

SINTONIA DOS CONTROLADORES PI DE AEROGERADORES DFIG PARA DESEMPENHO DURANTE FALTAS ELÉTRICAS UTILIZANDO O ALGORITMO PSO

MILTON E. B. AGUILAR, ROMEU REGINATTO

*Centro de Engenharia e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus Foz do Iguaçu
Av. Tarquínio Joslin dos Santos, 1300, Polo Universitário, Foz do Iguaçu – PR /CEP 85870-650
E-mails: miltonbarriosaguiar@gmail.com, romeu@unioeste.br*

Abstract— The integration increase of wind generation in electric power systems is nowadays a general trend in many countries and Variable Speed Wind Turbines with Doubly Fed Inductions Generator are commonly used for this purpose. In order to ensure stability and to obtain the desired performance when these are subject to electrical faults, it is necessary that its control system to operate properly. This work aims at tuning the Proportional and Integral controllers comprising the wind turbines control structure to achieve that end. For this, a constant wind speed complete dynamic model of the wind turbines is adopted and the tuning is performed by minimizing a set of objective functions with the Particle Swarm Optimization algorithm. Simulation results show the algorithm and the penalization of several variables in the objective function allowed the achievement of the pre-established tuning goal. Adequate damping of speed oscillations has been obtained along with fast voltage recovery after fault clearance. The results validate the tuning method used.

Keywords— DFIG, Modelling, Control System, PSO, Tuning.

Resumo— O aumento da integração da geração eólica no sistema elétrico é uma realidade em muitos países e os Aerogeradores de Velocidade Variável com Geradores de Indução de Dupla Alimentação são os mais utilizados para este fim. Para garantir a estabilidade e obter o desempenho esperado durante faltas, há a necessidade da ação adequada de seu sistema de controle. Este trabalho objetiva a sintonia dos controladores Proporcional e Integral da estrutura de controle do aerogerador para atingir tal fim. Para isso considera-se a modelagem completa do aerogerador, com velocidade de vento constante, e a sintonia é realizada através da minimização de um conjunto de funções objetivo com o algoritmo de otimização por enxame de partículas. Resultados de simulação mostram que o algoritmo e que a penalização de variáveis chaves na função objetivo permite atingir os objetivos de sintonia preestabelecidos - amortecimento adequado das oscilações de velocidade, bem como rápida recuperação da tensão pós-falta. Os resultados obtidos validam o método de sintonia utilizado.

Palavras-chave— GIDA, Modelagem, Sistema de Controle, PSO, Sintonia.

1 Introdução

Um Aerogerador de Velocidade Variável com Gerador de Indução de Dupla Alimentação (GIDA) é uma máquina de indução com rotor bobinado, cujo estator e rotor são conectados na rede elétrica, o primeiro em forma direta e o segundo, via anéis coletores, e conversor de potência bidirecional do tipo *back-to-back* dimensionado para operar com uma fração (20-30%) da potência total. Além disso, possui uma turbina de eixo horizontal, com três pás, orientada contra o vento e um acoplamento mecânico que une o eixo da turbina com do rotor. Atualmente são os mais empregados em turbinas eólicas devido a sua simplicidade construtiva e elevado volume de produção (Anaya-Lara *et al.*, 2009).

O conversor é a parte mais sensível do GIDA quando este é submetido a distúrbios transitórios. Não obstante, é a parte principal da estrutura de controle que tipicamente utiliza um conjunto de controladores Proporcional e Integral (PI) convencionais (Qiao *et al.*, 2006). Ajustar seus ganhos é um trabalho difícil devido às não-linearidades e à elevada complexidade do sistema. Um inadequado ajuste dos parâmetros do controlador pode levar a um desempenho ruim ou mesmo à instabilidade do sistema. Por outro lado uma sintonia adequada pode garantir a estabilidade e o desempenho desejados (Qiao *et al.*, 2006; Vieira *et al.*, 2007; Leite *et al.*, 2009; Chakravarty & Venayagamoorthy, 2011; Bekakra & Attous, 2013).

Nos últimos anos, uma técnica baseada na otimização inteligente chamada Otimização por Enxame de Partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*) tem sido utilizada com sucesso para otimização não-linear mono e multi-objetivo e reconhecida por ser robusta na resolução destes tipos de problemas (Qiao *et al.*, 2006; Leite *et al.*, 2009).

Artigos de sintonia existentes na literatura (Bekakra & Attous, 2013; Chakravarty & Venayagamoorthy, 2011; Leite *et al.*, 2009; Qiao *et al.*, 2006; Vieira *et al.*, 2007) tipicamente consideram somente a parte elétrica do GIDA, ponderando o torque mecânico como constante. Este trabalho procura preencher as deficiências encontradas na modelagem para posterior sintonia dos ganhos dos controladores PI. Nesse contexto, para obter um comportamento realista é modelado o vento como constante (Kayikçi & Milanović, 2008) e as dinâmicas da turbina eólica e do acoplamento mecânico turbina-gerador, componentes muito importantes pois introduzem oscilações também em variáveis elétricas diante de perturbações transitórias. Estas oscilações devem ser amortecidas com a adequada escolha dos ganhos dos controladores PI, já que amortecê-las utilizando métodos mecânicos resulta muito custoso (Ackermann, 2005; Akhmatov, 2003). Além disso, os trabalhos antes mencionados a sintonia é realizada penalizando só uma variável. Para obter um correto funcionamento tanto das grandezas mecânicas quanto das elétricas, neste trabalho os controles são sintonizados através da penalização de um conjunto de variáveis.

Portanto, o método de ajuste utilizado primeiramente modela com maior detalhe o GIDA e seu sistema de controle, em seguida estabelece as variáveis chaves a penalizar, visando seu desempenho transitório e a sua estabilidade para a condição de falta elétrica. Logo determina um conjunto de funções objetivo (FO), extrai seus valores diretamente da simulação dinâmica e finalmente emprega o algoritmo PSO como ferramenta para a minimização das FO e assim obter o desempenho e a estabilidade desejadas.

2 Representação do Sistema Elétrico de Potência e do Parque Eólico

Um parque eólico é um conjunto de aerogeradores próximos entre si e conectados em paralelo, na produção de energia elétrica (Ackermann, 2005). Neste trabalho, considera-se o parque eólico composto por aerogeradores GIDA e representado pelo Modelo Agregado, o qual fornece a resposta coletiva dos aerogeradores representados por um único equivalente, com potência igual à total do parque (Ackermann, 2005; Akhmatov, 2003).

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é representado mediante o modelo de Máquina-Barra Infinita (Figura 1).

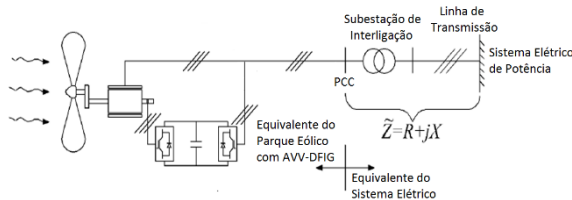


Figura 1. Parque eólico com GIDA conectado ao sistema máquina barra-infinita

Nessa topologia a frequência e a tensão do SEP são constantes e independentes da potência gerada ou consumida, assim como das perturbações aplicadas. A impedância do transformador da subestação de interligação e da linha de transmissão são representadas pela impedância Thévenin vista do ponto comum de conexão (Zanchettin, 2012).

3 Modelagem e Controles do GIDA

Esta seção apresenta a modelagem dos componentes do sistema utilizado no trabalho.

O modelo aerodinâmico da turbina eólica é tipicamente expresso por:

$$P_m = C_p P_{ar} \quad (1)$$

onde: C_p , o coeficiente de desempenho ou de potência, representa a relação entre a potência disponível no vento P_{ar} e a potência no eixo da turbina P_m (Zanchettin, 2012). A Figura 2 apresenta as curvas $C_p(\lambda, \beta)$ para a turbina eólicas de eixo horizontal, de três pás, com ângulo fixo ou com controle *Pitch*, em função do ângulo de passo (β) e da velocidade de rotação específica (λ) (Akhmatov, 2003).

Nota-se que quando β permanece constante, a potência capturada do vento reduz-se quando λ é diferente que λ_{ot} (ponto máximo de cada curva). Dessa forma, para um maior rendimento energético, a turbina deve operar com um λ próximo a λ_{ot} , o que consegue-se modificando a velocidade de rotação da turbina de acordo com a variação da velocidade do vento. Deste raciocínio deriva-se a estratégia de máximo aproveitamento da potência do vento, na qual β é mantido no valor nulo e a velocidade da turbina, ω_b , é continuamente ajustada de acordo com a velocidade do vento para manter λ perto de λ_{ot} , resultando na linha vermelha da Figura 3 (Bekakra & Attous, 2013).

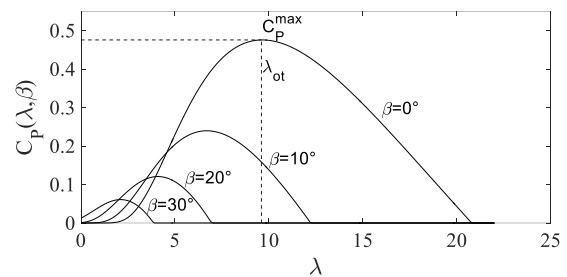


Figura 2. Curvas do coeficiente de potência

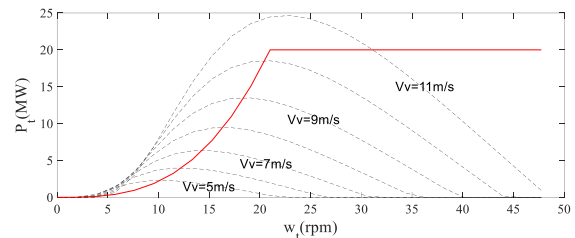


Figura 3. Estratégia máximo aproveitamento da potência do vento

Em estudos de geração eólica, a dinâmica do GIDA é tipicamente expressa pelo modelo em coordenadas dq e referencial síncrono, com parâmetros expressos em pu, o qual pode ser escrito como (Anaya-Lara *et al.*, 2009; Akhmatov, 2003):

$$\frac{\dot{\Lambda}_{ds}}{\omega_b} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} \Lambda_{ds} + \omega_e \Lambda_{qs} + \frac{R_s k^2}{\sigma M} \Lambda'_{dr} - V_{ds} \quad (2)$$

$$\frac{\dot{\Lambda}_{qs}}{\omega_b} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} \Lambda_{qs} - \omega_e \Lambda_{ds} + \frac{R_s k^2}{\sigma M} \Lambda'_{qr} - V_{qs} \quad (3)$$

$$\frac{\dot{\Lambda}'_{dr}}{\omega_b} = -\frac{R'_r}{\sigma L'_r} \Lambda'_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \Lambda'_{qr} + \frac{R'_r k^2}{\sigma M} \Lambda_{ds} - V'_{dr} \quad (4)$$

$$\frac{\dot{\Lambda}'_{qr}}{\omega_b} = -\frac{R'_r}{\sigma L'_r} \Lambda'_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \Lambda'_{dr} + \frac{R'_r k^2}{\sigma M} \Lambda_{qs} - V'_{qr} \quad (5)$$

onde: os sub-índices *d*, *q*, *s*, *r* indicam os eixos direto, de quadratura, grandezas do estator e do rotor, respectivamente; ω_e , ω_b e ω_r são as frequências síncrona, base e do rotor, respectivamente; Λ indica fluxo ligado, *V* tensão, *R* resistência, *L* indutância própria e *M* indutância de magnetização; σ e *k* são o fator de dispersão e de acoplamento, respectivamente.

A potência capturada pela turbina eólica é transmitida ao gerador via acoplamento mecânico. Dependen-

do das características construtivas do aerogerador e do controle envolvido, a potência gerada pode ser afetada por oscilações torcionais, as quais se propagam pela rede elétrica (Ackermann, 2005).

Tal como é demonstrado em (Akhmatov, 2003), a fim de estudar os aspectos transitórios dos parques eólicos num sistema elétrico é suficiente incluir a modelagem apenas do primeiro modo de oscilação, embora existam infinitos modos. Para isso utiliza-se o modelos de duas massas agrupadas, cuja dinâmica é representada pelas equações:

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{2H_t}(T_t - K_s\theta - D_t\omega_t) \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H_g}(K_s\theta - T_e - D_g\omega_r) \quad (7)$$

$$\dot{\theta} = \omega_b(\omega_t - \omega_r) \quad (8)$$

sendo θ o ângulo de torção (rad), T_t e T_e torques aerodinâmico da turbina (pu) e eletromagnético (pu); K_s a constante de rigidez torsional; D_t e D_g os coeficientes de amortecimento da turbina e do gerador, respectivamente; H_t e H_g , os momentos de inércia da turbina e do gerador, respectivamente.

3.1 Sistema de Controle

Para permitir o fluxo de potência entre o rotor e a rede elétrica o GIDA utiliza um conversor de potência de tipo *back-to-back*. Este compõe-se por dois inversores, um do lado do rotor e outro do lado da rede. Ambos com transistores, compartilhando um elo de corrente contínua (também chamado link CC) (Zanchettin, 2012).

O sistema de controle age sob o conversor para regular as variáveis de interesse. Neste trabalho utiliza-se o método de “Controle Vetorial Orientado pela Tensão do Estator”, resumido em forma de diagramas de bloco nas Figura 4 e Figura 5.

Para modelar a dinâmica do link CC utiliza-se a equação (9), onde v_{cc} é a tensão no capacitor, C a capacitância do capacitor, P_r e P_g as potências que fluem pelo lado do rotor e da rede, respectivamente. Destaca-se que não há acúmulo de energia no conversor, portanto a potência ativa que flui pelo lado do rotor, será igual à que flui pelo lado da rede (Zanchettin, 2012).

$$\dot{v}_{cc} = \frac{\omega_b}{Cv_{cc}}(P_r - P_g) \quad (9)$$

O conversor do lado da rede é modelado como uma fonte de corrente controlada. Seu esquema de controle é mostrado na Figura 4.

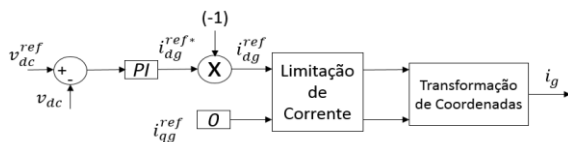


Figura 4. Esquema de Controle do Inversor do Lado da Rede

Esta estrutura de controle consiste na regulação da tensão do link CC através de um controlador PI atuando sobre a componente de eixo direto da corrente do inversor (i_{dg}^{ref}), mantendo o equilíbrio no fluxo de potência ativa entre os conversores. É necessário utilizar o controle inverso, já que neste caso um aumento da potência injetada na rede leva a uma diminuição da tensão do link CC (Anaya-Lara *et al.*, 2009). A potência reativa do inversor do lado da rede é definida pela componente do eixo de quadratura da corrente do conversor (i_{qg}). É tipicamente mantida em zero para operar com fator de potência unitário, por isso, tem-se $i_{qg}^{ref} = 0$ na figura. Em seguida, ambas referências de correntes são limitadas e finalmente alinhadas com a tensão do estator para obter a corrente do inversor do lado da rede (i_g).

A Figura 5 mostra as malhas de controle das potências ativa/reativa do gerador e as correntes de rotor. A potência ativa total P é controlada através da componente de eixo direto da corrente do rotor (i_{dr}). A potência reativa total Q corresponde apenas à potência reativa de estator e é controlada através da componente de eixo de quadratura da corrente de rotor (i_{qr}) (Zanchettin, 2012).

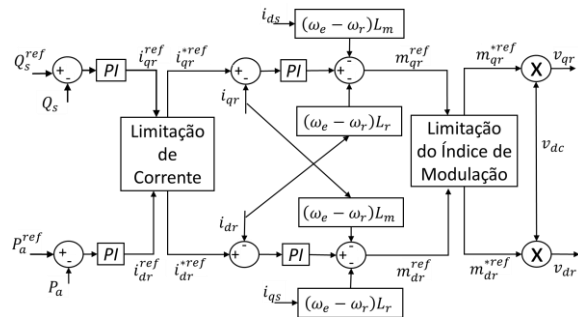


Figura 5. Controle Vetorial Orientado pela Tensão do Estator

Todas as malhas utilizam controladores PI com os parâmetros usuais de sintonia, o ganho proporcional e o tempo integral. A referência de potência ativa total gerada pelo GIDA (Figura 5) é obtida da estratégia de máximo aproveitamento da potência do vento, considerando as perdas elétricas do GIDA. Outro aspecto importante a destacar é que tanto a referência para a corrente de rotor, como o índice de modulação são limitados para preservar a integridade do conversor (Anaya-Lara *et al.*, 2009).

4 Objetivos de Sintonia

O funcionamento de um parque eólico na condição de falta elétrica é uma exigência dos códigos de rede de quase todos os países que possuem este tipo de geração. No caso brasileiro, o Operador Nacional do Sistema determina que no caso de existir um afundamento de tensão em uma ou mais fases no ponto de conexão na rede básica da central de geração eólica, a usina deve continuar operando se a tensão nos seus terminais permanecer acima da curva indicada na Figura 6 (ONS, 2009).

Por esta razão, tais requisitos orientam os objetivos da sintonia deste trabalho, detalhados a seguir:

(i) Amortecimento das oscilações mecânicas. Para isso as velocidades de rotor e turbina devem ter igual valor final e um decaimento adequado até o estado estável. Para atingir esta meta é penalizada a variação do ângulo de torção, na forma:

$$\text{custo } \theta = \int_0^t |\dot{\theta} - \dot{\theta}_{ref}| dt \quad (10)$$

Esta variável é proporcional à diferença entre a velocidade do rotor e da turbina (ver equação (8)) e portanto resulta adequada para atingir este objetivo.

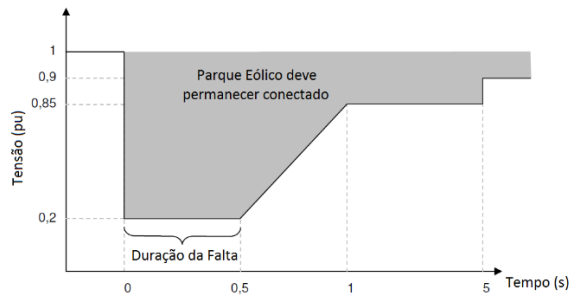


Figura 6. Tensão nos terminais dos Parque Eólico

(ii) Tensão no link CC com baixa variação, durante e após a falta. Este objetivo tem como fim evitar a saturação ou possível destruição do conversor (de Araújo Lima, 2009). Este estudo ocupa um capacitor de 110mF, o qual é pequeno para a potência dos aerogeradores (2MW cada um) e os controladores PI são os únicos controles empregados. Assim sendo, (de Araújo Lima, 2009) estabelece 1,3pu com limite para V_{CC} e neste trabalho este valor é utilizado como guia (com V_{CC} base de 975,81V). Penaliza-se utilizando a equação:

$$\text{custo } V_{CC} = \int_0^t |V_{CC} - V_{CCref}| dt \quad (11)$$

(iii) Favorecimento do cumprimento do código de rede brasileiro (ver Figura 6) e uma rápida recomposição pós-falta. Para isto é penalizada a tensão com a equação:

$$\text{custo } V = \int_0^t |V - V_{ref}| dt \quad (12)$$

Pode-se verificar que as três funções objetivos utilizam o erro dinâmico conhecido como Integral do Erro Absoluto (IEA). Esta forma de penalização não discrimina os erros de acordo com o tempo e pondera proporcionalmente os desvios ocorridos (Bekakra & Attous, 2013). Nas três equações, os valores das referências são os valores pré-falta das variáveis. Finalmente, como o PSO utilizado é mono-objetivo, os três custos são somados, dando a cada uma um determinado peso, resultando assim na função objetivo do algoritmo, dada por:

$$f(x) = \alpha_1 \text{custo } \dot{\theta} + \alpha_2 \text{custo } V_{DC} + \alpha_3 \text{custo } V \quad (13)$$

5 Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas

O *Particle Swarm Optimization* (PSO) é um algoritmo meta-heurística de base populacional que modela o comportamento psico-social de entidades coletivas (voo de aves, cardumes, etc.). O PSO está constituído por uma população de soluções (enxame) e nela estará presente a solução para o problema em questão. Entre suas características mais importantes do PSO estão a influência e o aprendizado social e que dá bons resultados para problemas não lineares e contínuos (Cagnina, 2010).

O PSO implementado com o intuito alcançar a melhor solução possível, segue o procedimento iterativo da Figura 7. Neste problema em particular, tem-se 5 controladores PI e portanto 10 ganhos, os quais estabelecem-se como as variáveis a encontrar seus valores e como o número de dimensões do algoritmo.

O PSO começa com a “Fase de inicialização”, atribuindo a cada dimensão de cada partícula da população um valor aleatório no intervalo estabelecido. Neste problema [0 50] (Leite *et al.*, 2009; Chakravarty & Venayagamoorthy, 2011). O mesmo ocorre com os vetores de velocidade (um por cada partícula) que são inicializados no intervalo $[V_{min}, V_{max}]$, neste caso [-5 5]. Os valores *fitness* são calculados através de função objetivo do problema e armazenados. Cada partícula *pbest* (melhor valor *fitness* descoberto por cada partícula até a atualidade) copia o valor das dimensões do seu indivíduo correspondente. Da mesma forma que a partícula *gbest*, à qual se atribui o indivíduo com melhor valor objetivo (o menor de todos). Desse modo utiliza-se uma topologia global na qual os indivíduos são influenciados pelo melhor da população (Cagnina, 2010; Qiao *et al.*, 2006).

A segunda e mais importante é a “Fase de Busca”, na qual o cúmulo percorre o espaço para obter a melhor solução possível, num processo repetitivo até atingir o critério de parada (iterações $t = 100$). Nesta, atualizam-se as equações de aprendizagem (velocidade e posteriormente posição, equações (14) e (15)) com base nos valores atuais de *pbest* e *gbest*. Os valores *fitness* são recalculados e utilizados para substituir as partículas *pbest* e *gbest*, caso na presente iteração obtiveram-se melhores valores objetivos. Finalmente extrai-se o resultado obtido (*gbest*) (Cagnina, 2010).

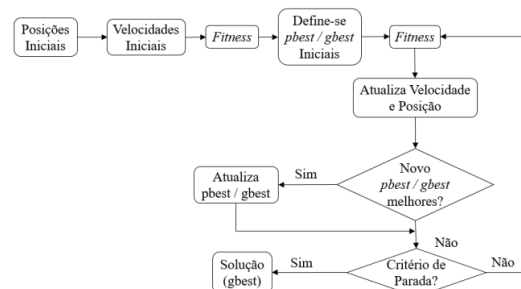


Figura 7. Fluxograma do funcionamento do PSO.

A equação (14) atualiza a velocidade da partícula i na dimensão j . Sendo c_1 e c_2 os fatores de aprendizado cognitivo e social, respectivamente e são constantes e iguais a 2 (Cagnina, 2010; Qiao *et al.*, 2006), r_1 e r_2 são números gerados aleatoriamente com distribuições uniforme no intervalo $[0,1]$ e ω é o fator inércia que diminui linearmente com o número de iteração (desde 0,9 até 0,4). A inércia utiliza-se para o controle da velocidade e a sua diminuição para compensar a capacidade de diversificação e intensificação do algoritmo. A equação (15) emprega-se para a atualização das posições (Cagnina, 2010; Qiao *et al.*, 2006).

$$v_{ij}(t+1) = w * v_{ij}(t) + c_1 * r_{1j} * (pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 * r_{2j} * (gbest(t) - x_{ij}(t)) \quad (14)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (15)$$

6 Resultados

Para o estudo da sintonia foi utilizado como sistema teste um GIDA na configuração máquina barra-infinita com regulação de potência ativa e reativa. A tensão na barra infinita é considerada em 1pu. A linha de transmissão tem uma relação X/R de 2,7 e potência de curto-circuito vista desde o ponto de conexão de 4pu. O parque eólico possui 10 aerogeradores, cada um com potência nominal de 2MW, tensão nominal de 690V e frequência de 50Hz. Os parâmetros do modelo agregado são (Anaya-Lara *et al.*, 2009): $R_s = 0,00488pu$, $R'_r = 0,00549pu$; $M = 3,95279pu$, $L_s = 0,09241pu$ e $L'_r = 0,09955pu$; $K_s=0,2pu/rad$; $D_r=D_g=0pu$; $H_r=2,96s$ e $H_g=0,54s$. Como (Leite *et al.*, 2009) conclui que para valores de ventos altos existem maiores dificuldades para obter o desempenho desejado, escolheu-se uma velocidade de vento constante de 0,795pu (velocidade de vento base de 12m/s), para que a potência ativa entregue pelo parque seja de 0,8pu.

Para avaliação da função objetivo, o sistema foi simulado durante 20s para uma falta elétrica na barra de conexão do gerador, aplicada no instante 1s e com duração de 500ms, a qual produz um afundamento de tensão até os 0,3pu. Na ponderação dos custos na função objetivo foram utilizados $\alpha_1=0,1$; $\alpha_2=10$; $\alpha_3=15$, ajustados empiricamente visando o desempenho adequado do sistema.

Na Tabela 1 tem-se os valores dos ganhos dos controladores obtidos. Nota-se que são bastante variados e seria muito difícil determiná-los sem uma ferramenta de sintonia.

Tabela 1. Ganhos dos controladores PI

K_idr	Ti_idr	K_iqr	Ti_iqr	K_P
0,4453	7,4579	0,4536	4,3711	0,1269
Ti_P	K_Q	Ti_Q	K_VCC	Ti_VCC
13,3963	0,0587	2,8346	3,0323	45,9257

A Figura 8 mostra como o algoritmo PSO ao longo de 100 iterações consegue diminuir o valor da função objetivo, que é a finalidade do algoritmo propriamente dita.

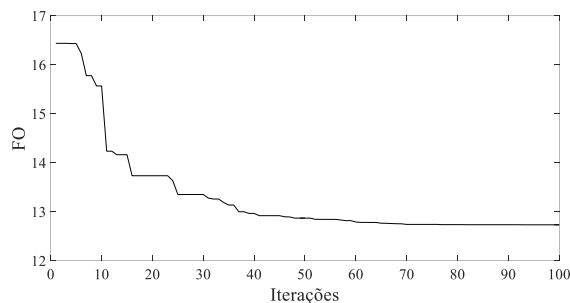


Figura 8. Melhora da FO

Segundo a Figura 9 e levando em conta o afundamento momentâneo de tensão utilizado neste caso, compreende-se que a tensão nos terminais do aerogerador atinge os requisitos do código de rede (CR) do Brasil (linha tracejada) e portanto o parque pode continuar operando durante e após o período de falta. Nos primeiros instantes após o início da falta percebe-se uma oscilação, que (Akhmatov, 2003) atribui à modelagem utilizando o modelo de 5° ordem junto com o modelo de duas massas do acoplamento mecânico. A mesma é normal na prática e portanto deve ser considerada na sintonia do GIDA. Nos instantes posteriores da retirada da falta, a tensão não cresce excessivamente e apresenta oscilações rapidamente amortecidas.

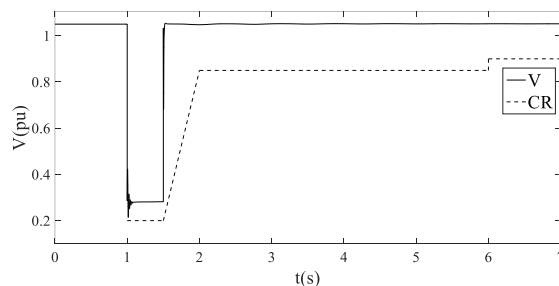


Figura 9. Tensão nos Terminais do GIDA

A tensão no link CC mostrada na Figura 10, apresenta um comportamento semelhante a uma oscilação amortecida com dois máximos no período de falta, sendo o primeiro maior que o segundo.

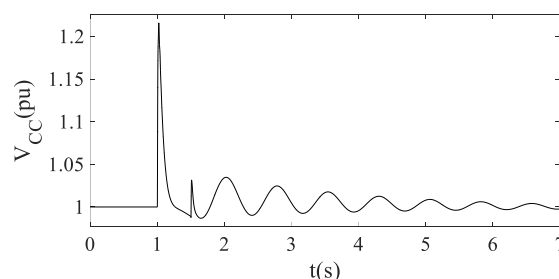


Figura 10. Tensão Link CC

Com esta sintonia o valor máximo de V_{CC} não alcançou os 1,3pu, (de Araújo Lima, 2009). Também, as

oscilações após a retirada da falta são amortecidas graças ao sistema de controle.

Na Figura 11 percebe-se que as velocidades do rotor e da turbina acomodam-se logo após da remoção da falta, atingindo o mesmo valor pré-falta e apresentando oscilações amortecidas. O estado estável é alcançado aproximadamente 12 segundos após da remoção da falta. Levando em conta que o coeficiente de rigidez torsional utilizado tem um valor mínimo possível (Ackermann, 2005), pode-se constatar que os controladores introduzem um forte amortecimento.

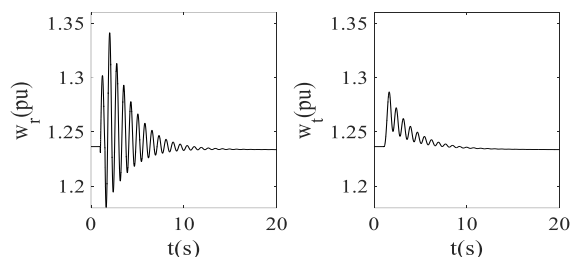


Figura 11. Velocidade do Rotor e da Turbina

7 Conclusão

Os resultados mostraram que o algoritmo PSO apresentou uma convergência da função objetivo e atingiu a sintonia buscada, sem a necessidade de realizar outras ações além da modelagem. Assim constitui uma ferramenta eficaz para a sintonia do GIDA, a partir da penalização de variáveis chaves diretamente extraídas de simulações dinâmicas.

Resultou importante penalizar um conjunto de variáveis, atingindo-se vários objetivos de sintonia ao mesmo tempo. O GIDA apresentou um comportamento estável com oscilações mecânicas e elétricas suficientemente amortecidas, sem grandes picos e mostrando uma recuperação rápida pós-falta, o que favorece o atendimento ao Código de Rede. Vale destacar que o afundamento de tensão considerado é forte, além de que o acoplamento mecânico turbina gerador foi considerado com máxima flexibilidade.

Esta sintonia considerou a modelagem detalhada do GIDA (velocidade de vento constante), portanto, a sintonia obtida tem em conta a dinâmica durante falta e garante que a melhoria do desempenho e da estabilidade obtidas para a esta condição são mais consistentes com a realidade, em comparação com outros resultados da literatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e a Unioeste pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*, Wiley, ed., Stockholm, Sweden.
- Akhmatov, V. (2003). *Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power*, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark.
- Anaya-Lara, O., Jenkins, N., Ekanayake, J., Cartwright, P., Hughes, M. (2009). *Wind energy generation : modelling and control*, Wiley, ed., United Kingdom.
- de Araújo Lima, F.K. (2009). *Aerogerador Baseado em Máquina de Indução Duplamente Alimentada-Suportabilidade para Afundamento de Tensão*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Bekakra, Y., Attous, D. Ben (2013). Optimal tuning of PI controller using PSO optimization for indirect power control for DFIG based wind turbine with MPPT, *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 5(3): 219–229.
- Cagnina, L.C. (2010). *Optimización Mono y Multiobjetivo a través de una Heurística de Inteligencia Colectiva*, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de San Luis.
- Chakravarty, P., Venayagamoorthy, G.K. (2011). Development of optimal controllers for a DFIG based wind farm in a smart grid under variable wind speed conditions, *2011 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2011*: 723–728.
- Kayikçi, M., Milanović, J. V. (2008). Assessing transient response of DFIG-based wind plants - The influence of model simplifications and parameters, *IEEE Transactions on Power Systems* 23(2): 545–554.
- Leite, H., Barros, J., Miranda, V. (2009). Evolutionary algorithm EPSO helping doubly-fed induction generators in ride-through-fault, *2009 IEEE Bucharest PowerTech: Innovative Ideas Toward the Electrical Grid of the Future*: 1–8.
- ONS (2009). *Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira e de seus componentes*, Technical report, Operador Nacional do sistema. Brasil.
- Qiao, W., Venayagamoorthy, G.K., Harley, R.G. (2006). Design of Optimal PI Controllers for Doubly Fed Induction Generators Driven by Wind Turbines Using Particle Swarm Optimization, *International Joint Conference on Neural Networks*: 1982–1987.
- Vieira, J.P. a, Nunes, M.V.A., Bezerra, U.H., Barra Jr, W. (2007). Novas estratégias de controle fuzzy aplicadas ao conversor do DFIG para melhoria da estabilidade transitória em sistemas eólicos, *IEEE Latin America Transactions* 5(3): 143–150.
- Zanchettin, M.G. (2012). *Análise da Inserção de Geração Eólica com Aerogeradores de Indução*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Foz do Iguaçu.