

Controle Direto de Potência do Gerador de Relutância variável utilizando PI Auto-ajustável

Elmer O. Hancoco Catata.*, Gloria Milena Vargas Gil, Luque, D. B.,
A. J. Sguarezi Filho, Carlos Eduardo Capovilla, A.L.L.F.Murari, J. L. Azcue-Puma.

Pos-graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do ABC - UFABC
Santo André, São Paulo, Brasil

Resumo—Neste trabalho, é proposto um sistema de conversão de energia eólica utilizando Geradores de Relutância Variável. O GRV é resistente, de configuração simples e durável, e apresenta um excelente desempenho e alta eficiência. Considerando as características não lineares do GRV pode-se aplicar algoritmos de controle inteligente baseado em redes neurais ou controladores Fuzzy com o propósito de superar as limitações dos algoritmos de controle convencional como o controlador proporcional integral (PI).

O controle de potência do GRV é realizado através de um controlador PI auto-ajustável e seus ganhos serão ajustados utilizando controladores Fuzzy a fim de melhorar o desempenho do controlador. A saída do controlador PI auto-ajustável é o ângulo θ_{off} , este ângulo determina a largura do pulso de habilitação na qual os enrolamentos do gerador são energizados através de um controlador de corrente por histerese. A potência gerada é injetada na rede elétrica por meio do conversor eletrônico de potência utilizando a técnica de controle vetorial por orientação da tensão. O sistema proposto foi validado através de simulações realizadas no software de simulação computacional *SimPowerSystems*® do *Matlab/Simulink*®.

Keywords: Gerador de relutância variável, PI auto-ajustável, controle vetorial por orientação da tensão, lógica fuzzy.

I. INTRODUÇÃO

Os geradores de relutância variável (GRV) caracterizam-se pela ausência de enrolamentos no seu rotor, apenas os enrolamentos do estator são excitados na sua operação. Neste tipo de máquinas o conjugado é produzido pelo alinhamento dos polos, devido ao fluxo produzido pelas correntes no estator. Esta estrutura permite um alto desempenho em aplicações de alta velocidade. Devido a estas características os GRVs tornam-se uma alternativa apropriada para sistemas de geração eólica comparados aos outros tipos de geradores convencionais [1] [2].

Das várias estratégias de controle para o GRV existentes na literatura, o GRV neste trabalho é controlado através dos ângulos de habilitação θ_{on} e θ_{off} . Estes ângulos são escolhidos de forma que a máquina de relutância variável opere na região de geração, isto é quando a indutância está no setor de inclinação negativa $dL/d\theta < 0$. O controle é aplicado no ângulo θ_{off} e o ângulo θ_{on} se mantém num valor constante.

O GRV tem uma estrutura duplamente saliente e excessiva saturação magnética. A relação do fluxo, indutância, e torque são altamente dependentes da posição do rotor e da corrente

de fase, por tanto todas estas características introduzem não linearidades no modelo do GRV.

Esta característica não linear torna difícil alcançar um desempenho satisfatório de controle usando métodos tradicionais de controle, por exemplo, os controladores proporcional integral (PI), proporcional integral derivativo (PID) não conseguem atender adequadamente as demandas de referência no estado estacionário. Por tanto, é importante introduzir uma estratégia de controle eficaz para atender as demandas da referência e também promover a aplicação do GRV [3] [4].

A Lógica Fuzzy (LF) tem sido amplamente estudada e utilizada para controlar sistemas não-lineares como no acionamento de sistemas elétricos e diferentes sistemas de controle. Os controladores fuzzy baseiam suas regras na expertise do especialista, portanto não é necessário um modelo preciso da planta sob controle. No [5] [6] [7] a LF mostra um melhor desempenho quando comparado com os controladores lineares convencionais em termos de tempo de resposta, tempo de estabilização, e robustez.

Esta proposta utiliza a lógica fuzzy para ajustar os ganhos do controlador PI. O controlador PI auto-ajustável é encarregado de controlar a potência gerada pelo GRV, a mesma que será transferida para o barramento CC, assim, a tensão no barramento CC será proporcional à potência fornecida pelo GRV. A potência disponível no barramento CC é injetada à rede elétrica através de um inversor trifásico de dois níveis. O controle de este inversor é realizado através da técnica de controle por orientação da tensão (VOC) na referência síncrona, que permite controlar as potências ativa e reativa de forma independente.

Apesar de todas as características vantajosas do GRV para sua aplicação em sistemas de conversão de energia eólica (WECS), o GRV não foi amplamente utilizado em aplicações de energia eólica, devido às dificuldades na implementação de controladores com desempenho satisfatório, porém neste trabalho procura-se melhorar o desempenho com a utilização da LF.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Na [Figura 1] é mostrado o diagrama esquemático do sistema de geração eólica conectado à rede elétrica utilizando

o gerador de relutância variável. O sistema é composto por dois conversores de potência. O conversor conhecido como conversor meia ponte assimétrica ou *AHB* (*Asymmetric Half Bridge*) responsável por acionar o GRV, e o conversor do lado da rede que é o encarregado de injetar a potência gerada para à rede elétrica. Também entre os conversores de potência é conectado um banco de capacitores com o objetivo de diminuir o ripple da tensão no barramento CC.

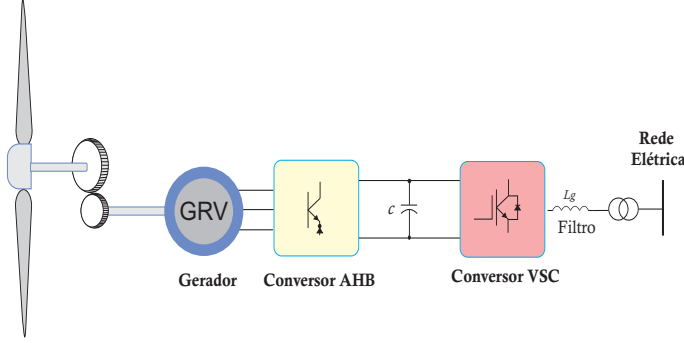


Figura 1. 1. Esquema do sistema de conversão de energia eólica utilizando o gerador GRV

A. Condição de geração do GRV

O GRV possui um bobinado no estator e a excitação é realizada pela combinação de pulsos nos enrolamentos do estator, pulsos que são aplicados em períodos do tempo estabelecidos pelos ângulos de habilitação em sincronia com o perfil das indutâncias, em intervalos de habilitação dado pelos ângulos $\theta_{on}-\theta_{off}$. Inicialmente o capacitor é carregado com uma tensão de 100v para iniciar a excitação do estator e posteriormente o barramento CC fornece energia para os enrolamentos do estator, esta fase é denominada de excitação como se mostra na [Figura 2]. Quando $dL/d\theta > 0$ perto da posição de alinhamento da fase do rotor com o estator começa a excitação da fase, por tanto a corrente é crescente. Quando o rotor atinge o ângulo $\theta = \theta_{off}$ a inclinação da indutância é negativa ($dL/d\theta < 0$), por tanto, o GRV começa a absorver a energia mecânica e transfere para o barramento CC através dos diodos do conversor AHB, por tanto as chaves do conversor AHB deverão estar desligadas [5] [8].

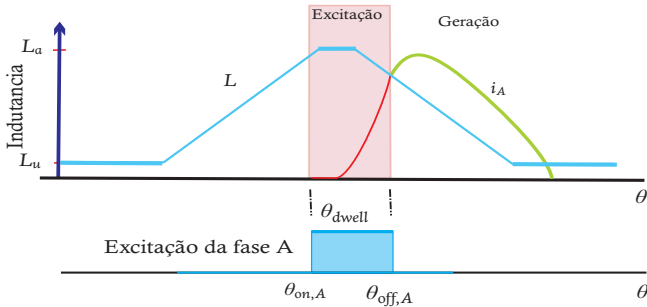


Figura 2. Forma de onda da corrente de fase no GRV

III. MODELADO DO SISTEMA

A. Modelo Dinâmico do Gerador

A máquina de relutância variável utilizada neste trabalho tem 6 polos no estator e 4 polos no rotor. As equações que caracterizam a máquina podem ser derivadas desconsiderando as indutâncias mútuas entre as fases. A tensão numa fase é igual à soma da queda de tensão no resistor e a derivada do fluxo que depende da corrente e posição do rotor [9]:

$$V = R_s \cdot i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

Sendo que R_s é a resistência por fase, λ é o fluxo concatenado por fase dada por:

$$\lambda = L(\theta, i)i \quad (2)$$

Sendo L a indutância dependente da posição do rotor e da corrente da fase. Por tanto, a tensão na fase é

$$v = R_s i + \frac{d\{L(\theta, i)i\}}{dt} = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (3)$$

A equação para o modelo mecânico da máquina é dada pela seguinte equação:

$$T_{emg} = T_{mec} + D \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

O torque eletromagnético T_{emg} é obtido através da co-energia W_{co} :

$$W_{co} = \int_0^i \lambda(\theta, i) di \quad (5)$$

$$T_{emg} = \frac{\delta W_{co}}{\delta \theta} = \frac{\partial \int_0^i \lambda(\theta, i) di}{\partial \theta} \quad (6)$$

A máquina de relutância variável possui características não lineares devido a saturação magnética nos polos. As características de magnetização da máquina podem ser obtidos através da análise por elementos finitos ou alternativamente pode ser calculada a partir da abordagem analítica, isto para se obter o modelo não linear da máquina capaz de reproduzir o seu comportamento real.

B. Modelagem da Turbina Eólica

A Equação (7) define a potência contida nos ventos ou a potência mecânica extraída do vento. Onde ρ é a densidade de massa do ar, $A = \pi R^2$ é a área varrida pela turbina e V_v é a velocidade do vento. A função $C_p(\lambda, \beta)$ é chamada coeficiente de potência e é inferior a 0,593 (limite de Betz), β e λ são o ângulo de inclinação da pá e a razão entre a velocidade de ponta de pá e a velocidade do vento, respectivamente. [10]

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_v^3 \quad (7)$$

A relação da velocidade tangencial na ponta de pá e a velocidade angular da turbina é definido como:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_t}{V v} \quad (8)$$

Sendo R o raio da turbina e ω_t a velocidade angular do rotor. Parte da potência do vento será transformada em potência mecânica no eixo da turbina eólica, por tanto, tem-se torque e rotação no eixo [11].

A função $C_p(\lambda, \beta)$ que depende de β e λ é expressado como:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(-\frac{C_5}{\lambda_i}\right) + C_6\lambda_i \quad (9)$$

Na qual, os coeficientes $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ dependem das características aerodinâmicas da turbina eólica.

Da Equação (7), tem-se que a potência mecânica gerada pela força do vento depende principalmente do coeficiente de potência C_p , considerando o ângulo de ataque da pá como máximo $\beta = 0$, tem-se que o coeficiente de potência é máximo C_{pmax} .

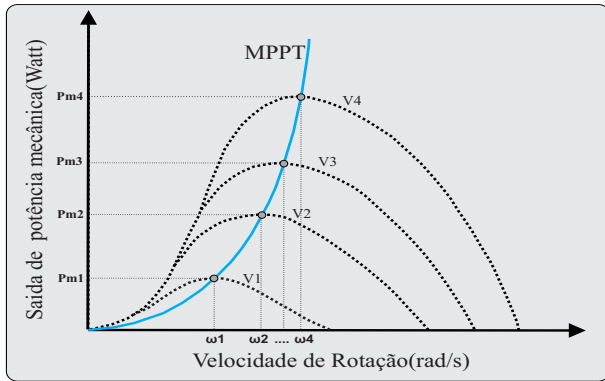


Figura 3. curvas de potência mecânica extraída do vento

Na [Figura. 3] mostra-se as curvas de extração de potência máxima do vento considerando o ângulo de controle *pitch* igual a zero $C_p(\lambda, \beta = 0)$, λ por tanto deve ser ajustado a λ_{opt} , onde C_{pmax} é o valor de pico de $C_p(\lambda)$ que é, $C_{pmax} = C_p(\lambda_{opt})$. Sob estas condições, tem-se

$$k_{opt} = \frac{0.5\rho AR^3\omega_b^3 C_{pmax}}{N^3 P_b \lambda_{opt}^3} \quad (10)$$

que dependem das características da turbina. Assim, um algoritmo para encontrar o ponto de máxima potência cumpre que [12]: (1) o torque da turbina deve mudar em relação ao quadrado da velocidade do rotor e (2) tem de assegurar que a relação entre a velocidade da turbina e a velocidade do vento é tal que $\lambda = \lambda_{opt}$.

Os dois objetivos são realizados se a seguinte relação é aplicada à máquina: [11]

$$P_{opt} = K_{opt} \cdot \omega_t^3 \quad (11)$$

C. Controlador PI Auto-ajustável Baseado em Lógica Fuzzy

Considerando as condições para que o GRV opere como gerador, e as características da turbina eólica, é proposto o controle direto de potência através do controlador PI auto-ajustável baseado em lógica fuzzy.

1) *Estrutura de auto-ajuste do controlador PI*: A LF tem sido amplamente estudado e utilizado para controlar sistemas não-lineares. A LF toma decisões que dependem mais da expertise do especialista do que de modelos analíticos e equações matemáticas. Portanto, a LF não exige um modelo preciso da planta e pode ser projetado com base nas informações linguísticas. Além disso, a LF no geral mostra melhor desempenho do que os controladores lineares convencionais em termos de tempo de resposta, tempo de estabilização, e robustez [5].

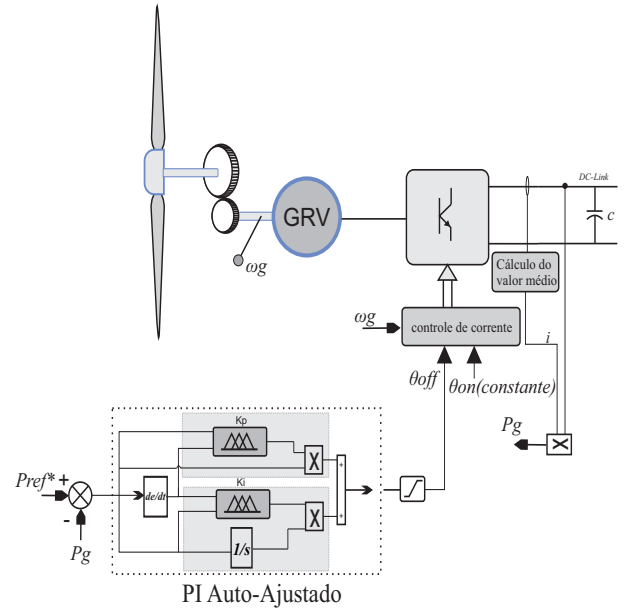


Figura 4. Esquema de controle do gerador GRV

Na [Figura 4] mostra-se o diagrama em blocos do sistema proposto com o controlador PI auto-ajustável, onde os ganhos K_p, K_i são ajustados usando inferências fuzzy proveniente de um mapeamento não linear do erro e a variação do erro para os ganhos do controlador PI [13]. Em cada ciclo de controle os ganhos são recalculados e posteriormente multiplicados aos fatores respectivos do controle. A LF pode alcançar maior adaptabilidade, isto é, o controlador terá um melhor desempenho para uma ampla gama de variações de carga, independentemente do modelo impreciso da planta. Os controladores tem como entradas o erro e a variação do erro da potência gerada pelo gerador, a qual é obtida através da comparação com a potência de referência. O processo de fuzzificação é realizada utilizando funções de pertinência triangulares para ambas entradas, erro e a variação do erro.

2) *Estimativa do modelo*: As regras e faixas de entrada dos ajustadores estão baseadas nas características do sistema e as

propriedades de controlador PI. O modelo da máquina que relaciona o ângulo θ_{off} e a potência gerada foi obtido através de uma técnica de estimação, para isso foi utilizado como entrada um sinal senoidal de varias frequências [Figura 8], com uma taxa de amostragem de 0.01 milissegundos, como é mostrado na [Figura 5]. As amostras são utilizados para estimar e validar o modelo. Todos os procedimentos de estimação são realizadas usando Matlab.

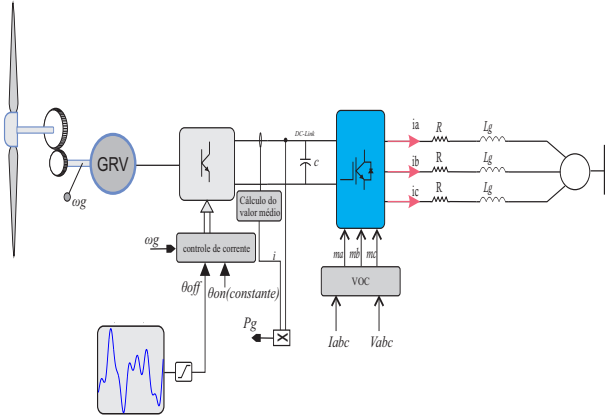


Figura 5. Sistema para a identificação

Foi selecionado uma estrutura de tipo função de transferência discreta para estimar o modelo do sistema. Uma vez determinada a função de transferência procedeu-se a ajustar os ganhos do controlador PI.

3) *Projeto do controlador PI auto-ajustável*: As especificações dos sistemas, tais como tempo de subida, tempo de estabelecimento e o tempo de erro de estado estacionário podem ser melhorados por meio do ajuste dos parâmetros Kp e Ki do controlador PI.

Os intervalos do erro e a derivada do erro foram estabelecidos no universo de discurso $[-0.1$ a $+0.1]$, como mostrado na [Figura 6(2)] e da mesma forma para as saídas dos auto-ajustados Kp' e Ki' no universo $[0$ a $1]$, como é mostrado na [Figura 6(3)].

Na saída os ganhos estimados são parametrizados com base na simulação do controlador PI, de forma a obter um intervalo adequado para os ganhos. Assim, obtém-se: $Kp = 0.0015 * Kp' + 0.00010$ e $Ki = 0.1 * Ki' + 0.010$.

Na [Figura 6(1)] mostra-se os termos linguísticos de entrada associadas ao erro e a variação do erro como NG, NP, Z, PP, PG que são definidas para as duas entradas, que representam: negativo grande, negativo pequeno, zero, positivo pequeno e positivo grande, respectivamente.

Na [Figura 6(3)] tem-se as funções de pertinência e os termos linguísticos, estes termos linguísticos são PP, PM, PC, PG, P que representam o Positivo Pequeno, Positivo Médio, Positivo Centro, Positivo Grande e Positivo, respectivamente. Finalmente, se obtém as saídas dos ajustadores fuzzy através do processo de defuzzificação.

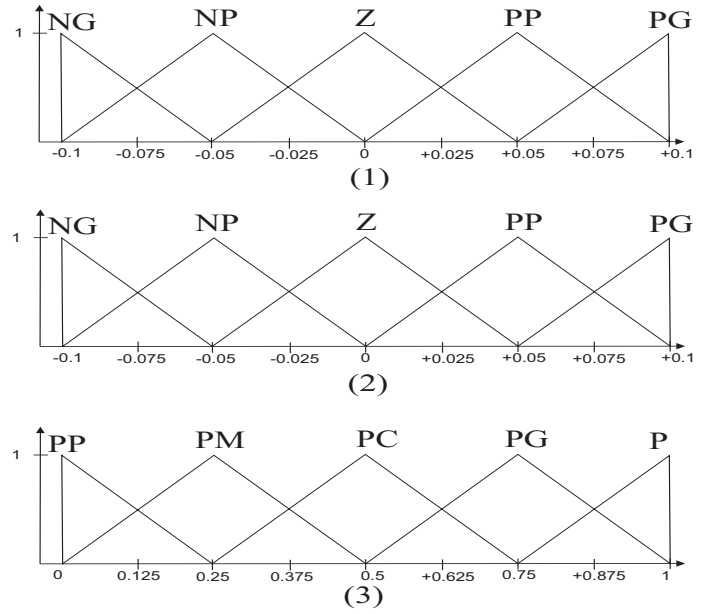


Figura 6. funções de pertinência do controlador auto-ajustável

D. Controle do Inversor Conectado à Rede Elétrica

O inversor conectado à rede elétrica pode ser controlado através de varias estratégias de controle. O método que será utilizado neste trabalho é conhecido como controle orientado pela tensão (VOC), este método é ilustrado na [Figura 7]. Este esquema de controle é implementado no sistema de referência síncrono dq . Na qual todas as variáveis são sinais contínuas em regime permanente. isso facilita o projeto de controle. [14]

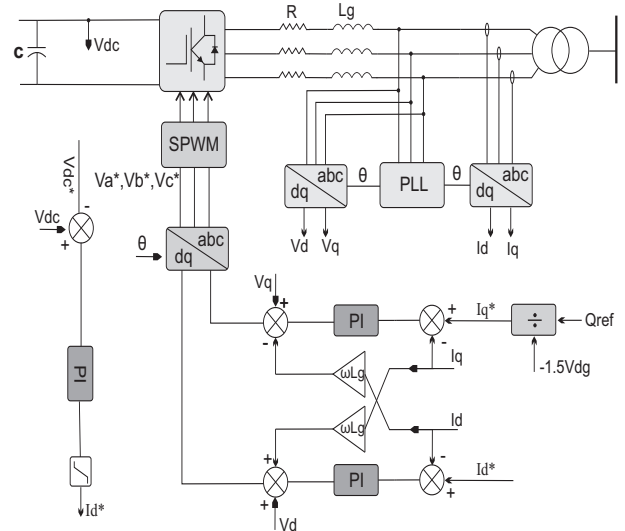


Figura 7. Diagrama de blocos do controle vetorial para o conversor conectado à rede elétrica

O controle VOC é realizado medindo a tensão da rede elétrica para determinar o ângulo θ_r de fase da rede, utilizando o método *phase - lockedloop* (PLL). Este ângulo permite

a orientação da tensão e a transformação das correntes e tensões do sistema de referência estacionário para o sistema de referência síncrono e vice-versa [14].

A estratégia de controle consiste basicamente em duas malhas internas de controle de corrente i_d e i_q , que podem controlar as potências ativa e reativa injetadas na rede elétrica de forma independente.

$$i_{dref} = \frac{2}{3.V_d}(P_{ref}) \quad (12)$$

$$i_{qref} = -\frac{2}{3.V_d}(Q_{ref}) \quad (13)$$

finalmente tem-se uma malha externa de controle que controla a tensão no barramento CC, e fornece uma referência para a corrente I_d^* que controla a potência ativa injetada na rede elétrica.

IV. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

As simulações foram realizadas, para verificar a eficácia do auto-ajuste para os ganhos do controlador PI utilizado, no software de simulação computacional *Matlab/Simulink*. Os parâmetros para a simulação encontram-se resumidos na tabela I.

Para a identificação do sistema de controle, é utilizado um perfil senoidal, como mostrado na [Figura 8].

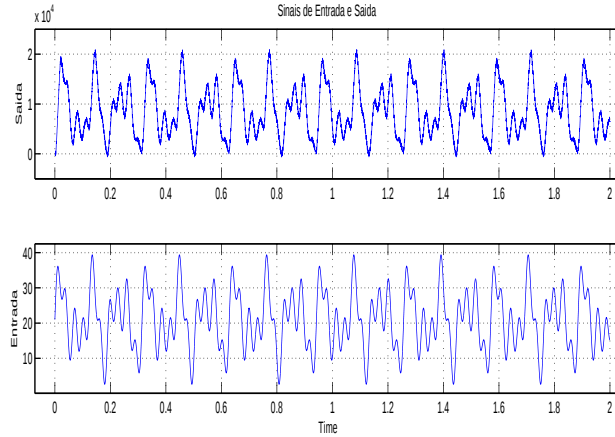


Figura 8. Sinais de entrada e saída

O modelo foi selecionado com 88,5% de aproximação, conforme mostrado na [Figura 9].

Simulou-se um perfil de potência gerado pela turbina eólica [Figura 10], para quando o GRV está operando abaixo de sua velocidade nominal. Na [Figura 10], ilustra-se a comparação do controlador PI versus o controlador PI Auto-ajustável com lógica fuzzy, observe-se que a [Figura 10.(1)] mostra a resposta do controlador PI cujos ganhos foram obtidos a partir do modelo estimado, entanto que, a [Figura 10.(2)] mostra uma melhora na resposta em regime permanente quando é utilizado o controlador PI auto-ajustável. Na [Figura 11] foi sobreposta a resposta de ambos os controladores, na qual pode-se verificar

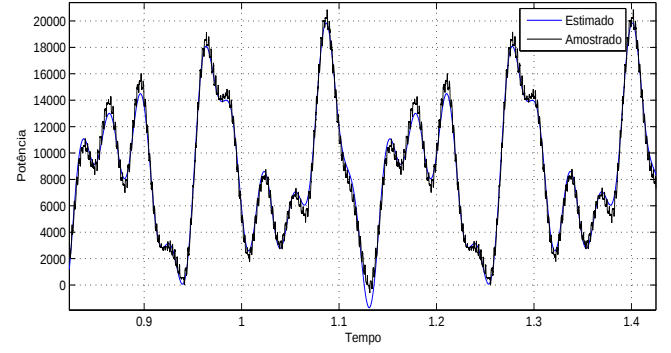


Figura 9. Curvas de validação

que efetivamente o desempenho em regime permanente do controlador proposto é superior.

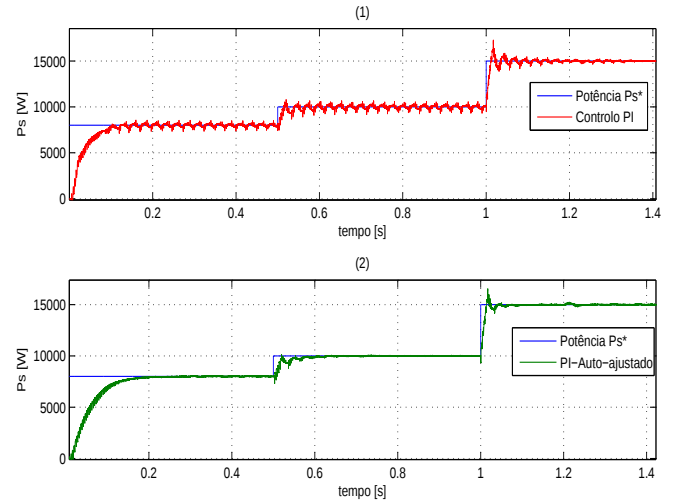


Figura 10. Comparação de controle PI versus PI Auto-ajustável

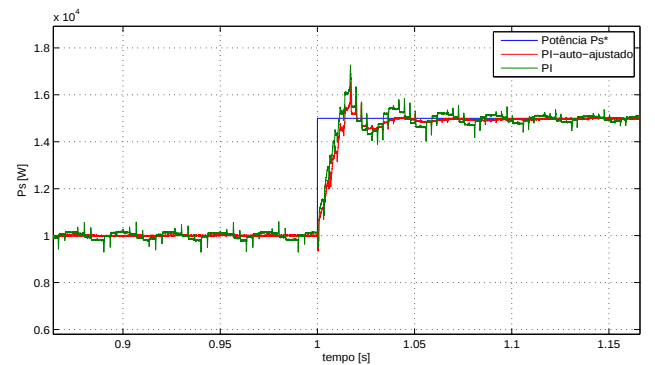


Figura 11. Comparação de controle PI versus PI Auto-ajustável

A [Figura 12], ilustra o controle satisfatório das potências injetadas na rede elétrica P_s e Q_s , pois as referências são sempre atendidas.

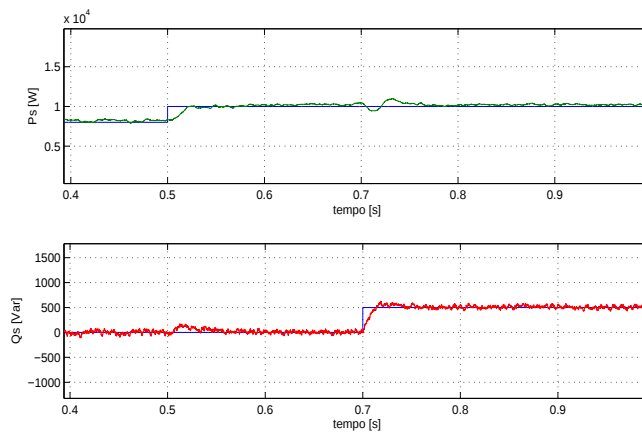


Figura 12. Resposta dinâmica de potência ativa e reativa

[Figura: 13], mostra o comportamento de tensão no barramento CC. A tensão de referência foi imposta a $V_{dc}^* = 500$ V e pode-se observar que a tensão no barramento CC segue a referência.

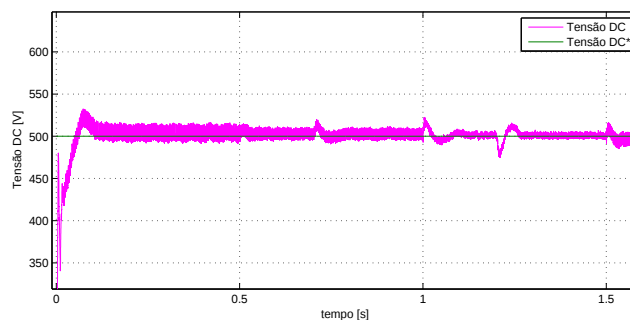


Figura 13. tensão no Barramento DC

Na [Figura 14], pode-se observar as formas de onda da tensão e da corrente da rede elétrica. Tem-se um fator de potência unitária $Q_s = 0$ Var no período de tempo de $t = 0.42$ s até $t = 0.7$ s e para tempos $t > 0.7$ a potência reativa varia até uma referência de $Q_s = 500$ Var produzindo uma desfasagem entre a tensão e a corrente da rede elétrica, conforme observado na [Figura 14].

SRG	Value	Unit
Potência Nominal	60	[kW]
Filtro Lg	800	[mH]
Tipo(Estator/Rotor Polos)	6/4	—
Resistência de Enrolamento	0.05	[Ohm]
Inércia	0.05	[kg.m.m]
Fricção	0.02	[N.m.s]

Tabela I
TABELA DE PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto a aplicação de um controlador PI auto-ajustável baseado em Lógica Fuzzy para o controle das potências ativa e reativa em sistemas de conversão de energia eólica utilizando geradores de relutância variável. O

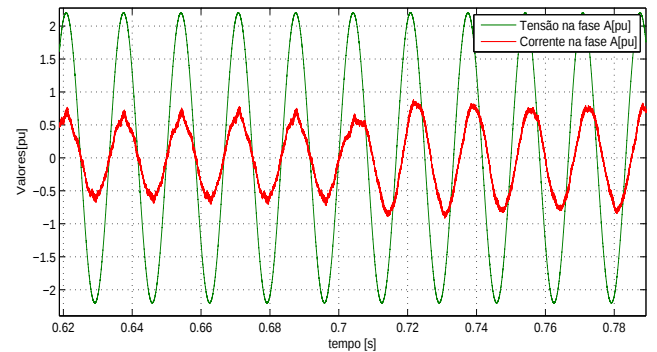


Figura 14. Tensão e Corrente na Rede Elétrica

controlador proposto foi validado através de simulações em diferentes condições de operação. Foi verificado também que a resposta em regime permanente do controlador PI auto-ajustável proposto é superior ao controlador PI tradicional.

REFERÊNCIAS

- [1] Lixin Xiong, Bingyin Xu, Houlei Gao, and Lie Xu. A novel algorithm of switched reluctance generator for maximum power point tracking in wind turbine application. In *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on*, pages 1–5, April 2009.
- [2] K.J. Eakman, M. Andres, L. Miller, and N.F. Campagna. Switched reluctance generator, March 10 1998. US Patent 5,726,560.
- [3] S. Mir, M.E. Elbuluk, and I. Husain. Torque-ripple minimization in switched reluctance motors using adaptive fuzzy control. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 35(2):461–468, Mar 1999.
- [4] Ming Cheng, Qiang Sun, and E. Zhou. New self-tuning fuzzy pi control of a novel doubly salient permanent-magnet motor drive. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 53(3):814–821, June 2006.
- [5] Liu Xiang and Yi LingZhi. Optimization output voltage of srg wind power generation system. In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific*, pages 1–4, March 2011.
- [6] K. Sinthipsoomboon, I. Hunsacharoonroj, J. Khedari, W. Pongaen, and P. Pratumsuwan. A hybrid of fuzzy and fuzzy self-tuning pid controller for servo electro-hydraulic system. In *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on*, pages 220–225, June 2011.
- [7] Rajani K. Mudi and Nikhil R. Pal. A self-tuning fuzzy {PI} controller. *Fuzzy Sets and Systems*, 115(2):327 – 338, 2000.
- [8] R. Cardenas, R. Pena, M. Perez, J. Clare, G. Asher, and P. Wheeler. Control of a switched reluctance generator for variable-speed wind energy applications. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 20(4):781–791, Dec 2005.
- [9] Ramu Krishnan. *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. CRC press, 2001.
- [10] Yu Zou, M. Elbuluk, and Y. Sozer. Stability analysis of maximum power point tracking (mppt) method in wind power systems. In *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011 IEEE*, pages 1–8, Oct 2011.
- [11] A. Yazdani and R. Iravani. *Voltage-Sourced Converters In Power Systems, Modeling, Control and Applications*. Wiley - IEEE Press, 2010.
- [12] Yu Zou, M.E. Elbuluk, and Y. Sozer. Stability analysis of maximum power point tracking (mppt) method in wind power systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 49(3):1129–1136, May 2013.
- [13] Zulfatman and M.F Rahmat. Application of self-tuning fuzzy pid control on industrial hydraulic actuator using system identification approach. *international journal on smart sensing and intelligent systems*, 2009.
- [14] Zargari, N. Kouro. S. Wu. B., Lang. Y. *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. Wiley-IEEE, 2011.