

Ganhos energéticos do uso de tecnologias mais eficientes de geradores eólicos de grande porte no Brasil

Energy gains from the use of more efficient technologies for large-scale wind generators in Brazil

Ganancias energéticas con el uso de tecnologías más eficientes para generadores eólicos de gran escala en Brasil

Recebido: 27/02/2025 | Revisado: 05/03/2025 | Aceitado: 06/03/2025 | Publicado: 09/03/2025

Rafael Balbino Cardoso

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4239-3108>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: cardosorb@unifei.edu.br

Bárbara Moraes Maia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3844-9362>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: barbara.mmoraes57@gmail.com

Resumo

Atualmente, diferentes marcas de geradores eólicos estão em operação no Brasil e, o uso de tecnologias mais eficientes resulta em maiores fatores de capacidades que, conseqüentemente, geram maiores quantidades de energia e redução de impactos ambientais. Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo estimar os impactos energéticos do uso de aerogeradores de grande porte comparando e analisando as curvas de potência x velocidade e os fatores de capacidade de três aerogeradores de grande porte estudados. O estudo de caso foi realizado para as condições climáticas da cidade de Itapipoca - CE, já que a cidade apresenta grande potencial de geração eólica. Com o estudo de caso pôde-se constatar que houve uma diferença de mais de 7% dos fatores de capacidade entre a tecnologia mais eficiente e a menos eficiente, das três estudadas. Assim, o trabalho conclui que a escolha de um gerador mais eficiente pode resultar em significativas quantidades de energia adicionais geradas, resultando em redução de emissões de efeito estufa, já que a geração eólica é uma das menos poluentes.

Palavras-chave: Aerogeradores; Tecnologias mais eficientes; Fator de capacidade; Energia gerada.

Abstract

Currently, different brands of wind turbines are in operation in Brazil, and the use of more efficient technologies results in higher capacity factors, which consequently generate greater amounts of energy and reduce environmental impacts. In this sense, this study aims to estimate the energy impacts of the use of large-scale wind turbines by comparing and analyzing the power x speed curves and the capacity factors of three large-scale wind turbines studied. The case study was carried out for the climatic conditions of the city of Itapipoca - CE, since the city has great potential for wind generation. With the case study, it was possible to verify that there was a difference of more than 7% in the capacity factors between the most efficient and the least efficient technology, of the three studied. Thus, the work concludes that the choice of a more efficient generator can result in significant amounts of additional energy generated, resulting in a reduction of greenhouse emissions, since wind generation is one of the least polluting.

Keywords: Wind turbines; More efficient technologies; Capacity factor; Energy generated.

Resumen

Actualmente, en Brasil están en operación diferentes marcas de generadores eólicos y el uso de tecnologías más eficientes resulta en factores de capacidad mayores que, en consecuencia, generan mayores cantidades de energía y reducen los impactos ambientales. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo estimar los impactos energéticos del uso de grandes aerogeneradores comparando y analizando las curvas de potencia x velocidad y los factores de capacidad de tres grandes aerogeneradores estudiados. El estudio de caso se realizó para las condiciones climáticas de la ciudad de Itapipoca - CE, ya que la ciudad posee gran potencial para la generación eólica. El estudio de caso reveló que había una diferencia de más del 7% en los factores de capacidad entre la tecnología más eficiente y la menos eficiente de las tres estudiadas. Así, el trabajo concluye que la elección de un generador más eficiente puede suponer una importante cantidad de energía adicional generada, lo que se traduce en una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que la generación eólica es una de las menos contaminantes.

Palabras clave: Turbinas eólicas; Tecnologías más eficientes; Factor de capacidad; Energía generada.

1. Introdução

A utilização da energia proveniente dos ventos sempre foi aproveitada pelos homens. Antes mesmo do surgimento das máquinas a vapor, os moinhos movidos a vento eram utilizados para moer grãos, bombear água e transportar mercadorias em barcos a velas, sendo a única forma de obter energia sem a tração animal. Com o desenvolvimento das redes elétricas, surgiu a ideia de adaptar os cataventos para que eles pudessem transformar a energia dos ventos em energia elétrica, com isso, o americano Charles Brush adequou o primeiro catavento para gerar energia elétrica, que desde então passou a ser chamado de aerogerador (Goldemberg, 2003).

Esse marco foi o pontapé para que outros países da Europa também tivessem interesses em produzir energia elétrica pela força eólica e começaram a desenvolver aerogeradores para aproveitar o vento para produzir energia. No entanto, demorou cerca de um século para que os aerogeradores fossem desenvolvidos em escala comercial. Devido ao aumento do interesse por essa tecnologia e às dificuldades associadas à crise do petróleo, a partir da década de 1970 o número de turbinas eólicas instaladas no mundo disparou de 150 em 1981 para 16.000 em 1985 (Melo, 2013).

Com o passar dos anos, as tecnologias e estudos para a geração de energia proveniente dos ventos foram se desenvolvendo, hoje é possível encontrar no mercado aerogeradores modernos capazes apresentar melhor eficiência energética, sendo umas das principais alternativas para a geração de energia limpa e renovável no mundo (Capaz e Nogueira, 2015).

Mesmo com todas as pesquisas e descobertas sobre a geração de energia eólica, a maioria dos países no mundo ainda adota como a matriz energética métodos que utilizam combustíveis fósseis para produção de energia, que emitem gases que contribuam com o efeito estufa (Geller, 2003). Além da geração de energia hídrica, que é considerada como renovável e vendida como "limpa" por não emitir gases do efeito estufa (GEE), porém causa impactos sociais e ambientais, como o alagamento para criação de represas e deslocamento de populações indígenas e ribeirinhas.

O Brasil é um país que, hoje, gera energia em uma vasta diversidade de fontes energéticas, que incluem fontes hidroelétricas, térmicas, nucleares, solar e eólica. A diversificação deste cenário se deu após a crise energética de 2001, onde a escassez de chuva fez com que os níveis dos reservatórios das principais hidrelétricas do país baixassem, impossibilitando a produção de energia suficiente para a demanda da população deixando grande parte do país sem luz.

O território brasileiro, possui recursos necessários para produzir energia de diversos tipos, principalmente as energias renováveis, que podem ser essenciais para suprir a demanda energética do país. A geração eólica é um tipo de geração de energia promissora para suprir as demandas do país, principalmente na região nordeste, que contém o maior potencial eólico do país (Cresesb, 2001), onde os primeiros testes foram realizados no arquipélago de Fernando de Noronha (Mdic, Gov, 2021). No local foram instaladas pequenas turbinas eólicas que geram 1MW, e mesmo produzindo pouca quantidade de energia esses testes foi significativo para provar que a região teria um potencial promissor para geração de energia eólica e impulsionar a implantação de usinas na região.

Entre os anos 90 e 2001, foram implantados no estado do Ceará os primeiros campos eólicos do Brasil com grandes torres, mas os investimentos para a criação de usinas eólicas se deram mesmo a partir do mesmo depois de 2001. Mais tarde, em 2004, o Governo Estadual do Ceará implementou no estado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa), que tinha como objetivo alavancar a produção de energia renovável no estado. Com reflexo deste programa, o Ceará se tornou o segundo maior produtor de energia eólica do Brasil. Em 2014 o estado já possuía 52 Parques com capacidade de produção de 1.140 MW, sendo concentrado nos municípios de Aquiraz, Acaraú, Amontada, Aracati, Beberibe, Comocim, Paracuru, São Gonçalo do Amarante e Fortaleza (Prado, 2021).

De acordo com Aldabo (2002), os aerogeradores mais utilizados no Brasil são os de eixo horizontal, contendo três pás. Esses tipos de geradores são comumente utilizados por apresentarem melhor custo-benefício, além das suas turbinas, que proporcionam captação de ventos em velocidades médias mais altas e constantes, sem turbulência, e são capazes de gerar mais

energia. Além de tudo, essa preferência ocorre visando obter o máximo possível de um escoamento laminar do fluido, para que haja rotação ordenada e constante da turbina, gerando uma conversão mais eficiente de energia.

Diante das constantes crises hídricas enfrentadas pelo Brasil, fica cada vez mais claro que é fundamental diversificar as fontes de geração de energia (Cardoso, 2015). Nesse contexto, o potencial de geração eólica do país ganha destaque como um alvo significativo para investimentos nos anos que se aproximam. A energia eólica desempenha um papel estratégico na busca do Brasil por uma matriz energética mais sustentável e diversificada. Ela não apenas reduz o impacto ambiental da geração de energia, mas também fortalece a segurança energética do país e impulsiona o desenvolvimento econômico e tecnológico.

Assim, o presente estudo tem o objetivo de estimar os impactos energéticos, em termos de aumento do fator de capacidades, que é a relação entre a energia gerada e a máxima que se poderia gerar, atribuídos ao uso de aerogeradores mais eficientes de grande porte, comparando três das principais tecnologias utilizadas no Brasil.

2. Tecnologias de Aerogeradores

A energia eólica é uma tecnologia bem difundida em diferentes países, com alto potencial competitivo em termos econômicos e ambientais, e que chega ao Brasil com a promessa de fortalecer a produção de energia do país (Aldabo, 2002; Rampinelli, 2012).

Com a grande crescente na procura sobre o aproveitamento da energia obtida por meio da geração eólica e os avanços tecnológicos ocorridos no setor, percebe-se a necessidade de conhecer o comportamento tecnológico para balizar estudos de prospecção das tecnologias envolvidas (Prado, 2021).

No curso da história, a energia eólica encontra sua origem mais antiga na utilização de velas em embarcações para o transporte de mercadorias. A partir desse ponto, vem a evolução para os cata-ventos usados para o bombeamento de água e para moer grãos (Tolmasquim, 2007).

Aproximadamente nos anos 1000 D.C., foram criados os moinhos de vento de modelo chinês (Figura 1), que tinha como características o eixo vertical e a utilização de pás de tecido. A vantagem desse modelo é que as pás eram giratórias, portanto, o vento era aproveitado independente de sua direção (Marques, 2004).

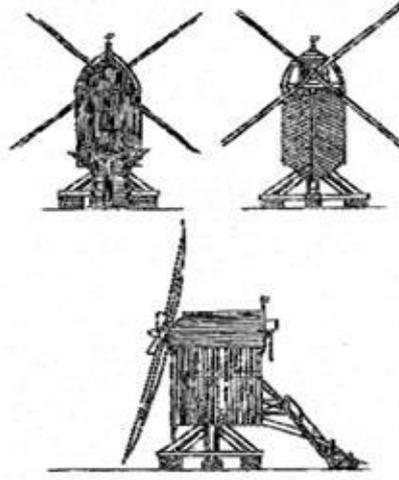
Figura 1 - Moinho de Vento Chinês (Eixo vertical e pás de tecido).



Fonte: Hau (2006).

Por volta de 1500, os moinhos de vento evoluíram para o modelo Dutch (Figura 2), estes eram construídos em torres de madeira. Essa configuração foi muito utilizada na Holanda para drenar *Polders* (estruturas hidráulicas artificiais utilizadas para drenagem), a pretexto de interesse econômico em expandir sua área territorial, já no resto da Europa, os moinhos apenas tinham função de moer grãos (Marques, 2004).

Figura 2 - Moinho de Dutch (Moinhos de Torre).



Fonte: Hau (2006).

No ano de 1891, foi desenvolvida a primeira máquina utilizada para a geração de eletricidade (Figura 3), criada por Poul La Cour. Essa máquina veio com os preceitos aerodinâmicos, fazendo assim o aparelho operar em alta velocidade, com a utilização de poucas pás, o tornando mais eficiente.

Figura 3 - Moinho de vento tipo leque ou americano.



Fonte: Hau (2006).

Entre os anos de 1920 e 1970, surgiram diversos projetos envolvendo a geração de eletricidade e os princípios aerodinâmicos, na prática não foram muito bem sucedidos, mas subsequentemente, tiveram grande importância no desenvolvimento das turbinas eólicas, dentre estes, pode-se citar as turbinas de eixo horizontal, denominadas Smith-Putnam,

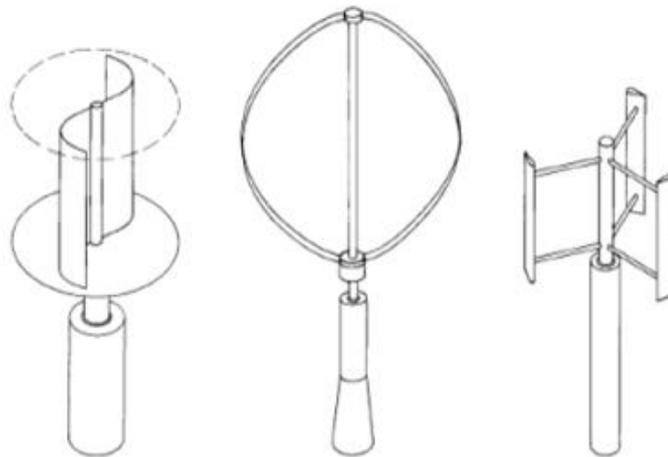
Gedser e Hutter, além das turbinas de eixo vertical, denominadas Darrieus e Savonius (Marques, 2004). As Figuras 4 e 5, a seguir, exemplificam os modelos de turbinas eólicas de eixo horizontal e eixo vertical, já citados anteriormente.

Figura 4 - Turbinas eólicas de eixo horizontal.



Fonte: Aldabo (2002).

Figura 5 - Turbinas eólicas de eixo vertical: *Savonius*, *Darrieus* e *em H* respectivamente.



Fonte: Hau (2006).

As turbinas eólicas verticais têm um sistema em que a força que impulsiona o vento é o que faz a pá girar, portanto, ocorre a geração de eletricidade independente da direção e intensidade em que o vento está circulando. São turbinas menores e mais leves em comparação com as horizontais, conseqüentemente geram menos energia. As turbinas eólicas horizontais, utilizadas em parques eólicos, são máquinas rotativas em que o movimento é produzido pela energia cinética do vento quando ele atua sobre um rotor que normalmente possui três pás. O movimento rotacional produzido é transmitido e multiplicado por meio de um multiplicador de velocidade para um gerador que é responsável pela produção de energia elétrica (Improta, 2008).

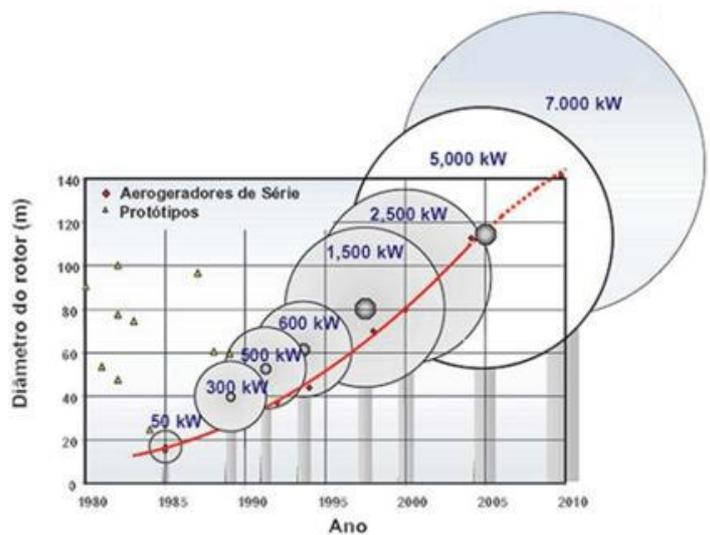
3. Metodologia para Obtenção do Desempenho de Aero geradores

Realizou-se uma pesquisa descritiva e de natureza quantitativa em relação às fórmulas e séries históricas e, do tipo estudo de caso (Pereira et al., 2018) que se focou no fenômeno dos ganhos energéticos do uso de tecnologias mais eficientes de geradores eólicos de grande porte.

Os aerogeradores são equipamentos que convertem a energia cinética proveniente do vento para a produção de energia elétrica, ou para transmissão direta de energia mecânica da turbina para o bombeamento de água ou outras aplicações (Tolmasquim, 2007).

O comércio de aerogeradores no mundo se desenvolveu rapidamente em tecnologia e tamanhos durante os últimos 15 anos. A Figura 6 mostra o impressionante desenvolvimento do tamanho e da potência de aerogeradores desde 1985.

Figura 6 - Evolução dos aerogeradores desde 1985 até 2005.



Fonte: Dutra (2011).

De acordo com (Wang, 2010), a energia cinética do vento que é coletada por aerogeradores é analisada em função da sua velocidade, da massa específica do ar, a área em que as pás fazem a varredura e também é estudada a altura de instalação do rotor.

A equação que expressa a potência total disponível pelo vento, em W (J/s), é:

$$W_{disp} = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad Eq. 1$$

ρ = massa específica do ar (kg/m³);

A = área de varredura das pás (m²);

V = velocidade do vento (m/s).

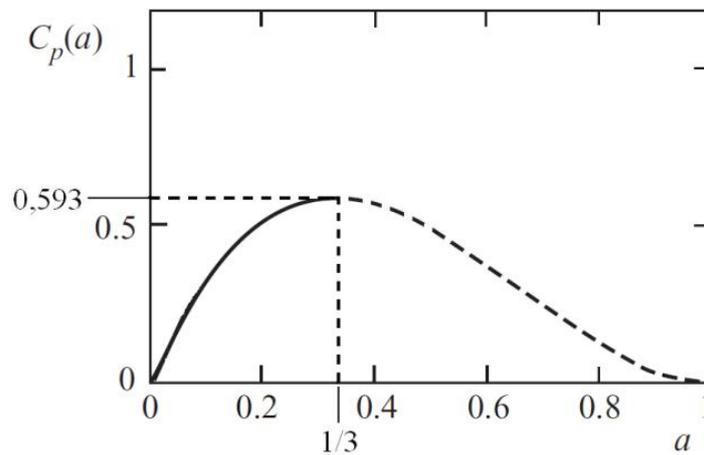
É válido destacar que de toda energia dada apresentada pela Eq. 1 apenas um percentual é retida pelo rotor eólico do aerogerador. A potência extraída, em W (J/s), pela turbina eólica é dada por:

$$W_{ext} = \frac{1}{2} C_p \rho AV^3 \quad Eq. 2$$

C_p = coeficiente de potência.

Em 1920 foi comprovado por Albert Betz, que a potência máxima capaz de ser explorada pelo vento representa 59,3% da sua potência total ofertada. O coeficiente de potência máximo ($C_p \text{ máx}$) = 0,593, apresentado na Figura 7, funciona como o parâmetro ideal, para comparação e análise do desempenho de turbinas eólicas. Efetivamente, as turbinas eólicas apresentam rendimento por volta de 40% (Shamshirband, 2014).

Figura 7 - Curva do Coeficiente de Potência.



Fonte: Shamshirband (2014).

A equação a seguir, refere-se à potência elétrica gerada, em W (J/s), que também está relacionada à função do cubo da velocidade do vento.

$$W_{elet} = \frac{1}{2} \eta C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad \text{Eq. 3}$$

η = eficiência da turbina eólica;

R = raio do rotor eólico (m).

O Fator de Capacidade (FC) da fonte eólica representa a proporção entre a geração efetiva da torre eólica e a capacidade total em um determinado período de tempo, sendo uma medida de produtividade. No mundo, o FC vem aumentando devido aos avanços tecnológicos, tanto em materiais, quanto no porte das instalações, o que permite um melhor aproveitamento dos ventos. Destaca-se que o FC médio mundial, para 2015, foi de 23,80%.

O fato de o Fator de Capacidade da energia eólica nacional apresentar a maior média mundial é outro elemento importante que explica o crescimento desta fonte no país. O FC evoluiu de 32,42%, em 2012, para 41,6%, em 2016 (MME, 2020), percentual quase duas vezes maior do que a média mundial. A sazonalidade da fonte eólica, no Brasil, acarreta o aumento do FC nos meses secos, de maio a novembro, e a sua diminuição nos meses úmidos, entre dezembro e abril. Pode-se afirmar que um aspecto positivo desta sazonalidade é a sua complementaridade com a fonte hídrica, a qual concentra a maior parte da geração no período úmido do ano. Deste modo, estimular a fonte eólica contribui ainda mais para a sua participação no balanço energético nacional.

4. Resultados dos Ganhos na Geração de Energia Devido ao Uso de Aero geradores Mais Eficientes

O estudo de caso do presente estudo foi realizado na região Nordeste do Brasil na cidade de Itapipoca-CE. Ao longo dos últimos anos, diversos parques eólicos foram instalados em Itapipoca, aproveitando o potencial eólico da região. Esses parques contribuem para a produção de energia renovável, ajudando a diversificar a matriz energética do estado do Ceará.

A Figura 8 apresenta um estudo estatístico dos dados dos ventos na cidade, obtidos por meio da série histórica contida no site do INMET.

Figura 8 - Série Histórica dos Ventos em Itapipoca-CE.



Fonte: Autores (2025).

No Quadro 1, são mencionados os diferentes tipos de aerogeradores que são discutidos de forma genérica, sem a menção de marcas específicas, apenas enfatizando a importância da diversidade de fornecedores e tecnologias no mercado de aerogeradores, sem comprometer a confidencialidade das empresas.

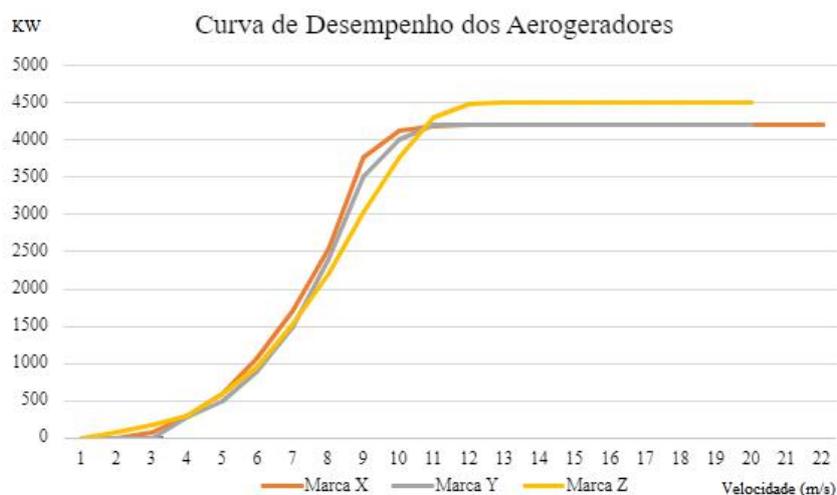
Quadro 1 – Informações técnicas dos aerogeradores utilizados neste estudo.

Marca	Altura de Cubo (m)	Potência Nominal (kW)	Diâmetro do Rotor (m)
X	110	4.200	155
Y	110	4.200	117
Z	110	4.500	145

Fonte: Autores (2025).

A seguir, a Figura 9 apresenta a variação de parâmetros como a potência nominal e a velocidade do vento resultando na sua curva de desempenho. Todos os dados foram coletados nas bases de dados disponibilizados pelos sites das empresas na internet.

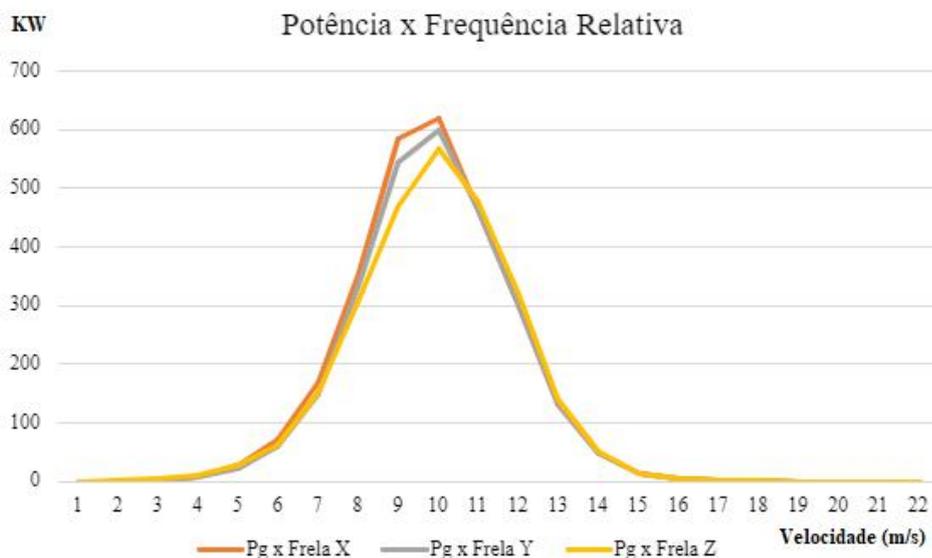
Figura 9 – Curva de Desempenho dos três aerogeradores estudados.



Fonte: Autores (2025).

A curva de densidade de potência (Figura 10) mostra como a potência do aerogerador varia com a velocidade do vento. Geralmente, a curva começa a se elevar a partir de uma determinada velocidade do vento mínima, indicando o início da geração de energia. A potência atinge seu pico em uma velocidade do vento específica, que é a velocidade de corte, ou seja, a velocidade em que o aerogerador atinge sua capacidade máxima de geração. Após esse ponto, a potência começa a diminuir à medida que o vento se torna excessivamente forte, indicando a velocidade de desligamento.

Figura 10 – Curva de densidade de potência.



Fonte: Autores (2025).

Relacionando os dados climáticos da região, apresentados na Figura 8, com as curvas de potências dos três aerogeradores estudados encontram-se os fatores de capacidades anuais de 66,9%, 64% e 58,2% para as tecnologias X, Y e Z, respectivamente. Conclui-se que a tecnologia mais eficiente estudada gera mais de 7% de energia, com relação à tecnologia menos eficiente, resultando em significativos ganhos energéticos e ambientais.

5. Conclusão

A partir da avaliação de três das tecnologias de grande porte mais utilizadas no mercado brasileiro para a geração de energia eólica o estudo constatou que a tecnologia mais eficiente apresenta maior fator de capacidade, com base nos dados climáticos da cidade de Itapipoca-CE, que possui grande potencial de geração eólica.

Os fatores de capacidade anuais encontrados para cada tecnologia foram 66,9%, 64% e 58,2% para as tecnologias X, Y e Z, respectivamente. A tecnologia mais eficiente estudada gera mais de 7% de energia, com relação à tecnologia menos eficiente, resultando em significativos ganhos energéticos e ambientais.

Com base nos resultados deste estudo, estudos futuros podem utilizar os ganhos do fator de capacidade da tecnologia mais eficiente e contabilizar em termos de incremento de energia gerada e redução de emissões de gases do efeito estufa, em função da área estudada e do porte do parque eólico implementado.

Referências

- Aldabó, R. (2002). Energia Eólica. ArtLiber.
- Brasil. (2020). MME (Ministério de Minas e Energia) Matriz Energética e Elétrica. EPE, 2020. <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>.
- Brasil. (2022a). Empresa de pesquisa energética – Parte 2. Plano Nacional de Energia – PNE 2030. Ministério das Minas e Energia. <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/plano-nacional-de-energia-2030-pdf>.
- Brasil. (2022b). Entenda como a matriz elétrica brasileira está mudando. GOV.BR, 2022. <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/entenda-como-a-matriz-eletrica-brasileira-esta-mudando>.
- Brasil. (2023). Fator de Emissão SIN. GOV.BR. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>.
- Capaz, R. S. & Nogueira, L. A. H. (2015). Ciências ambientais para engenharia. Elsevier.
- Cardoso, R. B. (2015). Etiquetagem e Eficiência Energética. Editora Appris.
- Cresesb. (2015). Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Cresesb. http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico.
- Custódio, R. S. (2009). Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica. Editora Eletrobrás.
- Dutra, R., Montezano, B. & Ferreira, J. C. E. (2011). Energia Eólica-Princípios e Tecnologias. CRESESB/Cepel.
- Geller, H. S. (2003). Revolução energética: Políticas para um futuro sustentável. Tradução: Maria Vidal Barbosa, Editora Relume Dumará: USAid.
- Goldemberg, J. & Villanueva, L. D. (2003). Energia, meio ambiente e desenvolvimento, (3ed.). Editora EDUSP.
- Hau, E. (2006) Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. [S.l.]: Editora Springer. ISBN 9783540242406.
- Improta, R. L. (2008). Implicações socioambientais da construção de um parque eólico no município de Rio do Fogo-RN. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Marques, J. et al. (2004). Turbinas eólicas: Modelo, análise, e controle do gerador de indução com dupla alimentação. <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/8442>.
- Melo, E. (2013). Fonte eólica de energia: aspectos de inserção, tecnologia e competitividade. Estudos Avançados. 27(77), 125–42.
- Pereira A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free e-book]. Editora UAB/NTE/UFSM.
- Prado, T. (2021). Evolução Tecnológica e Produtiva de Energia Eólica no Brasil e no Mundo. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/evolu%C3%A7%C3%A3o-tecnol%C3%B3gica-e-produtiva-de-energia-e-%C3%B3lica-brasil-prado/?originalSubdomain=pt>.
- Rampinelli, G. A. & Da Rosa Jr., C.G. (2012). Análise da geração eólica na matriz brasileira de energia elétrica. RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais. 14 (2), 273-302. <https://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/2298/2138>.
- Shamshirband, S. et al. (2014). Wind turbine power coefficient estimation by soft computing methodologies: Comparative study. Energy Conversion and Management. 81, 520-6.
- Silva, D. (2014). Revolução Industrial. Mundo Educação. <https://mundoeducacao.uol.com.br/historiageral/revolucao-industrial-2.htm#:~:text=O%20uso%20da%20eletricidade%20do,inven%C3%A7%C3%A3o%20do%20motor%20a%20explos%C3%A3o>.
- Tolmasquim, M. T., Guerrero, A. & Gorini, R. (2007). Matriz energética brasileira: uma prospectiva. Novos estudos CEBRAP. 47-69.
- Wang, C. & Prinn, R. G. (2010). Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms. Atmospheric Chemistry and Physics. 10 (4), 2053-61.