

Estudos de algoritmos de MPPT aplicados a sistemas de geração distribuída eólicos

Study of MPPT algorithms applied to wind distributed generation systems

RESUMO

Gabriel Ramos Previero
gabrielpreviero@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Sérgio Augusto Oliveira da Silva
augus@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

A evolução da eletrônica de potência proporcionou o desenvolvimento de novas topologias de sistemas de conversão de energia eólica (SCEE). Os SCEE com conversão de potência, de escala parcial ou total, representaram um aumento significativo na eficiência desses sistemas, uma vez que possibilitou a variação de velocidade de rotação do gerador conectado à turbina eólica (TE). Este controle de velocidade é realizado através de técnicas de MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*). Esses algoritmos de otimização são aplicados no estágio de retificação da energia por meio de informações fornecidas pelo aerogerador, os quais controlam o torque sobre o eixo do gerador, variando sua velocidade de forma indireta. Neste trabalho, um SCEE com conversão de potência de escala total será implementado, cuja topologia se dá por um retificador controlado, responsável por controlar a energia drenada do gerador para a atuação dos algoritmos de MPPT, e um inversor controlado em corrente, que faz interface com a rede trifásica. Para comparação do desempenho do sistema eólico, são empregadas técnicas de otimização heurísticas e metaheurísticas, tais como a P&O (Perturba e Observa), de passo fixo e variável, bem como a *Simulated Annealing* (SA). Os resultados de simulação são apresentados buscando validar os estudos.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas eólicos. Algoritmos de otimização. Técnicas de mppt.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

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

ABSTRACT

The evolution of power electronic provided the development of new wind energy conversion systems (WECS) topologies. WECS with power electronic converters have improved the efficiency of these systems, because allow variable-speed operation of the generator connected to the wind turbine. This speed control is possible through MPPT (Maximum Power Point Tracking) techniques. Optimization algorithms are applied in the rectification power stage based on information provided by the wind turbine. This paper will present a WECS with full power conversion, composed by a controlled rectifier and a current controlled inverter. Some MPPT techniques are applied to improve the wind system performance, such as P&O (Perturb e Observe) and Simulated Annealing (SA).

KEYWORDS: Wind systems. Optimization algorithms. Mppt techniques.

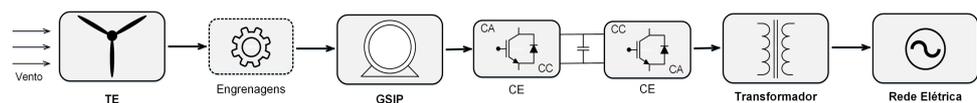


INTRODUÇÃO

Os sistemas de conversão de energia eólica (SCEE) são representados por um conjunto de turbina eólica (TE), capaz de converter a energia cinética do vento em energia mecânica, e um gerador elétrico (GE), responsável pela conversão de energia mecânica entregue pela TE em energia elétrica. Entre a conexão da TE com o GE, em diversos tipos de sistemas, pode ser inserida uma caixa de engrenagens, utilizada para multiplicar a velocidade de rotação da TE (THAKUR, 2016).

Os SCEE com conversão de potência de escala total, cuja topologia pode ser acompanhada pela Figura 1, representaram grande avanço para o seguimento, possibilitando maior eficiência e confiabilidade. Estes sistemas são compostos por dois estágios de conversão de energia, retificação e inversão. O gerador síncrono de ímã permanente (GSIP) é comumente utilizado, devido a presença de múltiplos polos, tornando assim a caixa de engrenagens não obrigatória (BARROS *et al.*, 2015; CAIXETA, 2011).

Figura 1 – Topologia de um SCEE de velocidade variável com conversão de potência de escala total equipado com GSIP.



Fonte: Autoria própria (2020).

METODOLOGIA E ESTRATÉGIA DE CONTROLE

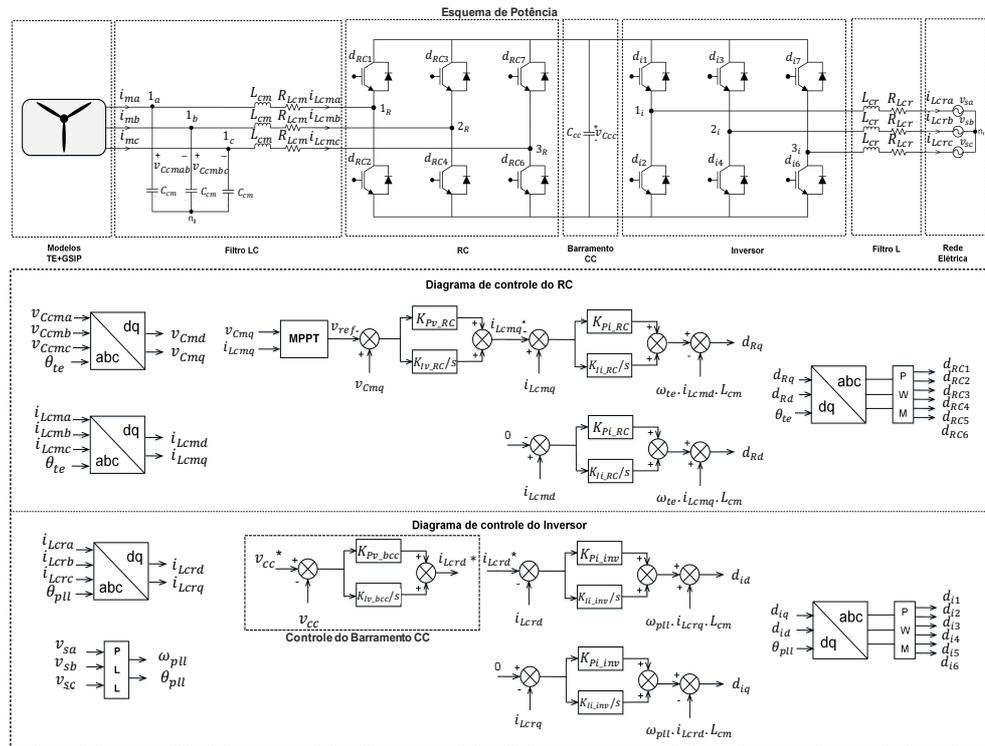
Na Figura 2 estão apresentados o esquema de potência, o qual abrange conversores de potência, filtros passivos e o aerogerador, bem como os diagramas de controle do retificador controlado, do inversor e do barramento CC. O TE/GSIP são implementados por modelos matemáticos como disponível em (WOLLZ, 2018).

O conversor conectado a máquina (CCM), representado pelo retificador controlado (RC), através do sistema de controle baseado em controladores do tipo PI (Proporcional-Integral), controla o conjugado aplicado ao rotor do gerador, gerenciando as correntes extraídas do mesmo. Esta orientação que indica a variação de torque sobre o eixo do GE é obtida através das técnicas de MPPT.

Os algoritmos de otimização de rastreamento do MPP (do inglês, *Maximum Power Point*) atuam com base no cálculo da potência elétrica média. Como pode ser observado pelo diagrama de controle do RC, as tensões e correntes de saída do modelo do conjunto TE/GSIP são transformadas do referencial estacionário *abc*, através do ângulo θ_{te} , conforme velocidade do rotor do GE. Essa transformação de eixos, além de facilitar o cálculo do algoritmo de MPPT, também se faz necessária devido ao fato de erros nulos em regime permanente serem, em teoria, garantidos pelos controladores PI para variáveis contínuas.

Por sua vez, o conversor conectado a rede (CCR), dado por um inversor, é responsável por controlar as correntes injetadas, de forma que estas estejam em conformidade com os parâmetros da rede elétrica a que o sistema eólico está conectado. Esse sincronismo é realizado a partir de um algoritmo de detecção do ângulo de fase da rede elétrica (PLL, do inglês, *Phase Locked Loop*).

Figura 2 – Topologia do SCEE empregada.



Fonte: Autoria própria (2020).

ALGORITMOS DE MPPT APLICADOS A SISTEMAS EÓLICOS

A potência entregue pelo aerogerador depende diretamente da força do vento. Sendo assim, para cada velocidade do vento existem uma faixa de rotação do eixo do gerador e, conseqüentemente da TE, em que a potência mecânica é máxima, expondo a necessidade de se aplicar os algoritmos de MPPT em sistemas eólicos. Neste trabalho três técnicas de MPPT foram empregadas.

O algoritmo P&O, é um método de otimização baseado na aplicação de uma perturbação no sistema, e, através da comparação de sua resposta instantânea com a resposta da iteração anterior, de forma a aumentar ou decrementar a variável de referência de controle de acordo com um passo de incremento (ABDULLAH, 2012). O passo utilizado foi de 3V. Usualmente, no método P&O é usado um passo fixo de perturbação, porém, passos variáveis podem ser aplicados para melhorar o desempenho do algoritmo. Desta forma, esta técnica passa a ser denominada como P&O modificado, ou de passo variável (BRITO *et al.*, 2010). O fluxograma dos algoritmos citados pode ser observado através da Figura 3.

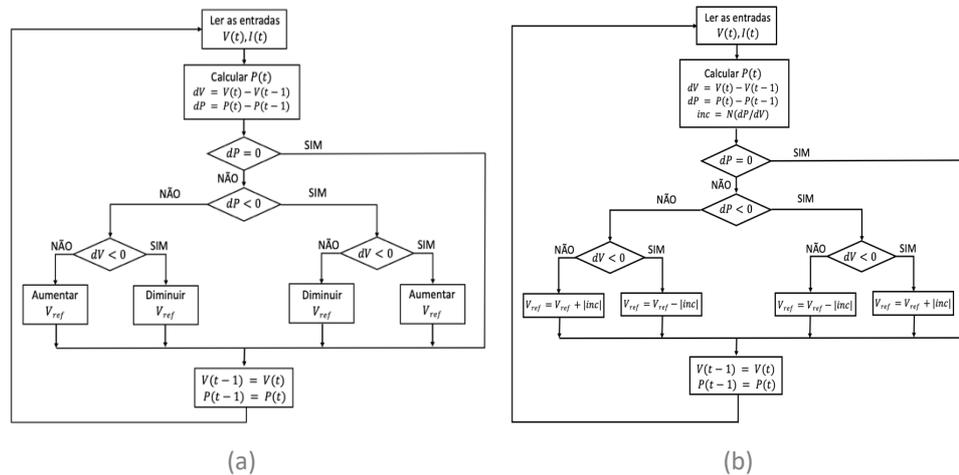
O *Simulated Annealing*, ou método do arrefecimento simulado, é baseado no resfriamento de materiais, onde o estágio ideal de resistência é obtido através de um processo gradual de resfriamento (CHAVES, 2016). Na Figura 4, seu comportamento é observado através de um fluxograma.

Para simular o resfriamento dos materiais, com o decorrer das iterações do algoritmo, a temperatura inicial é gradativamente reduzida, como pode ser observado pela Eq. (1), de acordo com o coeficiente α , evidenciado na Eq. (2) (GOLDBARG, 2016). Quando o sistema apresenta temperatura longe do seu estado

final, há grande possibilidade de serem considerados casos de piora. Essa consideração auxilia na não estabilização em máximos locais, Eq. (3) (FAN, 2016).

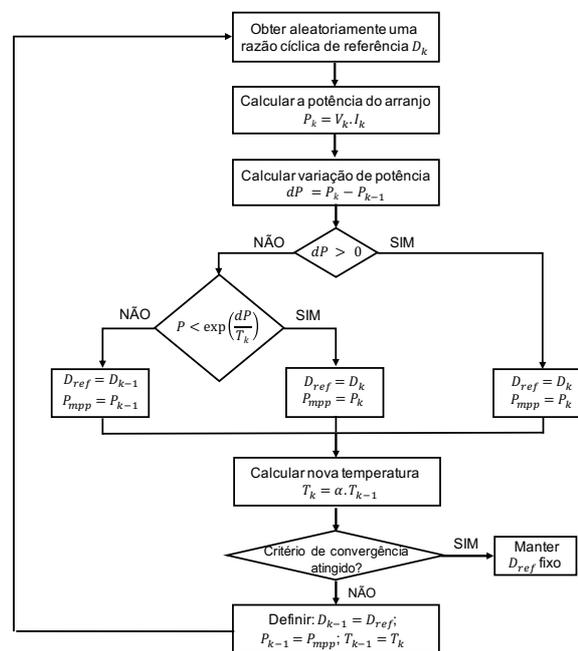
Portanto, basicamente o SA necessita da definição das temperaturas inicial e final do sistema, e β (parâmetro que ajusta o coeficiente de arrefecimento). Neste trabalho foram usados respectivamente, 25°, 0,1° e 0,4.

Figura 3 – Fluxograma do algoritmo: (a) MPPT-P&O (b) MPPT-P&O modificado.



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 4 – Fluxograma do algoritmo MPPT-SA.



Fonte: Autoria própria (2020).

$$T_k = \alpha T_{k-1} \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{1}{1+\beta} \tag{2}$$

$$P = \exp\left(\frac{P_k - P_{k-1}}{T_k}\right) \tag{3}$$

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os resultados que serão apresentados nesta seção são simulações realizadas utilizando a ferramenta computacional Simulink/Matlab. Para a obtenção dos resultados foram utilizados os seguintes parâmetros como descritos na Tabela 1 para o conjunto aerogerador e demais elementos passivos do sistema, bem como os dados referentes aos algoritmos de MPPT. Na Figura 5 está a curva de potência do aerogerador obtida com os parâmetros utilizados na simulação.

Tabela 1 – Parâmetros do conjunto aerogerador e elementos passivos do sistema.

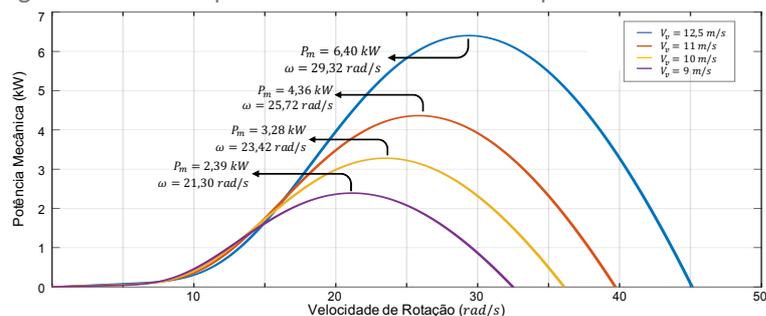
Parâmetro de simulação	Valor atribuído
Velocidade nominal do vento	$V_V = 12,5 \text{ m/s}$
Potencia elétrica nominal	$P_e = 6 \text{ kW}$
Resistência do estator do GSIP	$R_{est} = 0,4 \Omega$
Número de polos do gerador	$P = 18$
Número de pás da turbina	$N_p = 3$
Momento de Inércia do conjunto	$J = 0,8 \text{ kg.m}^2$
Capacitor de Filtragem	$C_{cm}, C_{cr} = 60 \mu\text{F}$
Indutores de Filtragem	$L_{cm}, L_{cr} = 1,5 \text{ mH}$
Resistencia Série dos Indutor de Filtragem	$R_{Lcm}, R_{Lcr} = 0,22 \Omega$
Tensão do Barramento CC	$V_{CC} = 530 \text{ V}$
Frequência de chaveamento	$f_s = 20 \text{ kHz}$
Frequência dos algoritmos de MPPT	$f_{MPPT_P\&O} = 10 \text{ Hz},$ $f_{MPPT_P\&Omod} = 8 \text{ Hz},$ $f_{MPPT_SA} = 2 \text{ Hz}$

Fonte: Autoria própria (2020).

Inicialmente é aplicado $V_V = 12,5 \text{ m/s}$, a fim de se analisar o sistema sob condições nominais de operação. São impostas posteriormente $V_V = 9 \text{ m/s}$ e $V_V = 11 \text{ m/s}$, buscando avaliar as respostas dinâmicas do sistema. Nas Figuras 6 e 7 podem ser observados os comportamentos das potências mecânicas e elétricas do GSIP, e tensão de referência dos algoritmos de MPPT obtidos em simulação, respectivamente. Resultados adicionais são dispostos numericamente na Tabela 2.

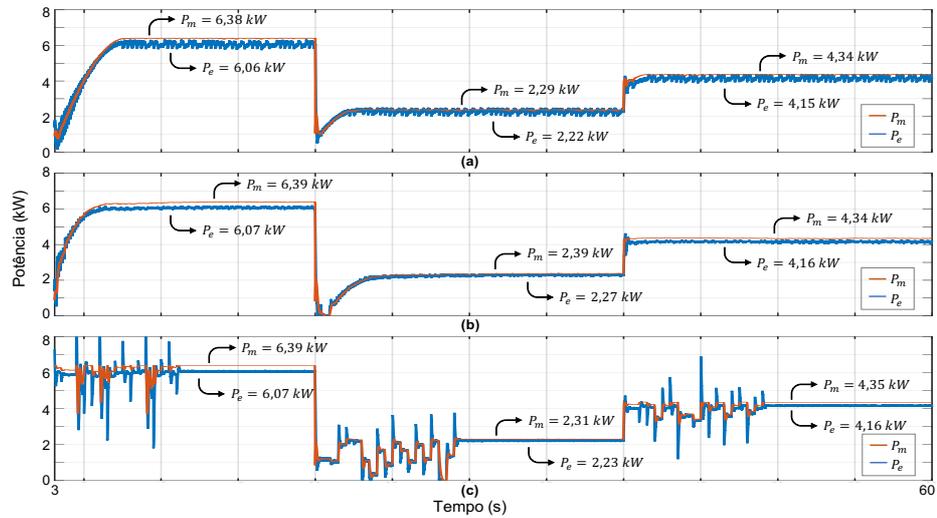
Na Figura 8 estão mostrados os comportamentos em regime das correntes injetadas na rede. Pode-se observar de acordo com as taxas de distorção harmônica (TDH), Tabela 3, que esta é reduzida de acordo com que se diminui a oscilação das referências em regime permanente fornecidas pelos algoritmos.

Figura 5 – Curva de potência da TE obtida com os parâmetros informados.



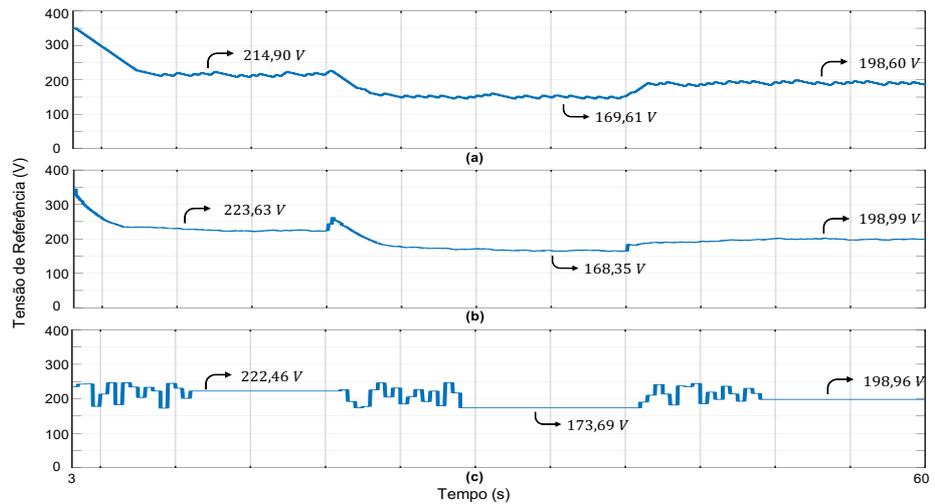
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 6 – Potência mecânica e elétrica de saída do gerador sob variações do perfil da velocidade do vento para o algoritmo: (a) P&O; (b) P&O modificado; (c) SA.



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 7 – Tensão de referência sob variações do perfil da velocidade do vento gerada pelo algoritmo: (a) P&O; (b) P&O modificado; (c) SA.



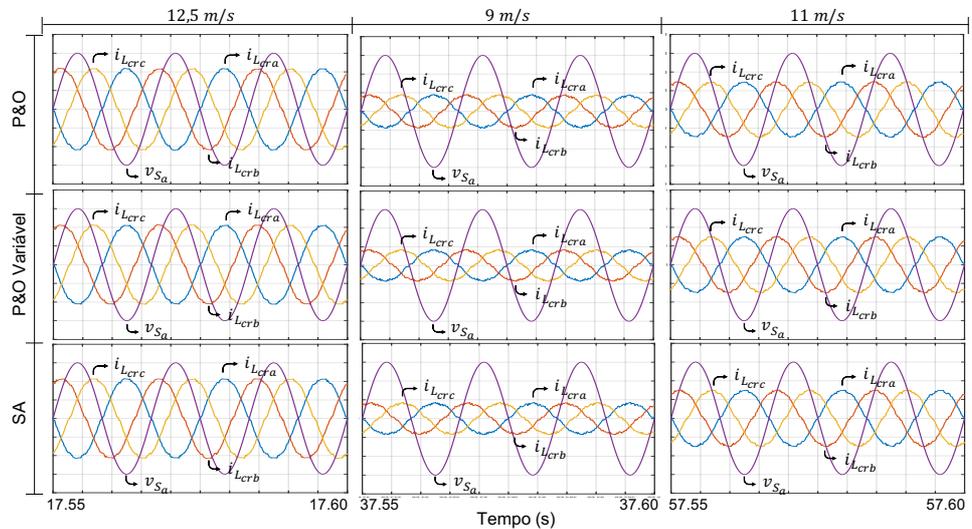
Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 2 – Resultados de simulação obtidos para variações na velocidade do vento.

Técnica MPPT	Velocidade do Vento (V_v)	Oscilação em Regime Permanente (%)	Velocidade de Rotação (rad/s)
P&O	12,5 m/s	8,01	29,12
	9 m/s	19,28	22,62
	11 m/s	10,86	26,70
P&O Modificado	12,5 m/s	3,45	30,14
	9 m/s	8,54	22,50
	11 m/s	5,22	26,74
SA	12,5 m/s	2,06	30,01
	9 m/s	6,34	23,14
	11 m/s	2,52	26,64

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 8 - Comportamento da corrente de fase injetada na rede (i_{Lcra} , i_{Lcrb} , i_{Lcrc}) e tensão da rede elétrica da fase 'a' (v_{sa}) sob variações do perfil da velocidade do vento (10A/div, 50V/div).



Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 3 – Taxas de distorção harmônica das correntes injetadas na rede.

Técnica MPPT	Grandeza	$V_v = 12,5 \text{ m/s}$	$V_v = 9 \text{ m/s}$	$V_v = 11 \text{ m/s}$
P&O	I_{Lcra}	3,36%	6,79%	4,23%
	I_{Lcrb}	3,36%	6,78%	4,23%
	I_{Lcrc}	3,34%	6,79%	4,22%
P&O Modificado	I_{Lcra}	3,13%	6,48%	4,01%
	I_{Lcrb}	3,13%	6,51%	4,02%
	I_{Lcrc}	3,11%	6,49%	4,01%
SA	I_{Lcra}	3,07%	6,32%	3,95%
	I_{Lcrb}	3,09%	6,36%	3,96%
	I_{Lcrc}	3,08%	6,32%	3,97%

Fonte: Autoria própria (2020).

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a aplicação e análise, através de simulações computacionais, de técnicas de MPPT aplicadas em um sistema de conversão de energia eólica com conversão de potência de escala total.

Os três algoritmos testados foram capazes de rastrear o ponto de máxima potência mesmo em caso de degraus abruptos de perfil da velocidade do vento, os quais indicam condições atípicas quando comparado a situações reais. Portanto, uma vez provado que é possível rastrear o MPP em condições extremas, conclui-se que este sistema seria eficiente em aplicações reais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UTFPR e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro oferecido (processo 126425/2019-1).

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, Majid A. *et al.* A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3220-3227, 2012.

ANGÉLICO, Bruno A.; CAMPANHOL, Leonardo BG; DA SILVA, Sérgio A. Oliveira. Proportional–integral/proportional–integral–derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram. **IET Power Electronics**, v. 7, n. 10, p. 2647-2659, 2014.

BRITO, M. A. G. D., JUNIOR, L. G., SAMPAIO, L. P., CANESIN, C. A., Avaliação das principais técnicas para obtenção de mppt de painéis fotovoltaicos. *In: IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 9., 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: INDUSCON, 2010, p. 1-6.

BLAABJERG, F.; MA, K.. Wind energy systems. **Proc. IEEE**, v. 105, n. 11, p. 2116-2131, 2017.

CAIXETA, D. A.; GUIMARÃES, G. C.; CHAVES, M. L. R.; OLIVEIRA, J. C. de; BONELLI, A. F. Maximização da potência de uma turbina eólica de velocidade variável considerando o efeito da inércia. *In: CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA*, 9., 2011, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: CEEL, 2011, v. 1. p. 1-6.

CHAVES, E. N.; REIS, J. H.; COELHO, E. A. A.; FREITAS, L. C. G.; VIEIRA JUNIOR, J. B.; L. C. FREITAS. Simulated annealing mppt in partially shaded PV systems. *Revista IEEE América Latina*, v. 14, p. 235-241, 2016.

DUTRA, R. **Energia eólica: princípios e tecnologia**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2008. 58p.

FAN, Y. *et al.* An improved simulated annealing maximum power point tracking technique for PV array under partial shading conditions. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS*, 18., 2016, Karlsruhe. **Anais...** Karlsruhe: EPE'16 ECCE, 2016, p. 1-8.

GOLDBARG, M.C.; GOLDBARG, E.G.; LUNA, H.P.L. **Otimização combinatória e metaheurísticas: algoritmos e aplicações**. Rio de Janeiro: Campus, 2016. 416 p.

HEIER, S. **Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems**. 1 ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 1998.

HEYDARI, Elahe; VARJANI, Ali Y. A new variable step-size P&O algorithm with power output and sensorless DPC method for grid-connected PV system. *In: INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS, DRIVE SYSTEMS AND TECHNOLOGIES CONFERENCE*, 10., 2019, Shiraz. **Anais...** Shiraz: PEDSTC, 2019, p. 545-550.

PREVIERO, Gabriel Ramos. **Implementação de Algoritmos de Otimização Heurísticos no Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em um Sistema de Geração Distribuída Eólico Conectado à Rede Elétrica Trifásica**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

ROSETO, Camilo J. Chaves. **Análise de um Sistema de Geração Composto por Turbinas Eólica e Submarina**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

YARAMASU, V. *et al.* High-power wind energy conversion systems: state-of-the-art and emerging technologies. **Proc. IEEE**, v. 103, n. 5, p. 740-788, 2015.

SLOOTWEG, J. G.; POLINDER, H.; KLING, W. L. Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations. **IEEE Transactions on energy conversion**, v. 18, n. 4, p. 516-524, 2003

DEVASHISH, A Thakur, PANIGRAHI, S., BEHERA, R. R. A review on wind energy conversion system and enabling technology. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL POWER AND ENERGY SYSTEMS*, 14., 2016, Bhopal. **Anais...** Bhopal: ICEPES, 2016, pp. 527-532.

WOLLZ, Danilo Henrique. **Desenvolvimento de um Emulador Eólico Eletrônico Baseado no Modelo Dinâmico do Gerador Síncrono de Imã Permanente**. Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.