

## 15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

### DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA PARA EMULAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA ATRAVÉS DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA.

GUSTAVO S. MAGNANI <sup>1</sup>, TIAGO V. ORTUNHO <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Bacharelado Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Presidente Epitácio, gustavo.magnani@aluno.ifsp.edu.br.

<sup>2</sup> Docente no curso Bacharelado Engenharia Elétrica, Campus Presidente Epitácio, tiago.veronese@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.01-0 Geração da Energia Elétrica.

**RESUMO:** As fontes de energia renováveis emergem como soluções eficazes para atender à crescente demanda por eletricidade e mitigar as preocupações globais com as emissões de dióxido de carbono, graças à sua natureza limpa, não poluente e abundante. Dentre essas fontes, a energia eólica se destaca como uma das mais promissoras. Neste estudo, traz o desenvolvimento de um modelo teórico de simulação para a geração de energia elétrica a partir de uma turbina eólica. O sistema consiste no modelamento com equações matemáticas para descrever o comportamento dinâmico da turbina, permitindo a obtenção de curvas de desempenho sob diferentes condições de vento, fenômenos aerodinâmicos e mecanismos de controle. Essas equações foram implementadas e simuladas no ambiente Matlab/Simulink®, visando determinar a velocidade angular de referência da turbina.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia Eólica; Simulação; Controle; Energia Renovável.

### DEVELOPMENT OF A DIDACTIC TEST BENCH FOR EMULATING A WIND TURBINE USING A DC MOTOR.

**ABSTRACT:** Renewable energy sources are emerging as effective solutions to meet the growing demand for electricity and mitigate global concerns about carbon dioxide emissions, thanks to their clean, non-polluting, and abundant nature. Among these sources, wind energy stands out as one of the most promising.. This study presents the development of a theoretical simulation model for generating electrical energy from a wind turbine. The system involves modeling with mathematical equations to describe the dynamic behavior of the turbine, enabling the generation of performance curves under different wind conditions, aerodynamic phenomena, and control mechanisms. These equations were implemented and simulated in the Matlab/Simulink® environment to determine the reference angular speed of the turbine.

**KEYWORDS:** Wind Energy; Simulation; Control; Renewable Energy.

## INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda por eletricidade e a necessidade de mitigar impactos ambientais, as fontes de energia convencionais, como carvão, petróleo e gás natural, enfrentam desafios consideráveis. A instabilidade dos preços desses recursos, combinada com a ameaça de esgotamento das reservas, gera preocupações técnico-econômicas e financeiras. Paralelamente, a inquietação crescente em relação às emissões de dióxido de carbono, um dos principais responsáveis pelo aquecimento global, intensifica a urgência de combater as mudanças climáticas e buscar alternativas sustentáveis (PINTO, 2012).

Para diminuir os impactos das emissões gasosas, diversos países participaram de conferências e firmaram pactos importantes, como o Protocolo de Kyoto (1997), a Rio +20 (2012), e o Tratado de Paris (2015). Esses esforços coletivos visam promover a conscientização e estabelecer acordos que garantam um desenvolvimento sustentável, além de reduzir a emissão de poluentes.

Entre as fontes alternativas de energia, a energia eólica se destaca como uma das mais viáveis e promissoras, impulsionada por avanços tecnológicos rápidos e recentes incentivos governamentais.

Entretanto, o alto custo de construção dos aerogeradores apresenta um obstáculo significativo para a pesquisa aprofundada nessa área. Uma solução mais econômica é o desenvolvimento de bancadas emuladoras de sistemas eólicos, que utilizam modelos matemáticos para simular cada componente de um aerogerador, desde as pás da turbina que ativam o eixo até a geração de eletricidade. Neste trabalho, será utilizado equações para uma turbina eólica, modelando a relação matemática entre a velocidade do vento (domínio) e a velocidade do eixo da turbina (contradomínio).

## MATERIAL E MÉTODOS

A emulação de uma turbina eólica em bancada experimental é obtida pelo controle de torque ou velocidade de um motor CC, a fim de se obter em seu eixo efeitos similares que uma turbina eólica real iria produzir para determinadas condições de operação e velocidade de vento.

O algoritmo de controle do emulador é implementado neste ambiente de modo a emular os diferentes fenômenos aerodinâmicos presentes no rotor de uma turbina.

A energia eólica provém da radiação solar, através do aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que aproximadamente 2% da energia solar absorvida pela Terra são convertidas em energia cinética dos ventos (Neto, 2005). Como o vento é um fluido, é possível calcular a potência gerada por uma turbina com base na energia cinética do vento, no balanço de energia e na aplicação da equação de Bernoulli. A turbina é modelada como um disco poroso que cria um diferencial de pressão ao se opor ao fluxo de vento, conforme ilustrado na Figura 1, sendo essa baseada em Neto (2005). Para relacionar a potência à velocidade do vento, assume-se que o ar é incompressível e que variáveis como potência, densidade do ar e velocidade são constantes em qualquer seção transversal do fluxo.

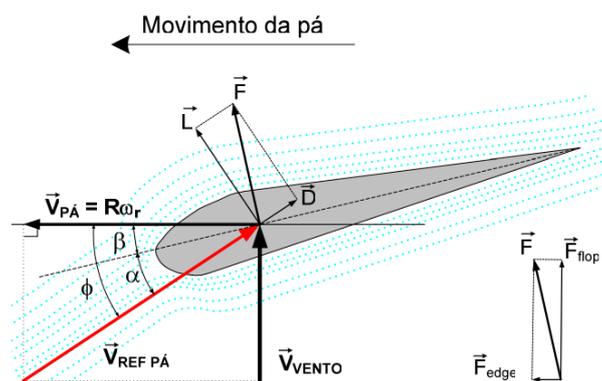


FIGURA 1. Diagrama de velocidades e forças atuantes sobre as pás da turbina.

Porém, essa potência não é totalmente convertida em energia elétrica. Na realidade, uma turbina deflete o vento, mesmo antes do plano do rotor. Isto significa que uma turbina nunca poderá captar toda a energia disponível do vento. Esse fenômeno é explicado pela lei de Betz (Neto, 2005). Aplicando a lei de Betz a equação de potência mecânica de um aerogerador tem-se Equação 1.

$$PM = \frac{1}{2} \rho ACp(\lambda, \beta) Vv^3 \quad (1)$$

em que,

PM - potência mecânica extraída pela turbina;

Vv - velocidade do vento [m/s];

$\rho$  - densidade do ar [Kg/m<sup>3</sup>];

A - a área varrida pelas hélices da turbina [m<sup>2</sup>];

Cp - é o coeficiente de potência;

$\lambda$  - relação entre velocidade angular das pás e velocidade dos ventos;

$\beta$  - inclinação das pás da turbina.

A eficiência de um aerogerador na conversão da energia do vento em energia rotacional varia com o ponto de operação, dependendo do ângulo de passo ( $\beta$ ) e da relação de velocidades ( $\lambda$ ) entre a ponta das pás e o vento (Rocha, 2008). Essa relação é determinada pela Equação 2.

$$\lambda = \frac{\omega t R}{Vv} \quad (2)$$

em que,

$\omega T$  - é a velocidade angular da pá da turbina [rad/s];

R - raio das pás da turbina eólica [m].

Pode-se expressar o coeficiente de potência (Cp) em função de  $\lambda$  e  $\beta$ , através da Equação 3 (Slootweg, 2003).

$$Cp(\lambda, \beta) = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{\frac{21}{\lambda i}} + 0,0068\lambda \quad (3)$$

em que o fator  $\lambda i$  é definido por:

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

Através das Equações (3) e (4) é possível obter uma família de curvas positivas para Cp ( $\lambda$ ,  $\beta$ ), para diversos valores do ângulo de passo com simulação em um ambiente Matlab®, conforme mostrado na Figura 2.

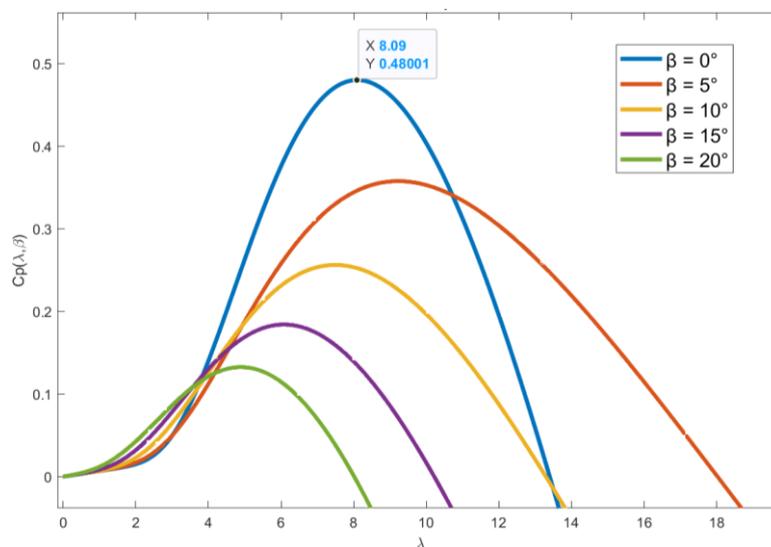


FIGURA 2. Coeficiente de potência para diferentes valores de velocidade específica para diferentes valores de ângulo de passo.

Determinando os valores do Cp, é possível identificar os valores ideais de  $\beta$  e  $\lambda$  para alcançar a extração máxima de potência de uma turbina eólica. Para extrair a máxima potência da turbina eólica é necessário que o valor do Cp seja máximo, o que ocorre quando  $\lambda = 8,09$  e  $\beta = 0^\circ$ .

A Figura 3 mostra a Equação 3 implementada no Simulink®.

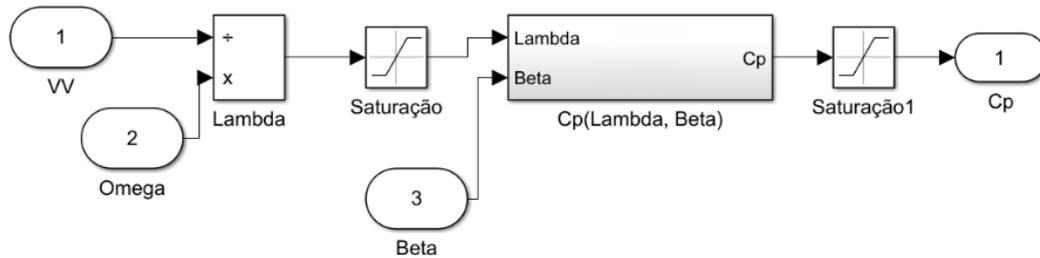


FIGURA 3. Equação implementada no software Simulink®.

O torque da turbina eólica pode ser expresso pela razão entre a potência mecânica e a velocidade angular da turbina.

$$T_t = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V \frac{v^3}{\omega T} \quad (5)$$

A equação mecânica pode ser observada.

$$\frac{d\omega T}{dt} = \frac{1}{J} (T_t - T_e - B\omega t) \quad (6)$$

em que,

J - é a inércia;

T<sub>t</sub> - torque da turbina eólica;

T<sub>e</sub> - torque eletromagnético;

B - coeficiente de atrito.

A modelagem do sistema mecânico entre a turbina eólica e o gerador elétrico é fundamental no desenvolvimento do emulador, considerando tanto as características dinâmicas da turbina quanto a rotação do motor de corrente contínua (CC). Esse processo permite calcular o torque aplicado ao eixo da turbina e regular a corrente que circula na armadura do motor CC, responsável por converter energia elétrica em mecânica. O motor CC é modelado com um circuito de campo que é excitado de forma independente.

A modelagem de um motor CC envolve parâmetros como força eletromotriz, torque mecânico e equação de velocidade (Nasar, 1984). Utilizando-se dessas equações no modelo do Matlab®, é possível determinar os ganhos do sistema. Nesse modelo, a tensão de armadura (V<sub>a</sub>) é a entrada e a velocidade angular (ω), expressa em radianos por segundo, é a saída. A Figura 4 ilustra o diagrama de blocos de um motor CC, obtido diretamente a partir da análise das equações referenciadas.

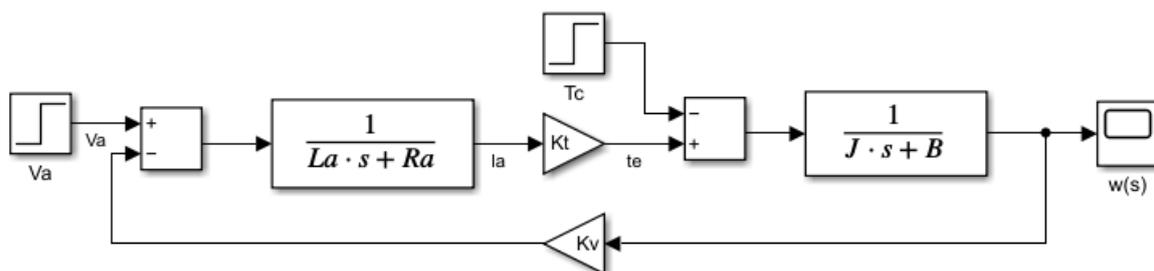


FIGURA 4. Diagrama de blocos do motor CC.

Um controlador PID, é um tipo de controlador eletrônico, que utiliza ações proporcionais, derivativas e integrais, para minimizar o erro entre uma variável de processo medida e um valor estipulado para o controle (Ogata, 2010). Segundo Ogata (2010) os controladores PID tem uma enorme aplicabilidade, na área de controle de processos, os controladores PID geram um tipo de controle satisfatório.

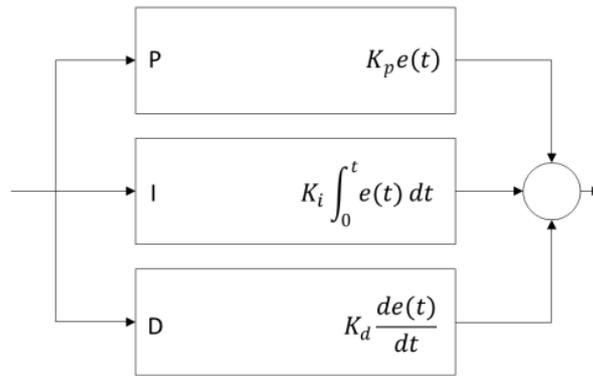


FIGURA 5. Representação em diagrama de blocos de um controlador PID. Modificar no simulink.

Este estudo explora o uso do Arduino para interligar uma simulação criada no Matlab/Simulink® com o controle de um motor de corrente contínua (CC). O Arduino atua capturando a tensão gerada por um tacogerador, que é utilizada como medida da velocidade angular do motor CC, e também recebe do Matlab/Simulink® o valor de referência da velocidade da turbina eólica. Um controlador PI, configurado no Simulink®, ajusta a tensão de PWM fornecida ao motor para regular sua velocidade conforme a velocidade do vento. Dessa forma, a interface Arduino-Simulink® permite o controle dinâmico e eficiente do motor (Júnior, 2017).

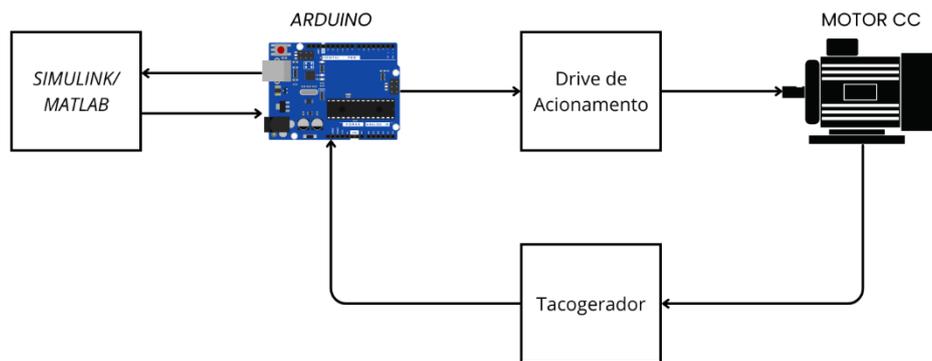


FIGURA 6. Diagrama de blocos dos componentes da bancada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em função das limitações de tempo visando o prazo estabelecido para a submissão do projeto, a montagem da bancada didática para emulação de uma turbina eólica permanece em fase de pesquisa. Contudo, espera-se que, até o término do cronograma, a montagem seja finalizada e as simulações práticas, assim como as realizadas em *software*, sejam executadas conforme previsto.

Sistemas de controle com retroalimentação, também conhecidos como sistemas de malha fechada, comparam continuamente a saída com a entrada de referência. A diferença resultante entre esses valores é usada como base para ajustar o controle, alimentando o controlador com informações que permitem reduzir o erro e alinhar a saída do sistema ao valor desejado (Maya, 2014). O controlador PID é amplamente empregado no setor industrial. Ele utiliza um algoritmo que proporciona respostas precisas e eficazes para uma variedade de processos, garantindo um controle consistente e estável de sistemas.

Um motor de corrente contínua (CC) equipado com um tacogerador no eixo utiliza um sistema de retroalimentação para regular sua velocidade. O tacogerador converte a rotação do eixo em um sinal elétrico proporcional à velocidade angular do motor. Esse sinal é enviado ao Arduino, que o compara com o valor de referência calculado a partir do modelo matemático da turbina eólica. Com base nessa comparação, o sistema ajusta suas ações de controle para garantir que a velocidade do motor se mantenha dentro dos parâmetros dinâmicos desejáveis.

O tacogerador fornece uma tensão proporcional à rotação do eixo do motor, que é convertida para o intervalo de 0 a 5 V por um divisor resistivo antes de ser lida pelo Arduino. Esse sinal ajustado é então

processado no Matlab/Simulink®, onde a velocidade angular do motor é comparada com o valor de referência computado.

A diferença entre a velocidade medida e a referência gera um erro, que é tratado pelo controlador PI. A ação de controle resultante é aplicada ao sistema ajustando a largura do pulso do PWM, o que modula a tensão fornecida ao motor CC para controlar sua velocidade. Conforme o ângulo de passo e o torque variam, a resposta do sistema é monitorada para garantir que o emulador de turbinas mantenha o desempenho esperado.

Quando a velocidade do motor muda, a tensão gerada pelo tacogerador varia proporcionalmente, refletindo alterações na velocidade mecânica. No Matlab/Simulink®, a potência medida é comparada com a potência simulada, permitindo ajustes precisos no controle do sistema. O Arduino, após receber a ação de controle, transmite para a placa de acionamento, ajustando a velocidade do motor de forma eficiente para otimizar a extração de potência, tanto em altas quanto em baixas rotações.

Ajustar o ângulo de passo em sistemas eólicos é essencial para controlar a potência do gerador durante ventos fortes e evitar danos. Além disso, essa adaptação maximiza a captação de energia em ventos fracos, permitindo o uso eficiente da potência disponível na rede elétrica.

No final do projeto, todos os dados referentes às simulações teóricas e práticas do controle PID, Arduino, e a simulação do motor em ambiente físico serão devidamente apurados.

## CONCLUSÕES

Este estudo propõe uma nova perspectiva para a análise de energias renováveis e métodos de controle, por meio da utilização de modelos matemáticos que simulam a dinâmica de turbinas eólicas e gerenciam um motor de corrente contínua (CC) para replicar seu comportamento. Ao contrário das abordagens convencionais de ensino, esta metodologia se destaca por seu enfoque prático, o que facilita a integração na indústria, um aspecto que frequentemente não é suficientemente abordado durante a formação acadêmica. Além disso, a implementação de ambientes virtuais para a simulação de equipamentos industriais reais representa uma alternativa econômica, possibilitando a reprodução de dispositivos que são encontrados no setor. O trabalho realizado contribuiu significativamente para o aprofundamento do conhecimento sobre sistemas que emulam turbinas eólicas e técnicas de controle. Para isso, foi essencial realizar uma revisão da literatura, a fim de entender o modelo matemático que descreve a dinâmica de uma turbina eólica e integrá-lo ao software Matlab/Simulink®.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

No término do estudo, a bancada poderá ser colocada à disposição no laboratório da instituição. Dessa forma, será possível conduzir novas pesquisas, explorando diferentes estratégias de controle e investigando outras formas de acionamento. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) Câmpus Presidente Epitácio, pela disponibilidade estrutural e recursos técnicos que foram essenciais para a realização deste trabalho. Minha gratidão também ao orientador.

## REFERÊNCIAS

JÚNIOR, M. J. S. **Desenvolvimento De Bancada Didática Para Emulação De Uma Turbina Eólica**. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Brasil: Paraná. 2017.

NASAR, S.A. **Máquinas Elétricas**. Brasil: McGraw-hill, 1984.

NETO, A. s. **Análise e Controle de Centrais Eólicas a Velocidade Variável Utilizando ATPDraw**. Universidade Federal de Pernambuco. Brasil: Recife, 2015.

MAYA, P. A. LEONARDI, F. **Controle Essencial**. 2.ed. São Paulo: Pearson, 2014.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2010.

ROCHA, V. R. **Simulação de um Aerogador em uma Bancada Experimental**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil: Rio de Janeiro, 2008.

SLOOTWEG, J. G.; KLING, W. L. Aggregated modelling of wind parks in power system dynamics simulations. In: **2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings**, [S.l.: s.n], 2003.