

Análise bibliométrica e avaliação da produção de hidrogênio baseada na velocidade do vento de uma localidade do nordeste

RESUMO

No Brasil, em especial no Nordeste, devido a abundância do recurso vento, um caminho ideal para a produção de energia limpa e com emissão zero de carbono é através do desenvolvimento do setor eólico-hidrogênio. Para isso, o potencial energético da produção e uso do hidrogênio deve ser estudado. Esse artigo avalia o potencial de energia eólica de uma localidade do Nordeste do Brasil, e analisa a produção de hidrogênio correspondente, através de uma avaliação do potencial do recurso eólico com base nos dados da velocidade do vento, utilizando a distribuição de Weibull, cujos parâmetros foram calculados através dos métodos Empírico, Máximo Versossemelhança, Momento e Energia Padrão, utilizando a linguagem de programação Python, para uma determinada região do Nordeste Brasileiro. Para a determinação do melhor método foi utilizado a métrica RMSE (Raíz quadrada do erro quadrático médio) e R^2 (Coeficiente de determinação) que indicou o método empírico como o mais representativo do histograma, sendo o método selecionado para o cálculo de potência produzível. Os dados utilizados foram do programa SONDA e a localidade escolhida foi São João do Cariri, na Paraíba. Posteriormente, fez-se uma estimativa de massa de hidrogênio produzida pela região selecionada considerando dois tipos de aerogerador, encontrando para a turbina tipo 1 (N90/2500) o valor de 345393.7 Kg e para a turma tipo 2 (V80/2000) o valor de 266112.44 Kg.

PALAVRAS-CHAVE: Weibull, Energia Eólica, Hidrogênio Verde.

João Victor Castelo Branco

jvcastelo.mec@alu.ufc.br

Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.
Ceará. Brasil.

Jairon Isaias Leal

jleal@alu.ufc.br

Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.
Ceará. Brasil.

Carla Freitas Andrade

carla@ufc.br

Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.
Ceará. Brasil.

Paulo Alexandre Costa Rocha

paulo.rocha@ufc.br

Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.
Ceará. Brasil.

Anselmo Ramalho Pitombeira

anselmo.pitombeira@ufc.br

Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.
Ceará. Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A energia desempenha um papel importante e essencial em muitos países. Por outro lado, nenhum recurso renovável de energia está diminuindo. Entre as diferentes fontes de energias renováveis, a energia eólica é atraente e está disponível em diferentes partes do mundo, principalmente no Nordeste Brasileiro.

A energia eólica está se aproximando de um nível que pode competir com os métodos convencionais. Os mercados de energias renováveis, bem como a energia eólica, evoluíram rapidamente nos anos anteriores. O vento é considerado uma fonte de energia abundantemente disponível, amiga do ambiente, barata e fácil de aproveitar em muitos países (SHAMSHIRBAND et al., 2016).

Nos últimos anos, muitas pesquisas têm sido realizadas para avaliar o potencial da energia eólica em diferentes áreas (“Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain”, [s.d.]; PAN et al., 2016; WANG et al., 2016). Muitos estudos usaram as distribuições de Pearson, Johnson, Log-normal, Weibull, Rayleigh e Gaussiana e, entre todas elas, a distribuição Weibull mostra algumas vantagens (ALLOUHI et al., 2017; HOSSAIN; SHARMA; KISHORE, 2014; WANG; HU; MA, 2016). Avaliar os métodos numéricos disponíveis para calcular um modelo mais adequado para a determinação dos parâmetros de Weibull é significativo e existem diversos trabalhos abordando esse assunto e também relacionados à avaliação da densidade da energia eólica e seus métodos de estimativa, mas faltam pesquisas e trabalhos na literatura sobre o cálculo da produção de hidrogênio a partir da energia eólica para o Brasil em especial para o Nordeste. Sacramento et al. (2008) propôs um plano de energia e hidrogênio para o estado do Ceará usando painéis de células fotovoltaicas e turbinas eólicas.

A produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, como o vento, vem sendo considerada uma meta atraente para diminuir a utilização de fontes de combustíveis fósseis e uma forma de armazenar essa energia renovável, sendo considerada uma evolução gradual de uma economia limpa e uma matriz energética mais sustentável e inteligente (SIGAL; LEIVA; RODRÍGUEZ, 2014; YANIKTEPE; GENC, 2015).

Rodríguez et al. (2010) avaliaram o potencial de geração de hidrogênio a partir da energia eólica na província de Córdoba, Argentina. Já Aiche-Hamane et al. (2009) realizaram um estudo para determinar a viabilidade da geração de hidrogênio a partir da energia eólica em Ghardaia, Argélia. E Zhang e Wan (2014) investigaram um modelo de sistema de armazenamento de energia eólica-hidrogênio. Sarrias-Mena et al. (2015) propuseram um modelo para a produção de hidrogênio a partir da energia do vento.

Sendo assim, o objetivo principal deste estudo é analisar a produção de hidrogênio para uma localidade do Nordeste Brasileiro usando duas turbinas eólicas comerciais, sendo elas N90/2500 e V80/2000.

Para este fim, os dados de uma série histórica de vento, obtida pelo programa SONDA, foram analisados estatisticamente, utilizando a distribuição de Weibull cujos parâmetros foram calculados através de quatro diferentes métodos, sendo eles Método Empírico, Máximo Versossemelhança, Momento e Energia Padrão, através de um programa desenvolvido em linguagem de programação Python, e

para cada um dos métodos foi estimada a quantidade de hidrogenio verde a ser gerada considerando cada uma das duas turbinas comerciais. Consideradas.

A principal contribuição desta pesquisa é mostrar que se pode estimar a produção de hidrogênio a partir da energia eólica para uma determinada localidade, nesse caso, específico, mostrar a estimativa para uma localidade específica do Nordeste Brasileiro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Buscou-se, inicialmente, contextualizar as pesquisas relacionadas com a área de energia eólica e hidrogênio verde, fazendo uma análise sobre as publicações nessa área no contexto mundial e nacional, mostrando os trabalhos com maiores citações e em que países e centro de pesquisa encontram-se mais pesquisas abordando esse assunto.

Com a tendência da produção de hidrogênio verde por meio da energia eólica, pesquisadores que trabalham com temas afins estão se dedicando à área. Embora tenha havido um interesse crescente na produção de hidrogênio verde, muito poucos estudos foram dedicados a medir e analisar publicações científicas de uma perspectiva global. Essa parte do artigo busca avaliar as tendências das publicações relacionadas com a produção de energia eólica vinculada ao Hidrogênio verde em um contexto global, como uma forma de mostrar a importancia do presente artigo que aborda um tema que ainda começa a ser estudado.

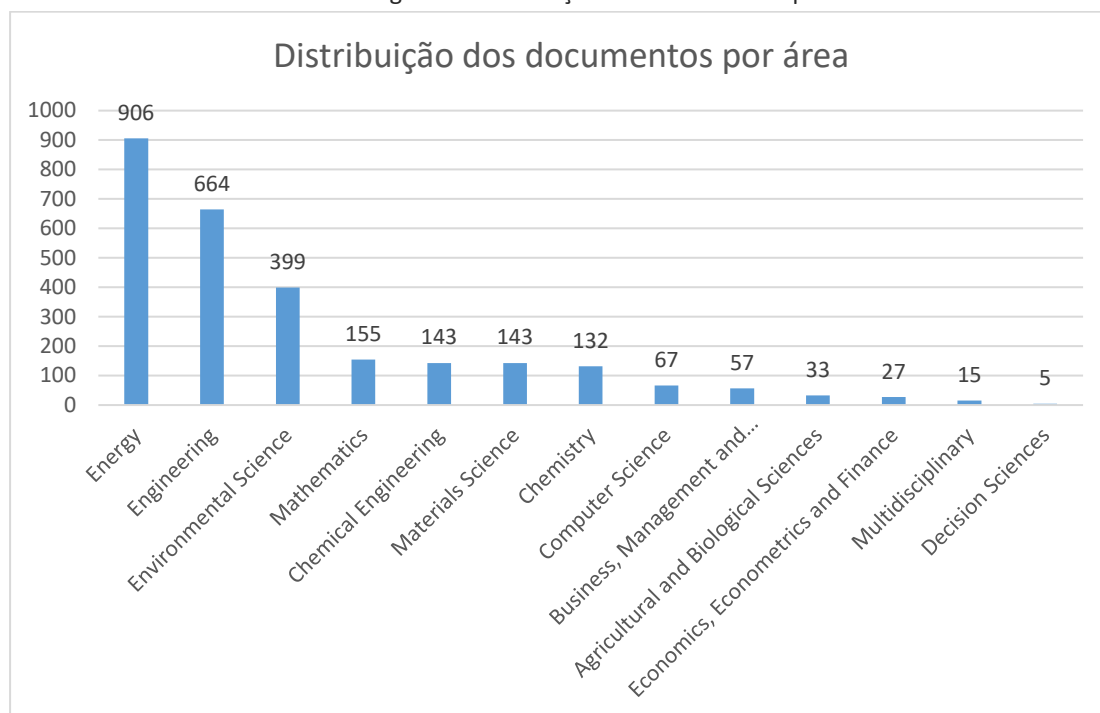
A extração de dados científicos para esse estudo foi realizada usando o banco de dados Scopus em abril de 2023. A literatura foi pesquisada considerando todos os anos possíveis, usando as opções de pesquisa avançada “título, resumo e palavras-chave”, e aplicando a lógica como (“hydrogen” AND (“wind energy” OR “wind power” OR “wind turbine” OR “weibull”)), onde obteve-se 3.356 documentos, e aplicando um refinamento, filtrando os documentos, conforme mostra na Tabela 1, para “artigo e revisão”, Língua Inglesa, estágio de publicação final, tipo de fonte Jornal, ficou-se com apenas 1.374 documentos, que estão distribuídos nas seguintes áreas, conforme a Figura 1.

Tabela 1 – Escopo, banco de dados, termos e filtros referentes à análise bibliométrica realizada com o Bibliometrix

| Banco de Dados | String de Busca | Quantidade de documentos total | Quantidade de documentos para o Brasil | Filtros inseridos |
|----------------|---|--------------------------------|--|--|
| Scopus | (“hydrogen” AND (“wind energy” OR “wind power” OR “wind turbine” OR “weibull”)) | 1.374 | 18 | Tipos de Documentos: Artigos e Review Estágio da publicação: Final Tipo de Fonte: Journal Idioma: Inglesa |

Fonte: Base Scopus, Abril.2023

Figura 1: Distribuição dos documentos por área



Fonte: O autor baseado na Base Scopus – Abril 2023

A Figura 1 mostra que a maioria dos artigos encontra-se na sub área de energia com 906 documentos, seguida da área de engenharia com 664 artigos.

Diante dos documentos selecionados, para compilar os dados e fazer uma análise das informações, foi utilizada a ferramenta do Bibliometrix (<https://www.bibliometrix.org/>), um software livre escrito em linguagem R (ARIA; CUCCURULLO, 2017).

O conjunto de documentos contém um total de 1.374 documentos, sendo 1.246 artigos e 128 trabalhos de revisão, distribuídos em 374 fontes e tendo a participação de 4.144 autores. Assim, uma análise para avaliar a contribuição sobre os últimos desenvolvimentos, perspectivas futuras de pesquisa foi realizada usando esse conjunto de dados.

A Figura 2 mostra a produção científica anual desde 1967 até 2022, onde percebe-se nitidamente o aumento das publicações nessa área principalmente nos últimos anos.

Figura 2 – Produção científica anual



Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Abril 2023

Dentre as publicações mais recentes pode-se citar o trabalho de Adedoja et al. (2023) que apresenta uma análise de sensibilidade de carga de balanço de energia e método multicritério para dimensionar um sistema de energia verde. Al-Orabi; Osman; Sedhom (2023) avaliaram a capacidade de hidrogênio verde como um meio potencialmente novo para armazenar energia elétrica renovável e combustível do Egito. Já Superchi et al. (2023) investigaram a viabilidade de acoplar a geração intermitente de energia elétrica de um parque eólico com eletrolisadores alcalinos para produzir hidrogênio verde. Enquanto Abadie; Chamorro (2023) avaliaram a viabilidade econômica de uma instalação combinada de hidrogênio verde baseada no vento do ponto de vista de um investidor, apresentando um modelo teórico e exemplos. Wang et al. (2023) propõe um sistema de operação combinando eólica e hidrogênio bombeado baseado em aprendizado de máquina e rede neural para prever a geração de energia eólica.

No trabalho de Zhao et al. (2022), os autores avaliaram possíveis soluções para a escassez de energia do Paquistão com base em uma fonte renovável de hidrogênio verde fornecida por energia geotérmica, eólica, biomassa e solar.

Com base nos resultados do estudo, a eficiência das fontes de energia eólica é mais bem adaptada para produzir energia de hidrogênio no Paquistão. Já o trabalho de Wang et al. (2022) propõe um sistema de produção de hidrogênio via reator de membrana utilizando energia solar, eólica e biomassa. Os autores de Tang; Rehme; Cerin (2022) apresentam um modelo para identificar os principais e mostram que a velocidade do vento é crucial na redução do custo.

Importante referenciar também o trabalho de Saenz-Aguirre et al. (2022) onde os autores fizeram uma análise da influência da implementação de Geradores Vortex (VGs) e Gurney Flaps (GFs) em Pás de Turbinas Eólicas (WTBs) na Produção Anual de Energia (AEP) de grandes Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (HAWT). Para isso, foram calculadas as distribuições Weibull de séries de dados anuais de velocidade do vento de um parque eólico real, e cálculos baseados em Blade Element Momentum (BEM) foram realizados para avaliar o efeito dos dispositivos de controle de fluxo na curva de potência.

A Tabela 2 mostra as fontes que mais tem publicação na área, tendo destaque a revista Energy que lidera com 92 documentos.

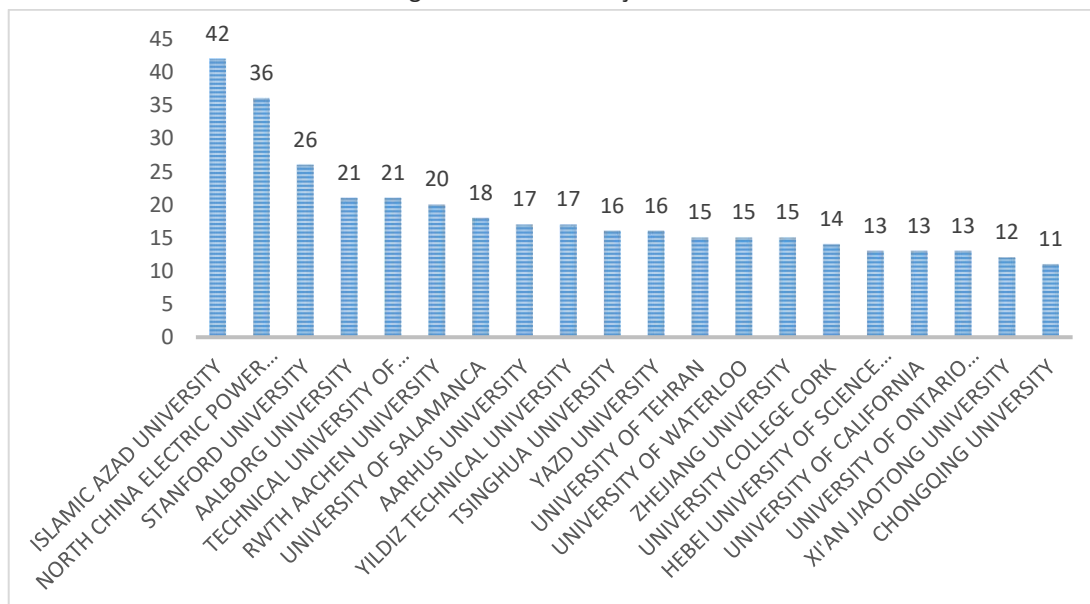
Tabela 2 – As 20 fontes com mais publicação na área considerada

| Fontes | Quantidade de Artigos | Fontes | Quantidade de Artigos |
|--|-----------------------|--|-----------------------|
| ENERGY | 92 | JOURNAL OF POWER SOURCES | 19 |
| APPLIED ENERGY | 85 | SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENTS | 19 |
| ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT | 82 | IEEE ACCESS | 17 |
| ENERGIES | 73 | RENEWABLE ENERGY AND POWER QUALITY JOURNAL | 16 |
| RENEWABLE ENERGY | 71 | FRONTIERS IN ENERGY RESEARCH | 13 |
| RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS | 55 | INTERNATIONAL JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY RESEARCH | 13 |
| JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION | 47 | ENERGY REPORTS | 12 |
| JOURNAL OF ENERGY STORAGE | 28 | PROCESSES | 12 |
| ENERGY POLICY | 27 | SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT | 11 |
| INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH | 22 | WIND ENGINEERING | 10 |

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Abril, 2023

Outro parâmetro importante a ser analisado são as instituições que mais estão desenvolvendo pesquisas na área. A Figura 3 mostra as 20 instituições com mais publicações vinculadas.

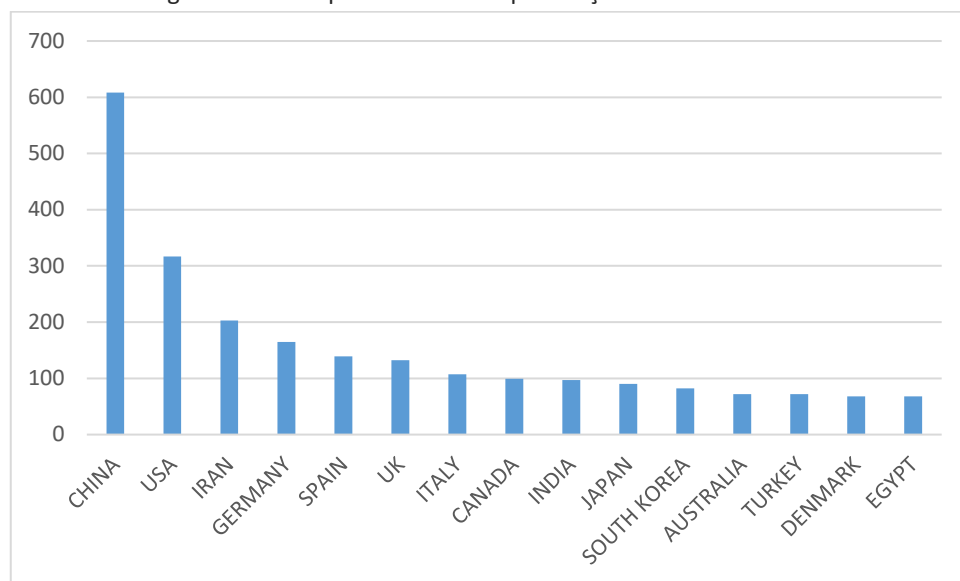
Figura 3 – As 20 afiliações mais relevantes



Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Abril, 2023

A Figura 4 mostra a quantidade publicações por países observando o destaque da China, com 600 documentos, e para os Estados Unidos, com 302 artigos.

Figura 5 – Os 15 países com mais publicação na área em estudo.



Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Abril, 2023

A Tabela 3 mostra a relação de alguns dos trabalhos mais citados, mostrando o primeiro autor, ano de publicação, revista publicada, citação, DOI e o total de citações.

Tabela 3 – Alguns dos 20 documentos mais citados com a quantidade de citações

| 1º AUTOR, ANO DE PUBLICAÇÃO, JOURNAL, CITAÇÃO | DOI | Total Citações |
|--|-------------------------------|----------------|
| PANWAR NL, 2011, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY VER (PANWAR; KAUSHIK; KOTHARI, 2011) | 10.1016/j.rser.2010.11.037 | 2224 |
| JACOBSON MZ, 2009, ENERGY ENVIRON SCI (JACOBSON, 2009) | 10.1039/b809990c | 1245 |
| HOSSEINI SE, 2016, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY VER (HOSSEINI; WAHID, 2016) | 10.1016/j.rser.2015.12.112 | 1194 |
| OLAH GA, 2009, J ORG CHEM (OLAH; GOEPPERT; PRAKASH, 2009) | 10.1021/jo801260f | 1150 |
| HOFFERT MI, 2002, SCIENCE (HOFFERT et al., 2002) | 10.1126/science.1072357 | 1108 |
| ZAKERI B, 2015, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY VER (ZAKERI; SYRI, 2015) | 10.1016/j.rser.2014.10.011 | 1089 |
| JACOBSON MZ, 2011, ENERGY POLICY (JACOBSON; DELUCCHI, 2011a) | 10.1016/j.enpol.2010.11.040 | 1001 |
| LUND PD, 2015, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY VER (LUND et al., 2015) | 10.1016/j.rser.2015.01.057 | 989 |
| CHENG S, 2009, ENVIRON SCI TECHNOL (CHENG et al., 2009) | 10.1021/es803531g | 922 |
| LUND H, 2009, ENERGY (LUND; MATHIESEN, 2009a) | 10.1016/j.energy.2008.04.003 | 836 |
| TURNER J, 2008, INT J ENERGY RES (TURNER et al., 2008a) | 10.1002/er.1372 | 777 |
| GOFF AL, 2009, SCIENCE (GOFF et al., 2009) | 10.1126/science.1179773 | 764 |
| LIN K, 2015, SCIENCE (LIN et al., 2015) | 10.1126/science.aab3033 | 691 |
| WAGNER FT, 2010, J PHYS CHEM LETT (WAGNER; LAKSHMANAN; MATHIAS, 2010) | 10.1021/jz100553m | 672 |
| LEE DJ, 2008, IEEE TRANS ENERGY CONVERS (LEE; WANG, 2008) | 10.1109/TEC.2007.914309 | 608 |
| WANG M, 2014, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY VER (WANG et al., 2014) | 10.1016/j.rser.2013.08.090 | 599 |
| DELUCCHI MA, 2011, ENERGY POLICY (DELUCCHI; JACOBSON, 2011) | 10.1016/j.enpol.2010.11.045 | 555 |
| BERNAL-AGUSTÍN JL, 2009, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY VER (BERNAL-AGUSTÍN; DUFO-LÓPEZ, 2009) | 10.1016/j.rser.2009.01.010 | 529 |
| CHI J, 2018, CUIHUA XUEBAO CHIN J CATALYSIS (CHI; YU, 2018) | 10.1016/S1872-2067(17)62949-8 | 518 |
| OMAE I, 2012, COORD CHEM VER (OMAE, 2012) | 10.1016/j.ccr.2012.03.017 | 512 |

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Abril, 2023

Dentre o mais citado está o trabalho de Panwar; Kaushik; Kothri, (2011) fez uma revisão sobre o escopo da mitigação de CO₂ por meio de fogão solar, aquecedor de água, secador, biocombustível, fogões melhorados e por hidrogênio. O trabalho de Jacobson (2009), com 1245 citações, analisa e classifica as principais soluções propostas relacionadas à energia para o aquecimento global, mortalidade por poluição do ar e segurança energética, considerando outros impactos das soluções propostas, como abastecimento de água, uso da terra, vida selvagem, disponibilidade de recursos, poluição térmica, química da água poluição, proliferação nuclear e desnutrição, onde consideraram, dentre as fontes, a fonte eólica.

O trabalho de Jacobson; Delucchi (2011b) recebeu 1001 citações e abordam sobre a viabilidade de fornecer energia mundial para todos os fins (energia elétrica, transporte, aquecimento/resfriamento, etc.) a partir do vento, água e luz solar. Já o trabalho de Lund; Mathiesen (2009b) recebeu 836 citações até o momento e

apresenta a metodologia e os resultados da análise geral do sistema energético de um sistema de energia 100% renovável. A metodologia de análise do sistema de energia inclui simulações de computador hora a hora que levam ao projeto de sistemas de energia flexíveis com a capacidade de equilibrar a oferta e a demanda de eletricidade para a Dinamarca. Em Turner et al. (2008b) fala-se sobre as tecnologias para produzir hidrogênio a partir de fontes renováveis e sustentáveis, onde a eletrólise da água é uma tecnologia comercial padrão para a produção de hidrogênio, e o artigo tem 777 citações.

Quando se analisa o cenário para o Brasil, obtém-se, para esse conjunto de palavras consideradas, apenas 18 documentos, que estão distribuídos pelas seguintes instituições, conforme a Tabela 4. Já a Tabela 5 mostra os documentos brasileiros e suas quantidades de citações.

Tabela 4 – Instituições brasileiras com mais publicação nessa área.

| Instituições | Quantidade de Artigos |
|---|------------------------------|
| UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL | 4 |
| UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO | 2 |
| UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ | 2 |
| UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA | 2 |
| UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA | 2 |
| UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO | 2 |
| UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ | 2 |

Fonte: Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Abril, 2023

Tabela 5 – Documentos com autores brasileiros e suas citações

| 1º AUTOR, ANO DE PUBLICAÇÃO, JOURNAL, CITAÇÃO | DOI | TOTAL DE CITAÇÕES |
|--|--------------------------------|-------------------|
| KHOSRAVI A, 2018, ENERGY (KHOSRAVI et al., 2018a) | 10.1016/j.energy.2018.02.008 | 108 |
| MENDES PRC, 2016, J POWER SOURCES (MENDES et al., 2016) | 10.1016/j.jpowsour.2016.07.076 | 63 |
| DA SILVA EP, 2005, SOL ENERGY (DA SILVA et al., 2005) | 10.1016/j.solener.2004.10.011 | 55 |
| SILVEIRA JL, 2009, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY VER (SILVEIRA et al., 2009) | 10.1016/j.rser.2009.06.032 | 49 |
| SOUZA FL, 2015, J ENVIRON MANAGE (SOUZA et al., 2015) | 10.1016/j.jenvman.2015.04.040 | 46 |
| PELAEZ-SAMANIEGO MR, 2014, ENERGY (PELAEZ-SAMANIEGO et al., 2014) | 10.1016/j.energy.2013.11.012 | 32 |
| OLAMA A, 2018, IET GENER TRANSM DISTRIB (OLAMA; MENDES; CAMACHO, 2018) | 10.1049/iet-gtd.2018.5852 | 25 |
| HUNT JD, 2022, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY VER (HUNT et al., 2022a) | 10.1016/j.rser.2022.112291 | 22 |
| DO SACRAMENTO EM, 2013, ENERGY POLICY (DO SACRAMENTO et al., 2013) | 10.1016/j.enpol.2013.06.071 | 21 |
| SOUZA FL, 2016, J ENVIRON MANAGE (SOUZA et al., 2016) | 10.1016/j.jenvman.2016.01.032 | 19 |
| HUNT JD, 2021, J ENERGY STORAGE (HUNT et al., 2021) | 10.1016/j.est.2021.102746 | 17 |
| NASCIMENTO DA SILVA G, 2022, APPL ENERGY (NASCIMENTO DA SILVA; ROCHEDO; SZKLO, 2022) | 10.1016/j.apenergy.2022.118631 | 10 |
| ROMERO A, 2020, ENERGY (ROMERO et al., 2020) | 10.1016/j.energy.2020.117964 | 7 |
| MODESTO JUNIOR EN, 2019, FOOD RES INT (MODESTO JUNIOR; CHISTÉ; PENA, 2019) | 10.1016/j.foodres.2019.01.029 | 6 |
| HUNT JD, 2022, ENERGY (HUNT et al., 2022b) | 10.1016/j.energy.2022.123660 | 4 |
| GAVIOLLI E, 2021, INT J ADHES ADHES (GAVIOLLI et al., 2021) | 10.1016/j.ijadhadh.2021.102932 | 3 |
| SAVARIS ID, 2013, RENEWABLE ENERGY AND POWER QUAL J (SAVARIS et al., 2013) | 10.24084/repqj11.385 | 2 |
| HUNT JD, 2023, J ENERGY STORAGE (HUNT et al., 2023) | 10.1016/j.est.2023.106638 | 0 |

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Abril, 2023

No trabalho de Khosravi et al. (2018b), com 108 citações, os autores avaliam um sistema de energia renovável híbrida off-grid com armazenamento de hidrogênio. O sistema combina energia solar e eólica, unidade de produção de hidrogênio e célula de combustível.

3 METODOLOGIA

A energia eólica está se aproximando de um nível que pode competir com os métodos convencionais. Os mercados de energia renovável, bem como a energia eólica, evoluíram rapidamente nos anos anteriores (MOSTAFAEIPOUR et al., 2016a). O vento é considerado uma fonte de energia abundantemente disponível e fácil de aproveitar em muitos países.

Nos últimos anos, a geração de hidrogênio a partir de fontes de energias renováveis é considerada atraente para uma evolução gradual de uma economia limpa e uma matriz energética mais sustentável. O hidrogênio pode ser gerado por meio da energia eólica, eletrolisando a água sem emissão de dióxido de carbono, podendo ser usado como combustível, o que pode reduzir o efeito estufa, por isso o hidrogênio é considerado um combustível do futuro que não agride o meio ambiente. Sendo assim, como pode ser visto na análise bibliométrica, estudos estão sendo realizados considerando o hidrogênio produzido pela energia eólica.

Este trabalho assume um sistema eólico de produção de hidrogênio, onde foram coletadas informações relacionadas à um determinado local, como os dados de velocidade do vento, e posteriormente esses dados foram usados para modelar a condição de vento no local considerado com a ajuda da função de distribuição de Weibull, sendo que os parâmetros de Weibull foram encontrados através do método da máxima verossimilhança, método da energia padrão, método do momento e método empírico, e para a determinação do melhor método foi utilizado a métrica Raíz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e Coeficiente de determinação (R^2).

Ademais, foi feita a importação dos dados da curva de potência de dois aerogeradores comerciais, N90/2500 e V80/2000 para os cálculos da potência produzível, e, por fim, foram realizados os cálculos de EAP (Energia Anual Gerada), que foram utilizados no cálculo da massa produzida de hidrogênio, podendo obter o valor aproximado de produção de toneladas de hidrogênio por meio da utilização da energia elétrica, gerada pela turbina eólica, na eletrólise da água.

3.1 Velocidade do vento

É comum observar que o vento não é constante e para calcular a potência gerada por uma turbina eólica a partir de sua curva de potência, é necessário conhecer a distribuição da densidade de probabilidade da velocidade do vento (MOSTAFAEIPOUR et al., 2016b).

Características do vento, como a velocidade do vento, são parâmetros eficazes para medir a viabilidade de geração de energia eólica em uma região. Parâmetros estatísticos de dados de velocidade do vento podem ser usados para modelar a condição do vento de cada região. Por meio dessa modelagem, pode-se avaliar o desempenho das turbinas eólicas (ALMUTAIRI et al., 2021).

As condições do vento podem ser modeladas com várias funções de distribuição de probabilidade, dentre elas Weibull, que é amplamente sendo dada pela Equação (1)

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2)$$

onde v , k e c são a velocidade do vento (m/s), o parâmetro de forma (sem dimensão) e o parâmetro de escala (m/s), respectivamente, sendo que o parâmetro de forma (k) representa a forma do pico da função de distribuição de probabilidade. Para estimar estes parâmetros de Weibull, alguns métodos numéricos podem ser usados. Nesse trabalho, foram utilizados o método da

máxima verossimilhança, método da energia padrão, método do momento e método empírico.

3.1.1 Método da Máximo Verossimilhança

O método de estimação de máxima verossimilhança determina os parâmetros de Weibull através de iterações numéricas, onde os parâmetros k e c são determinados de acordo com as Equações (3) e (4), respectivamente.

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

onde n é o número de observações realizadas e v_i é a velocidade do vento medida no intervalo i .

3.1.2 Método da Energia Padrão

No método da energia padrão os parâmetros de Weibull podem ser calculados utilizando as Equações (5) até (8).

$$k = 1 + \frac{3,69}{(E_{pf})^2} \quad (5)$$

onde

$$E_{pf} = \frac{\bar{v}^3}{(\bar{v}^3)} \quad (6)$$

E

$$\bar{v} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (7)$$

Onde E_{pf} é o fator de padrão de energia, Γ é a função gama e \bar{v} é a velocidade média do vento na altura da turbina eólica.

Sendo assim, o parâmetro de escala pode ser calculado por:

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (8)$$

3.1.3 Método do Momento

O método do momento é um método iterativo dependente da velocidade média do vento (\bar{v}) e do desvio padrão (σ) dos dados observados das velocidades do vento, onde os parâmetros de Weibull são determinados pelas Equações (7) e (9).

$$\sigma = c \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{1/2} \quad (9)$$

3.1.4 Método Empírico

Pelo método empírico, utiliza-se novamente a Equação (7) para encontrar o valor do parâmetro de escala (c) combinada com a Equação (10) para encontrar o valor do parâmetro de forma (k).

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad (10)$$

3.1.5 Avaliação da Distribuição de Weibull

A qualidade do ajuste de um modelo estatístico descreve o quão bem ele se ajusta a um conjunto de observações. As medidas de qualidade do ajuste geralmente resumem a discrepância entre os valores observados e os valores esperados de acordo com o modelo em questão (MOSTAFAEIPOUR et al., 2016b).

Para avaliar o desempenho dos diferentes métodos utilizados para determinar os parâmetros da função Weibull (k e c), foram utilizados dois parâmetros, sendo eles o RMSE que fornece o desvio padrão entre o previsto, y_i , e os valores experimentais, x_i , que deve ser o mais próximo de zero possível e sendo expresso por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (11)$$

E o Coeficiente de determinação (R^2), dado pela Equação (12)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2 - \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2} \right] \quad (12)$$

Onde (z_i) é a frequência relativa média das observações.

3.1.6 Fator de Capacidade e Produção Anual de Energia

O Fator de capacidade (FC), dado pela Equação (13), é dependente dos parâmetros k e c e da velocidade do vento nominal (v_{rated}), cut-in, cut-out da turbina eólica selecionada. A maioria dos valores práticos para FC situam-se entre 20% e 40% dependendo das condições do local e da tecnologia da turbina eólica. Então, para cada método utilizado para encontrar os valores de k e c , ter-se-á, diferentes valores de CF.

$$CF = \frac{P_{out}}{P_r} = \frac{e^{-\left(\frac{v_{cut-in}}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_{rated}}{c}\right)^k}}{\left(\frac{v_{rated}}{c}\right)^k - \left(\frac{v_{cut-in}}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_{cut-out}}{c}\right)^k} \quad (13)$$

Importante saber que os valores de (v_{rated}), cut-in, cut-out são dados pelos fabricantes de turbinas. Então deve-se selecionar um modelo para realizar o estudo. No presente trabalho, dois modelos foram utilizados, sendo eles N90/2500 e V80/2000.

A produção anual de energia, E_{out} , para cada turbina eólica pode ser calculada usando sua potência nominal, P_{rated} , e fator de capacidade, FC, calculado na Equação (13).

$$E_{out} = CF \cdot P_{rated} \times 8760h \quad (14)$$

Já o valor P_{rated} é dado pelo fabricante, e é a capacidade que a turbina é vendida. Para considerar a energia produzida em todo um parque eólico, considera-se a Equação (15)

$$E_{out} = N_{tb} \cdot P_{rated} \cdot CF \quad (15)$$

Onde N_{tb} e P_{rated} são, respectivamente, o número de turbinas e a capacidade nominal de cada turbina. Lembrando que o P_{rated} é para cada modelo de turbina.

Para esse estudo, escolheu-se dois tipos de turbina, pois é preciso saber que máquina será usada, pois a energia que se recebe depende da especificação de cada uma das turbinas.

3.1.7 Produção de Hidrogênio pela Energia Eólica

Os eletrolisadores alcalinos e de membrana de troca de prótons (PEM) são os eletrolisadores de água comerciais mais populares para a produção de hidrogênio (ALMUTAIRI et al., 2021).

Como resultado, a quantidade de hidrogênio verde (kg) produzida pelo processo de eletrólise da água através da energia eólica pode ser calculada pela Equação (16).

$$M_{hydrogen} = \frac{E_{out} \eta_{rect}}{E_{cel}} \quad (16)$$

Onde $M_{hidrogênio}$ é a quantidade de hidrogênio produzida na saída do eletrolisador, E_{out} é a energia elétrica de saída da turbina eólica, η_{rect} é a eficiência da conversão, é a eficiência do retificador do sistema (após a dedução das perdas), que será assumida como 0,9 (MOHSIN; RASHEED; SAIDUR, 2018). E E_{cel} é a demanda de energia do eletrolisador, energia consumida pelo eletrolisador, que se presume ser 54 kWh/kg para um eletrolisador PEM padrão.

O valor de E_{cel} será calculado pela Equação (15), caso seja considerado um parque, ou pela Equação (14), se considerar somente uma turbina instalada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, foi feita a coleta dos dados na plataforma SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) da cidade de São João do Cariri - PB no período de 2008. Os dados utilizados foram coletados de 10 em 10 minutos para a altitude de 50 m.

Em seguida, foi implementado um algoritmo na linguagem Python para a realização dos cálculos de estimativa de massa de hidrogênio produzida pela região selecionada considerando dois tipos de aerogerador.

A linguagem Python foi selecionada por ser uma linguagem open source, além de possuir fácil consulta e acesso. As principais bibliotecas utilizadas foram Pandas, Scipy e Matplotlib. A primeira para importação e manipulação dos dados, a segunda para cálculos de sistemas de equações e a terceira para criação e exibição

dos gráficos. No programa desenvolvido, foi considerada a entrada de tanto por .txt como por .xls.

O primeiro passo foi a importação dos dados da plataforma SONDA para, posteriormente, tratá-los, onde se retirou dados negativos e zero.

Quando se tratou os dados para a localidade de São João do Cariri – PB, ficou-se com 99,92 % de dados válidos, como pode ser observado na Tabela 5.

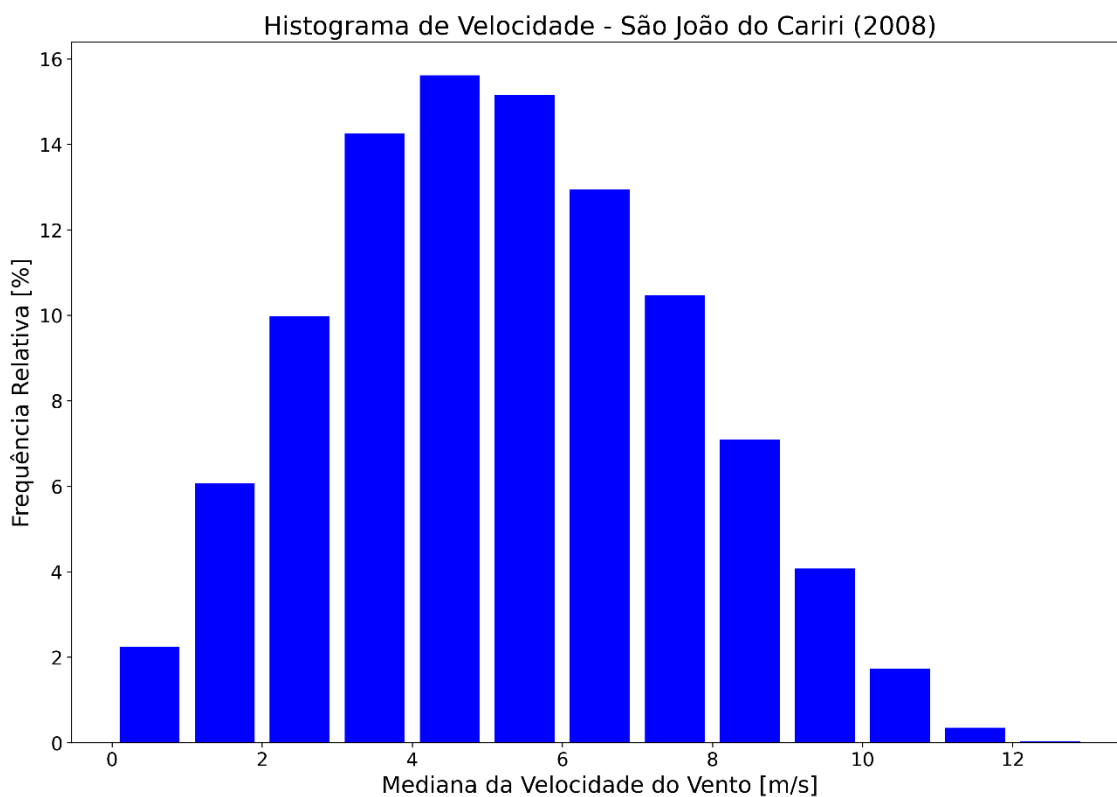
Tabela 6 – Percentagem de dados válidos

| | Dados Úteis | Dados Desprezados | Dados Totais |
|------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|
| Bruto | 52662 | 42 | 52704 |
| Percentagem (%) | 99,92031 | 0,07969 | 100 |

Após o tratamento dos dados, rodou-se a sub-rotina para calcular as frequências absolutas e relativas de um intervalo de velocidades, sendo representado pela mediana e os valores limites do intervalo são definidos a cada 1 m/s.

A Figura 6 exhibe o histograma da distribuição de velocidade do vento para a localidade de São João do Cariri, na Paraíba, para o ano de 2008.

Figura 6 – Histograma da velocidade do vento da região do São João do Cariri para o ano de 2008.



Fonte: Gerado pelo autor

O segundo passo foi o cálculo dos valores de k e c , os quais são conhecidos como fator de forma e fator de escala, respectivamente, para a sua utilização na função densidade de probabilidade de weibull, dada pela Equação (1).

Foram selecionados 4 métodos para calculá-los, os quais são: Método da máxima verossimilhança (Equação (3) e Equação (4)), método da energia padrão (Equação (5) e Equação (8)), método do momento, (Equação (7) e Equação (9)) e método empírico (Equação (10) e Equação (7)).

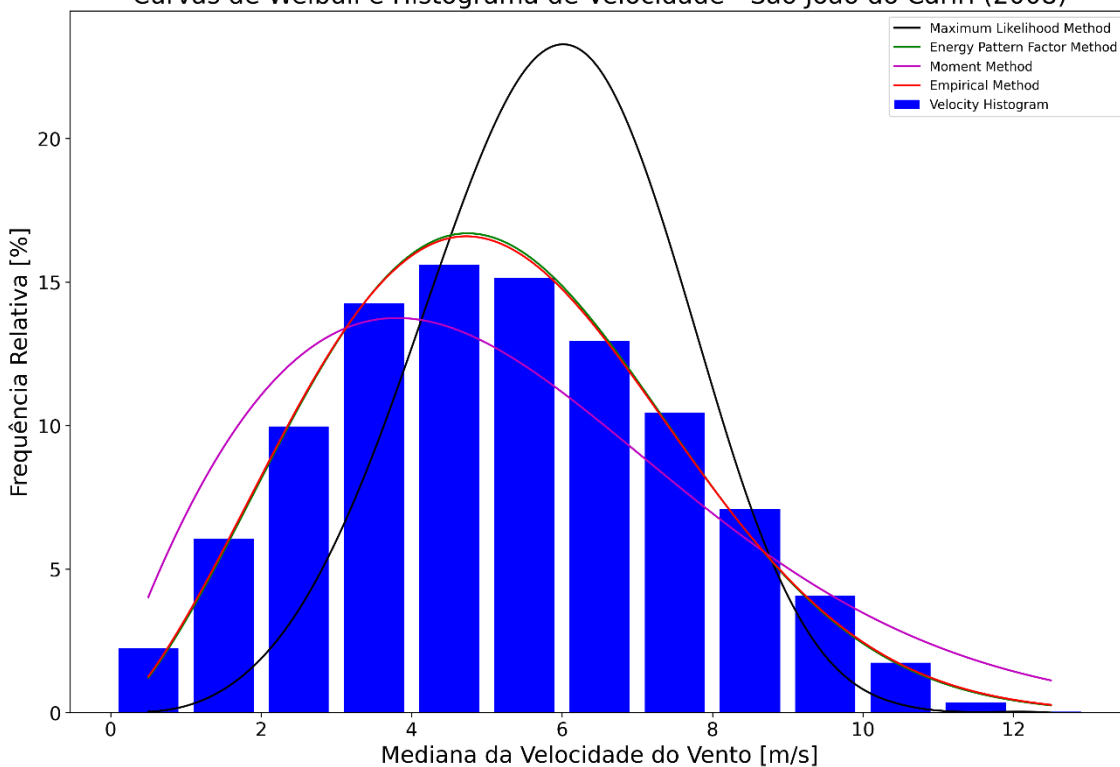
Após realizar o cálculo dos parâmetros, a equação de Weibull foi calculada para cada um dos métodos considerados, utilizando as Equações (1) e (2). Os valores de k e c para cada um dos métodos pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 7 – Valores encontrados de k e c para os diferentes métodos

| Métodos | k | c |
|------------------------|-------|-------|
| Máximo verossimilhança | 3,959 | 6,472 |
| Energia Padrão | 2,427 | 5,908 |
| Momento | 1,822 | 5,894 |
| Empírico | 2,408 | 5,909 |

A Figura 7 evidencia todas as curvas de Weibull calculadas, para cada um dos métodos considerados, sobre o histograma da distribuição de velocidade do vento.

Figura 7 – Histograma e as curvas calculadas pelos diferentes métodos
Curvas de Weibull e Histograma de Velocidade - São João do Cariri (2008)



Percebe-se que a curva calculada pelo método da máxima verossimilhança é a que menos representa o histograma dessa localidade, assim como a curva calculada pelo método do momento.

Para a determinação do melhor método foi utilizado a métrica RMSE (Raiz quadrada do erro quadrático médio), conforme a Equação (11) e R^2 (Coeficiente de determinação), conforme a Equação (12), que indicou o método empírico como o mais representativo do histograma, como pôde ser analisado na Figura 7 e confirmado na Tabela 8.

Tabela 8 – Cálculo do erro para os diferentes métodos

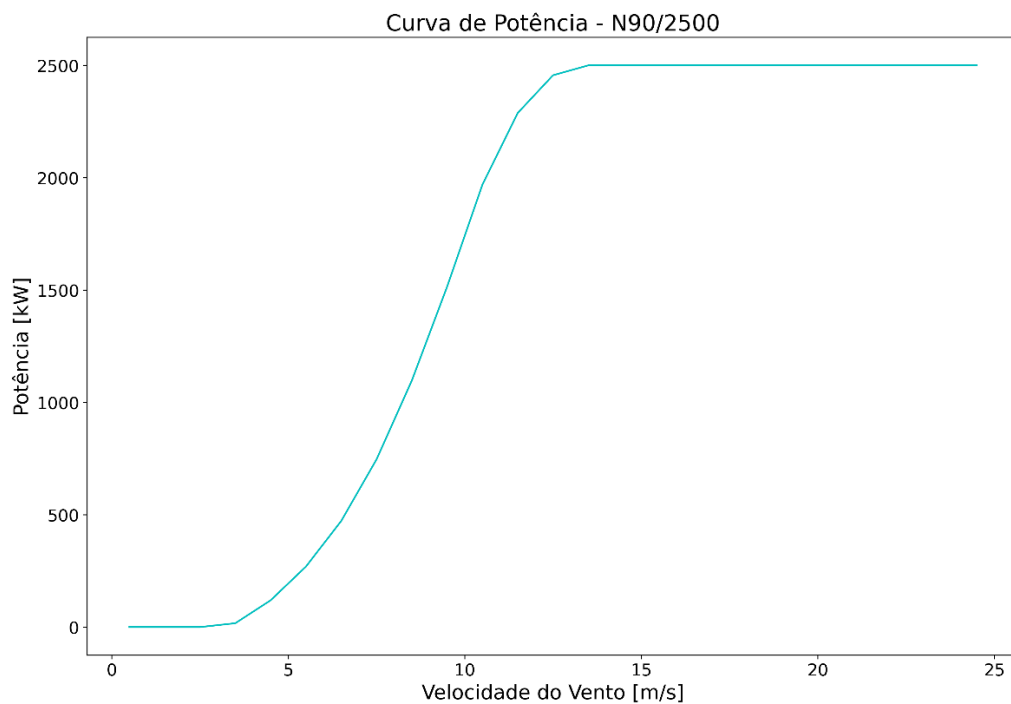
| | RMSE | R^2 |
|------------------------|---------|---------|
| Máximo verossimilhança | 0,04617 | 0,29941 |
| Energia Padrão | 0,00675 | 0,98503 |
| Momento | 0,02026 | 0,86513 |
| Empírico | 0,00644 | 0,98637 |

Pela Tabela 8, percebe que o método que teve menor erro pelo RMSE foi o Empírico e pelo R^2 também, pois quanto mais próximo de 1, melhor. Com isso, o Método Empírico foi o selecionado para os cálculos de potência produzível, pois é o método que melhor representa esse conjunto de dados de velocidade de vento, representando essa localidade em um determinado ano.

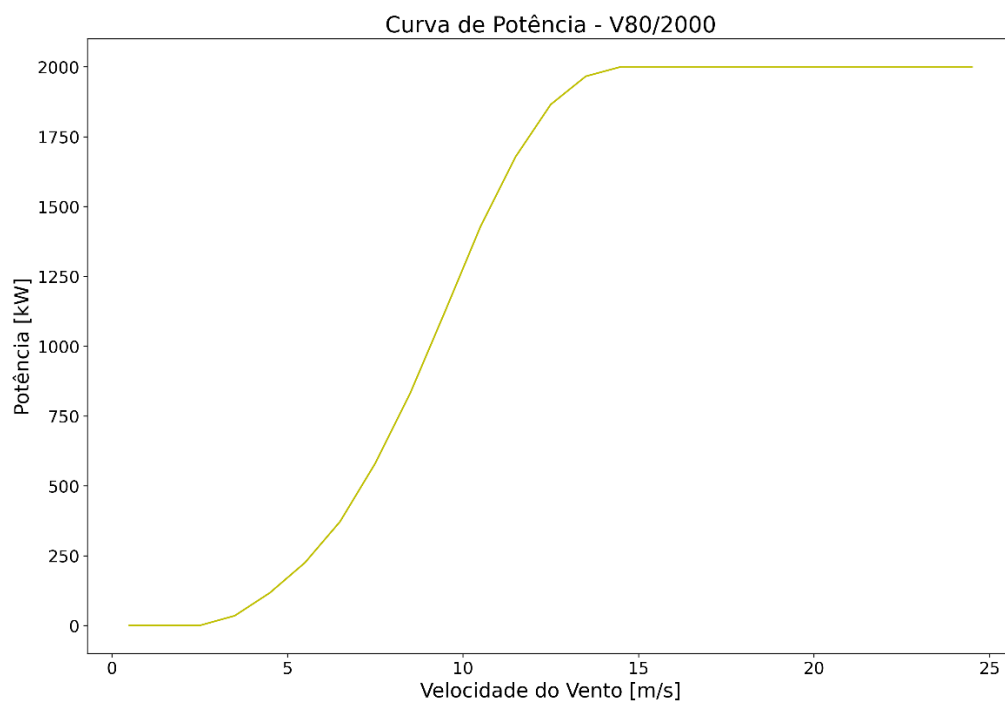
Paralelamente, foi feita a importação dos dados da curva de potência de dois aerogeradores comerciais, sendo eles N90/2500 e V80/2000, para os cálculos da potência produzível.

A Figura 8 apresenta a curva de potência dos aerogeradores selecionados, onde a Figura 8(a) corresponde ao aerogerador N90/2500 e a Figura 8(b) corresponde ao aerogerador V80/2000.

Figura 8 – Curva de potência para as duas turbinas comerciais consideradas



(a)



(b)

Posteriormente, foram realizados os cálculos de potência eólica disponível para cada uma das turbinas consideradas, o fator de capacidade, conforme a Equação (13), e a produção anual, de acordo com a Equação (14). Os dados gerados podem ser vistos na Tabela 9 para cada uma das turbinas comerciais consideradas.

Tabela 9 – Produção de energia para as diferentes turbinas consideradas

| Velocidade Mediana [m/s] | Potência Eólica Disponível - N90/2500 [kW] | Potência Eólica Disponível - V80/2000 [kW] | Fator de Capacidade - N90/2500 | Fator de Capacidade - V80/2000 | Energia Anual Produzida - N90/2500 | Energia Anual Produzida - V80/2000 |
|--------------------------|--|--|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0,5 | 0,514 | 0,406 | 0,907 | 0,907 | 0,000 | 0,000 |
| 1,5 | 13,879 | 10,967 | 0,891 | 0,891 | 0,000 | 0,000 |
| 2,5 | 64,256 | 50,773 | 0,852 | 0,852 | 0,000 | 0,000 |
| 3,5 | 176,319 | 139,320 | 0,787 | 0,787 | 117.252,690 | 241.402,597 |
| 4,5 | 374,742 | 296,106 | 0,703 | 0,703 | 732.499,890 | 720.188,967 |
| 5,5 | 684,200 | 540,628 | 0,606 | 0,606 | 1.427.667,340 | 1.194.145,544 |
| 6,5 | 1.129,367 | 892,381 | 0,507 | 0,507 | 2.094.360,232 | 1.650.639,844 |
| 7,5 | 1.734,917 | 1.370,863 | 0,413 | 0,413 | 2.700.756,779 | 2.099.784,091 |
| 8,5 | 2.525,526 | 1.995,570 | 0,332 | 0,332 | 3.189.268,645 | 2.418.843,676 |
| 9,5 | 3.525,866 | 2.786,000 | 0,265 | 0,265 | 3.514.142,076 | 2.614.150,574 |
| 10,5 | 4.760,613 | 3.761,648 | 0,212 | 0,212 | 3.651.969,682 | 2.648.559,017 |
| 11,5 | 6.254,441 | 4.942,012 | 0,171 | 0,171 | 3.422.880,131 | 2.510.311,565 |
| 12,5 | 8.032,025 | 6.346,588 | 0,139 | 0,139 | 3.000.556,036 | 2.278.516,697 |

A partir do valor da produção anual de energia, pôde-se calcular a massa de hidrogênio produzida, conforme a Equação (16), encontrando para a turbina tipo 1 (N90/2500) o valor de 345393,7 Kg e para a turma tipo 2 (V80/2000) o valor de 266112,44 Kg.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou uma análise bibliográfica onde se mostrou as revistas, países e instituições com mais publicação quando se considerou uma pesquisa envolvendo termos relacionados com hidrogênio, energia eólica e Weibull.

A revista com mais publicação foi a Energy, que liderou com 92 documentos, já os países que mais se destacaram em publicações foi a China e Estados Unidos.

Quando se analisa publicações com autores brasileiros, obtém-se, para esse conjunto de documentos analisados, apenas 18 artigos, mostrando como o tema ainda precisa ser mais explorado. É importante observar que existe uma distância grande entre a quantidade de publicações com autores brasileiros e publicações ao redor do mundo, o que o mostra que ainda tem muito o que ser pesquisado a nível nacional.

Nesse trabalho também foi realizada uma simulação considerando um conjunto de dados de velocidade de vento para a localidade de São João do Cariri, na Paraíba, para o ano de 2008, onde mostrou-se que para esse conjunto de dados, o melhor método para calcular os parâmetros de Weibull foi o método empírico, isto é, para representar os dados dessa localidade, nesse período de 2008, a distribuição de Weibull, calculada pelo método empírico representa bem os dados medidos.

Considerando o método empírico, foi feita a simulação para saber a produção de hidrogenio gerada considerando duas turbinas comerciais, e

verificou-se a que a turbina comercial do tipo N90/2500 tem um melhor rendimento.

Sugere-se para trabalhos futuros testar outras distribuições e outros tipos de turbinas além de testar em outras localidades, tanto regiões litorâneas como fora, e para dados On Shore e Off Shore.

Bibliometric analysis and evaluation of hydrogen production based on wind speed in a northeast location

ABSTRACT

In Brazil, especially in the Northeast, due to the abundance of wind resources, an ideal way to produce clean energy with zero carbon emissions is through the development of the wind-hydrogen sector. For this, the energy potential of the production and use of hydrogen must be studied. This article assesses the wind energy potential of a location in Northeast Brazil, and analyzes the corresponding hydrogen production, through an assessment of the wind resource potential based on wind speed data, using the Weibull distribution, whose parameters were calculated using the Empirical, Maximum Versesimilarity, Momentum and Standard Energy methods, using the Python programming language, for a specific region of Northeast Brazil. To determine the best method, the RMSE metric (Square Root Mean Squared Error) and R^2 (Coefficient of Determination) were used, which indicated the empirical method as the most representative of the histogram, being the method selected for the calculation of producible power. The data used were from the SONDA program and the location chosen was São João do Cariri, in Paraíba. Subsequently, an estimate of the mass of hydrogen produced by the selected region was made considering two types of wind turbine, finding for the type 1 turbine (N90/2500) the value of 345393.7 Kg and for the type 2 group (V80/2000) the value of 266112.44 Kg.

KEYWORDS: Weibull, Wind Energy, Green Hydrogen.

REFERÊNCIAS

- ABADIE, L. M.; CHAMORRO, J. M. Investment in wind-based hydrogen production under economic and physical uncertainties. *Applied Energy*, v. 337, p. 120881, maio 2023.
- ADEDOJA, O. S. et al. An energy balance and multicriterial approach for the sizing of a hybrid renewable energy system with hydrogen storage. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, v. 4, p. 100146, jun. 2023.
- AICHE-HAMANE, L. et al. Feasibility study of hydrogen production from wind power in the region of Ghardaia. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 34, n. 11, p. 4947–4952, jun. 2009.
- ALLOUHI, A. et al. Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, p. 311–324, maio 2017.
- ALMUTAIRI, K. et al. Technical, economic, carbon footprint assessment, and prioritizing stations for hydrogen production using wind energy: A case study. *Energy Strategy Reviews*, v. 36, p. 100684, jul. 2021.
- AL-ORABI, A. M.; OSMAN, M. G.; SEDHOM, B. E. Analysis of the economic and technological viability of producing green hydrogen with renewable energy sources in a variety of climates to reduce CO2 emissions: A case study in Egypt. *Applied Energy*, v. 338, p. 120958, maio 2023.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017.
- BERNAL-AGUSTÍN, J. L.; DUFO-LÓPEZ, R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 8, p. 2111–2118, out. 2009.
- CHENG, S. et al. Direct Biological Conversion of Electrical Current into Methane by Electromethanogenesis. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 10, p. 3953–3958, 15 maio 2009.
- CHI, J.; YU, H. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, v. 39, n. 3, p. 390–394, mar. 2018.

DA SILVA, E. P. et al. Analysis of hydrogen production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil. *Solar Energy*, v. 78, n. 5, p. 670–677, maio 2005.

DELUCCHI, M. A.; JACOBSON, M. Z. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. *Energy Policy*, v. 39, n. 3, p. 1170–1190, mar. 2011.

DO SACRAMENTO, E. M. et al. Feasibility study for the transition towards a hydrogen economy: A case study in Brazil. *Energy Policy*, v. 62, p. 3–9, nov. 2013.

DOSACRAMENTO, E. et al. A solar–wind hydrogen energy system for the Ceará state – Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, n. 20, p. 5304–5311, out. 2008.

GAVIOLLI, E. et al. Influence of different contaminants and cleansing agents on bond strength and in situ degree of conversion of composite-adhesive interface. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 110, p. 102932, out. 2021.

GOFF, A. L. et al. From hydrogenases to noble metal-free catalytic nanomaterials for H₂ production and uptake. *Science*, v. 326, n. 5958, p. 1384–1387, 2009.

HOFFERT, M. I. et al. Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet. *Science*, v. 298, n. 5595, p. 981–987, nov. 2002.

HOSSAIN, J.; SHARMA, S.; KISHORE, V. V. N. Multi-peak Gaussian fit applicability to wind speed distribution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 34, p. 483–490, jun. 2014.

HOSSEINI, S. E.; WAHID, M. A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 57, p. 850–866, maio 2016.

HUNT, J. D. et al. Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression. *Journal of Energy Storage*, v. 40, p. 102746, ago. 2021.

HUNT, J. D. et al. Possible pathways for oil and gas companies in a sustainable future: From the perspective of a hydrogen economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 160, p. 112291, maio 2022a.

HUNT, J. D. et al. Hydrogen Deep Ocean Link: a global sustainable interconnected energy grid. *Energy*, v. 249, p. 123660, jun. 2022b.

HUNT, J. D. et al. Compressed air seesaw energy storage: A solution for long-term electricity storage. *Journal of Energy Storage*, v. 60, p. 106638, abr. 2023.

JACOBSON, M. Z. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy Environ. Sci.*, v. 2, n. 2, p. 148–173, 2009.

JACOBSON, M. Z.; DELUCCHI, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, v. 39, n. 3, p. 1154–1169, mar. 2011a.

JACOBSON, M. Z.; DELUCCHI, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, v. 39, n. 3, p. 1154–1169, mar. 2011b.

KHOSRAVI, A. et al. Energy, exergy and economic analysis of a hybrid renewable energy with hydrogen storage system. *Energy*, v. 148, p. 1087–1102, abr. 2018a.

KHOSRAVI, A. et al. Energy, exergy and economic analysis of a hybrid renewable energy with hydrogen storage system. *Energy*, v. 148, p. 1087–1102, abr. 2018b.

LEE, D.-J.; WANG, L. Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I: Time-Domain Simulations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 23, n. 1, p. 311–320, mar. 2008.

LIN, K. et al. Alkaline quinone flow battery. *Science*, v. 349, n. 6255, p. 1529–1532, 2015.

LUND, H.; MATHIESEN, B. V. Energy system analysis of 100% renewable energy systems—The case of Denmark in years 2030 and 2050. *Energy*, v. 34, n. 5, p. 524–531, maio 2009a.

LUND, H.; MATHIESEN, B. V. Energy system analysis of 100% renewable energy systems—The case of Denmark in years 2030 and 2050. *Energy*, v. 34, n. 5, p. 524–531, maio 2009b.

LUND, P. D. et al. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 785–807, maio 2015.

MENDES, P. R. C. et al. Energy management of an experimental microgrid coupled to a V2G system. *Journal of Power Sources*, v. 327, p. 702–713, set. 2016.

MODESTO JUNIOR, E. N.; CHISTÉ, R. C.; PENA, R. DA S. Oven drying and hot water cooking processes decrease HCN contents of cassava leaves. *Food Research International*, v. 119, p. 517–523, maio 2019.

MOHSIN, M.; RASHEED, A. K.; SAIDUR, R. Economic viability and production capacity of wind generated renewable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 43, n. 5, p. 2621–2630, fev. 2018.

MOSTAFAEIPOUR, A. et al. Evaluating the wind energy potential for hydrogen production: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 15, p. 6200–6210, abr. 2016a.

MOSTAFAEIPOUR, A. et al. Evaluating the wind energy potential for hydrogen production: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 15, p. 6200–6210, abr. 2016b.

NASCIMENTO DA SILVA, G.; ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A. Renewable hydrogen production to deal with wind power surpluses and mitigate carbon dioxide emissions from oil refineries. *Applied Energy*, v. 311, p. 118631, abr. 2022.

OLAH, G. A.; GOEPPERT, A.; PRAKASH, G. K. S. Chemical Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Dimethyl Ether: From Greenhouse Gas to Renewable, Environmentally Carbon Neutral Fuels and Synthetic Hydrocarbons. *The Journal of Organic Chemistry*, v. 74, n. 2, p. 487–498, 16 jan. 2009.

OLAMA, A.; MENDES, P. R. C.; CAMACHO, E. F. Lyapunov-based hybrid model predictive control for energy management of microgrids. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 12, n. 21, p. 5770–5780, 12 nov. 2018.

OMAE, I. Recent developments in carbon dioxide utilization for the production of organic chemicals. *Coordination Chemistry Reviews*, v. 256, n. 13–14, p. 1384–1405, jul. 2012.

Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain. [s.d.].

PAN, X. et al. Safety study of a wind–solar hybrid renewable hydrogen refuelling station in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 30, p. 13315–13321, ago. 2016.

PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C.; KOTHARI, S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 3, p. 1513–1524, abr. 2011.

PELAEZ-SAMANIEGO, M. R. et al. Production and use of electrolytic hydrogen in Ecuador towards a low carbon economy. *Energy*, v. 64, p. 626–631, jan. 2014.

RODRÍGUEZ, C. R. et al. Analysis of the potential for hydrogen production in the province of Córdoba, Argentina, from wind resources. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, n. 11, p. 5952–5956, jun. 2010.

ROMERO, A. et al. 100% renewable fueled mine. *Energy*, v. 205, p. 117964, ago. 2020.

SAENZ-AGUIRRE, A. et al. Flow control based 5 MW wind turbine enhanced energy production for hydrogen generation cost reduction. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 11, p. 7049–7061, fev. 2022.

SARRIAS-MENA, R. et al. Electrolyzer models for hydrogen production from wind energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 7, p. 2927–2938, fev. 2015.

SAVARIS, I. D. et al. Porous Ni Electrodes for Hydrogen Production from Water Electrolysis. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, p. 609–612, mar. 2013.

SHAMSHIRBAND, S. et al. Application of extreme learning machine for estimation of wind speed distribution. *Climate Dynamics*, 2016.

SIGAL, A.; LEIVA, E. P. M.; RODRÍGUEZ, C. R. Assessment of the potential for hydrogen production from renewable resources in Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, n. 16, p. 8204–8214, maio 2014.

SILVEIRA, J. L. et al. The benefits of ethanol use for hydrogen production in urban transportation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 9, p. 2525–2534, dez. 2009.

SOUZA, F. L. et al. A wind-powered BDD electrochemical oxidation process for the removal of herbicides. *Journal of Environmental Management*, v. 158, p. 36–39, ago. 2015.

SOUZA, F. L. et al. Performance of wind-powered soil electroremediation process for the removal of 2,4-D from soil. *Journal of Environmental Management*, v. 171, p. 128–132, abr. 2016.

SUPERCHI, F. et al. Development of a reliable simulation framework for techno-economic analyses on green hydrogen production from wind farms using alkaline electrolyzers. *Renewable Energy*, v. 207, p. 731–742, maio 2023.

TANG, O.; REHME, J.; CERIN, P. Levelized cost of hydrogen for refueling stations with solar PV and wind in Sweden: On-grid or off-grid? *Energy*, v. 241, p. 122906, fev. 2022.

TURNER, J. et al. Renewable hydrogen production. *International Journal of Energy Research*, v. 32, n. 5, p. 379–407, abr. 2008a.

TURNER, J. et al. Renewable hydrogen production. *International Journal of Energy Research*, v. 32, n. 5, p. 379–407, abr. 2008b.

WAGNER, F. T.; LAKSHMANAN, B.; MATHIAS, M. F. Electrochemistry and the Future of the Automobile. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, v. 1, n. 14, p. 2204–2219, 15 jul. 2010.

WANG, B. et al. Techno-economic analysis and optimization of a novel hybrid solar-wind-bioethanol hydrogen production system via membrane reactor. *Energy Conversion and Management*, v. 252, p. 115088, jan. 2022.

WANG, J. et al. Optimal design of combined operations of wind power-pumped storage-hydrogen energy storage based on deep learning. *Electric Power Systems Research*, v. 218, p. 109216, maio 2023.

WANG, J.; HU, J.; MA, K. Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 881–899, jul. 2016.

WANG, M. et al. The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 29, p. 573–588, jan. 2014.

WANG, Z. et al. Assessment of wind energy and wave energy resources in Weifang sea area. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 35, p. 15805–15811, set. 2016.

YANIKTEPE, B.; GENÇ, Y. A. Establishing new model for predicting the global solar radiation on horizontal surface. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 44, p. 15278–15283, nov. 2015.

ZAKERI, B.; SYRI, S. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 569–596, fev. 2015.

ZHANG, G.; WAN, X. A wind-hydrogen energy storage system model for massive wind energy curtailment. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, n. 3, p. 1243–1252, jan. 2014.

ZHAO, J. et al. The determinants of renewable energy sources for the fueling of green and sustainable economy. *Energy*, v. 238, p. 122029, jan. 2022.

Recebido: 17 fev. 2023.

Aprovado: 20 mar. 2023.

DOI: 10.3895/rbpd.v12n2.16414

Como citar: BRANCO, J. V. C.; LEAL, J. I.; ANDRADE, C. F.; ROCHA, P. A. C.; PITOMBEIRA, A. R. Análise bibliométrica e avaliação da produção de hidrogênio baseada na velocidade do vento de uma localidade do nordeste. *R. Bras. Planej. Desenv.* Curitiba, v. 12, n. 02, p. 559-586, mai./ago. 2023. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbpd>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Carla Freitas de Andrade

Av. da Universidade, 2853 - Benfica, Fortaleza - CE

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

