potential in the southern region of Ecuador. *Energy Reports*, 7, 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.044>
- Soukissian, T. H., Karathanasi, F. E., & Zaragkas, D. K. (2021). Exploiting offshore wind and solar resources in the Mediterranean using ERA5 reanalysis data. *Energy Conversion and Management*, 237, 114092. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114092>
- Sundaram, S., & Babu, J. S. C. (2015). Performance evaluation and validation of 5 MWp grid connected solar photovoltaic plant in South India. *Energy Conversion and Management*, 100(2015), 429–439. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.069>
- Tan, Q., Wen, X., Sun, Y., Lei, X., Wang, Z., & Qin, G. (2021). Evaluation of the risk and benefit of the complementary operation of the large wind-photovoltaic-hydropower system considering forecast uncertainty. *Applied Energy*, 285(January), 116442. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116442>
- Thompson, G., Tewari, M., Ikeda, K., Tessorf, S., Weeks, C., Otkin, J., & Kong, F. (2016). Explicitly-coupled cloud physics and radiation parameterizations and subsequent evaluation in

- WRF high-resolution convective forecasts. *Atmospheric Research*, 168, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.005>
- Tolmasquim, M. T., de Barros Correia, T., Addas Porto, N., & Kruger, W. (2021). Electricity market design and renewable energy auctions: The case of Brazil. *Energy Policy*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112558>
- Trannin, M. (2016). Desafios e oportunidades para a geração de energia elétrica por fontes renováveis no Brasil. in *Caderno Opinião*.
- Troen, I., & Lundtang Petersen, E. (1989). *European wind atlas - Errata*. [http://orbit.dtu.dk/en/publications/european-wind-atlas\(335e86f2-6d21-4191-8304-0b0a105089be\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/european-wind-atlas(335e86f2-6d21-4191-8304-0b0a105089be).html)
- Tsai, W.-C., Hong, C.-M., Tu, C.-S., Lin, W.-M., & Chen, C.-H. (2023). A Review of Modern Wind Power Generation Forecasting Technologies. *Sustainability*, 15(14), 10757. <https://doi.org/10.3390/su151410757>
- Velloso, M. F. A., Martins, F. R., & Pereira, E. B. (2019). Case study for hybrid power generation combining hydro- and photovoltaic energy resources in the Brazilian semiarid region. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(5), 941–952. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01685-1>
- Xie, Y., Sengupta, M., & Dudhia, J. (2016). A Fast All-sky Radiation Model for Solar applications (FARMS): Algorithm and performance evaluation. *Solar Energy*, 135, 435–445. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.003>
- Zhong, J., Bollen, M., & Rönnberg, S. (2021). Towards a 100% renewable energy electricity generation system in Sweden. *Renewable Energy*, 171, 812–824. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.153>