

Análise de Dados na Flutuação Horária da Velocidade do Vento na Região Nordeste

Vanessa Cristina Pereira Miranda * Stefânia de Oliveira Silva **
Manoel Messias Silva Junior ** Kleymilson do Nascimento Souza ***

* Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa BA, (e-mail: vanessa.m2408@ufob.edu.br)

** Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa BA (e-mail: stefania.silva@ufob.edu.br, manoel.messias@ufob.edu.br)

*** Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias, (e-mail: kleymilson.souza@ufob.edu.br)

Abstract: The increase in the world population has generated the need for greater energy supplies. However, its growth was not accompanied, in numbers, by the supply of energy. In this context, environmental factors also prove to be a reducing agent for energy security, since the occurrence of long periods of drought affect the production of electricity. In view of this fact, energy independence is sought through renewable sources, of which wind energy has been standing out in the sector. Thus, this article enables an analysis of the hourly fluctuation of wind speed in some cities in Brazil, focusing on the Northeast region with the purpose of determining a possible implementation of wind farms under the determination of the wind regime. As a result, the highest wind intensities occur in periods with low rainfall. Therefore, it proves the possibility of using wind resources as a source capable of reducing water energy dependence in months of drought. To produce the results, databases from the Instituto Nacional de Meteorologia were used, verifying hourly data from automatic stations over a period of ten years, between 2012 and 2022.

Resumo: O aumento da população mundial gerou a necessidade de maiores suprimentos energéticos. Entretanto, o seu crescimento não foi acompanhado, em números, pelo fornecimento de energia. Nesse contexto, os fatores ambientais também demonstram ser um agente redutor da segurança energética, visto que a ocorrência de longos períodos de estiagem afetam a produção de eletricidade. Diante de tal fato, busca-se a independência energética por meio de fontes renováveis, do qual a energia eólica vem se destacando no setor. Assim, o presente artigo viabiliza uma análise acerca da flutuação horária da velocidade do vento em algumas cidades do Brasil, com enfoque na região Nordeste com o propósito de determinar uma possível implementação de parques eólicos sob a determinação do regime de ventos. Como resultado, as maiores intensidades do vento ocorrem em períodos com baixos índices pluviométricos. Portanto, comprova a possibilidade de usar os recursos eólicos como fonte capaz de reduzir a dependência energética hídrica em meses de estiagem. Para produzir os resultados foram utilizados bancos de dados do Instituto Nacional de Meteorologia, verificando dados horários de estações automáticas em um período de dez anos, compreendidos entre 2012 e 2022.

Keywords: Energy supply; Wind regime; Wind resources; Energy dependence; Hourly complementarity.

Palavras-chaves: Fornecimento de energia; Regime de ventos; Recursos eólicos; Dependência energética; Flutuação horária.

1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente por energia elétrica e o uso preferencial de combustíveis fósseis na geração de eletricidade elevaram, consideravelmente, a concentração de gás carbônico na atmosfera. Em 2010, o setor energético obteve um aumento de 30% nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em relação a 1970, tornando-se o maior setor contribuinte para as emissões globais (Borges, 2018).

O setor de energia é o maior responsável pelo crescimento na emissão dos GEE, tendo nos combustíveis fósseis sua principal fonte de contribuição (IPCC, 2007). Segundo Assad et al. (2008), "o tamanho da população mundial, os padrões de consumo, a utilização de combustíveis fósseis e a eficiência energética são fatores que influenciam, para mais ou para menos, as emissões de GEE responsáveis pelo aquecimento global". Nesse contexto, é importante destacar que o consumo de energia elétrica tem aumentado nos últimos anos, entretanto a oferta não se expandiu

na mesma proporção, fazendo com que houvesse racionamentos e apagões (Araújo et al., 2020). Dessa forma, as energias renováveis têm se mostrado uma eficaz alternativa na produção de eletricidade, promovendo a sustentabilidade, reduzindo os impactos ambientais e garantindo a segurança no suprimento energético.

Inserida nessa perspectiva, a energia eólica é uma alternativa viável na mitigação de mudanças climáticas globais. Segundo o Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC), essa fonte de energia oferece um grande potencial para a redução das emissões de GEE. Além disso, a energia eólica se destaca por não comprometer totalmente o terreno, por sua fonte ser limpa, gratuita, renovável e por apresentar um baixo custo de geração (Vian et al., 2021). Considerando barreiras políticas, econômicas e tecnológicas, estima-se que ela poderia suprir até 20% da demanda mundial de energia elétrica até 2050 (IPCC, 2011).

Em 2020, a energia eólica obteve um crescimento recorde impulsionado pelo aumento de instalações na China e nos EUA – os dois maiores mercados de energia eólica do mundo – que juntos instalaram quase 75% das novas instalações e representam mais da metade da energia eólica total do mundo (GWEC, 2020). O Conselho Global de Energia Eólica, GWEC, em seu relatório anual, apresentou a evolução da potência instalada no mundo com aumento de 53% em relação ao ano anterior, como pode ser observado na Fig. 1. Um dos primeiros comparativos é o crescimento acentuado de usinas onshore em relação às offshore.

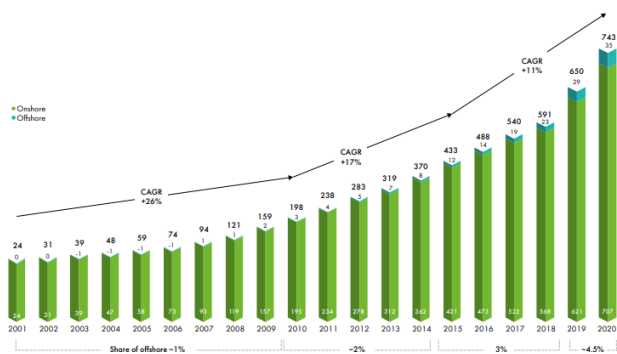


Fig. 1. Evolução da Potência Eólica Instalada no Mundo (Fonte: (GWEC, 2020))

Claramente, os parques eólicos em terra possuem as maiores instalações em detrimento ao mar, embora já possa ser comprovado que Usinas Eólicas offshore apresentam maiores velocidades de vento e menores efeitos de turbulência que as onshore. Outra análise é que há 20 anos não havia quase nenhuma usina instalada e a geração eólica era praticamente escassa. Entretanto, com os programas de incentivo à geração, estudos desenvolvidos e conscientização da humanidade, a energia eólica chegou a 743GW de potência instalada em 2020. Como resultado, mais de 1.1 bilhão de gás carbônico pôde ser evitado globalmente, o que corresponde, aproximadamente, às emissões anuais de carbono da América do Sul.

2. MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As fontes renováveis de energia representam uma alternativa para reduzir as emissões de GEE com o intuito de mitigar a mudança do clima global. Entretanto, por serem dependentes das condições climáticas, estão potencialmente sujeitas a impactos do próprio fenômeno que pretendem evitar (Assad et al., 2008).

Segundo o relatório "Mudanças Climáticas e Desdobramentos sobre os Estudos de Planejamento Energético: Considerações Iniciais" da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), publicado em 2018, a mitigação tem a finalidade de limitar as emissões dos GEE pelas atividades humanas e, como consequência, reduzir o ritmo das mudanças climáticas evitando efeitos danosos para a sociedade e para os sistemas naturais em geral. Nesse contexto, as fontes alternativas de energia são bastante viáveis, visto que a maior parcela de emissão de GEE se dá pela queima de combustíveis fósseis na geração de eletricidade. Além disso, a redução das emissões de GEE está diretamente associada a uma revisão do paradigma energético, pois aproximadamente 70% das emissões antrópicas de gases do efeito estufa são oriundas desse setor (Souza and Azevedo, 2006).

A Fig. 2 ilustra a evolução anual das emissões de GEE associadas à geração de eletricidade no Sistema Interligado Nacional, sendo possível observar a redução das emissões a partir de 2014. Esse resultado é devido o aumento da inserção de energia eólica e do aumento dos reservatórios hidroelétricos (Borges, 2018).

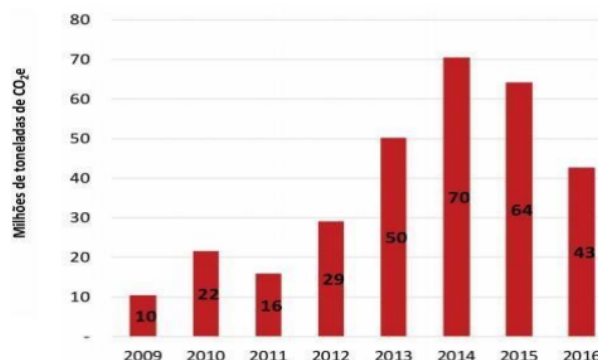


Fig. 2. Evolução anual das emissões de GEE associadas à geração de eletricidade no SIN (Fonte:(SEEG,2017))

A partir da assinatura do Protocolo de Quioto, em 1997, elevou-se a busca por alternativas que pudessem suprir as necessidades econômicas e, ao mesmo tempo, gerar menos impactos ambientais (Simas and Pacca, 2013). Em dezembro de 2015, em Paris, foi realizada a 21ª Conferência das Partes (COP-21) da UNFCCC, definindo um novo acordo sobre mudança global do clima e demonstrando que essas alterações afetam a disponibilidade de recursos energéticos no planeta, sendo necessário o comprometimento dos países na redução das emissões de GEE e no desenvolvimento de políticas de mitigação. De acordo com o IPCC, nenhuma região do planeta estará totalmente a salvo dos efeitos decorrentes das alterações do clima.

Segundo os estudos de previsão climática desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

(MCTI, 2016), a principal vulnerabilidade à mudança climática identificada no setor de energia no Brasil é a redução do potencial de produção de energia hidrelétrica, afetando as bacias do Sistema Interligado Nacional e ocasionando produções bem abaixo do esperado. Por outro lado, em relação à energia eólica, projeta-se um aumento da velocidade total dos ventos, o que acarreta aumento do potencial de sua geração (EPE, 2018).

Em estudo realizado por especialistas da COPPE (Schaeffer et al., 2008) para o caso brasileiro, considerando cenários traçados pelo IPCC e projeções feitas pelo INPE, concluiu-se que haverá uma diminuição na vazão dos rios e, como consequência, redução da geração hidroelétrica. Ademais, para a energia eólica, haverá um favorecimento na geração nas áreas do litoral do Nordeste. Com as modificações no regime dos ventos, essas áreas, que nas condições atuais já são propícias ao aproveitamento eólico, passariam a ser ainda mais, favorecendo a viabilidade econômica dos projetos (Schaeffer et al., 2008).

3. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2018b), a participação das renováveis no Brasil correspondeu a 42,9% em 2017, enquanto na matriz energética mundial representou apenas 13,7% em 2015. Embora a matriz elétrica brasileira seja bastante “limpa”, o país ainda é altamente dependente de hidrelétricas. Cerca de 60% de toda eletricidade produzida no Brasil é oriunda de hidrelétricas, tornando-o bastante vulnerável ao regime de chuvas.

Analisando a matriz energética, observa-se uma forte dependência hidrológica, que aliada a não execução dos planos de expansão, foram duas das razões que resultaram na crise energética de 2001 (Bermann, 2006). Desde a média histórica em 2012, tem chovido bem abaixo do esperado, as perspectivas de chuva não estão se materializando e o estoque de água tem piorado em todos os reservatórios (Bank, 2022). O Brasil vem sofrendo com uma segunda crise hídrica, e, se não fosse a geração da energia eólica atingindo recordes de produção na região Nordeste e garantindo o funcionamento do sistema elétrico brasileiro, a situação não seria atenuada.

É importante destacar que, a fim de compensar a carência hídrica, o uso das termelétricas tem crescido bastante, contribuindo no aumento da tarifa, visto que as mesmas precisam de combustíveis fósseis para gerar eletricidade e esses insumos encontram-se em alta no mercado. As usinas termelétricas possuem custo de operação maior que as usinas hidrelétricas (Galvão and Bermann, 2015). Como consequência, é perceptível um aumento na tarifa da conta de luz, a qual tem subido mais do que a inflação no país. Em 2021, a conta de energia acumulou alta de 114%, diante dos 48% da inflação no mesmo período CNN (2022). Nessa circunstância, vale lembrar que cerca de 36% da matriz energética brasileira ainda é composta por combustíveis fósseis, sendo o carvão mineral e o petróleo insumos de maior uso. Portanto, a diversificação da matriz é extremamente necessária e desejável para o crescimento do país, sendo as fontes renováveis a alternativa para reduzir as dependências e vulnerabilidades energéticas. A diminuição da dependência externa deve ser uma busca constante (Souza, 2010).

Segundo o Relatório de Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2021, a participação de renováveis na matriz energética brasileira atingiu 78,1% de renovabilidade em 2021. Além disso, mais de 15 TWh adicionais em relação a 2021 se devem à evolução da geração eólica (GWh), que teve sucessivos incrementos ao longo dos anos (EPE, 2022). A Fig. 3 demonstra esses resultados e indica que a geração eólica teve um crescimento de 26,7% em relação a 2020, consolidando a liderança entre as três fontes (Eólica, Biomassa e Nuclear).

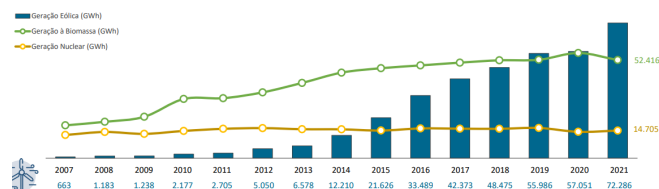


Fig. 3. Evolução da Geração Eólica em relação a Energia de Biomassa e Energia Nuclear (Fonte: (BEN, 2022))

Em 17 de Fevereiro de 2022, a GWEC publicou o relatório “Aproveitando as Oportunidades de Recuperação Verde da Energia Eólica em Economias em Desenvolvimento”, o qual aponta um crescimento de US\$ 22 bilhões na economia brasileira até 2026 se investissem mais em energia eólica. Além disso, a busca por uma recuperação verde resultaria em uma redução de mais de 40% nas emissões de gás carbono entre 2022-2026 (ABEEÓLICA, 2022). Ademais, cerca de 106 milhões de litros de água seriam economizados anualmente, contando com 20 GW de instalações de energia eólica adicionais suficientes para abastecer 25 milhões de residências por ano. O destaque ainda aconteceria dentro do Nordeste, visto que é a principal área produtora de energia. Embora as áreas do interior ofereçam um grande potencial eólico, falta desenvolvimento na infraestrutura. Em 2019, 70% de toda energia consumida no Nordeste foi proveniente de usinas eólicas. Em agosto, desse mesmo ano, em apenas um dia, 89% de toda energia eólica consumida na região vieram dos ventos NEOENERGIA (2022). Provando que está no Nordeste brasileiro a solução para a oferta de energia sem restrições e desenvolvimento do país.

4. REGIME DE VENTOS DO NORDESTE

A energia eólica é uma das muitas formas em que se manifesta a energia solar. Basicamente, é formado pelo deslocamento das massas de ar provocadas pelo aquecimento desigual da superfície terrestre pelos raios solares. Estima-se que 2% da energia solar total que atinge a Terra seja convertida em energia eólica (Amarante et al., 2012). Portanto, esse aquecimento desigual provoca diferentes zonas de pressão e temperatura ao longo do planeta. Próximo à linha do Equador e dos círculos polares, a incidência solar produz as zonas de baixa pressão. De maneira análoga, próximo às linhas tropicais e aos polos Norte e Sul, encontram-se as zonas de alta pressão. Nas zonas de baixa pressão, os ventos mais aquecidos tornam-se mais leves e por isso deslocam-se em direção às zonas de alta pressão, cujos ventos mais frios e densos descem, provocando uma circulação de ar em todo o planeta. Esse movimento origina os ventos globais. Por conseguinte, os ventos que sopram dos trópicos para o equador, próximos da superfície, são

os ventos alísios, os quais são responsáveis pela abundante intensidade do vento, principalmente nas regiões do litoral nordestino (Nunes, 2012).

Embora a região Nordeste apresente grande potencial na geração eólica, é importante frisar que o vento é uma variável aleatória e, portanto, a máxima potência não será produzida o tempo todo. Dessa forma, antes de implementarmos parques eólicos em qualquer localidade é necessário realizar um estudo da viabilidade eólica e do potencial energético da região. Ademais, a velocidade e direção do vento dependem da rugosidade do solo, da altitude, da localização geográfica e do clima da região. Dependendo da altitude de implementação do aerogerador, haverá um mal escoamento do vento causando perdas energéticas. Nesse sentido e, de acordo com Silva (2003), a região Nordeste é altamente privilegiada pelo fluxo de ar, o qual prevalece de uma extensa cobertura oceânica (livre de obstáculos), observando a continuidade, intensidade e constância dos ventos alísios.

Em períodos de El Niño ou La Niña, as condições do clima de todo o planeta são muito distintas (Grimm et al., 2000). Esses fenômenos influenciam diretamente na formação dos ventos alísios e na configuração climatológica do planeta. Enquanto o El Niño é caracterizado pelo aquecimento anômalo das águas superficiais do Oceano Pacífico, o La Niña é entendido como o resfriamento dessas águas. Particularmente no Nordeste do Brasil, o El Niño provoca uma diminuição da precipitação ao norte da região do semiárido (Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte) nos meses chuvosos de fevereiro a maio Silva (2003). Nos anos que ele ocorre há uma diminuição na intensidade dos ventos alísios. Observe os efeitos do El Niño no planeta na Fig. 3.

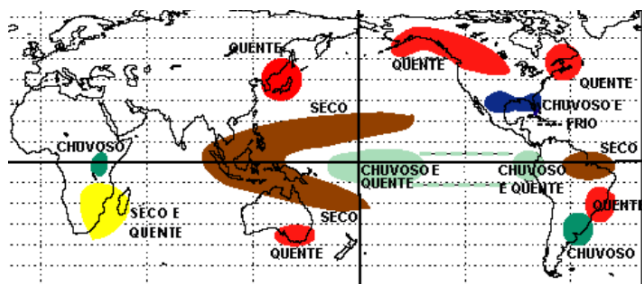


Fig. 4. Efeitos do El Niño no Planeta (Fonte:(NCEP/NOAA – EUA))

Por outro lado, durante o período do La Niña, os ventos alísios se intensificam e no Nordeste ocorre uma maior precipitação que pode levar a enchentes. No final de 2021, as mudanças climáticas puderam ser sentidas na Bahia quando a região sofreu com chuvas atípicas e inundações, caracterizadas como reflexo de La Niña.

O estudo sobre a região Nordeste permite inferir que no litoral os ventos são mais constantes e intensos por possuírem menos obstáculos que dificultam seu escoamento. À medida que adentramos o continente, a turbulência aumenta e a velocidade do vento diminui, influenciadas também pela topografia e rugosidade local. Os resultados obtidos no presente trabalho confirmam essas afirmações.

5. CARACTERIZAÇÃO DO VENTO

O artigo realiza um estudo acerca do regime de ventos na região Nordeste, servindo de base para outras pesquisas de interesse à comunidade acadêmica e externa, visto que existe uma bibliografia limitada acerca da caracterização dos ventos. O estudo é de suma importância visto que, antes da implementação de projetos eólicos, é necessário realizar análises climatológicas detalhadas sobre o vento, a fim de identificar as áreas mais apropriadas para o aproveitamento dessa energia (Sousa, 1992).

O trabalho também objetiva a análise estatística da flutuação horária da velocidade do vento. Os dados foram coletados a partir de estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em um período de 10 anos, compreendidos do dia 01 de janeiro de 2012 a 01 de janeiro de 2022. Como resultado, é possível verificar o perfil do vento ao longo dos 10 anos, a faixa de horário em que o mesmo atinge maiores e menores velocidades, bem como seu comportamento ao longo dos meses e anos. Para desenvolver as análises, primeiramente, é necessário realizar a limpeza e tratamento dos dados obtidos do INMET. Durante o período de 10 anos, existiram longos intervalos com dados ausentes sem previsão da informação.

Com o auxílio do MATLAB, foi possível produzir gráficos estatísticos de ótima análise e fácil compreensão. O principal modelo de uso é o boxplot, o qual permite a análise da variabilidade e dispersão dos dados em torno da mediana. De acordo com (Camponogara, 2019), o diagrama de caixas nos permite observar a distribuição dos dados quanto à sua simetria, ao observar o deslocamento da caixa interquartil e também inferir a variabilidade do dado a partir do tamanho da caixa e das linhas de valores. Dessa forma, quanto menor o tamanho da caixa, mais concentrados estão os dados. Outra análise observada no diagrama é a divisão da caixa em 3 quartis. O primeiro quartil, Q1, representa 25% dos dados da amostra, o segundo quartil, Q2, equivalente à mediana, possui 50% dos dados e, por último, o terceiro quartil, Q3, representa 75% dos dados.

Por conseguinte, o centro do diagrama de caixas indica a mediana, as caudas se estendem até os pontos de dados mais extremos não considerados outliers e os outliers são plotados individualmente usando o '+' símbolo do marcador. Ademais, o MATLAB realiza o cálculo do diagrama da seguinte forma: primeiramente, é carregada uma planilha de dados, em seguida os dados são ordenados para o cálculo da mediana e realizada a marcação da medida em forma de linha horizontal na caixa. Por último, criam-se os quartis inferior e superior.

Para facilitar o entendimento, a região Nordeste será dividida em três áreas: litoral Norte-Nordeste, litoral Nordeste-Sudeste e Nordeste Continental. A primeira região a ser analisada foi o litoral Norte-Nordeste que vai do extremo norte do Maranhão até o extremo sul do Rio Grande do Norte. As cidades a serem verificadas nessa faixa: São Luís – MA, Parnaíba – PI e Natal – RN. Em seguida, a região litorânea Nordeste-Sudeste, com ênfase na cidade de Maceió –AL e, por último, as cidades de Euclides da Cunha e Vitória da Conquista, todas na Bahia, finalizando a região Nordeste Continental.

Segundo Costa and Lyra (2012), a geração de energia elétrica se inicia com velocidades de vento da ordem de 3,0 m/s. A Tabela 1 contém as características das localidades escolhidas, com os dados da estação do INMET, latitude e longitude:

Tabela 1. Características da Estação do INMET para as cidades.

CIDADE	ESTAÇÃO	LAT	LONG
SÃO LUÍS	A203	-2.53°	-44.21°
NATAL	A304	-5.84°	-35.21°
PARANAÍBA	A308	-3.08°	-41.78°
MACEIÓ	A303	-9.55°	-35.77°
EUCLIDES DA CUNHA	A442	-10.54°	-38.99°
VITÓRIA DA CONQUISTA	A414	-14.88°	-40.80°

6. RESULTADOS

Primeiro, realizou-se a análise das cidades ao longo de cada dia, verificando as faixas de horário em que o vento atinge as menores e maiores intensidades. Ademais, comparou-se os dias de um mesmo mês e, como resultado, as flutuações se tornam mais bruscas, dificultando a determinação do perfil do vento na localidade. Entretanto, ao analisar a mediana de todas as variações horárias no período compreendido entre 2012 a 2022, as oscilações são atenuadas, permitindo ilustrar o comportamento diário do vento. No litoral Norte-Nordeste, é possível verificar que embora os municípios escolhidos se encontrem no litoral, o perfil do vento não é o mesmo. A Fig. 5 ilustra a flutuação horária da mediana, realizando um comparativo entre São Luís, Natal e Parnaíba.

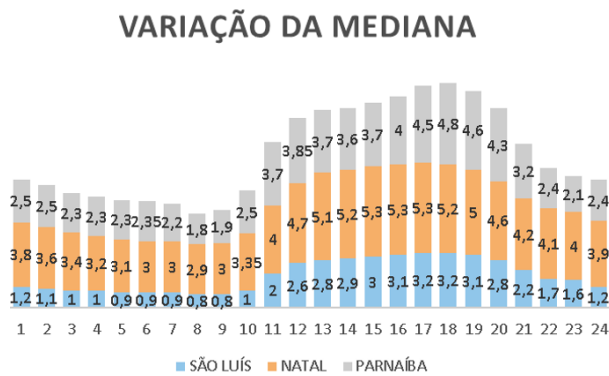


Fig. 5. Flutuação horária da mediana (Fonte: (Autoria própria))

Observa-se que a cidade de São Luís apresenta alta variabilidade nos dados e durante o período matutino a intensidade do vento é menor. Entretanto, o período vespertino é o de maiores velocidades e maiores constâncias da velocidade do vento, variando cerca de 0.1 m/s à cada hora. Além disso, de acordo com o Boxplot, Fig. 6, no turno vespertino, a velocidade do vento pode chegar a máxima de até 5,7m/s, sendo representada pelo traçado superior limite. Nesse contexto, pode-se observar que, ao longo do dia, a mediana se encontra mais próxima do 1º quartil, com a máxima de 3,2 m/s e as velocidades aumentam a partir das 10h da manhã até as 18h da noite, quando as mesmas começam a cair.

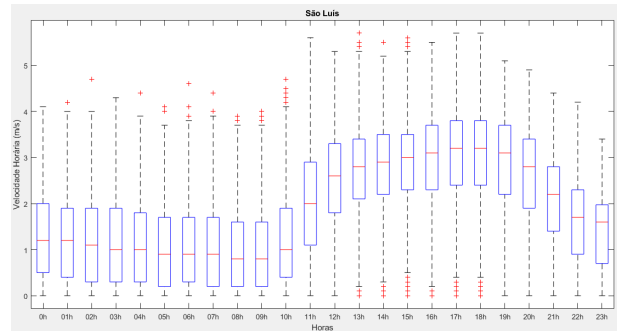


Fig. 6. Flutuação horária em São Luís (Fonte: (Autoria própria))

A Fig. 7 mostra o comportamento do vento em Natal, o qual apresenta menores variações tanto na amplitude das caixas quanto ao longo do dia, aumentando e diminuindo proporcionalmente ao passar das horas. Outro fato é que, embora Natal apresente maiores intensidades em relação a São Luís, o período matutino para ambos é o de menores velocidades do vento. Vale ressaltar no boxplot que a mediana se encontra muito próxima do meio do retângulo, caracterizando uma distribuição simétrica. As maiores amplitudes da caixa se encontram no período vespertino, crescendo a partir das 10h e decrescendo às 18h. A mediana, durante 15h e 17h, é praticamente constante, atingindo 5,3 m/s nesse período. Ademais, os dados estão mais concentrados entre 4,5 e 6,2m/s, atingindo máximas de até 8,7m/s. O período abaixo das 11h apresenta menores velocidades do vento, com dados abaixo dos 4m/s.

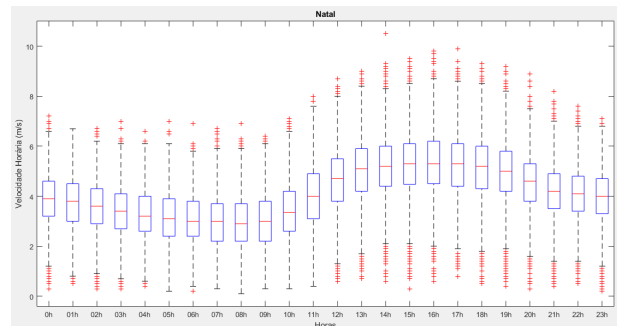


Fig. 7. Flutuação horária em Natal (Fonte: (Autoria própria))

A mesma análise é feita na cidade da Parnaíba. Como resultado, a flutuação horária apresentou variações ao longo do dia, com a mediana oscilando ao passar das horas. A maior intensidade de vento é no turno da tarde, chegando à máxima de 8,4 m/s e mediana de 4,8 m/s. Já no período entre 24h e 7h, as velocidades são mais baixas, porém decrescem de forma constante. Embora as duas localidades, Natal e Parnaíba, sejam altamente privilegiadas com regime eólico, ambas divergem seu comportamento ao longo do dia. A Parnaíba possui mais flutuações horárias que Natal e menores regularidades da velocidade ao longo do dia.

Portanto, para a primeira análise pode-se concluir que a cidade de São Luís apresenta menores regimes eólicos quando comparada à Parnaíba e Natal. Isso ocorre porque

o estado do Maranhão se encontra mais próximo da Zona de Convergência Intertropical, sendo também influenciado pela precipitação, afetando negativamente a formação dos ventos alísios. Ademais, analisando o litoral que se estende do Piauí até o sul do Rio Grande do Norte, tem-se um aumento gradual da velocidade do vento. Essa região possui fortes regimes eólicos, ótimo favorecimento das brisas marítimas e formação dos ventos alísios. Em Natal, mais especificamente, há uma alta incidência solar e isso influencia na formação dos ventos alísios. Outra característica marcante é que, essa localidade possui maiores velocidades médias que as outras cidades analisadas e, esse regime eólico, também pode ser explicado pela localização estratégica (litoral) livre de obstáculos, no qual o vento pode atingir maiores velocidades, sendo mais constante com um melhor escoamento. Ademais, todas as três localidades apresentaram menores velocidades de vento no período matutino, com crescimento a partir das 10h e redução a partir das 18h.

Na análise do litoral Nordeste-Sudeste e Nordeste Continental, observa-se uma queda na velocidade do vento em comparação ao litoral Norte-Nordeste. A Fig. 8 ilustra a flutuação horária da mediana para as cidades de Maceió, Euclides da Cunha e Vitória da Conquista.

VARIAÇÃO DA MEDIANA

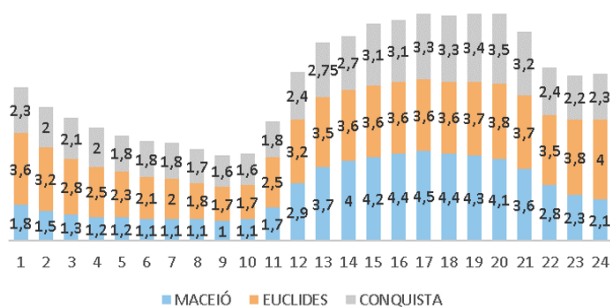


Fig. 8. Variação da Mediana (Fonte: (Autoria própria))

Em Maceió, nota-se que o período de maior intensidade é o da tarde, com crescimento a partir das 10h e redução da velocidade a partir das 18h. Entretanto, Maceió apresenta maior variabilidade que Natal, com mediana máxima de 4,5 m/s. Fazendo a análise do boxplot, Fig. 9, a velocidade máxima durante o dia é de 7,6 m/s.

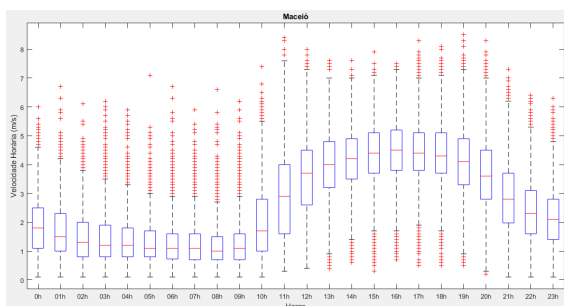


Fig. 9. Flutuação horária em Maceió (Fonte: (Autoria própria))

A última região a ser analisada é o Nordeste Continental. À medida que adentra o continente, a intensidade do vento diminui devido a rugosidade do local, a topografia, os obstáculos naturais e a diminuição da influência de brisas marítimas. Os melhores regimes eólicos se encontram em cidades específicas com ventos de forma localizada. Nessas áreas, a turbulência tende a aumentar e, em locais com montanhas e serras, há a indução da circulação do vento, estando condicionado a brisas de montanha e de vales. A cidade de Euclides da Cunha, Fig. 10, tem características muito diferentes das outras localidades analisadas, visto que a maior intensidade do vento ocorre após o pôr do sol, sendo praticamente constante entre 13h e 01h.

De acordo com o boxplot, Fig. 10, e com a Fig. 8, é possível inferir que a partir das 13h, a mediana da velocidade do vento atinge bons resultados e passa a ser praticamente constante, se mantendo após às 18h. É no período noturno que a intensidade máxima é atingida, sendo evidenciada à 0h (24h) uma mediana de 4m/s e uma velocidade máxima de 8,8 m/s. Também pode-se inferir que há uma redução na velocidade a partir da 0h e, a partir das 5h até às 10h da manhã, o período é de menores intensidades com decaimento constante. Essa característica de melhores condições de vento no período noturno até então, não foi observada em nenhuma cidade analisada. Embora Natal apresente velocidades superiores às de Euclides da Cunha, para o período noturno, ainda assim o seu perfil é melhor desempenhado durante a tarde.

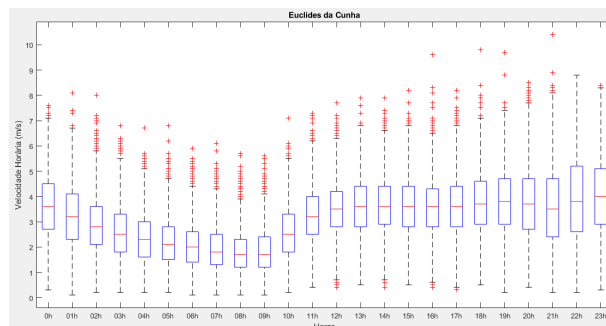


Fig. 10. Flutuação horária em Euclides da Cunha (Fonte: (Autoria própria))

O mesmo estudo foi realizado para a localidade de Paulo Afonso, apresentando também essa peculiaridade noturna. A topografia da cidade influencia na circulação do vento, sendo composta por vários planaltos e depressões. Entretanto, os dados do INMET não eram suficientes para compreender todo o período analisado de 10 anos. Devido à falta de dados horários a partir de 2016, as inferências não puderam ser concluídas.

Por último, fazendo a mesma análise para a cidade de Vitória da Conquista, a qual se encontra mais afastada do litoral, percebe-se que há uma redução na intensidade do vento, com mediana e velocidade máximas de 3,8 e 5,7m/s respectivamente. Ademais, a maioria das medianas se encontram abaixo de 3 m/s. Essas são características esperadas, visto que, quanto mais longe da costa, maiores são os obstáculos, dificultando o escoamento do vento. Além disso, em Vitória da Conquista, a temperatura é praticamente constante, com pouca oscilação durante o

dia e índice pluviométrico significativo ao longo do ano. Fatores que influenciam na formação do vento da região.

Para o segundo estudo, foi realizada a Análise Mensal da flutuação horária da velocidade do vento e, como resultado, foi possível determinar quais os melhores e piores meses ao longo do ano. Segundo Costa (2016), o período de maior potencial eólico coincide com o período de menor precipitação, ocorrendo na metade do inverno e em toda primavera, compreendendo os meses de Agosto a Novembro. Conforme Barros (2013), na primavera, o gradiente horizontal do vento apresenta-se mais intenso do que nas outras estações do ano.

Em São Luís, Fig. 11, o melhor período compreende setembro a dezembro, destacando o mês de outubro, no qual apresentou maiores mediana e velocidade máxima. Contudo, entre março e julho, há uma redução da intensidade do vento.

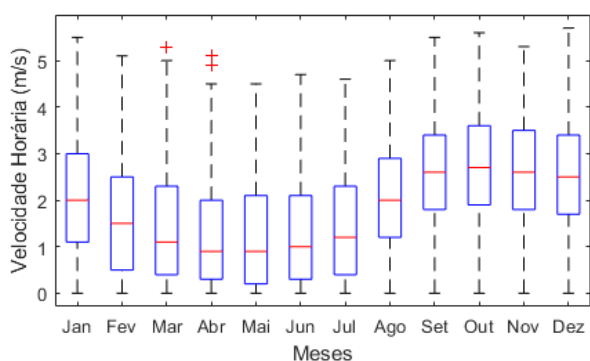


Fig. 11. Análise mensal em São Luís (Fonte: (Autoria própria))

Em Natal, Fig. 12, o melhor período compreende agosto a outubro, destacando o mês de setembro. É importante destacar que as amplitudes das caixas são menores e, esse fator, indica menor variabilidade dos dados. Durante o ano, as medianas são proporcionais e grande parte maior que 4m/s. Portanto, há alta regularidade entre os meses.

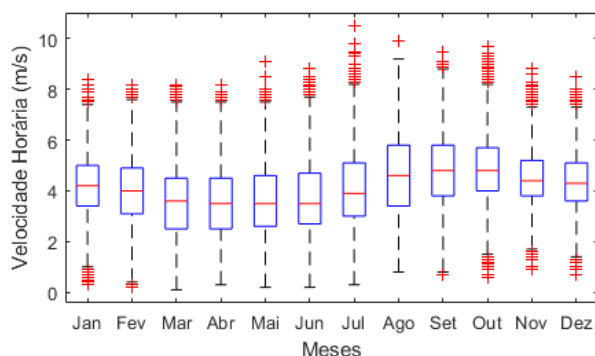


Fig. 12. Análise mensal em Natal (Fonte: (Autoria própria))

Fazendo a mesma análise de forma análoga às cidades acima, obteve-se como resultado para a Parnaíba, o melhor período entre setembro e dezembro, destacando o mês de outubro. Já em Maceió, o estudo apresentou boa regularidade interanual, atingindo maiores velocidades no mês de novembro, quando a temperatura aumenta e as

chuvas diminuem. A cidade de Vitória da Conquista teve como destaque o mês de setembro.

Em Euclides da Cunha, Fig. 13, o gráfico ilustra a constância mensal, menores amplitudes das caixas, indicando também menor variabilidade dos dados. Destaca-se o mês de outubro, no período compreendido entre setembro e novembro.

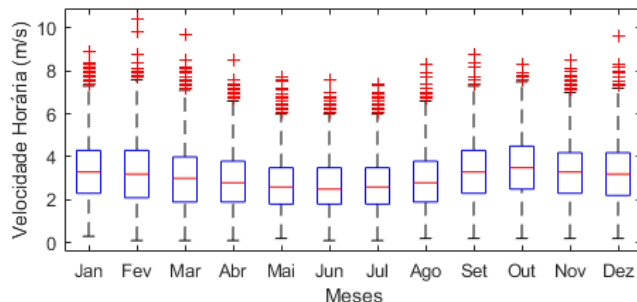


Fig. 13. Análise mensal em Vitória da Conquista (Fonte: (Autoria própria))

Analisando a média da velocidade horária ao longo dos 10 anos para cada cidade, encontra-se os seguintes resultados da Tabela 2:

Tabela 2. Velocidade Média horária

CIDADE	MÉDIA
SÃO LUÍS	2,04
NATAL	4,2
PARANAÍBA	3,2
MACEIÓ	2,6
EUCLIDES DA CUNHA	3,1
VITÓRIA DA CONQUISTA	2,5

A cidade de Natal se destaca com a maior velocidade média, bem como a Parnaíba e Euclides da Cunha, sendo viável a implementação de parques eólicos nessas localidades. Entretanto, São Luís, Maceió e Vitória da Conquista possuem velocidade média abaixo de 3 m/s, intensidade mínima para o funcionamento das turbinas. É importante destacar que não existe parques eólicos em Euclides da Cunha, em Maceió e em Vitória da Conquista, entretanto seria viável a implementação de um na localidade de Euclides da Cunha, devido as análises realizadas.

7. CONCLUSÃO

A partir de seis estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foi possível analisar a flutuação horária da velocidade do vento nas cidades nordestinas. Os dados permitem inferir que a região litorânea atinge maiores velocidades de vento, com maiores constâncias ao longo dos meses, graças à localização privilegiada pelas fortes brisas marítimas, atuando na formação dos ventos alísios. Também chegou-se a conclusão de que as maiores velocidades do vento se encontram no período da tarde. Ademais, nos períodos com baixos índices pluviométricos, entre os meses de agosto e dezembro, comprovou-se maior intensidade nas velocidades do vento. Esse período, no Brasil, também é conhecido como safra dos ventos. Pode-se inferir que as cidades de Vitória da Conquista,

São Luís e Maceió possuem médias abaixo da necessária para funcionamento da turbina eólica. Como estão abaixo de 3,0 m/s, não seria viável a instalação nessas localidades. Por outro lado, as cidades de Natal, Parnaíba e Euclides da Cunha demonstram um bom potencial eólico. Como as cidades litorâneas possuem maior potencial no período da tarde e o município de Euclides da Cunha no período noturno, seria viável uma complementariedade horária entre as regiões. Nesse contexto, não somente as estações eólicas se complementarizariam, mas também seriam possíveis na época de maiores secas e menores regimes de chuva, quando as hidrelétricas se mostram insuficientes para abastecer o país. Dessa forma, com a expansão da matriz energética brasileira, com ênfase na geração eólica, o país estará dando largos passos rumo à independência hídrica e dos combustíveis fósseis.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Oeste da Bahia e ao CNPq por incentivarem a pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

- Amarante, O., Brower, M., Zack, J., and Sá, A. (2012). Atlas do potencial eólico brasileiro (ministério de minas e energia, Brasília, 2001). 10(11).
- Araújo, G.A., Cangussú, D.D.S., Silva, M.R., and Perdigão, K.M. (2020). Aplicação do modelo weibull na modelação matemática para análise da viabilidade de geração de energia eólica. *Revista Engenharia de Interesse Social*, 5(5).
- Assad, E., Pinto, H., Zullo Jr, J., Evangelista, S., Otavian, A., Avila, A., et al. (2008). Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. *Publicações Técnico-Científicas, EMBRAPA*. Available from: <http://www.embrapa.br/publicacoes/tecnico/aquecimentoglobal.pdf/view>.
- Bank, T.W. (2022). Os desafios do planejamento de sistemas hidrelétricos. <http://aiweb.techfak.uni-bielefeld.de/content/bworld-robot-control-software/>. Acessado em: 13 mar. 2022.
- Barros, J.D. (2013). Sazonalidade do vento na cidade de Natal/RN pela distribuição de weibull. *Sociedade e Território*, 25(2), 78–92.
- Bermann, C. (2006). Proyecto cono sur sustentable: propuestas de políticas energéticas sustentables para el cono sur. 2002.
- Borges, O.H.d.M. (2018). Redução das emissões de gases efeito estufa devido ao uso de energia eólica.
- Camponogara, L.d.S. (2019). Análise estatística da intermitência horária de fontes renováveis: um estudo de caso do estado da Bahia.
- CNN (2022). Energia elétrica aumentou mais do que o dobro da inflação nos últimos anos. <https://www.cnnbrasil.com.br/business/energia-eletrica-aumentou-mais-do-que-o-dobro-da-inflacao-nos-ultimos-anos/>. Acessado em: 14 mar. 2022.
- Costa, G.B. and Lyra, R.F.d.F. (2012). Análise dos padrões de vento no estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27, 31–38.
- Costa, R.F. (2016). Determinação do potencial eólico do município de São Luís/MA.
- EPE (2018b). Balanço energético nacional. <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico419/BEN2018.pdf>.
- EPE (2022). Balanço energético nacional. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>.
- EPE, E.d.P.E. (2018). Mudanças climáticas e desdobramentos sobre os estudos de planejamento energético: Considerações iniciais. documento de apoio ao PNE 2050.
- Galvão, J. and Bermann, C. (2015). Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. *Estudos Avançados*, 29, 43–68.
- Grimm, A.M., Barros, V.R., and Doyle, M.E. (2000). Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 13(1), 35–58.
- GWEC, . (2020). Gwec global wind report 2020. *Global Wind Energy Council: Bonn, Germany*.
- IPCC (2011). Ipcc special report on renewable energy sources and climate change mitigation. *Prepared By Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK*.
- IPCC, C. (2007). Ipcc fourth assessment report: Synthesis report. Valencia, Spain.
- MCTI (2016). Avaliação de estudos de vulnerabilidade e adaptação a mudança do clima nas cidades brasileiras. *BRASIL—Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação*, 511–590.
- NEOENERGIA (2022). Energia eólica: Ventos do Nordeste. <https://www.neoenergia.com/pt-br/>. Acessado em: 15 mar. 2022.
- Nunes, H.M.P. (2012). Avaliação do potencial eólico ao largo da costa nordeste do Brasil.
- Schaeffer, R., Szklo, A.S., Lucena, A.F.P.d., Souza, R.R.d., Borba, B., Costa, I.V.L.d., Pereira Jr, A., and Cunha, S.H.F.d. (2008). Mudanças climáticas e segurança energética no Brasil. *Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ*.
- Silva, G.R. (2003). Características de vento da região nordeste: análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas. *Universidade Federal de Pernambuco*.
- Simas, M. and Pacca, S. (2013). Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. *Estudos Avançados*, 27, 99–116.
- Sousa, J.W.d. (1992). Análise climatológica do potencial eólico no estado de Minas Gerais.
- Souza, A.D.d. (2010). *Avaliação da energia eólica para o desenvolvimento sustentável diante das mudanças climáticas no nordeste do Brasil*. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco.
- Souza, Z.J.D. and Azevedo, P.F.d. (2006). Protocolo de Kyoto e co-geração no meio rural: configuração institucional e organizacional e perspectivas. *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*.
- Vian, Â., Tahan, C.M.V., Aguiar, G.J.R., Gouvea, M.R., and Gemignani, M.M.F. (2021). *Energia Eólica: Fundamentos Tecnologia e Aplicações*. Editora Blucher.