

## MODELAGEM DE UMA TURBINA EÓLICA DE VELOCIDADE VARIÁVEL COM CONTROLE MPPT

Mailson Neres Valentim – mailsonneres@gmail.com  
Universidade Federal do Ceará/ Campus Sobral  
Rua Estandislau Frota, S/N, Centro  
62010560 – Sobral – Ceará

Miguel Enéas da Silva Neto – miguel.eneas@gmail.com  
Universidade Federal do Ceará/ Campus Sobral  
Rua Estandislau Frota, S/N, Centro  
62010560 – Sobral – Ceará

Marcio André Baima Amora – marcio@dee.ufc.br  
Universidade Federal do Ceará/ Campus Sobral  
Rua Estandislau Frota, S/N, Centro  
62010560 – Sobral – Ceará

**Resumo:** Neste trabalho é abordado a modelagem de uma turbina eólica no software PSIM para a implantação da técnica de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) em sistemas eólicos. A topologia adotada é formada pela turbina, gerador síncrono, retificador não controlado, conversor boost e a carga resistiva. A técnica é conhecida por torque ótimo. Este método se utiliza do conhecimento prévio de alguns parâmetros do sistema para gerar um sinal de torque de referência. Com este torque e a manipulação de algumas equações da teoria de MPPT será criada uma corrente de referência, onde juntamente com o controlador proporcional e integral (PI) irão atuar no ciclo de trabalho do conversor boost. Assim, embora a turbina eólica forneça um determinado torque para o gerador síncrono, a malha de controle do conversor irá atuar fazendo com que a corrente medida instantaneamente no indutor do conversor siga essa corrente de referência. Desta forma, quanto maior a condução de corrente por parte do conversor, menor o torque mecânico fornecido e consequentemente a turbina terá um aumento de velocidade até atingir seu ponto de máximo. Com tudo, o sistema de conversão de energia eólica (WECS) irá atuar no seu ponto de máxima potência quando a turbina atingir sua máxima velocidade.

**Palavras-chave:** WECS, MPPT, Torque, Turbina.

### 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas as energias renováveis, em especial a eólica, vêm ganhando importância no cenário político e econômico, sendo motivo de debates junto aos governos, pesquisadores e empresas no mundo. Isso se dá pelo constante aumento dos preços dos combustíveis fósseis, que possuem reservas limitadas e não renováveis, além de serem os principais causadores do aumento do efeito estufa. Segundo os dados da associação brasileira de energia eólica (ABEEólica), no mês de abril de 2019, a capacidade da potência eólica instalada no Brasil chegou a 15 GW, sendo a segunda fonte da matriz elétrica brasileira.

O sistema eólico é uma fonte de energia limpa, não causa grandes impactos ao meio ambiente e possui sua fonte de energia renovável e abundante, motivo do aumento dos

investimentos no Brasil. Estima-se que até o final de 2023 a capacidade de potência eólica instalada no território brasileiro seja de 19,7 GW (ABEEólica, 2019).

Nesse contexto, é necessário ampliar a variação da matriz energética para que na ausência de uma das fontes, o comércio energético não seja impactado por completo. Desta forma, este trabalho visa contribuir com o avanço tecnológico dos sistemas de conversão eólicos.

O Sistema de Conversão de Energia Eólica (Wind Energy Conversion System (WECS)) é composto por uma turbina que tem a função de transformar a energia cinética armazenada nas massas de ar em energia mecânica e por um gerador acoplado a esta turbina transformando energia mecânica em elétrica. Pelo fato da velocidade do vento variar constantemente, a disponibilidade de potência também é alterada. Assim, os algoritmos de rastreamento de máxima potência (MPPT) têm por função extrair a potência máxima fornecida pela turbina, indiferentemente do valor da velocidade do vento, buscando sempre o ponto de máxima potência.

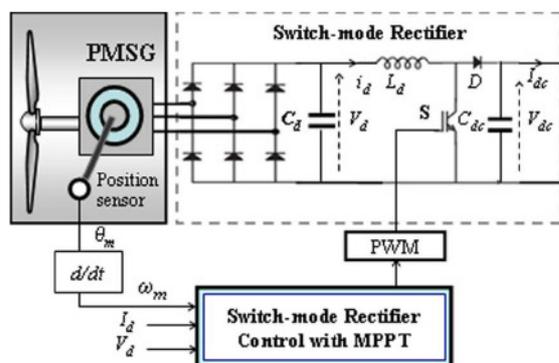
Sob essas perspectivas, este trabalho tem como propósito desenvolver a modelagem do sistema turbina-gerador que torne possível a implementação de diversas técnicas de MPPT para análise de eficiência da mesma. Além disso, é possível analisar uma técnica tradicional de MPPT baseado no valor de torque ótimo, conforme (ABDULLAH, 2012) e (LALOUNI, 2014).

## 2 TOPOLOGIA DO SISTEMA

O sistema é composto por um Gerador Síncrono de Imã Permanente (Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG)), que se diferencia dos demais geradores por não precisar de fluxo de energia bidirecional, não possuir escorregamento, não necessitar de caixa de engrenagem acoplada à turbina eólica reduzindo assim o atrito mecânico e por possuir uma maior eficiência associado a um baixo peso, em comparação aos Geradores Gaiola de Esquilo (Squirrel Cage Induction Generators (SCIG)) e aos Geradores de Indução Duplamente Alimentados (Doubly Fed Induction Generator (DFIG)), conforme (SANTOS, 2015), (SARVI, 2013) e (VIJAYALAKSHMI, 2015).

Para retificar a tensão, será utilizado um retificador não controlado de diodo associado com um conversor Boost elevador, que tem a função de controlar a potência fornecida à carga. A figura 1, a seguir, mostra a topologia escolhida para este trabalho, vastamente mencionada na literatura. Em situações que se necessita da conexão desta topologia na rede elétrica, será acrescentado um inversor de frequência após o conversor Boost, tornando a tensão novamente alternada.

Figura 1 - Topologia do sistema WECS



Fonte: HAQUE, 2010.

### 3 MODELAGEM DA TURBINA

A quantidade de energia captada pela turbina eólica (potência fornecida pelo rotor) é dada pela Equação (1), conforme (JUNIOR, 2016).

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p(\beta, \lambda) \quad (1)$$

Onde:  $P_m$  é a potência mecânica da turbina eólica,  $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{Kg/m}^3$ ),  $A$  é a área varrida pela pá ( $\text{m}^2$ ),  $V$  a velocidade do vento ( $\text{m/s}$ ) e  $C_p$  é o coeficiente de potência que depende da relação entre a velocidade tangencial da ponta das pás pela velocidade do vento ( $\lambda$ ) e o ângulo de inclinação da pá ( $\beta$ ). Esta relação de  $\lambda$  também é conhecida por velocidade de ponta, ilustrada pela Equação (2), conforme (PUTRI, 2018).

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_m}{V} \quad (2)$$

Sendo  $R$  o comprimento da pá ( $\text{m}$ ),  $\omega_m$  a velocidade mecânica do rotor da turbina ( $\text{rad/s}$ ) e  $V$  a velocidade do vento.

O coeficiente de potência  $C_p$  é definido na Equação (3) e (4), conforme (LOPEZ, 2007).

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\left(\frac{c_5}{\lambda_i}\right)} + c_6 \lambda_i \quad (3)$$

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

As constantes  $c_1$  à  $c_6$  são fornecidas pelos fabricantes das turbinas, mas também podem ser obtidas empiricamente ou por meios de ensaios experimentais, conforme (HUI, 2008).

A Equação (5) mostra o torque mecânico gerado pela transferência de potência do eixo.

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (5)$$

Para realizar o acoplamento da turbina com o gerador deverá ser considerado o momento de inércia da turbina. Com isso, a equivalência entre o sistema elétrico e mecânico é obtida, obedecendo a Tabela 1.

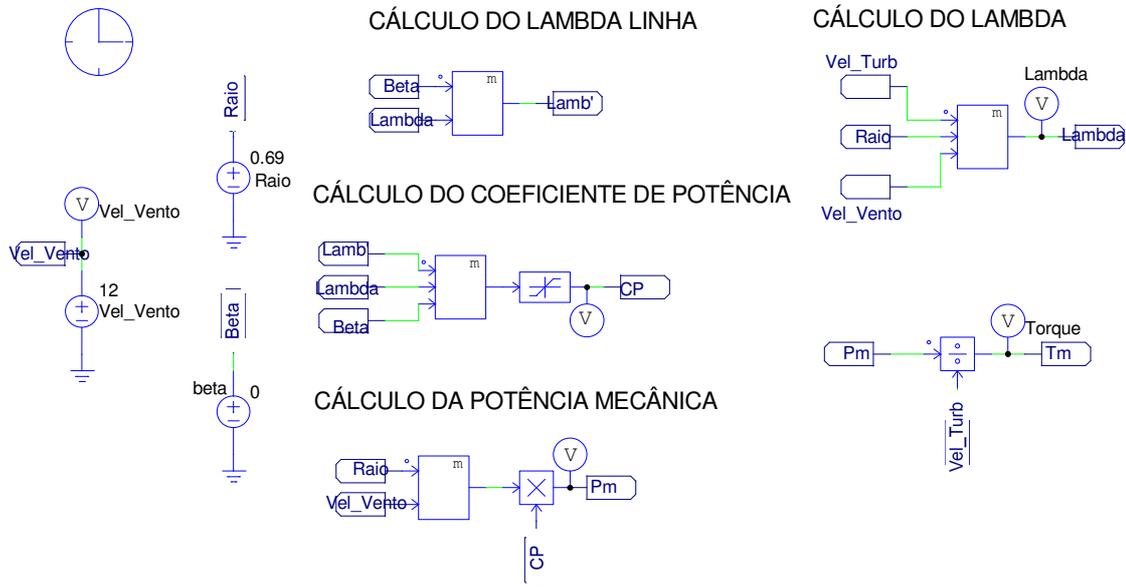
Tabela 1 - Equivalência entre grandeza elétrica e mecânica.

EQUIVALÊNCIA ENTRE GRANDEZAS:	
Elétrica	Mecânica
Tensão (V)	Velocidade ( $\Omega$ )
Corrente (I)	Conjugado (T)
Capacitância (C)	Momento de Inércia (J)

Fonte: FERREIRA, 2010.

Depois do equacionamento matemático será utilizado o software PSIM para a simulação de acordo com a Figura 2.

Figura 2 - Modelagem da turbina eólica.



Fonte: Próprio autor.

A Equação 6 é obtida devido ao acoplamento da turbina com o gerador, conforme (FERREIRA, 2010).

$$T_r - T_g = (J_r + J_g) \frac{d\omega_m}{dt} \quad (6)$$

Onde:  $T_r$  é o conjugado mecânico da turbina eólica,  $T_g$  é o conjugado mecânico do gerador elétrico,  $J_r$  é o momento de inércia da turbina eólica,  $J_g$  é o momento de inércia do gerador e  $\omega_m$  é a velocidade de rotação do eixo da turbina.

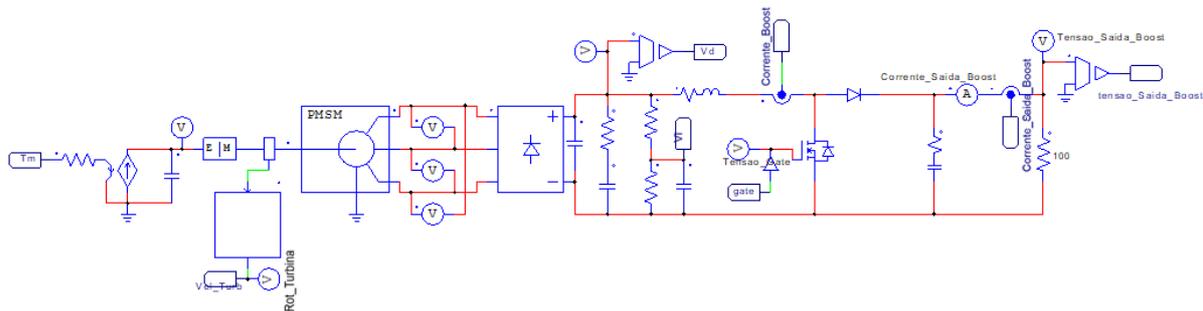
Realizando a equivalência da Tabela 1 com a Equação (6) obtêm-se a Equação (7), conforme (FERREIRA, 2010).

$$I_r - I_g = (C_r + C_g) \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

Onde  $I_r$  é a corrente produzida pelo circuito elétrico do sistema eólico que equivale ao conjugado mecânico da turbina,  $I_g$  é a corrente produzida pelo circuito elétrico do gerador e representa o conjugado mecânico do gerador,  $C_r$  é a capacitância que representa o momento de inércia da turbina eólica,  $C_g$  é a capacitância que representa o momento de inércia do eixo do gerador elétrico e  $V$  é a tensão que representa a velocidade do eixo da turbina.

Como na modelagem da turbina se obtém um conjugado mecânico na saída representado por tensão, é realizado a conversão em corrente para obter a equivalência eletromecânica. Logo, utiliza-se um resistor unitário em série com uma fonte de corrente que será ligada em paralelo com a capacitância  $C_r$ . Além disso, é necessário um bloco de conversão eletromecânica para ser ligado no gerador. Seguindo a topologia adotada, o gerador é conectado ao retificador não controlado que está associado ao conversor Boost que alimenta uma carga resistiva de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Acoplamento turbina-gerador-conversor-carga.



Fonte: Próprio autor.

#### 4 ALGORITMOS DE MPPT

Rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT) são métodos responsáveis pela procura do ponto de operação mais eficiente de forma contínua, de modo que o sistema funcione com melhor rendimento. Os algoritmos clássicos de extração de MPP podem ser classificados em dois tipos: baseados no conhecimento prévio dos parâmetros do sistema como, medição da velocidade do vento (Wind Speed Measurement (WSM)), realimentação do sinal de potência (Power Signal Feedback (PSF)), torque ótimo e os baseados em métodos iterativos como o perturba e observa (P&O).

A técnica de medição da velocidade do vento (WSM) proporciona um controle de alta precisão do valor da velocidade de ponta ( $\lambda$ ), todavia, a função real do coeficiente de potência ( $C_p$ ) deve ser conhecida para que o valor ótimo seja alcançado. Outro fator relevante é o custo de manutenção de sensores mecânicos de velocidade do vento ser economicamente inviável para turbinas de baixa potência, (JUNIOR, 2016).

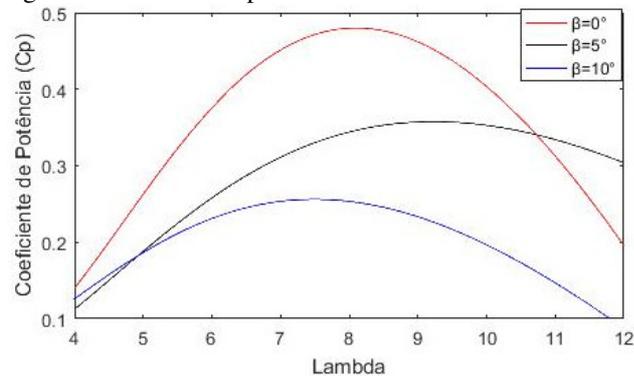
A técnica de realimentação do sinal de potência (PSF) realiza as medidas de potência elétrica do gerador para valores específicos de velocidade do rotor e velocidade do vento. Esses dados são inseridos em uma tabela de consulta, de modo que, para determinado valor de potência elétrica e velocidade do eixo a velocidade do vento é encontrada pela tabela, ou seja, são dados obtidos experimentalmente. Além disso, a função real do coeficiente de potência ( $C_p$ ) deve ser conhecida, (JUNIOR, 2016).

O método do perturba e observa (P&O) realiza uma perturbação em alguma variável de referência e analisar como a potência se comporta. Para um aumento de potência a perturbação permanece no mesmo sentido, quando a potência diminui, a perturbação inverte o sentido. Com isso, o algoritmo ficará oscilando em torno do ponto de máxima potência (MPP), (JUNIOR, 2016). Esse método é mais utilizado, pois não necessita de parâmetros prévios do sistema nem de sensor de velocidade. Uma desvantagem desse algoritmo é o tempo para atingir a máxima potência e o passo do incremento.

Devido a necessidade de melhorar esses métodos tradicionais são criados algoritmos que derivam dos citados anteriormente, como por exemplo: algoritmos híbridos, redes neurais, lógica difusa ou fuzzy, entre outros.

Foi utilizado o algoritmo de MPPT torque ótimo para validar o trabalho. O controle por torque ótimo se utiliza do conhecimento prévio de alguns parâmetros do sistema, como por exemplo, Coeficiente de Potência ( $C_{p\_opt}$ ) e Lambda ( $\lambda_{opt}$ ) extraídos da Figura 4. O gráfico a seguir exibe as curvas  $C_p$  em função de  $\lambda$  para diversos valores de ângulo da pá ( $\beta=0^\circ$ ;  $\beta=5^\circ$ ;  $\beta=10^\circ$ ). Foi utilizada uma velocidade de vento de 12 m/s.

Figura 4 - Curvas do Cp versus lambda.



Fonte: Próprio autor.

Após análise da Figura 4 pode-se perceber que o maior valor de Cp obtido será quando o ângulo de inclinação da pá está em 0°. Desta forma, o ponto de máxima potência desta curva fornece os valores de Cp<sub>opt</sub> e λ<sub>opt</sub> de 0.48 e 8.12 respectivamente.

Desta forma, com os valores de Cp<sub>opt</sub> e λ<sub>opt</sub> obtidos da figura 4, a potência mecânica ótima pode ser descrita através das Equações (8) e (9) como sendo:

$$P_{m\_opt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_{p\_opt} \left( \frac{\omega_{m\_opt}^3 \cdot R^3}{\lambda_{opt}^3} \right) \quad (8)$$

$$\omega_{m\_opt} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (9)$$

$$k_{opt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_{p\_opt} \cdot \left( \frac{R^3}{\lambda_{opt}^3} \right) \quad (10)$$

Logo, o torque ótimo gerado por uma turbina eólica pode ser escrito de acordo com as Equações (5), (8) e (10) como sendo:

$$T_{m\_opt} = K_{opt} \cdot \omega_{m\_opt}^2 \quad (11)$$

O controle aplicado em (HAQUE, 2010) atua de uma forma diferente dos demais métodos de torque ótimo encontrados na literatura. Neste processo será gerado um torque de referência utilizando a Equação (11), onde o valor da velocidade mecânica da turbina será medido instantaneamente durante a simulação do sistema.

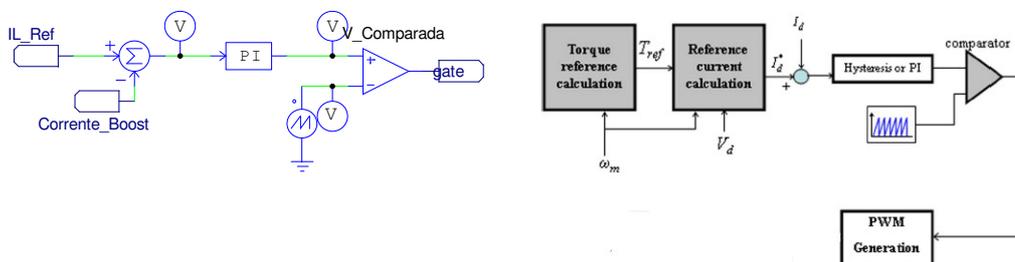
Com o torque de referência mensurado, será criado um sinal de corrente de referência por meio da Equação (12). Nesta corrente o valor de tensão da entrada do conversor boost será medido instantaneamente assim como a velocidade mecânica.

$$I_{ref} = \frac{T_{ref} \cdot \omega_{medida}}{V_{entrada\_Boost}} \quad (12)$$

A corrente de referência gerada pela Equação (12) será então comparada com a corrente (IL) medida no indutor do conversor boost, resultando em uma tensão utilizada pelo controlador proporcional e integral (PI). A comparação entre o sinal do controlador e uma

onda dente de serra produzirá o PWM utilizado no chaveamento do conversor, conforme ilustrado na Figura a seguir. O fluxograma do controle deste trabalho também está ilustrado na figura 5.

Figura 5 - Controle do ciclo de trabalho do Boost.



Fonte: Adaptado de HAQUE, 2010.

## 5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

As simulações do sistema mostrado na Figura 3 foram realizadas utilizando um software de simulação. Os principais dispositivos de conversão de energia utilizados foram parametrizados com as configurações descritas na Tabela 2. Essas informações são fundamentais para a obtenção dos gráficos mostrados a seguir.

Tabela 2 - Parâmetros do conjunto gerador e turbina.

PARÂMETROS DO AEROGERADOR		PARÂMETROS DO GERADOR SÍNCRONO	
Resistência de Armadura	1.1 Ohms	Resistência do Enrolamento	0.5 Ohms
Indutância de Armadura	6.0 mH	Indutância Própria dos Enrolamentos	3.35 mH
Momento de Inércia (J)	0.04160 Kg.m <sup>2</sup>	Momento de Inércia (J)	0.00179 Kg m <sup>2</sup>
Coefficiente de Atrito (B)	0.04160 N.m/(rad/s)	Coefficiente de Atrito (B)	0,04160 N.m/(rad/s)

Fonte: JUNIOR, 2016

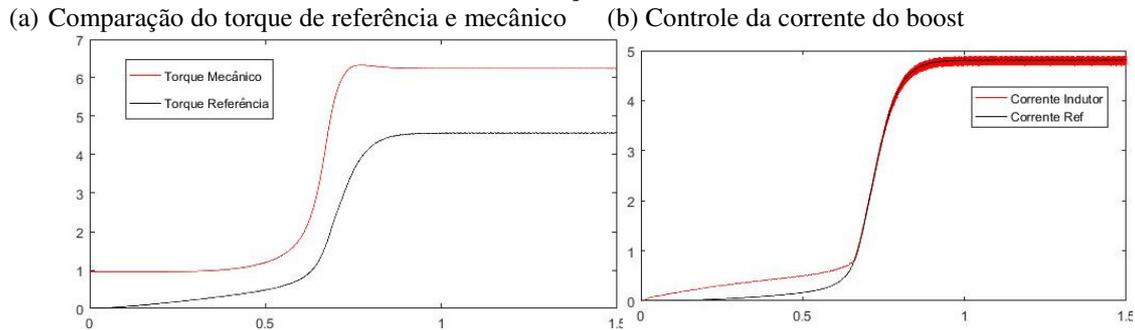
O Gráfico 1-(a) mostra a comparação entre o torque produzido pela turbina eólica e o torque de referência gerado pela Equação (11). Embora exista uma diferença de sinal, a corrente gerada na Equação (12) por meio deste sinal de referência irá corrigir esta discrepância.

Uma vez gerado a corrente de referência, esta será comparada com a corrente lida no indutor do conversor boost, e com o auxílio de um controlador PI será fornecido o sinal de chaveamento (PWM), alterando o ciclo de trabalho do boost, fazendo com que a corrente do indutor se ajuste a corrente de referência, como mostra o Gráfico 1-(b). Desta forma, o WECS irá trabalhar no ponto de máxima potência.

Embora o torque fornecido pela turbina esteja acima da ideal, à maior condução de corrente por parte do conversor irá aumentar o valor do torque elétrico do sistema, diminuindo consequentemente o mecânico, conforme a Equação (13). Assim, a turbina irá ganhar velocidade até que a corrente do indutor se iguale a corrente de referência, ponto este de velocidade máxima.

$$T_a = T_m - T_e = T_j \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (13)$$

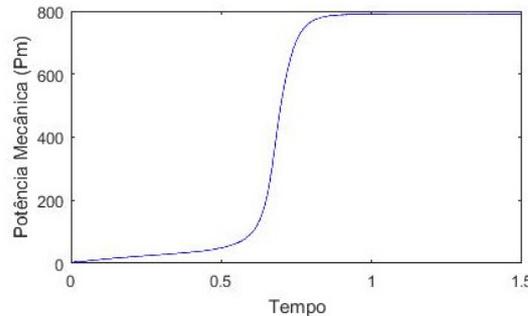
Gráfico 1 – Torque e conversor boost



Fonte: Próprio autor.

Ao atingir o ponto de velocidade máxima, o WECS estará trabalhando no seu ponto de máxima potência. O gráfico 2 mostra o comportamento da potência mecânica fornecida pela turbina até o ponto em que o sistema se estabiliza no máximo ponto de máxima velocidade.

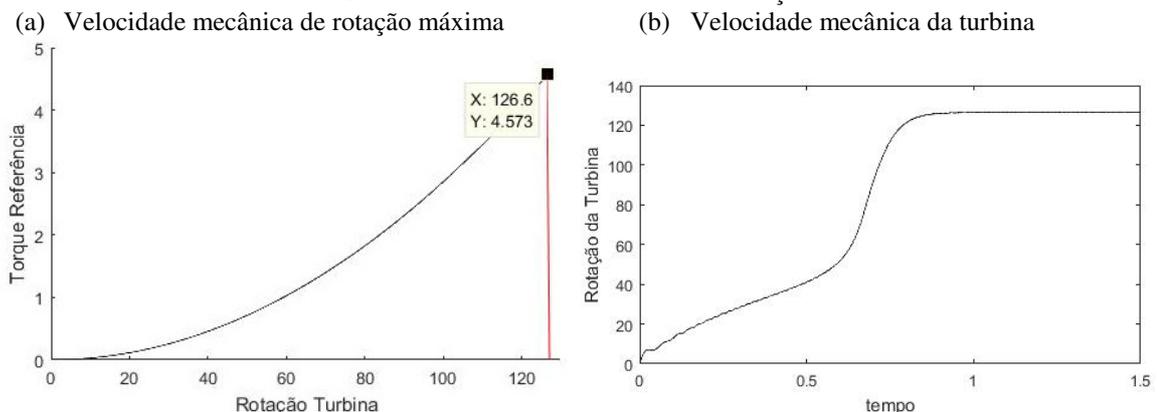
Gráfico 2 - Potência mecânica da turbina



Fonte: Próprio autor.

Ao analisar o Gráfico 3-(a), pode-se medir o valor da velocidade de rotação mecânica máxima que o sistema irá atingir com o valor de torque de referência gerado pela Equação (9). Da figura, os valores máximos de torque e velocidade estão identificados por 4.57 (Nm) e 126.6 (rad/s), respectivamente. Este valor de velocidade máxima pode ser identificado também pelo Gráfico 3-(b), que mostra o comportamento da velocidade mecânica até atingir seu valor máximo que é de 126.6 (rad/s).

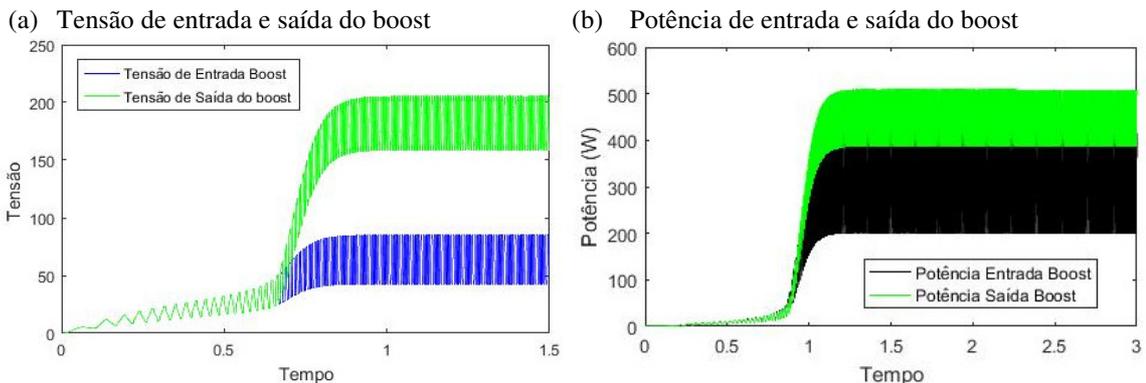
Gráfico 3 - Velocidade mecânica de rotação



Fonte: Próprio autor.

No Gráfico 4-(a) está ilustrado o comportamento das tensões de entrada e saída do boost. Com a alteração do ciclo de trabalho devido à corrente de referência, o conversor atua elevando a tensão em cima da carga, e consequentemente, aumentando a potência entregue a ela, conforme o Gráfico 4-(b).

Gráfico 4 - Análise do conversor boost



Fonte: Próprio autor.

Portanto, o controle do sistema WECS utilizando a metodologia proposta no trabalho está atuando de forma correta, uma vez que tanto as potências como as tensões medidas no boost se comportam de forma constante, após o período de estabilização do sistema.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho utilizou uma topologia bastante disseminada na literatura para estabelecer um modelo para análise de técnicas de MPPT. Para validação da modelagem foi adotado uma técnica de MPPT bastante difundida no meio acadêmico, conhecida como torque ótimo. Essa metodologia se utiliza de conhecimento prévio de alguns parâmetros do sistema eólico, como por exemplo, o coeficiente de potência ( $C_p$ ) e lambda ( $\lambda$ ), para realizar o controle da turbina em busca do ponto máximo de potência.

Ao analisar as figuras fornecidas pelas simulações percebe-se o correto funcionamento do sistema devido à atuação da malha de controle do boost, que tem como característica principal manter um fornecimento de potência constante a carga independentemente das condições externas.

Os próximos trabalhos estão voltados à simulação de diferentes tipos de MPPT para comparação entre as técnicas e propor um algoritmo inteligente que seja mais eficiente que os tradicionais.

## REFERÊNCIAS

ABDULLAH, M. A.; YATIM, A. H. M.; TAN, C. W.; SAIDUR, R. **A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 16, p. 3220– 3227, June 2012.

ABEEólica. **Eólica já é a segunda fonte da matriz elétrica brasileira com 15 GW de capacidade instalada.** Disponível em: <http://abeeolica.org.br/noticias/eolica-ja-e-a-segunda-fonte-da-matriz-eletrica-brasileira-com-15-gw-de-capacidade-instalada/>. Acesso em: 01 abr. 2019.

FERREIRA, R. S.; GUIMARÃES, G. C. **Análise de um sistema de conversão de energia eólica por meio do software Psim.** VIII CEEL, Uberlândia, 2010.

HAQUE, M. E.; NEGNEVITSKY, M.; MUT-TAQI, K. M. **A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine With a Permanent-Magnet Synchronous Generator.** IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, n.1, 2010.

HUI, J.; **An adaptive control algorithm for maximum power point tracking for wind energy conversion systems**, Master's thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2008.

JUNIOR, Jorge Luiz Wattes Oliveira. **Desenvolvimento de plataforma emuladora de turbina eólica para estudos de algoritmos de MPPT eólicos inteligentes**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2016.

LALOUNI, S.; REKIOUA, D.; IDJDARENE, K.; TOUNZI, A. **An improved MPPT algorithm for wind energy conversion system**. Journal of Electrical Systems, pp. 484-494, 2014.

LOPEZ, H. E. M.; **Maximum power tracking control scheme for wind generator systems**, Master's thesis, Texas A&M University, USA, 2007.

PUTRI, R. I.; PUJANTARA, M.; PRIYADI, A.; ISE, T.; PURNOMO, M. H. **Maximum power extraction improvement using sensorless controller based on adaptive perturb and observe algorithm for PMSG wind turbine application**. The Institution of Engineering and Technology, Vol. 12, pp. 455-462, 2018.

SANTOS, Guilherme Vianna. **Sistemas de controle aplicado aerogeradores síncronos com conversor back-to-back**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2015.

SARVI, M.; Sh. Abdi ; AHMADI, S. **A new method for rapid maximum power point tracking of PMSG wind generator using PSO\_fuzzy logic**. Technical Journal of Engineering and Applied Sciences, pp. 1984-1995, 2013.

VIJAYALAKSHMI, S.; GANAPATHY, V.; VI-JAYAKUMAR, K.; DASH, S.S. **Maximum power point tracking for wind power generation system at variable wind speed using a hybrid technique**. International Journal of Control and Automation, Vol. 8, n.7, pp. 357-372, 2015.

## MODELING OF A VARIABLE SPEED WIND TURBINE WITH MPPT CONTROL

**Abstract:** *This job is approached modeling of the wind turbine to software to PSIM for systems and technique. The topology adopted is formed by the turbine, synchronous generator, uncontrolled rectifier, boost converts and the resistive load. The technique is known by the optimal torque. This method uses prior knowledge of some system parameters to generate a reference torque signal. This module and a management of MPPT theory equations will contribute to a reference current, along with the proportional and integral controller (PI) will act on the duty cycle of the boost converter. Thus, although a wind turbine provides a fixed torque for the power generator, a test machine will cause the measurement current to instantaneously not induce the same control of a reference current. In this way, the greater the current conduction by the converter, the greater the mechanical torque supplied and consequently a turbine will have an increase of speed to reach its maximum point. With all, the wind power conversion system (WECS) will act at its maximum power point when a turbine reaches its maximum speed.*

**Key-words:** WECS, MPPT, Torque, Turbine.