

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE TÉCNICA DE MPPT APLICADA NA GERAÇÃO EÓLICA

A.P. Andrade, J.P. Oliveira, L.P. Moura, I.N. Santos

Núcleo de Redes Elétricas Inteligentes e de Qualidade de Energia

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia-MG

alissonpda@gmail.com; jp.oliveira.itba@gmail.com; leandropm91@gmail.com; ivan@ufu.br

Resumo— O aumento da capacidade de geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, com destaque para a fonte eólica, cria a necessidade de realização de estudos que façam análises relacionadas com as influências da inserção desta fonte alternativa nas redes elétricas. Tem-se também como importante a otimização do aproveitamento eólico no que tange à extração de potência dos ventos. Nesse contexto, destacam-se as técnicas de extração da máxima potência, ou MPPT, as quais são utilizadas para aumentar o rendimento dos aerogeradores. Assim, o presente artigo é direcionado para a análise de uma técnica MPPT voltada para sistemas de geração eólica à máquina síncrona e conversores plenos, visando estudos de desempenho da filosofia de controle adotada diante de distintas situações de funcionamento.

Palavras-chave — Geração Eólica, Fontes Renováveis, Modelagem Computacional, Técnicas de MPPT.

IMPLEMENTATION AND ANALYSIS OF THE MAIN MPPT TECHNIQUE APPLIED IN THE WIND GENERATION

Abstract- The increasing electricity generation from renewable sources, mainly wind and photovoltaic, needs studies regarding to the integration of these technologies to the interconnected system and improve the viability of these forms of energy generation in the country. The MPPT techniques are ways to increase the yield of wind turbines, bringing the ability to transform the kinetic energy present in the air masses in electricity. In this paper, it is intended to implement computationally the main MPPT technique commercially found in Full Converters arrangements and conduct performance analysis studies of the same on different operating situations.

Keywords—Boost Converter, Modeling, MPPT Techniques, Renewable Generation, Wind Generation.

I. INTRODUÇÃO

Percebe-se atualmente um aumento acentuado no uso de energia proveniente de fontes renováveis, dentre as quais tem-se destacado, sobremaneira, a geração eólica de energia elétrica.

Vale ressaltar que a geração eólica encontra-se inserida no contexto da busca por meios de geração de energia de características renováveis tendo em vista a sustentabilidade ecológica, social e energética. Temas estes que, no cenário atual, têm ganhado importância e têm sido adotados como norteadores das políticas públicas em todo o mundo [12].

Essas fontes de energia, no sistema elétrico brasileiro, diferente da geração hidrelétrica ou mesmo termelétrica, possuem grandes variações de potência ao longo do período de geração e, sendo assim, não é possível realizar o controle da fonte primária de energia assim como é feito em usinas hidrelétricas, por exemplo. Isto posto, torna-se necessário estratégias que contornem tal problemática [6].

No que tange à energia eólica, a adequação da fonte primária (vento) se dá através de diferentes estratégias, as quais serão apresentadas na sequência. Não obstante a isto, é importante ressaltar que a extração de potência do vento possui um ponto ótimo de funcionamento do ponto de vista da potência extraída, o qual pode ser alcançado pelo chamado rastreamento do ponto de máxima potência que, em inglês, é definido por *Maximum Power Point Tracking* – MPPT [5].

Neste contexto, o presente informe técnico pretende apresentar as distintas estratégias de MPPT e, complementarmente, realizar a implementação computacional daquela que for julgada a mais adequada para a geração eólica de arranjo com topologia *Full Converter*. A implementação será realizada em um *software* no domínio da frequência e servirá para eventuais avaliações de desempenho.

II. SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

O princípio de funcionamento da geração de energia elétrica através de energia eólica é a de conversão da energia cinética dos ventos em potência por turbinas eólicas. Neste contexto, é importante destacar conceitos estabelecidos pelo físico alemão Albert Betze, de que o máximo de extração de energia mecânica advinda da energia cinética presente nas massas de ar é de 59,3% [10].

A geração eólica segue, atualmente, via de regra, duas metodologias de conversão mecânica-elétrica a saber: sistema DFIG de geração e a arranjo *Full Converter* de conversão [1]. O primeiro tipo baseia-se na utilização de um gerador de indução (assíncrono), cujo estator é conectado à rede elétrica, geralmente através de um transformador. Com o intuito de controlar a velocidade do rotor do gerador, conecta-se um conversor tipo *back-to-back* ao mesmo. Esta topologia de geração encontra-se ilustrada na Fig. 1 [11].



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

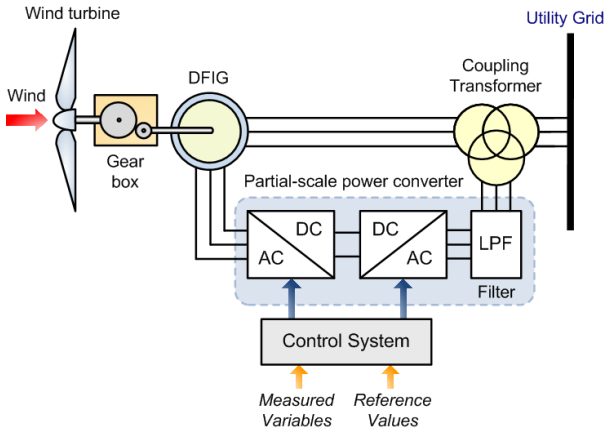


Fig. 1. Topologia DFIG de geração eólica.

Já a segunda topologia de geração eólica é conhecida por *Full Converter*. A mesma utiliza geradores síncronos de rotor bobinado ou de ímã permanente, sendo este último mais comumente empregado. A topologia geral consiste deste gerador conectado a um retificador não controlado, um conversor DC-DC e um inversor para conexão do conjunto com a rede elétrica [7]. A Fig. 2 apresenta uma visão geral deste arranjo [1].

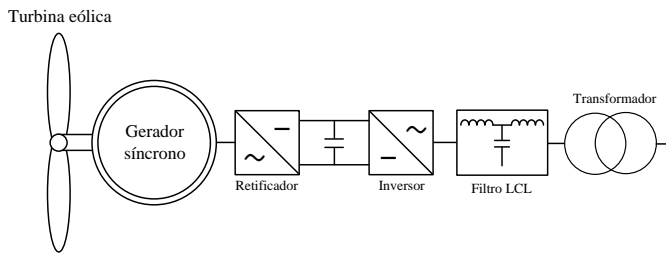


Fig. 2. Topologia *Full Converter* de geração eólica.

Os dois procedimentos de geração eólica diferem-se principalmente pela potência a qual os conversores estão sujeitos: na topologia DFIG os conversores são dimensionados considerando cerca de 30% da potência nominal dos geradores, enquanto na topologia *Full Converter*, considera-se uma potência igual ou superior à 100%.

No presente trabalho investigativo será considerado tão somente geração *Full Converter*. Tal opção foi realizada por ser esta uma topologia de forte uso no Brasil [2]. Neste sentido, na sequência, segue um maior detalhamento deste sistema de geração.

III. TOPOLOGIA *FULL CONVERTER*

Na topologia *Full Converter*, a primeira etapa após a conversão mecânica-elétrica realizada pela máquina síncrona é a retificação, a qual tem como objetivo converter tensões com amplitudes e frequências variáveis em um elo de corrente contínua.

Uma segunda etapa de transformação é a conversão CC-CC. Esta conversão faz uso de um conversor *boost* ou *buck*. O principal objetivo desta etapa é a extração da máxima potência do sistema (MPPT).

Uma terceira etapa de conversão é a inversão do sinal CC em CA. Esta etapa faz uso de um inversor de frequência para converter tensão e corrente, que estavam na forma contínua, em alternadas com a mesma frequência da rede elétrica. Tal processo em geral utiliza de um controle de conversão trifásico vetorial [3].

No trabalho ora realizado, apresenta-se um estudo focado na etapa de conversão CC-CC, conforme já mencionado, ou seja, nos métodos e procedimentos destinados à extração da máxima potência do sistema de geração eólica. Neste sentido, com o intuito de aprimorar o rendimento de um aerogerador na conversão de energia foram desenvolvidos distintos métodos de controle para a extração da máxima potência. Dentre as principais estratégias, pode-se citar: *Hill Climb Search* (HCS), *Tip Speed Ratio* (TSR), e *Power Signal Feedback* (PSF) [4].

O HCS baseia-se em encontrar o ponto máximo global da função de C_p (coeficiente de potência) em relação à velocidade do rotor. Este C_p é uma relação entre a potência elétrica gerada (potência útil) e a potência do vento incidente nas pás do aerogerador (potência total), conforme será melhor explanado no próximo subitem. Este método utiliza do fato de que a função C_p tem apenas um ponto máximo local, ponto que corresponde ao valor zero para a derivada da equação.

O segundo método, TSR, adequa a velocidade do rotor do gerador para a velocidade em que o coeficiente de potência C_p seja o ótimo. Como desvantagem apresentada pelo método está a necessidade de monitorar a velocidade do vento e de rotação da turbina, o que eleva os custos da execução do projeto [4].

O terceiro método a ser citado é o PSF, o qual consiste na utilização de um torque elétrico ótimo como referência, alterando a velocidade do rotor a fim de se obter o torque elétrico próximo do torque elétrico ótimo. O fator limitante desse método é a necessidade de se conhecer as características do gerador e da turbina para ajuste das malhas de controle [9].

Neste contexto, os estudos apresentados no presente trabalho serão conduzidos fazendo uso do método PSF, uma vez que este é o método mais comumente empregados nos sistemas de geração eólica.

IV. PRINCIPAL TÉCNICA DE MPPT APLICADA NA GERAÇÃO EÓLICA DE ENERGIA

A turbina eólica não é capaz de converter toda a energia advinda das massas de ar, ou seja, a energia mecânica gerada no eixo da turbina será menor do que a disponível pelo vento. A razão entre estas duas potências é denominada Coeficiente de Potência. Este coeficiente, representado pela equação (1), quantifica a eficiência da turbina eólica em converter a energia cinética presente no vento em energia mecânica.

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_v} = \frac{\text{Potência extraída pela turbina}}{\text{Potência disponível no vento}} \quad (1)$$

Onde: P_{mec} é a potência mecânica extraída pela turbina e P_v é a potência disponível no vento.

O coeficiente de potência também pode ser determinado em função de alguns parâmetros construtivos da turbina [3]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad (2)$$

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

$$\lambda = \frac{\omega_{turbina} R}{v_1} \quad (4)$$

Onde: λ é a razão da velocidade da pá; λ_i é uma constante auxiliar para o cálculo do C_p ; β é o ângulo de passo das pás da turbina; $\omega_{turbina}$ é a velocidade da pá da turbina; R é o raio da turbina e v_1 é a velocidade média do vento.

A representação gráfica de C_p em função da velocidade do rotor está ilustrada na Fig. 3 [4].

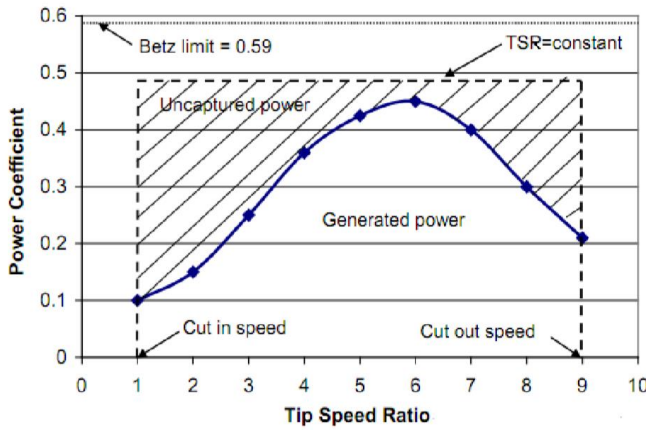


Fig. 3. Gráfico de C_p em função da razão da velocidade do rotor.

Vale salientar que a potência disponível no vento é dada pela expressão [8]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v_1^2 \quad (5)$$

Onde: ρ é a densidade do ar seco ($1,225 \text{ kg/m}^3$) e A é a área de varredura do rotor em m^2 . Já a potência extraída pela turbina pode ser apresentada como se segue:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p \rho A v_1^3 \quad (6)$$

Uma vez conhecida a potência mecânica máxima que pode ser extraída do vento, considerando uma determinada velocidade do vento, estima-se a velocidade ótima de rotação da turbina eólica, velocidade que maximizará o coeficiente de potência para a condição imposta pelo vento. Para variação da velocidade da turbina, faz-se necessária a alteração do conjugado eletromagnético do gerador, conforme apresentado na equação (7):

$$T_{mec} - T_{ele} = J \frac{d\omega_{turbina}}{dt} \quad (7)$$

Onde: T_{mec} é o torque mecânico no eixo da turbina; T_{ele} é o torque eletromagnético gerado pelo gerador e J é a inércia das pás da turbina.

O torque ou conjugado eletromagnético, por sua vez, pode ser controlado indiretamente através do controle da corrente do estator do gerador, papel que é desempenhado pelo conversor *boost*. A corrente de referência para o controle do conversor *boost*, a qual garante um máximo C_p para a dada condição de vento, depende de características do sistema de geração e pode estimada através da equação (8).

$$I_{cc,ref} = \frac{T_{ele-otimo}}{3n_p \lambda_{d,est}} \quad (8)$$

Onde: $I_{cc,ref}$ é a corrente de referência usada para o controle de MPPT; $T_{ele-otimo}$ é o torque elétrico para C_p máximo; n_p é o número de polos do gerador; $\lambda_{d,est}$ é o fluxo de eixo direto do gerador.

O torque elétrico ótimo pode ser calculado por [3]:

$$T_{ele-otimo} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p-otimo}}{\lambda_{otimo}} \omega_{turbina}^2 \quad (9)$$

Onde, $C_{p-otimo}$ é o coeficiente de potência máximo da turbina eólica e λ_{otimo} é a razão de velocidade das pás.

Portanto, o conversor *boost* irá agir de maneira a garantir uma corrente de referência no estator do gerador, a qual levará à um C_p ótimo relacionado à máxima extração de potência para as condições atuais de operação do aerogerador.

V. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DE MPPT EM UM SIMULADOR NO DOMÍNIO DO TEMPO

Nesta etapa dos desenvolvimentos foi realizada a implementação do controle de MPPT escolhido no simulador *Matlab*. O modelo computacional do sistema de geração eólica utilizado nas análises de desempenho é constituído de: representação do vento, modelo equivalente da turbina eólica, gerador síncrono de ímã permanente, retificador não controlado e, evidentemente, o conversor *boost* juntamente com sua malha de controle, conforme apresentado pela Fig. 4. Vale ressaltar que o sistema de inversão empregado em sistemas de geração reais não foi contemplado nesse estudo, uma vez que o mesmo não tem influência significativa nos resultados.

Vale ressaltar que a única parte não implementada do aerogerador, neste arranjo, foi seu sistema de inversão para conexão à rede elétrica. Tal implementação não foi feita devido o foco deste informe técnico ser a análise do sistema de MPPT. Na Figura 5 tem-se destacado as conexões gerais do circuito de MPPT implementado neste trabalho.

Na sequência será desenvolvida uma aplicação do arranjo eólico ora implementado com uma respectiva análise de desempenho do sistema de MPPT.

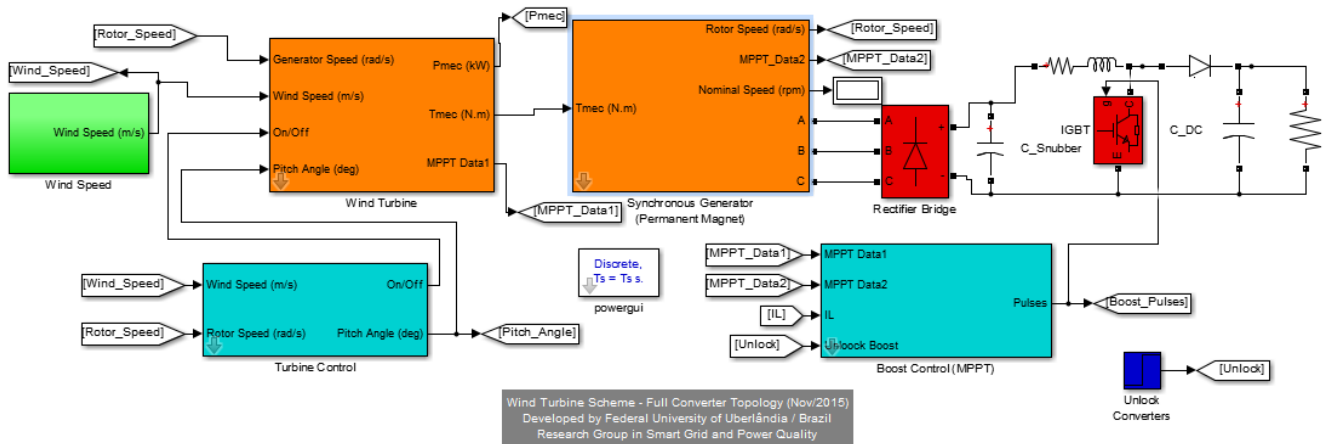


Fig. 4. Modelagem do sistema eólico de topologia *Full Converter* no *Matlab*.

VI. ESTUDOS DE CASO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DO ARRANJO IMPLEMENTADO

Uma vez realizada a modelagem computacional do conversor *boost* e do respectivo controle MPPT, os quais foram implementados no *Matlab/Simulink*, tem-se nesta seção a avaliação da modelagem via de estudos de casos.

Serão realizados três estudos de caso, a saber:

- Caso 1: arranjo de geração eólica sem controle de MPPT;
- Caso 2: arranjo de geração eólica com controle de MPPT e potência entregue no elo CC inferior à máxima potência;
- Caso 3: arranjo de geração eólica com controle de MPPT e potência entregue no elo CC próximo da máxima potência.

Vale lembrar que a máxima potência é aquela alcançada quando o aerogerador está operando próximo ao coeficiente de potência ótimo.

Para os estudos computacionais, considerou-se um aerogerador *Full Converter* de 1MW, cujos principais parâmetros estão destacados na Tabela I.

TABELA I. PARÂMETROS DO AEROGERADOR

TURBINA EÓLICA	Raio(m)	40
	Velocidade Nominal (m/s)	12
	Velocidade Cut in (m/s)	3
	Velocidade Cut Out (m/s)	25
GERADOR SÍNCRONO TRIFÁSICO	Tensão Nominal (V)	690
	Potência nominal (MVA)	1
	Número de polos	120
	Frequência Nominal (Hz)	17
	Reatância de eixo direto (pu)	0,68
	Reatância de eixo em quadratura (pu)	0,60
	Reatância transitória de eixo direto (pu)	0,248
	Reatância subtransitória eixo direto (pu)	0,184
	Reatância transitória eixo quadratura (pu)	0,10
	Reatância de dispersão (pu)	0,01
	Reatância do estator (pu)	0,013
Inércia conjunto gerador e turbina (Kg.m ²)	50000	

Complementarmente, tem-se um conversor *boost* que utiliza uma chave IGBT, um indutor de 1,2 mH, um diodo e um capacitor de saída de 90 mF. A carga que receberá a

energia gerada será uma resistência, cujo valor é definido na sequência.

Ressalta-se, ainda, que todas as simulações foram feitas durante um intervalo de 25 s, que o passo de integração aplicado é de 50 μ s e que a condição de vento atribuída foi a de um vento base de 11 m/s durante todo período de simulação.

A. Caso 1: arranjo eólico sem MPPT

Uma vez realizada a simulação computacional, têm-se, na sequência, os gráficos resultantes para a Caso 1. A resistência representativa do carregamento, a qual está conectada na saída do elo CC, é de 1,8 ohm.

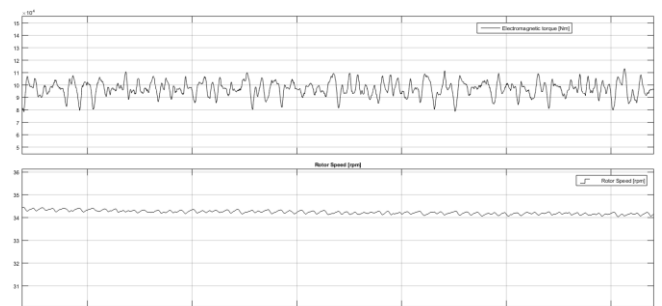


Fig. 6. Torque elétrico e velocidade do rotor – Caso 1.

Verifica-se uma velocidade constante de aproximadamente 34,8rpm, enquanto o torque também se mantém constante em aproximadamente 110kN.m. Já na Figura 7 destaca-se o comportamento do coeficiente de potência.

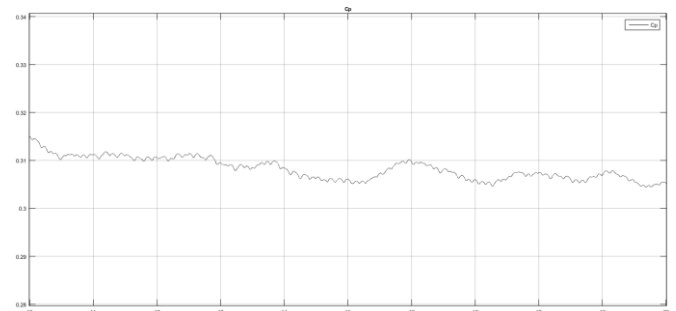


Fig. 7. Comportamento de C_p – Caso 1.

O coeficiente de potência apresenta pequenas variações em torno de 31%. Na Figura 8 é mostrado o gráfico da potência elétrica de saída do elo CC ao longo do tempo. Percebe-se que a mesma se mantém constante em cerca de 450kW.

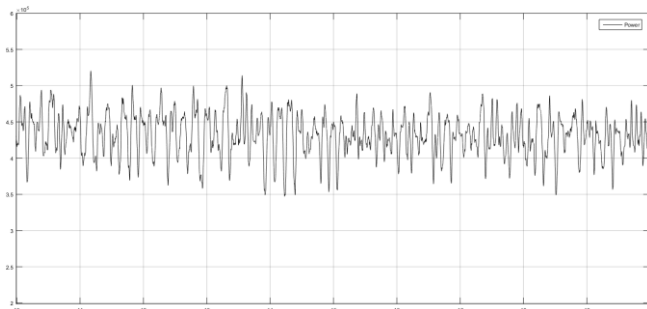


Fig. 8. Potência elétrica injetada no elo CC – Caso 1.

B. Caso 2: arranjo eólico com MPPT operando em um ponto de baixo coeficiente de potência

Neste estudo, chamado de Caso 2, manteve-se o mesmo valor de resistência representativa do carregamento.

Os gráficos aqui apresentados seguem a mesma lógica adotada para a Caso 1. Vale ressaltar que o controle do MPPT é ativado a partir do instante 15s. Isto é válido tanto para a Situação 2 como para a Caso 3.

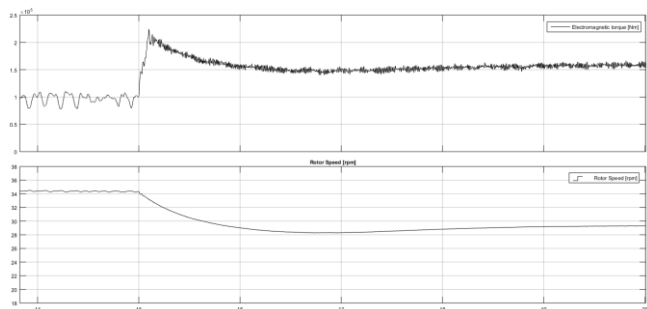


Fig. 9. Torque elétrico e velocidade do rotor – Caso 2.

Nota-se que o torque se estabiliza após o desbloqueio do conversor *boost* (MPPT) em torno de 160kN.m, enquanto a velocidade caía para aproximadamente 29,3rpm.

O comportamento do coeficiente de potência, apresentado na Figura 10, mostra-se superior em relação à situação anterior, alcançando um patamar de aproximadamente 43,4%.

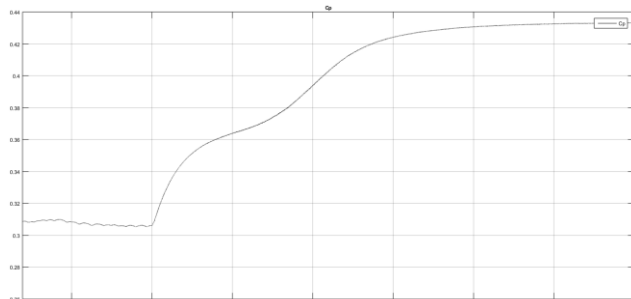


Fig. 10. Comportamento de C_p – Caso 2.

Por fim, tem-se na Figura 11 um gráfico da potência elétrica da saída do elo CC ao longo do tempo, no qual pode-se

observar uma elevação da mesma para um nível em torno de 600kW. Isto, é claro, após sua estabilização.

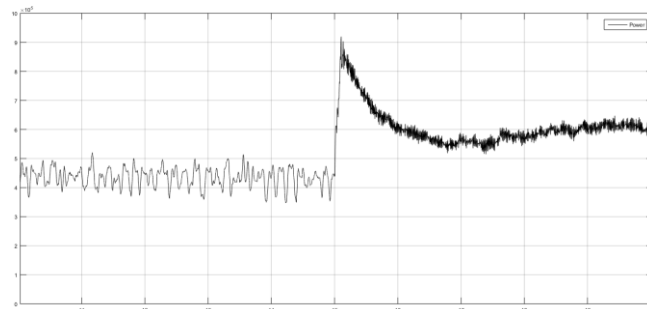


Fig. 11. Potência elétrica injetada no elo DC – Caso 2.

C. Caso 3: arranjo eólico com MPPT operando em um ponto de alto coeficiente de potência

Nesta situação, a resistência foi alterada para um valor representativo de um elevado coeficiente de potência mesmo na ausência de MPPT, adotando-se para tanto 1,3ohm.

Fica evidenciado, por meio da Figura 12, um ligeiro aumento do torque elétrico – estabilizando-se em torno de 170kN.m, enquanto a velocidade cai para 29,5rpm, após, é claro, a ativação do sistema MPPT.

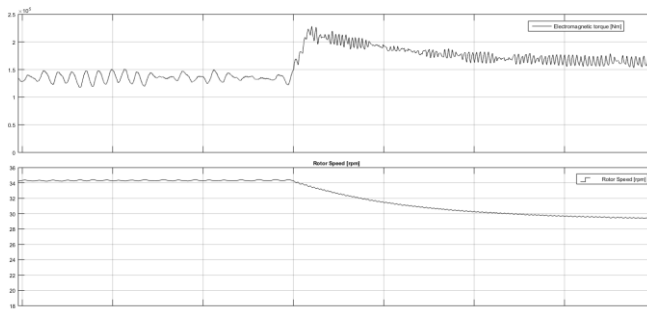


Fig. 12. Torque elétrico e velocidade do rotor – Caso 3.

No que se refere ao coeficiente de potência, para esta situação, verifica-se, após estabilização, uma manutenção do mesmo em cerca de 43,3%.

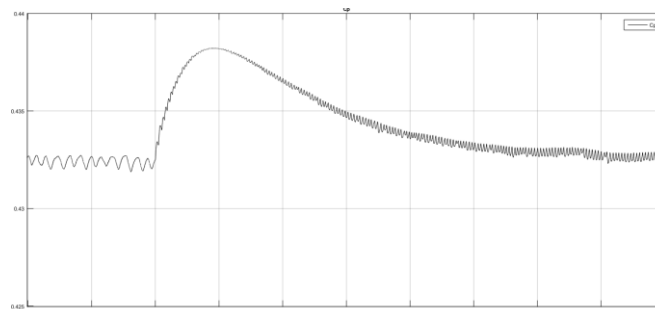


Fig. 13. Comportamento de C_p – Caso 3.

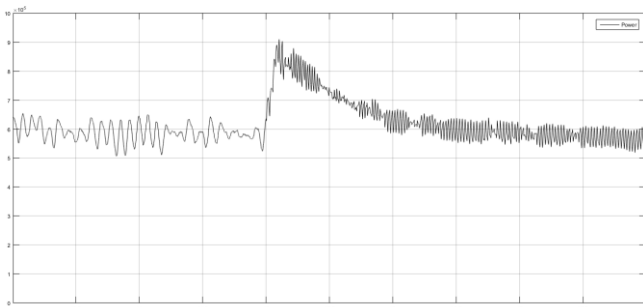


Fig. 14. Potência elétrica injetada no elo CC – Caso 3.

Na figura 14, potência elétrica injetada no elo CC, observa-se que praticamente não houve variação perceptível da potência de saída com a aplicação do MPPT, mantendo-se a mesma em torno $600kW$.

Diante dos resultados obtidos com a implementação computacional do sistema eólico, pode-se afirmar:

- Em todas as situações impostas os sistemas simulados resultaram em valores coerentes com o aerogerador utilizado e as condições de vento estabelecidas.
- Na Caso 1 não foi percebida qualquer variação significativa nos índices selecionados para análise, conforme já era esperado, uma vez que não teve atuação do MPPT.
- Na Caso 2 verificou-se, com a atuação do MPPT, uma elevação do torque elétrico, coeficiente de potência e potência elétrica disponibilizada. Por outro lado, houve uma diminuição da velocidade do rotor. Estes valores quando comparados à Caso 1 (sem MPPT) evidenciam uma sensível melhora da eficiência do sistema de geração eólica, elevando a potência de cerca de $450kW$ para algo em torno de $600kW$.
- Vale ressaltar, para o caso 2, que o aumento do torque elétrico em detrimento à diminuição da velocidade do rotor deve-se ao fato que a elevação do torque elétrico representa uma oposição ao torque mecânico da máquina síncrono, o que, por sua vez, faz com que haja uma desaceleração da mesma. Isto está matematicamente correlacionado pela Equação (7). Por fim, a elevação do torque elétrico, nesta situação, ocorre devido ao aumento da corrente provocado pela atuação do MPPT.
- Na Caso 3, onde foi colocada uma condição de carga cujo o valor já levava à um alto coeficiente de potência, observou-se uma pequena variação nos indicadores de corrente e torque elétrico. Contudo, a potência manteve-se a mesma independentemente da atuação do MPPT. Nesta situação, o MPPT não trouxe ganhos significativos.

VII. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentado a principal estratégia para maximização do rendimento da turbina eólica nomeado *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) para um gerador *Full Converter*. Ademais, foi discutido matematicamente e fisicamente a metodologia do PSF (*Power Signal Feedback*), demonstrando através de equações, o funcionamento do PSF

no sistema eólico e suas consequências esperadas com as principais grandezas envolvidas no sistema.

Por fim, realizou-se um estudo de caso por meio de simulações implementadas no software *Matlab/Simulink*, sendo utilizado um sistema eólico de arranjo *Full Converter* de geração e lógica PSF de extração da máxima potência. A apresentação dá-se de como o aspecto físico do sistema foi transferido para o *software* e as suas devidas características. Este estudo de caso gerou diversos resultados relacionados à aplicação do MPPT. Estes resultados, por sua vez, enfatizaram as vantagens e limitações (quando da ocorrência próximo ao C_p máximo) da aplicação da técnica de rastreamento de máximo ponto de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressão seus agradecimentos ao CNPQ (Proc. 460208/2014-4) e à FAPEMIG (Proc. TEC-APQ-02447-15) pelo suporte financeiro concedido via Projetos de Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] A. F. Bonelli. “Modelagem e Simulação de Unidade Eólica para Estudos de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica”. Dissertação (Mestrado)- FEELT, UFU, Uberlândia, 2010.
- [2] J. M. V. S. Reis. “Comportamento dos Geradores Eólicos Síncronos com Conversores Diante de Curto-Circuitos no Sistema”. Dissertação (Mestrado)- Coppe, UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.
- [3] A. Reis. “Uma Contribuição para o Controle Operativo de Unidades Eólicas: Modelagem, Regulação de Tensão e Minimização dos Harmônicos”. Dissertação (Mestrado)- FEELT, UFU, Uberlândia, 2014.
- [4] S. S. Mali, B. E. Kushare. “MPPT Algorithms: Extracting Maximum Power from Wind Turbines”, Research Assistant, Electrical Engineering Department, IIT Bombay, Índia, 2013.
- [5] J. S. Thongam, M. Ouhrouche. “MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems”, University of Quebec at Chicoutimi, Quebec, Canada.
- [6] G. L. Xavier. “Avaliação de desempenho da estratégia de representação laboratorial de turbinas eólicas utilizando motores de indução controlados”. Dissertação (Mestrado)- FEELT, UFU, Uberlândia, 2012.
- [7] P. A. B. Block, F. S. Retorta, D. B. Dahlke, M. D. Teixeira. “Estudo Comparativo do Desempenho harmônico de aerogeradores”, Institutos Lactec, Curitiba, Paraná, 2015.
- [8] J. Hui, “An Adaptive Control Algorithm for Maximum Power Point Tracking for Wind Energy Conversion Systems”, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada, 2008.
- [9] G. N. Ram, A. Kiruthiga, Dr. J. D. Shree, “A Novel Maximum Power Point Tracking System for Wind-Energy-Conversion System using Particle Swarm Optimization”, IJERT, Vol. 3 Issue 2, February – 2014
- [10] M. Ragheb, “Wind Energy Conversion Theory, Betz Equation”, 2014.
- [11] A. L. Tsuchida, “Aspectos Metodológicos Acerca da Modelagem de Turbinas Eólicas”, USP, São Carlos, 2012.
- [12] J. L. C. Cruz, “Geração distribuída”, O Setor Elétrico, edição 93, outubro de 2013.