

CONVERSÃO DE ENERGIA CINÉTICA DO VENTO PARA ENERGIA MECÂNICA DE ROTAÇÃO EM TURBINAS EÓLICAS

Wesley da Silva Alves

Resumo: A geração de energia eólica é a geração de energia através do giro de grandes aerogeradores com a ajuda do vento. A produção de energia eólica depende da potência das turbinas que por sua vez está relacionada à velocidade do vento. A conversão de energia eólica requer o estudo do comportamento mecânico da turbina para permitir otimizar a extração de energia do vento. Um parâmetro importante nesse estudo é o chamado coeficiente de potência que será definido ao longo do presente estudo. Através do coeficiente de potência será analisado a conversão de energia cinética do vento em energia cinética de rotação para a produção de energia eólica. Será mostrado que existe um limite para a potência mecânica que pode ser efetivamente capturada do vento.

Palavras-chave: Energia eólica, conversão de energia, energia do vento, aerogeradores, coeficiente de potência.

1. INTRODUÇÃO

O mundo está passando por uma transição energética progressiva. Recentemente, a Alemanha e outros países europeus, em conjunto com países fora da Europa como China, Índia, EUA, Brasil e Canadá, fizeram um grande esforço para reduzir sua dependência de combustíveis fósseis, afastando-se da plataforma de hidrocarbonetos e estabelecendo uma plataforma de energia renovável [1,2]. Promover a incorporação de recursos de energia renovável, em particular a energia eólica, na matriz elétrica, é uma das estratégias utilizadas para atingir esse objetivo e mitigar as emissões de gases de efeito estufa [3].

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o aquecimento global é uma realidade e as atividades humanas são responsáveis por causar um aquecimento aproximado de 1 °C acima dos níveis pré-industriais, um número que provavelmente chegará a 1,5 °C entre 2030 e 2052 [4]. Para enfrentar os desafios ambientais impostos pelo aquecimento global, a geração de energia a partir de fontes renováveis deve ser aumentada como medida de precaução, não apenas para a segurança energética, mas também para promover um ambiente mais saudável.

Nos últimos anos, com o crescente interesse pela energia elétrica e o aumento dos problemas ecológicos, tornou-se grande a demanda de tempo para buscar alternativas aos combustíveis fósseis. O sistema de energia eólica tem sido uma alternativa melhor e chamando a atenção como uma melhor fonte de eletricidade. As fontes de energia não renováveis estão minando com alta velocidade e produzem uma enorme contaminação, de modo que o uso de fontes não convencionais de energia para geração de eletricidade se tornou uma enorme demanda de tempo [5]. Dentre todas as fontes inesgotáveis, a eólica tem sido utilizada como um ativo da era energética. No campo da produção de eletricidade, o vento é, em geral, a inovação mais prudente, limpa e livre de descargas. Portanto, o uso proficiente e constante da energia eólica na geração de energia tornou-se uma questão importante.

O vento é considerado um recurso energético atraente por ser renovável, limpo, socialmente justificável, economicamente competitivo e ambientalmente amigável [6]. Portanto, a perspectiva é de aumentar a

participação da energia eólica no futuro para pelo menos 18% da energia global até 2050, segundo a Agência Internacional de Energia [7]. O Conselho Global de Energia Eólica indicou que em 2017 o total acumulado foi 11% maior do que o total de 487 GW no final do ano de 2016, e a produção global permaneceu acima de 50 GW em 2017. Além disso, de acordo com o Conselho Global de Energia Eólica, “Além das estatísticas, a energia eólica está se tornando uma tecnologia totalmente comercializada e não subsidiada; competindo com sucesso no mercado contra incumbentes fósseis e nucleares altamente subsidiados” [8]. Entre os países que estão promovendo o vento como recurso de energia renovável estão 30 países com mais de 1 GW de capacidade instalada e nove países com mais de 10 GW, incluindo China, EUA, Alemanha, Índia, Espanha, Reino Unido, França, Brasil e Canadá [9].

A natureza flutuante do vento, apesar da elevada penetração da energia eólica, coloca vários desafios na integração da energia eólica na rede elétrica, uma vez que podem envolver custos elevados para a construção de parques eólicos, bem como para estudos de avaliação prévios e em curso. Ao contrário das fontes de energia convencionais, a velocidade do vento varia espacial e temporalmente, gerando flutuações na produção de energia eólica [10]. Variáveis meteorológicas como direção do vento, temperatura, pressão e umidade, entre outros, influenciam na produção de energia eólica [11].

Assim, integrar a energia eólica na rede elétrica requer estimativas, pelo menos, dos valores futuros da velocidade do vento [12]. O desenvolvimento de novas técnicas para melhorar o entendimento dessas variáveis, por meio de simulação, previsão, ajuste de curva de distribuição, filtragem e modelagem, permite tomar melhores decisões sobre a expansão do setor eólico e uma melhor gestão do sistema elétrico. Além disso, a estimativa precisa da velocidade do vento pode melhorar a segurança, confiabilidade e lucratividade de exploração de parques eólicos [13]. Isso envolve entender o regime de vento de uma região específica, para permitir uma previsão mais precisa de valores futuros com base nos anteriores.

O desenvolvimento de turbinas eólicas mais eficientes pode proporcionar uma significativa redução no número de aerogeradores necessários para determinados projetos, desde que o aproveitamento energético eólico também apresenta algumas desvantagens. Dentre as principais desvantagens encontra-se a intermitência do vento, o impacto visual, o impacto sobre as aves e o ruído sonoro. Dessa forma, o estudo investiga as seguintes questões: As formas de energias envolvidas na geração eólica, os parâmetros fundamentais influenciam a geração de energia e a conversão de energia cinética do vento em energia mecânica e elétrica.

No presente artigo, serão trabalhados alguns parâmetros que são fundamentais na geração de energia elétrica. O foco será principalmente no primeiro processo de conversão, que é de energia cinética do vento em mecânica de rotação. Onde, veremos a quantidade de energia disponível, o quanto dela pode ser transformada, o coeficiente existente para essa quantidade e algumas simulações com modelos existentes.

2. CONVERSÃO DE ENERGIA

2.1 POTÊNCIA E ENERGIA CINÉTICA DO VENTO

A instalação do parque eólico requer que a velocidade do vento no local escolhido seja suficiente para girar as pás da turbina eólica. A turbina será responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação que, por sua vez, será transformada em energia elétrica [1]. Em geral, os aerogeradores são projetados para começar a girar a velocidades de aproximadamente 3 a 5 m/s. A velocidade do vento, portanto, é um fator determinante da quantidade de energia que será gerada. Entretanto, a turbina eólica converte em energia mecânica de rotação apenas uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor. Em seguida, uma parte dessa energia mecânica de rotação é transformada em energia elétrica.

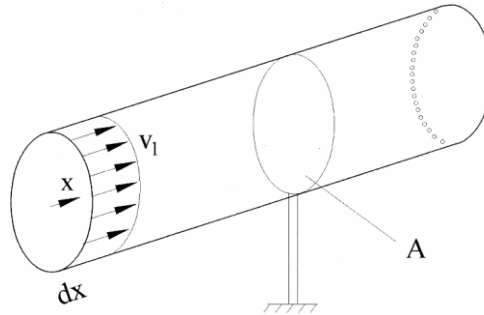


Figura 1. Fluxo de ar através de uma área transversal A. Fonte: ref. [14].

Tendo em vista que a velocidade do vento pode variar significativamente em curtas distâncias (algumas centenas de metros), os procedimentos para avaliar o local no qual se deseja instalar turbinas eólicas devem levar em consideração todos os parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento. Entre os principais fatores de influência no regime dos ventos destacam-se: a variação da velocidade com a altura; a rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções; a presença de obstáculos nas redondezas (relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar). As informações necessárias para o levantamento das condições regionais podem ser obtidas a partir de mapas topográficos e de uma visita ao local de interesse.

A energia cinética de uma massa de ar m em movimento a uma velocidade v é dada por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2. \quad (1)$$

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através de rotação das pás da turbina eólica. Entretanto, a potência disponível pelo vento não pode ser totalmente aproveitada pela turbina eólica na conversão de energia elétrica. A energia disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada ao deslocamento da massa de ar que, por conseguinte, depende da velocidade do vento.

A potência disponível do vento que passa por uma seção transversal A de um cilindro imaginário (figura 1), transversal ao fluxo de ar será dada por:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}mv^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\rho A dx v^2),$$

onde $\rho = m/Adx$ é a densidade da massa de ar (considerada constante devido a baixa pressão do ar) e dx é a distância percorrida no intervalo de tempo dt . Aplicando a derivada do produto, então

$$P = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{dx}{dt} v^2 + dx 2v^3 \frac{dv}{dt} \right).$$

Considerando um fluxo de ar constante, o segundo termo da soma será nulo e o resultado fica

$$P = \frac{1}{2} \rho A v v^2,$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3. \quad (2)$$

A potência dada pela Eq. (1) seria a potência gerada pela turbina se o processo fosse 100% eficiente e o fluxo de ar seria reduzido a zero logo após passar pelo rotor aerodinâmico da turbina. Entretanto, não é possível converter toda a energia cinética do vento que passa por uma turbina eólica em energia mecânica de rotação. Para determinar o valor máximo de energia que pode ser extraído do vento, normalmente utiliza-se o modelo desenvolvido pelo físico alemão Albert Betz [1].

A energia disponível a ser convertida em energia cinética de rotação é a energia cinética associada ao deslocamento de uma massa de ar que passa pela turbina eólica. Normalmente, usa-se a potência do vento no lugar da energia, pois as turbinas eólicas são classificadas pela potência. O modelo desenvolvido por Albert Betz, baseado na teoria da quantidade de movimento axial, determina o funcionamento e a potência para uma turbina ideal [2]. Basicamente, este modelo consiste na passagem de uma corrente de ar por um tubo contendo um disco em seu interior, o qual simula a turbina. O tubo possui duas secções transversais distintas e no local de transição de secção encontra-se o disco/turbina que vai criar uma descontinuidade na pressão do ar. Conforme ilustrado na figura 2, v_1 representa a velocidade do vento na região anterior às pás, v_2 a velocidade do vento no nível das pás e v_3 a velocidade no vento após deixar as pás.

O modelo de Betz mostra que a velocidade do deslocamento da massa de ar é reduzida quando a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica de rotação. Assim, a potência disponível pelo vento não pode ser totalmente convertida em energia elétrica. Essa característica física é representada por um índice denominado de coeficiente de potência, que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível extraída pela turbina. Aplicando a lei da continuidade temos que:

$$m_1 = m_2 = m_3,$$

onde m_1 , m_2 e m_3 são a massa de ar antes das pás, no nível das pás e depois de passar pelas pás respectivamente. Substituindo a massa pelo volume de ar vezes a densidade, então

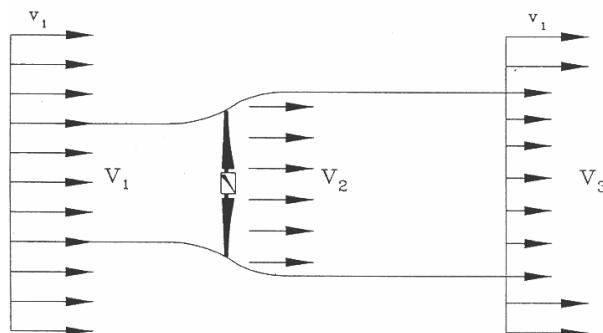


Figura 2. Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás. Fonte: ref. [14].

$$\rho A_1 dx_1 = \rho A_2 dx_2 = \rho A_3 dx_3.$$

Para um intervalo de tempo dt a equação fica

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v_3 A_3. \quad (3)$$

A energia cinética extraída pela turbina eólica é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás, então

$$E_{ex} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad (4)$$

A potência extraída será dada por

$$P_{ex} = \frac{dE_{ex}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_1^2 - v_3^2),$$

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \rho A_2 v_2 (v_1^2 - v_3^2), \quad (5)$$

onde foi utilizado a Eq. (3). Pela Eq. (5) observa-se que se $v_1 = v_3$, nenhuma potência será extraída. Por outro lado, se $v_3 = 0$ a potência extraída seria máxima. Entretanto o rotor deveria ser um disco sólido e portanto não giraria. Assim, nenhuma energia cinética seria convertida.

Pelo teorema de Rankine-Froude pode-se assumir a relação entre as velocidades v_1 , v_2 e v_3 através da seguinte equação [14]

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}. \quad (6)$$

Substituindo a Eq. (6) na Eq. (5) e fazendo $A_2 = A$, a potência extraída será portanto

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v_1 + v_3}{2} \right) (v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{2} \rho A \frac{1}{2} (v_1^3 - v_1 v_3^2 + v_3 v_1^2 - v_3^3),$$

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_3^2}{v_1^2} + \frac{v_3}{v_1} - \frac{v_3^3}{v_1^3} \right),$$

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}. \quad (7)$$

O termo $\frac{1}{2}\rho A v_1^3$ é a potência do vento. O termo entre chaves pode ser definido como o coeficiente de potência, ou seja

$$C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}.$$

(8)

A figura 3 mostra a distribuição de C_p em função de v_3/v_1 . Observa-se que a máxima potência que pode ser extraída por uma turbina eólica, considerando que não há perdas no processo de extração de energia do vento, é cerca de 59% da energia disponível no vento. Isso significa que o coeficiente máximo de potência é 0,59 quando $v_3/v_1 = 1/3$. Esse valor é conhecido como o limite de Betz [15]. Na prática, até os dias atuais, nenhuma turbina eólica foi capaz de atingir o valor do limite de Betz. As turbinas eólicas mais modernas atingem no máximo 0,47 enquanto as menos sofisticadas alcançam valores máximos entre 0,3 e 0,4.

2.2 CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

Um método de conversão de energia eólica (CEE) é uma associação que ajusta a vitalidade ativa da próxima circulação de vento em energia elétrica. Neste sistema a transformação de energia ocorre em duas etapas. Na primeira etapa, a energia do vento na forma de um flutuador de ar gira a turbina devido à qual a energia cinética do vento se converte em energia mecânica. Na segunda etapa, a força mecânica da turbina gira o gerador que converte a força mecânica em energia elétrica. Portanto, os componentes essenciais de uma estrutura de conversão da força do vento são uma turbina, uma caixa de engrenagens, um alternador e as configurações do conversor de energia [16]. Às vezes, um transformador também é necessário para conexão à rede. O conversor de força é colocado entre a grade e o gerador. Existem inúmeras configurações técnicas viáveis de sistemas de conversão da força do vento. Em algumas configurações, o arranjo de engrenagens está presente e em outras pode não estar. O mesmo acontece com conversores de energia, pode estar presente e pode não estar. A saída de energia pode ser de ambos os tipos, pode ser CC ou CA [16].

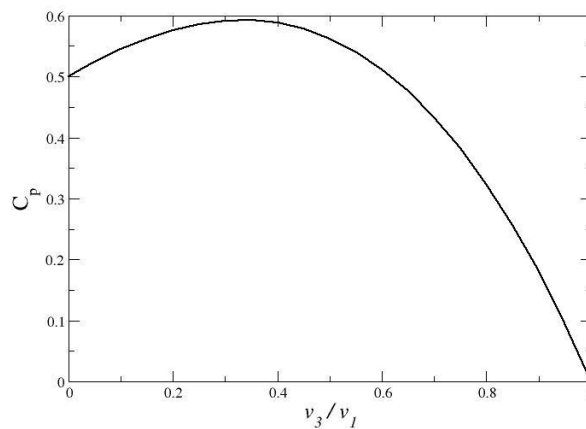


Figura 3. Distribuição de C_p em função de v_3/v_1 . Fonte: autoria própria.

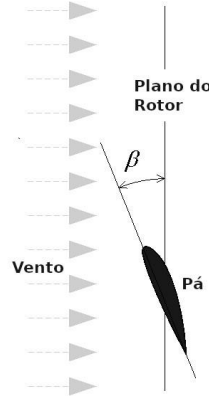


Figura 4. Ângulo de inclinação da pá do rotor da turbina. Fonte: ref. [17].

A energia disponível a ser convertida em energia cinética de rotação é a energia cinética associada ao deslocamento de uma massa de ar que passa pela turbina eólica. Normalmente, usa-se a potência do vento no lugar da energia, pois as turbinas eólicas são classificadas pela potência. O modelo desenvolvido por Albert Betz, baseado na teoria da quantidade de movimento axial [18], determina o funcionamento e a potência para uma turbina ideal. Basicamente, este modelo consiste na passagem de uma corrente de ar por um tubo contendo um disco em seu interior, o qual simula a turbina. O tubo possui duas seções transversais distintas e no local de transição de seção encontra-se o disco/turbina que vai criar uma descontinuidade na pressão do ar. O modelo de Betz mostra que a velocidade do deslocamento da massa de ar é reduzida quando a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica de rotação. Assim, a potência disponível pelo vento não pode ser totalmente convertida em energia elétrica. Essa característica física é representada pelo coeficiente de potência (definido na Eq. (8)), que pode ser entendido como a fração da potência eólica disponível extraída pela turbina [18].

Nas turbinas eólicas reais, o coeficiente de potência (também chamado de coeficiente de performance) é função da relação (ou razão) de velocidade da ponta λ (*tip speed ratio*) dada pela equação [15]

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} , \quad (9)$$

onde ω é a velocidade angular da turbina, R é o raio da pá e v é a velocidade do vento.

Outro parâmetro que tem influência no coeficiente de potência é o ângulo de inclinação das pás. O modelo proposto por Heier [19] para a estimativa do valor de C_p para turbinas eólicas com controle ativo de ângulo de inclinação (*pitch angle control*) em função da razão de velocidades λ e do ângulo de inclinação das pás β (Figura 4) é dado pelas equações:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{\frac{-c_7}{\lambda_i}} , \quad (10)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + c_8 \beta} \frac{c_9}{\beta^3 + 1}}, \quad (11)$$

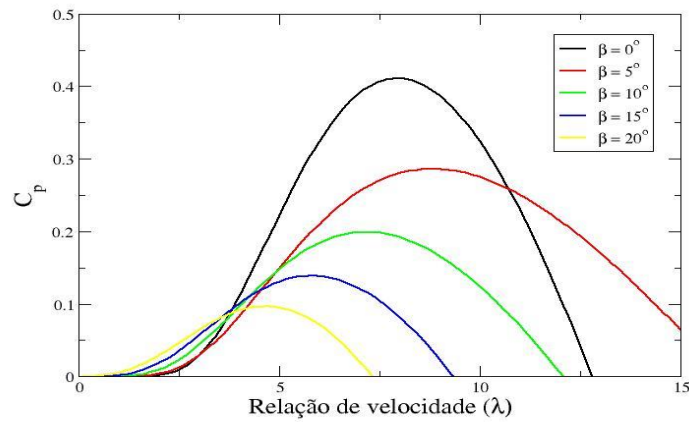


Figura 5. Coeficiente de potência em função de λ e β utilizando os parâmetros de Heier (ver tabela 1). Fonte: autoria própria.

onde c_i são parâmetros a serem determinados. O valor $\beta = 0$ representa o ângulo no qual a captura de energia é máxima (ângulo de ataque é máximo) e os valores positivos representam ângulos que resultam na diminuição da captura de energia (diminuição do ângulo de ataque).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros c_i propostos por Heier e Slootweg [15]. O cálculo da eficiência aerodinâmica proposto por Heier não discrimina turbinas de velocidade fixa e de velocidade variável. Já Slootweg propôs o ajuste dos parâmetros das Eqs. (10) e (11) para essas duas classes de turbinas eólicas. Desta forma, as curvas de performance puderam ser melhores representadas em análises baseadas em modelos computacionais.

Tabela 1 – Valores propostos para os parâmetros de cálculo de C_p . Fonte: ref. [15]

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
Heier	0,5	116	0,4	0	0	5	21	0,08	0,035
Velocidade Variável	0,73	151	0,58	0,002	2,14	13,2	18,4	-0,02	-0,003

A Figura 5 mostra as curvas do coeficiente de potência, calculado pelas Eqs. (10) e (11), em função de λ para diferentes valores de β utilizando os parâmetros propostos por Heier e a Figura 6 mostra as curvas de C_p calculadas utilizando os parâmetros propostos por Slootweg para as turbinas de velocidade variável.

Constata-se que, de certa forma, o valor máximo do coeficiente de potência de turbinas eólicas de velocidade variável aumentou um pouco em relação às turbinas de Heier (ver Tabela 2). Além disso, o controle da potência da turbina de velocidade variável é melhor em relação às turbinas de Heier, pois a mesma variação de

ângulo de inclinação produz maior variação no coeficiente de potência da turbina de velocidade variável. Essa característica faz com que a potência mecânica capturada seja ajustada mais rapidamente.

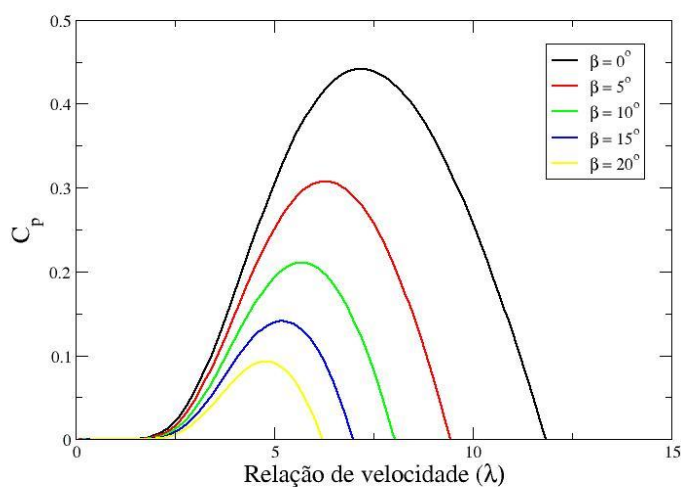


Figura 6. Coeficiente de potência em função de λ e β utilizando os parâmetros de velocidade variável (ver tabela 1). Fonte: autoria própria.

Conforme mostram as curvas de C_p , para extrair a máxima potência da energia incidente do vento, deve-se continuamente ajustar a velocidade rotacional da turbina, pois existe um valor de λ que maximiza C_p . A potência máxima pode ser alcançada quando $\beta = 0$, pois ângulo de inclinação muito alto tendem a reduzir a potência extraída do vento. Isso significa que somente baixos ângulos de inclinação são úteis para conversão ótima de energia, embora necessite de uma relação de velocidade λ mais alta.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros β e C_p máximo. Fonte: autoria própria.

β	0°	5°	10°	15°	20°
C_p (Heier)	0,41	0,29	0,20	0,14	0,09
C_p (Velocidade 0,44 Variável)	0,31	0,21	0,14	0,09	

3. CONCLUSÃO

A geração de energia eólica é a geração de energia através do giro de grandes aerogeradores com a ajuda do vento. A energia eólica é considerada uma fonte limpa de energia, pois não contribui para o efeito estufa na atmosfera e pode substituir os combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo. Uma vantagem que torna muito atrativa a energia eólica é o baixo custo de produção de eletricidade e de manutenção das turbinas eólicas. Entretanto, as turbinas ocupam uma considerável extensão de terra, uma vez que é necessário um determinado número de turbinas eólicas conectadas para obter a potência desejada. Denominamos esse conjunto de turbinas conectadas de parque eólico.

A instalação do parque eólico requer que a velocidade do vento no local escolhido seja suficiente para girar as pás da turbina eólica. A turbina será responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação que, por sua vez, será transformada em energia elétrica. A velocidade do vento, portanto, é um fator determinante da quantidade de energia que será gerada.

Um parâmetro de grande influência para a conversão de energia eólica é o coeficiente de potência C_p . Esse parâmetro depende da relação de velocidade λ e do ângulo de inclinação β das pás da turbina eólica. O trabalho de Betz tem mostrado que o valor de C_p é limitado a 0,59 uma vez que o ar deve estar sempre em movimento para sair do sistema, e portanto, apenas uma fração da energia cinética do vento pode ser convertida. Entretanto, sempre haverá um valor de λ que maximiza C_p , maximizando assim a potência extraída para uma certa velocidade do vento.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EL-SHARKAWI, M. A., Wind Energy – An Introduction. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [2] EMEIS S., Wind energy meteorology: atmospheric physics for wind power generation, Springer, 2º ed., 2018.
- [3] EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA), Ministério de Minas e Energia, Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019: ano base 2018, Brasília: EPE, 2019.
- [4] FALKNER, R, The Paris Agreement and the new logic of international climate politics, International Affairs, v. 92, n. 5, p. 1107–1125, 2016.
- [5] LEE, J. et al., Economic feasibility of campus-wide photovoltaic systems in New England, Renewable Energy, v. 99, p. 452–464, 2016.
- [6] GARRAT, J. R, The atmospheric boundary layer, Cambridge University Press, 1994.
- [7] GONZALEZ-RODRIGUEZ, A. G, Review of offshore wind farm cost components. Energy for Sustainable Development, v. 37, p. 10–19, 2017.
- [8] GREEN, R., VASILAKOS, N., The economics of offshore wind. Energy Policy, v. 39, n. 2, p. 496–502, 2011.
- [9] GWEC (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL), Global Wind Report 2019, Brussels, Belgium, 2020.
- [10] HOSSAIN, J. et al., World Wind Resource Assessment Report, World Wind Energy Association (WWEA), Bonn, Alemanha, 2014.
- [11] IOANNOU, A., ANGUS, A., BRENNAN, F., A lifecycle techno-economic model of offshore wind energy for different entry and exit instances., Applied Energy, v. 221, n. 221, p. 406–424, 2018.
- [12] PRAMOD, J., Wind Energy Engineering. Mc Graw Hill, 2º ed., 2011.
- [13] KAISER, M. J., SNYDER, B. F., Offshore Wind Energy Cost Modeling – Installation and Decommissioning., Springer-Verlag, 1º ed., 2012.
- [14] BRITO, S. DE S., Energia Eólica – Princípios e Tecnologias, Equipe CEPEL/CRESESB, 2008.
- [15] Gemignani, M. M. F. et al, Energia Eólica Fundamentos Tecnologia e Aplicações, Blucher Open Access, 1o Ed., 2021.
- [16] MADARIAGA, A. et al., Current facts about offshore wind farms. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 5, p. 3105–3116, 2012.
- [17] Hall, J. F., Design and control of a variable ratio gearbox for distributed wind turbine systems, Tese de doutorado, Universidade do Texas, 2012.
- [18] AL-BAHADLY, I., Wind Turbines, IntechOpen, 2011.

[19] Heier, S., Grid Integration of Wind Energy, John Wiley & Sons, 2014.