

## Influência das variáveis ambientais e construtivas no eixo do rotor eólico

## Influence of the environmental and constructive variables on the axis of wind rotor

### RESUMO

A geração de energia eólica vem aumentando nas últimas décadas por ser um tipo de energia renovável. A eficiência para geração de energia eólica depende de parâmetros construtivos, assim como variáveis ambientais. O objetivo dessa pesquisa foi identificar a influência das variáveis no eixo de rotação de aerogeradores. A partir de valores fornecidos pela literatura e pelos fabricantes de turbinas eólicas foram combinadas as seguintes variáveis: diâmetro do rotor; velocidade do vento; e ângulo de passo da turbina para verificar sua relação com a rotação e potência disponível no cubo de rotores eólicos. A combinação foi construída usando Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). A conclusão da pesquisa mostra a necessidade de ampliar os estudos para encontrar uma dependência matemática entre a rotação do eixo e o ângulo de passo para modelar adequadamente o sistema de controle da turbina eólica

**PALAVRAS-CHAVE:** Velocidade do vento. Energia eólica. Rotação

### ABSTRACT

Wind power generation has been increasing in recent decades as a type of renewable energy. Efficiency for wind power generation depends on construction parameters, as well as environmental variables. The objective of this research was to identify the influence of variables on the rotation axis of wind turbines. Based on values provided by the literature and by wind turbine manufacturers, the following variables were combined: rotor diameter; wind speed; and pitch angle of the turbine to check its relationship with the rotation and power available in the hub of wind turbines. The combination was built using a Central Composite Rotational Design (CCRD). The conclusion of the research shows the need to expand the studies to find a mathematical dependence between the rotation of the axis and the pitch angle to properly model the control system of the wind turbine

**KEYWORDS:** Velocidade do vento. Energia Eólica. Rotação.

Leonardo Pavan

[leonardopavan21@gmail.com](mailto:leonardopavan21@gmail.com)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil

Evandro André Konopatzki

[eaakonopatzki@utfpr.edu.br](mailto:eaakonopatzki@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

A demanda por eletricidade no mundo tem exigido cada vez mais a produção de energia a partir de fontes renováveis. Essas energias podem ser provenientes de fontes como o sol, água, biocombustíveis, maremotriz, biomassa, geotérmica e eólica.

A energia eólica é a energia existente na movimentação dos ventos, ou seja, é a energia cinética contida nas massas de ar da atmosfera. A energia eólica é limpa e uma fonte de energia prontamente disponível. É uma fonte de ocorrência natural e não poluente de gerar eletricidade. A energia contida no vento é não poluente como outros tipos de fontes, que são dependentes de combustíveis fósseis, tais como gás natural ou carvão. Para Montezano (2007) é uma alternativa energética competitiva na qual seu grande incentivo acontece na forma de baixo impacto ambiental.

O problema apresentado nesse estudo é representar matematicamente a rotação e a potência do rotor eólico de turbinas de eixo horizontal para controlar as variações e os efeitos das variáveis ambientais e das variáveis construtivas de um gerador sobre seu eixo – no ponto de acoplamento à máquina geradora.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa teve abordagem quantitativa descritiva apresentando as características da representação matemática de um gerador eólico na rotação do eixo acoplado ao cubo rotor eólico, estabelecendo correlações estatísticas de aderência entre variáveis analisadas, seguindo o propósito de uma análise descritiva (VERGARA, 1998).

A técnica utilizada para definição da equação de regressão foi a otimização de processos apresentada por Rodrigues e Lemma (2009). O delineamento das variáveis foi fatorial do tipo composto central rotacional caracterizado por quinze ensaios dos quais oito compuseram o modelo fatorial, seis representaram os pontos axiais e um retratou o ponto central.

As variáveis respostas buscadas nessa pesquisa foram a rotação do cubo do rotor (R), cuja unidade é radianos por segundo (rad/s) e a potência mecânica no eixo do rotor, unidade watt (W).

A construção das variáveis é dada por  $2^n$  cenários fatoriais, acrescida de uma análise de ponto central e oito cenários com pontos axiais. A forma de definir a expansão dos pontos axiais é relacioná-los ao valor fatorial nominal pelo valor de transformação da variável axial ( $\alpha$ ) para os pontos extremos, definida pela Eq. (1).

$$\alpha = \pm \sqrt[1/4]{2^n} \quad (1)$$

Os níveis de variação foram escolhidos com base nas informações disponíveis pelos fabricantes de turbinas eólicas.

Tabela 1 – Níveis do DCCR

Variáveis	- $\alpha$	-1	0	+1	+ $\alpha$
D: Diâmetro do rotor (m)	70,00	100,40	145,00	189,60	220,00
$\beta$ : Ângulo de passo (°)	0,00	4,05	10,00	15,95	20,00
$V_v$ : Velocidade vento (m/s)	3,00	7,46	14,00	20,54	25,00

Fonte: Autoria própria (2020).

A potência transferida do vento para a turbina eólica pode ser calculada pela Eq. (2).

$$P_m = \frac{\rho \times A \times C_p \times V_v^3}{2} [W] \quad (2)$$

Onde  $\rho$  representa a densidade do ar,  $A$  representa a área do rotor,  $C_p$  o coeficiente de potência e  $V_v$  a velocidade do vento.

O coeficiente  $C_p$  é apresentado na Eq. (3).

$$C_p = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} \quad (3)$$

Onde  $\lambda_i$  é a relação entre a velocidade tangencial de ponta da pá com a velocidade do vento no ponto "i" (adimensional);  $\beta$  é o ângulo de passo da turbina (°) e  $c_1, c_2, c_3, c_4$  e  $c_5$  são parâmetros de ajuste de ganho.

Nesse estudo foram adotados os parâmetros indicados por Montezano (2007), que apresentou os valores de ajuste ótimos como sendo:  $c_1 = 0,5176$ ;  $c_2 = 98$ ;  $c_3 = 0,4$ ;  $c_4 = 5$  e  $c_5 = 16,5$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cenários construídos para o DCCR são mostrados a seguir.

Tabela 2 – Cenários construídos para delineamento da potência e rotação

Cenário	D(m)	$\beta$ (°)	$V_v$ (m/s)	$P_m$ (MW)	R (rad/s)
1	100,40	4,05	7,46	0,74	1,19
2	189,60	4,05	7,46	2,63	0,63
3	100,40	15,95	7,46	-0,18	1,19
4	189,60	15,95	7,46	-0,63	0,63
5	100,40	4,05	20,54	15,39	3,27
6	189,60	4,05	20,54	54,89	1,73
7	100,40	15,95	20,54	-3,68	3,27
8	189,60	15,95	20,54	-13,12	1,73
9	70,00	10,00	14,00	1,06	3,20
10	220,00	10,00	14,00	10,45	1,02
11	145,00	0,00	14,00	12,43	1,54
12	145,00	20,00	14,00	-7,92	1,54
13	145,00	10,00	3,00	0,04	0,33
14	145,00	10,00	25,00	25,84	2,76
15	145,00	10,00	14,00	4,54	1,54

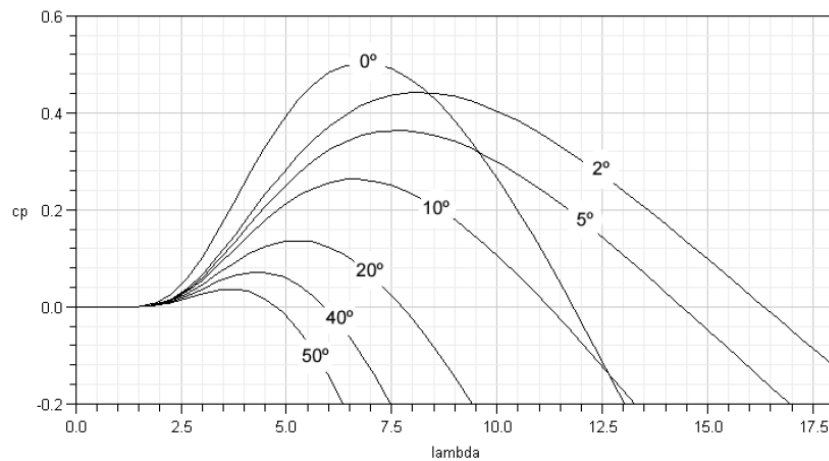
Fonte: Autoria própria (2020).

## POTÊNCIA TRANSFERIDA PARA O ROTOR

Os resultados obtidos por meio da simulação apresentaram  $P_m$  com valores negativos nos cenários 3, 4, 7, 8 e 12 mostrando que altos valores aplicados ao ângulo de passo da turbina podem levar o rotor a ter seu giro sustentado pela energia elétrica da rede ao invés da energia cinética do vento, ou seja, vai consumir energia ao invés de gerar.

Montezano (2007) explicou a relação de  $C_p$  com  $\beta$  por meio da relação entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento, também definido pelo autor como  $\lambda$ .

Figura 1 – Dependência do coeficiente de potência ( $C_p$ ) com ângulo de passo da hélice ( $\beta$ ) e a relação da velocidade da ponta da pá com a velocidade do vento.



Fonte: Montezano (2007).

Montezano (2007) constatou que o coeficiente de potência difere de valor nulo com uma velocidade de ponta de pá aproximadamente 2,5 maior que a que a velocidade do vento para ângulos de passo testados entre  $0^\circ$  e  $50^\circ$ . A figura deixa claro que existe um valor ótimo de  $\lambda$  para cada ângulo. Como por exemplo, para um valor de ângulo  $\beta$  de  $0^\circ$  o aproveitamento máximo é superior a 40% e quando esse ângulo aumenta o aproveitamento cai.

O autor também observou que  $\lambda$  elevado pode tornar o  $C_p$  negativo, fator esse que imputa uma potência negativa no aerogerador causando o fenômeno de consumo de energia elétrica para sustentação do movimento das pás.

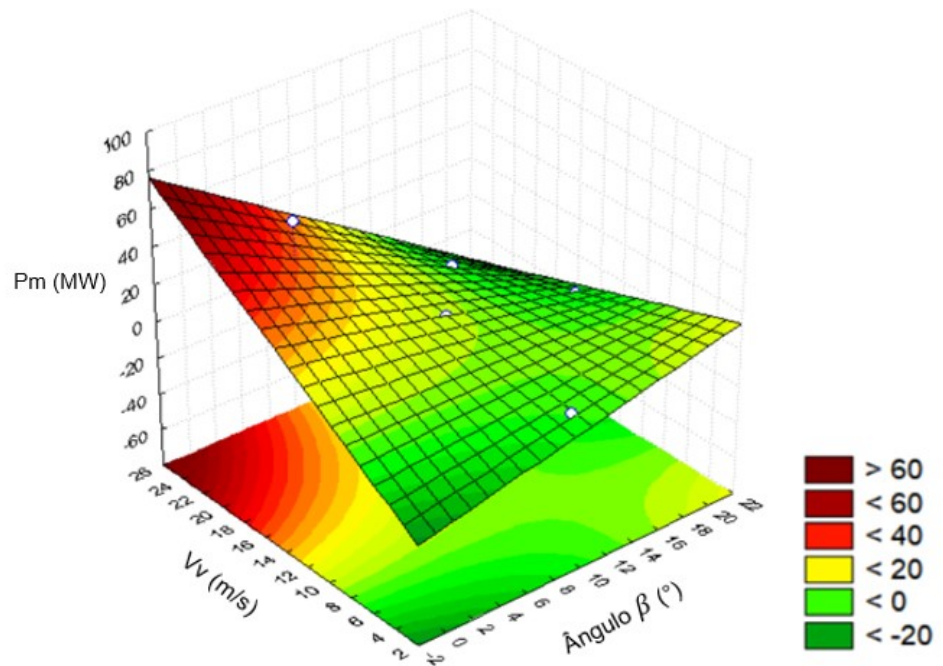
O cenário 6 apresentou valor de potência elevado e não constatado nos padrões construtivos atuais, denotado pela combinação de pequeno ângulo de passo e elevada velocidade do vento em uma turbina construída com pás de raio alto observa-se que a tecnologia atualmente existente não consegue atender tais condições construtivas e ambientais.

Na simulação realizada a potência (em MW) apresentou dependência diretamente proporcional à velocidade do vento  $V_v$  e inversamente proporcional ao ângulo de passo  $\beta$ , sendo representada pela equação de regressão (4).

$$P_m = (-9,19)\beta + (6,91)V_v - (10,36)\beta * V_v + (6,83) \quad (4)$$

A figura apresentada a seguir mostra a superfície de resposta da potência máxima transferida para o aerogerador sob as variáveis independentes velocidade do vento e ângulo de passo.

Figura 2 – Superfície de resposta da potência ( $P_m$ ) com influências da velocidade do vento ( $V_v$ ) e do ângulo de passo ( $\beta$ )



Fonte: Autoria própria (2020).

Essa figura mostra a dependência diretamente proporcional da potência gerada pela turbina eólica com a velocidade do vento. Também caracteriza que elevado ângulo de passo reduz o rendimento da turbina, podendo fazer com que a usina deixe de produzir energia e, para manter suas hélices girando, passa a consumi-la.

Nesse mesmo contexto Minnesota Municipal Power Agency [20--] também descreveu que para cada ângulo de passo diferente há um limite de relação  $\lambda$  que torna o coeficiente negativo. Esse coeficiente negativo faz com que a turbina deixe de fornecer energia ativa para a rede. Por esse motivo os projetos de geração eólica devem prever o corte de geração para altas velocidades de vento.

### ROTAÇÃO DO EIXO DA TURBINA

O diâmetro de um rotor varia de acordo com a potência desejada para o aerogerador. A Tabela 3 apresenta alguns valores construtivos de diâmetro para aerogeradores entre 3 e 4,5 MW de potência de pico de geração.

Tabela 3 – Exemplificação do diâmetro de alguns modelos de turbinas eólicas

Modelo	Potência da turbina (MW)	Diâmetro rotor (m)	Rotação do cubo (RPM)	Área varrida (m <sup>2</sup> )
N155	4,5	155	11	18.870
N155	4,8	155	11	18.870
N131	3,9	131	7,9-15,4	13.478
N131	3,6	131	7,5-13,6	13.478
AW148	3 a 3,6	148	6,2-12,4	17.203
AW132	3,465	132	7-14	13.685

Fonte: Adaptado do site da fabricante Nordex (2020).

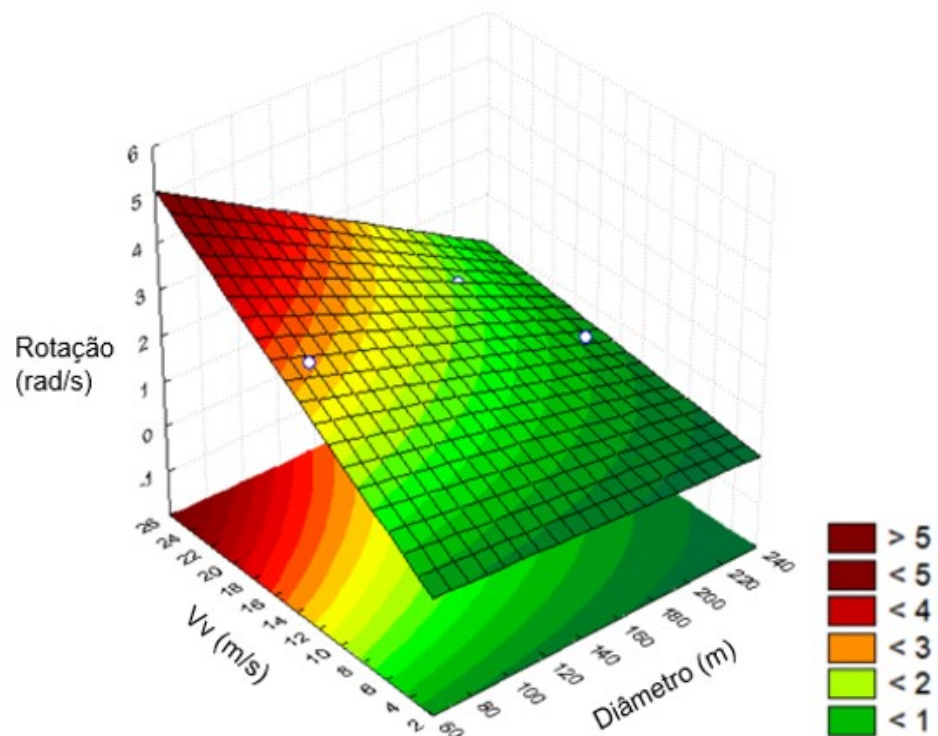
Os dados da Tabela 3 não esgotam todas as possibilidades construtivas, servem apenas como exemplos trazidos da literatura para facilitar as relações matemáticas aqui apresentadas.

A literatura não apresenta uma equação para modelar a rotação do eixo, sendo que nessa simulação foi constatada dependência diretamente proporcional a velocidade do vento e inversamente proporcional ao diâmetro do rotor. A regressão estatística é apresentada na Eq. (5).

$$R = (-0,58)D + (0,77)V_v - (0,25)D * V_v + (1,71) \quad (5)$$

A superfície de resposta da rotação do eixo do aerogerador sob as variáveis independentes velocidade do vento e diâmetro do rotor é mostrada a seguir.

Figura 3 – Superfície de resposta da Rotação (R) com influências da velocidade do vento (V<sub>v</sub>) e do Diâmetro do rotor



Fonte: Autoria própria (2020).

Essa figura mostra a dependência diretamente proporcional da rotação com a velocidade do vento e a dependência inversa da resposta (rotação) com o diâmetro do rotor.

## CONCLUSÃO

Foi possível verificar que as variáveis ambientais e construtivas possuem grande influência na rotação e potência disponível no eixo do rotor eólico pelos gráficos de superfícies analisados. Entretanto não foi possível, até o momento, construir uma bancada experimental para reproduzir os efeitos ambientais e construtivos da geração eólica em escala laboratorial, sendo necessária a realização de tais experimentos para validar as equações de regressão aqui apresentadas.

Foi observado nesse estudo que o ângulo de passo é a variável imprescindível para o controle da potência transferida para turbina eólica quando da variação na velocidade do vento, sendo que essa hipótese constitui a recomendação para trabalhos futuros com objetivo de verificar existência de dependência matemática entre a rotação do eixo e o ângulo de passo da pá do aerogerador.

## REFERÊNCIAS

Minnesota Municipal Power Agency (MMPA). **Wind energy math calculations: calculating the tip speed ratio of your wind turbine**. Disponível em: <https://mmpa.org/wp-content/uploads/2015/09/Tip-Speed-Ratio-Provided-by-Kid-Wind-PDF.pdf>. Acesso em: 22 maio 2020.

MONTEZANO, B. E. M., **Modelo dinâmico de visualização de um aerogerador com velocidade de rotação variável e controle de passo em VRML**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

NORDEX. **The delta4000 platform**. <https://www.nordex-online.com/en/product/platforms/#delta4000>. Acesso em 18 maio 2020.

NORDEX. **The AW3000 platform**. <https://www.nordex-online.com/en/product/platforms/#awplatform>. Acesso em 18 maio 2020.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento d experimentos e otimização de processos**. 2. ed. Campinas, SP: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.

VERGARA, C. S. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas S.A, 1998.