

Sintonia dos controladores do aerogerador GIDA com regulação de tensão para desempenho durante falta utilizando algoritmo PSO^{*}

Milton B. Aguilar; Denis V. Coury^{*}
Fernanda R. Machado; Romeu Reginatto^{**}

^{*} *Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, SP, (e-mail: miltonbarriosaguilar@usp.br);(e-mail: coury@sc.usp.br)*

^{**} *Centro de Engenharia e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, PR (e-mail: rm.fernandamachado@gmail.com);(e-mail: romeu@unioeste.br)*

Abstract: The variable speed wind turbines with doubly fed induction generator (DFIG) are the most employed in wind generation and there are different control strategies for this type of machines and the correct choice of gain values of the controllers depends on the stability and performance of the machine when subjected to a transient disturbance. Thus, this research employs DFIG turbine with active power and voltage (PV) control loops, seeks tuning the controllers gains to obtain a damped behavior with small peaks of electrical and mechanical variables when the wind turbine is subjected to an electrical fault. Thus, initially the DFIG is modeled with its mechanical and electrical part, and PV control system, then, tuning is performed by minimizing an objective function, derived from the weighted sum of three objectives, with the PSO algorithm. Simulation results showed that PSO is an effective minimization tool and achieved a correct tuning of the PV control. Therefore, the DFIG terminal voltage remained within the pre-established limits, active power showed low peaks and the electrical and mechanical oscillations were properly damped.

Resumo: Os aerogeradores de velocidade variável com geradores de indução de dupla alimentação (GIDA) são os mais empregados na geração eólica. Existem diferentes estratégias de controle para este tipo de máquinas, sendo que da correta escolha dos valores dos parâmetros dos controladores dependem a estabilidade e desempenho da máquina quando esta é submetida a uma perturbação transitória. Portanto, esta pesquisa aborda o GIDA com malha de controle de tensão terminal e de potência ativa (PV), busca a sintonia dos ganhos dos controladores para obter um desempenho com amortecimento de oscilações e sem fortes picos das grandezas elétricas e mecânicas quando o aerogerador é submetido a uma falta elétrica. Para tanto é modelado o GIDA com suas partes mecânicas, elétricas e o sistema de controle PV. Em seguida, é realizada a sintonia através da minimização de uma função objetivo, composta pela soma ponderadas de três custos, com o algoritmo PSO. Os resultados das simulações mostraram que o PSO possibilitou uma minimização eficaz e alcançou uma sintonia do controle PV. Portanto, a tensão do DFIG manteve-se entre os limites preestabelecidos, a potência ativa apresentou baixos picos e as oscilações elétricas e mecânicas foram satisfatoriamente amortecidas.

Keywords: DFIG wind turbine; PSO algorithm; PV Control; Modeling; Tuning.

Palavras-chaves: Aerogerador GIDA; Algoritmo PSO; Controle PV; Modelagem; Sintonia.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por energia elétrica levou à rápida expansão da geração eólica, fazendo com que a turbina eólica de velocidade variável com geradores de indução duplamente alimentados (GIDA) seja uma das mais utilizadas na atualidade (Anaya-Lara et al. (2009); Kamel et al. (2020)). Na sua parte mecânica, há uma

turbina de eixo horizontal, com três pás, orientada contra o vento e um acoplamento mecânico que une o eixo da turbina com o do gerador. E na parte elétrica, há uma máquina de indução com rotor bobinado que é conectada à rede, sendo o estator conectado diretamente enquanto o rotor via anéis coletores e um conversor de potência bidirecional *back-to-back* (Anaya-Lara et al. (2009)).

No conversor encontra-se a estrutura de controle do aerogerador, envolvendo malhas de tensão e de potência ativa: denominada estratégia PV. A estrutura de controle é pro-

^{*} Os autores agradecem a USP, Unioeste e FPTI pelo apoio financeiro.

jetada para manter constante a tensão terminal buscando o máximo aproveitamento da energia eólica (Anaya-Lara et al. (2009)). As malhas estão constituídas por controladores do tipo Proporcionais-Integrais (PI) e da correta escolha dos seus ganhos dependem o desempenho e a estabilidade do GIDA, sendo, portanto, necessária uma estratégia de sintonia. Destaca-se a importância da influência que as variáveis mecânicas exercem sobre as elétricas, pois as primeiras introduzem oscilações nas segundas quando o sistema é afetado por alguma perturbação transitória (Kamel et al. (2020); Anaya-Lara et al. (2009)).

Nesse contexto, a Otimização por Enxame de Partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*) vem sendo estudada na literatura por ser robusta e capaz de se adaptar aos diferentes tipos de problemas, além de usada com sucesso para otimização não-linear e em problemas multimodais, mono e multi-objetivo Bonyadi et al. (2014); Reyes-Sierra and Coello Coello (2006).

Sendo assim, em Kamel et al. (2020) são propostos cinco métodos de otimização para o ajuste dos controladores PI, buscando aprimorar o desempenho dinâmico da tensão terminal do GIDA: tentativa e erro, lógica *Fuzzy*, ACO (do inglês, *Ant Colony Optimization*), PSO e um híbrido ACO-PSO, mostrando que os métodos biológicos podem ser adaptados oferecendo resultados promissores, economizando tempo e esforço, fornecendo capacidade LVRT (do inglês, *Low Voltage Ride Through*) aceitável e mantendo a conformidade com os códigos de rede. Labdai et al. (2019) propõe um PSO modificado, denominado *Duplicate PSO* (D-PSO) para ajustar os controles PI do DFIG, no qual em cada geração, as partículas entram em uma competição para selecionar apenas os melhores *Fitness*, objetivando extrair a máxima potência disponível do vento. Eles mostram que o D-PSO produz resultados melhores em comparação com controladores não-otimizados ou sintonizados com o PSO convencional. Também, Anilkumar et al. (2018) aplicam o algoritmo PSO para maximizar o intercâmbio de potência entre a rede e o DFIG através do controle das potências ativa e reativa. Ainda, o PSO foi usado por Prajapat et al. (2017), onde a função objetivo incluía a velocidade do gerador e as tensões do estator e do elo CC. O parâmetro do controlador mais dominante foi então identificado e selecionado para ajuste. A estrutura de controle foi modificada, adicionando um controlador de amortecimento à magnitude do fluxo GIDA e à estrutura de controle de ângulo. Também, Aguilar and Reginatto (2016) empregando malhas de controle de potência ativa e reativa, utiliza o PSO para amortecer as oscilações mecânicas e controlar o pico e as oscilações da tensão do elo de corrente contínua (CC) do GIDA, buscando favorecer a capacidade LVRT considerando o Código de Rede do Brasil. Nesse artigo é penalizada a diferença entre as velocidades do rotor e da turbina, a tensão terminal e do elo CC.

Este trabalho realiza a modelagem dinâmica do GIDA e busca a sintonia dos ganhos do controlador PI da sua estrutura de controle através de um algoritmo PSO mono-objetivo. Esta pesquisa diferencia-se das apresentadas anteriormente pois controla a tensão e a potência ativa e busca a sintonia deste sistema de controle com PI, ainda leva em consideração as influências mútuas entre as grandezas elétricas e mecânicas do GIDA e penaliza vários objetivos ao mesmo tempo. Para isto, foi simulada uma

falta elétrica, estabelecidos os objetivos de desempenho e amortecimento das oscilações e escolhidas as variáveis chaves a penalizar na função objetivo do algoritmo. Finalmente, empregou-se o PSO para minimizar o valor da mencionada função.

2. REPRESENTAÇÃO DO AEROGERADOR

Para a realização deste trabalho, modelou-se um parque eólico com GIDA que Ackermann (2005) define como um conjunto de aerogeradores próximos entre si, conectados em paralelo e destinados a transformar a energia cinética contida no fluxo de ar em energia elétrica. Ainda, foi utilizado o “Modelo Agregado”, no qual o parque eólico é modelado por um único aerogerador que fornece a potência total do parque (Ackermann (2005); Akhmatov (2003)). Além disso, o sistema elétrico foi representado pelo modelo máquina barra-infinita.

Inicialmente, a ligação entre a potência mecânica captada pela turbina e a disponível no vento é dada pelo modelo aerodinâmico da turbina eólica e neste trabalho modela-se através do coeficiente de desempenho ($C_p(\lambda, \beta)$), que é função do ângulo de passo (β) e da velocidade de rotação específica (λ) e é aplicável para turbinas eólicas de eixo horizontal, de três pás e com ângulo fixo ou controle *Pitch* (Zamzoum et al. (2016)).

A “estratégia de máximo aproveitamento da potência do vento”, que objetiva maximizar o coeficiente de potência, consiste em manter β com valor igual a zero e modificar constantemente a velocidade de rotação da turbina de acordo com a variação da velocidade do vento. Maiores detalhes podem ser vistos em: (Aguilar and Reginatto (2016); Zamzoum et al. (2016)).

Seguindo a modelagem, encontra-se o sistema mecânico dos aerogeradores que encarrega-se de transmitir a potência capturada pela turbina eólica ao gerador onde é transformada em potência elétrica. Com o intuito de estudar os aspectos transitórios do GIDA, é modelado o primeiro modo de oscilação (Akhmatov (2003)) do acoplamento mecânico turbina-gerador através do modelo de duas massas agrupadas, sendo sua dinâmica representada pelas equações:

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

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

$$\dot{\theta} = \omega_b(\omega_t - \omega_r) \quad (3)$$

sendo: θ ângulo de torção (rad), T_t e T_e torques aerodinâmico da turbina (pu) e eletromagnético (pu), respectivamente; K_s 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. Maiores detalhes podem ser vistos em: Akhmatov (2003); Ackermann (2005).

Finalmente, a parte elétrica da máquina é representada pelo modelo fasorial simplificado do gerador de indução, conhecido como modelo de terceira ordem, que é obtido

negligenciando a variação dos fluxos de estator e pode ser expresso por:

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

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

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} (-F_{pu} \omega_r + T_{mg} - T_e) \quad (6)$$

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 angulares elétricas da rede/estator, base e do rotor, respectivamente; Λ fluxo, V tensão, R resistência, L indutância própria e M indutância de magnetização; σ e k são o fator de dispersão e de acoplamento, respectivamente. Maiores detalhes podem ser vistos em: Ackermann (2005); Anaya-Lara et al. (2009).

2.1 Sistema de Controle

Como introduzido anteriormente, o GIDA é um aerogerador de velocidade variável e, portanto, utiliza um conversor de potência, normalmente do tipo “back-to-back”, que regula a potência intercambiada entre o rotor e a rede elétrica. Ainda, no conversor encontra-se o sistema de controle o qual regula as potências, tensão e correntes, buscando o desempenho e a estabilidade necessários para a operação da máquina (Anaya-Lara et al. (2009); Aguilar and Reginatto (2016)). Na Figura 1, esquematiza-se o sistema de controle empregado neste trabalho.

Inicialmente, observa-se que a estratégia para o controle de tensão é projetada usando o conversor do lado do rotor. A estrutura de controle de tensão adotada neste trabalho segue o raciocínio de Anaya-Lara et al. (2009), decompondo i_{qr} em duas componentes, uma de magnetização i_{qr_m} e outra i_{qr_g} que controla o fluxo de potência reativa (ou tensão do terminal) com a rede. Com esta decomposição, é possível obter:

$$Q_{grid} = Q_{mag} + Q_{gen} = -\frac{v_{qs}^2}{\omega_s L_{ss}} + \frac{L_m v_{qs}}{L_{ss}} (i_{qr_m} + i_{qr_g}) \quad (7)$$

Ainda, para que $Q_{mag} = 0$ impõe-se:

$$i_{qr_m} = \frac{v_{qs}}{\omega_s L_m} \quad (8)$$

Portanto, a tensão terminal aumenta ou diminui dependendo proporcionalmente do fornecimento de potência reativa à rede, e sendo assim o controle de tensão é realizado com base nos seguintes princípios: (i) a potência reativa consumida pelo GIDA deve ser compensada por $i_{qr_m}^{ref}$ e (ii) se a tensão terminal estiver muito baixa ou alta em comparação com o valor de referência, o componente $i_{qr_g}^{ref}$ deve ser ajustado adequadamente. Neste caso, é utilizado um controle proporcional, onde seu ganho K_V é ajustado para melhorar o desempenho da tensão terminal ou do fator de potência.

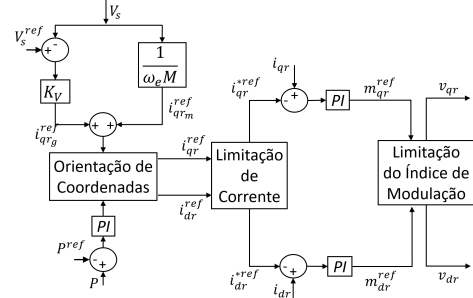


Figura 1. Sistema de Controle do conversor do lado do rotor

Também, a potência ativa total P é controlada pelo controlador PI, que atua sobre a componente de eixo direto da corrente do rotor (i_{dr}) e os controles da potência ativa e tensão são realizados através da “orientação de coordenadas”, alinhada com a direção do fasor da tensão do estator.

A referência de potência ativa total (P^{ref} da Figura 1) é dada pela diferença entre a potência ativa calculada pela “estratégia de máximo aproveitamento da potência do vento” e as perdas elétricas de estator e rotor. É importante destacar que as referências para a corrente de rotor e os índices de modulação são limitados para preservar a integridade do conversor, e também para que cada controlador PI tenha um ganho proporcional (K) e outro integral (Ti).

Portanto, para a sintonia do sistema de controle é necessário a escolha dos valores de sete parâmetros, resumidos na Figura 1: $K_{i_{dr}}$, $Ti_{i_{dr}}$, $K_{i_{qr}}$, $Ti_{i_{qr}}$, K_P , Ti_P e K_V . Por conseguinte, nas seções seguintes serão apresentados os objetivos de sintonia e o algoritmo PSO utilizado como ferramenta de otimização.

3. SINTONIA PARA FALTA ELÉTRICA: OBJETIVOS BUSCADOS E VARIÁVEIS PENALIZADAS

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) estabelece que caso haja variações temporárias de tensão em uma ou mais fases no ponto de conexão da central geradora eólica, a usina deve continuar operando (sem desconexão) se a tensão nos terminais dos aerogeradores permanecer dentro da região indicada na Figura 2. Esta característica aplica-se a qualquer tipo de distúrbio, sejam eles provocados por rejeição de carga, defeitos simétricos ou assimétricos, devendo ser atendida pela tensão da fase que sofrer maior variação (Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2017)).

Sendo assim, para este trabalho foi simulada uma falta elétrica trifásica nos terminais do GIDA, causando um afundamento momentâneo de tensão (AMT). Ainda, o ajuste adequado do sistema de controle pode contribuir na capacidade LVRT do parque eólico com GIDA, ou seja, pode favorecer o amortecimento de oscilações e minimizar os picos de variáveis mecânicas e elétricas. Portanto, é necessário estabelecer objetivos de sintonia além do cumprimento do código de rede. Para este trabalho foram estipulados:

(i) Estabilidade mecânica do aerogerador: amortecimento das oscilações mecânicas. Para cumprir este objetivo é ne-

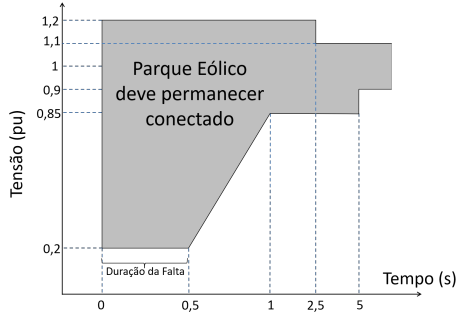


Figura 2. Tensão nos terminais dos aerogeradores da central geradora

cessário a igualdade dos valores finais entre as velocidades da turbina e do rotor. Portanto, foi penalizada a variável $\dot{\theta}$ (variação do ângulo de torção, ver equação (3)) em relação à $\dot{\theta}^{ref} = 0$:

$$custo \dot{\theta} = \int_0^t |\dot{\theta} - \dot{\theta}^{ref}| dt \quad (9)$$

(ii) Ajuda no cumprimento do código de rede: tensão (V_s) com rápida recomposição após falta e amortecimento durante a falta, ou seja, que V_s esteja dentro dos limites da Figura 2. Foi penalizado o desvio de V_s em relação ao seu valor pré-falta (V_s^{ref}):

$$custo V_s = \int_0^t |V_s - V_s^{ref}| dt \quad (10)$$

(iii) Controle da potência fornecida pelo GIDA: potência ativa (P) com baixos picos e oscilações. Por conseguinte, penalizou-se o desvio de P em relação ao valor pré-falta (P^{ref}):

$$custo P = \int_0^t |P - P^{ref}| dt \quad (11)$$

Ainda, devido ao algoritmo utilizado, para poder penalizar todas as grandezas consideradas, todos os custos foram somados e ponderados na forma

$$FO(x) = \alpha_1 custo \dot{\theta} + \alpha_2 custo V_s + \alpha_3 custo P \quad (12)$$

A seguir é apresentado o algoritmo PSO utilizado para minimizar a equação (12) e, portanto, para otimizar o funcionamento do GIDA.

4. OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

O *Particle Swarm Optimization* (PSO) é um algoritmo estocástico de otimização baseado em população, ou seja, um conjunto de soluções, denominado enxame de partículas. Este baseia seu funcionamento na simulação do comportamento social de aves dentro de um bando. Ainda, têm como características principais ser de fácil implementação e convergência rápida e estável, sendo amplamente utilizado para problemas contínuos e não-lineares (Bonyadi et al. (2014); Reyes-Sierra and Coello Coello (2006))

Com o intuito de atingir a melhor solução possível para o problema de sintonia do GIDA apresentado anteriormente, o PSO empregado segue o fluxograma da Figura 3. O mesmo inicia distribuindo aleatoriamente as partículas na área de busca, para isso, confere a cada dimensão de cada partícula um valor aleatório maior a zero e menor ou igual a cinquenta. Também, inicia as velocidades de cada partícula dando valores entre -5 e 5 a cada dimensão. Ainda, como este problema têm sete variáveis a otimizar, cada partícula têm sete dimensões.

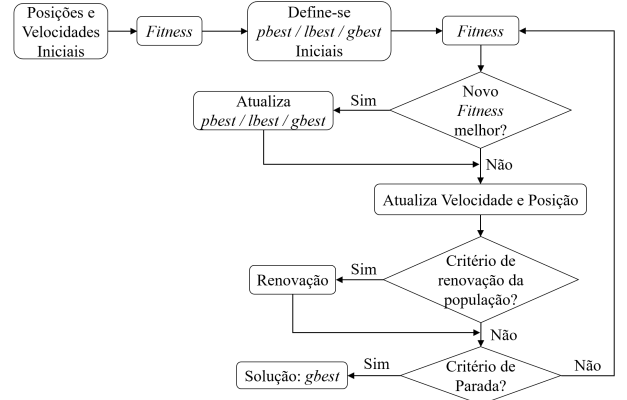


Figura 3. Fluxograma do algoritmo PSO proposto

A seguir, é calculada a função objetivo (*Fitness* da Figura 3) para cada partícula e determinada a melhor posição pessoal de cada partícula (*pbest*). Por ser esta a “Fase de Inicialização”, o *pbest* determina-se copiando as posições iniciais. Depois, determina-se o *lbest* que é a posição do melhor membro da vizinhança de uma determinada partícula (menor *Fitness* da vizinhança). Esta estratégia ajuda a melhorar a capacidade de exploração do algoritmo. Para este trabalho foi empregada a topologia em anel, esquematizada na Figura 4. Finalmente, calcula-se a partícula com menor valor *Fitness* do enxame, o *gbest*.



Figura 4. Topologia em anel

Depois, inicia-se o processo iterativo do PSO que tem como objetivo encontrar a melhor solução possível para o problema. Para isso, calcula-se o *Fitness* da partícula, logo, se o novo valor é melhor que o memorizado anteriormente, atualizam-se o *pbest*, o *lbest* e o *gbest* (no caso destes dois últimos, somente se o valor encontrado é o melhor da vizinhança e/ou do enxame, respectivamente). Se não é encontrado um valor menor, prossegue-se diretamente a atualizar o vetor velocidade com a equação (13) e o vetor posição empregando a equação (14).

$$v_{ij}(t+1) = w v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(lbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)) \quad (13)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (14)$$

onde: v é a velocidade da partícula; os subíndices i e j representam a partícula e sua dimensão, respectivamente; w é o fator de inércia; t o número de iteração; c_1 e c_2 são

os fatores cognitivos e sociais, respectivamente; r_1 e r_2 são valores aleatórios; x é a posição da partícula.

O critério para renovação da população estabelecido para este trabalho foi de que o número de iteração fosse maior ou igual a 50% das iterações totais e que o *gbest* não tivesse sido melhorado nas últimas 10 iterações. Também, a população é renovada somente uma vez durante o processo iterativo. Ainda, se o critério de renovação da população é atingido, todo o enxame é renovado com exceção da partícula *gbest*.

Finalmente, se o critério de parada é cumprido, o algoritmo para e a solução é a partícula com menor valor de *Fitness* (o *gbest*). Por outro lado, se o critério ainda não foi alcançado, o processo iterativo continua, como mostra a Figura 3.

Através do algoritmo anterior foi obtida a sintonia dos parâmetros dos controladores PI para o GIDA com os objetivos mencionados anteriormente. Desse modo, na seção seguinte serão apresentados os resultados de desempenho durante uma falta elétrica no aerogerador GIDA com os valores dos controladores PI obtidos com o PSO.

5. RESULTADOS

Neste trabalho foi considerado um parque eólico com aerogeradores GIDA conectados à rede elétrica na configuração máquina barra-infinita com as seguintes condições e parâmetros: Tensão Barra-Infinita: $V_\infty = 1pu$; Relação X/R da linha de transmissão: $X/R = 2.7$; Nível de inserção: $\rho = 0.25$; Potência ativa entregue pelo parque: $P = 0.8pu$; Número de geradores: 10; Potência base para um único gerador: $P_b = 2MW$; Tensão nominal de linha do estator: $V = 690V$; Frequência: $f = 50Hz$; Velocidade do vento base: $V_{vb} = 12m/s$; Resistência do estator: $R_s = 0.00488pu$; Resistência do rotor: $R_r = 0.00549pu$; Reatância de magnetização: $M = 3.95279pu$; Reatância de dispersão do estator: $L_s = 0.09241pu$; Reatância de dispersão do rotor: $L_r = 0.09955pu$; Capacitor do elo CC: $C = 10mF$; Constante de inércia equivalente do gerador: $H_g = 0.54s$; Coeficiente de amortecimento do gerador: $D_g = 0pu$; Constante de inércia equivalente da turbina: $H_t = 2.96s$; Coeficiente de amortecimento da turbina: $D_t = 0pu$; Coeficiente de rigidez torsional: $K_s = 0.3pu/rad$ (Anaya-Lara et al. (2009); Ackermann (2005)).

Para a realização da sintonia foi simulada uma falta elétrica nos terminais de conexão de $500ms$ de duração e que ocasiona um afundamento momentâneo de tensão (AMT) de até $0,4pu$ da tensão terminal, de modo que o AMT não deixa os terminais da usina eólica sem tensão. Ainda, para a função objetivo, equação (12), foram estabelecidos: $\alpha_1 = 1/100$, $\alpha_2 = 1$ e $\alpha_3 = 1$, com o intuito de dar o mesmo peso de ponderação para as grandezas elétricas e mecânicas.

O PSO, com 200 iterações como critério de parada e com $c_1 = c_2 = 2$, conseguiu diminuir o valor da função objetivo (equação (12)) como mostra a Figura 5 e foram obtidos os seguintes valores dos parâmetros dos controladores: $K_{idr} = 0.4454$; $T_{idr} = 45.3271$; $K_{iqr} = 9.8402$; $T_{iqr} = 50$; $K_P = 0.0001$; $T_{iP} = 1.2236$; $K_V = 0.5959$.

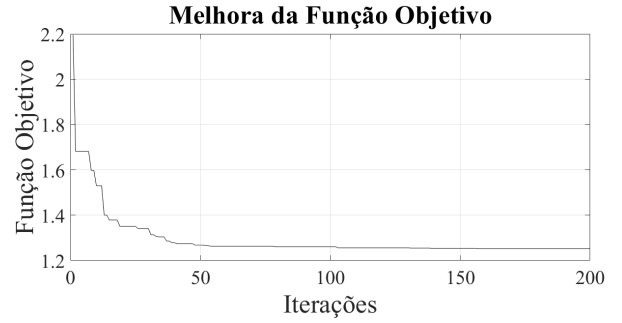


Figura 5. Processo iterativo do PSO

Também, observando a distribuição dos valores dos ganhos dos controladores, verifica-se a necessidade de ter uma ferramenta de sintonia para calculá-los.

O comportamento da tensão nos terminais do GIDA pode ser observado na Figura 6, onde é mostrada a tensão V (linha sólida) e os requisitos do Código de Rede (CR) do Brasil (linha tracejada) (Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2017)) e a referência de tensão (linha pontilhada). Vale destacar que o sistema de controle atua com o intuito de manter a tensão do GIDA no valor de $1p.u.$ e, como observado na figura, este é o valor pré-falta e pós-falta V , ou seja, depois de serem amortecidas as oscilações (as quais tem relação com o sistema mecânico).

Também, observa-se que a tensão nos terminais do aerogerador limita-se à região estabelecida pelo CR tanto antes, durante e após o acentuado AMT acontecer e, sendo assim, evita-se a possibilidade de desconexão do parque por violação aos limites da curva LVRT estabelecidos no código de rede. Além disso, observa-se que mesmo com a intensa falta elétrica simulada, a tensão terminal do GIDA apresenta um comportamento pouco oscilatório e rapidamente amortecido. Portanto, mesmo considerando as simplificações do modelo de 3º ordem (que negligencia a dinâmica de estator da máquina), tal comportamento é atribuído à sintonia dos controladores resultante da otimização com o algoritmo PSO (Akhmatov (2003)).

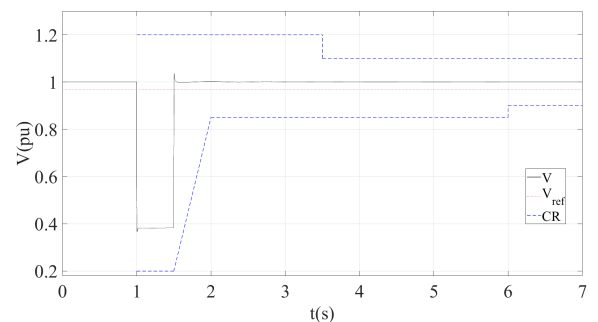


Figura 6. Tensão Terminal no GIDA

Na Figura 7 observa-se, inicialmente, a potência ativa entregue pela máquina. Durante o período de falta apresenta uma diminuição abrupta até $0,2pu$ e comportamento pouco oscilatório. Após a retirada da falta, observam-se oscilações as quais são rapidamente amortecidas pelos controladores. Por conseguinte, o sistema de controle consegue diminuir os impactos que poderiam ser ocasionados pelas oscilações da potência ativa entregue pelo GIDA. Ainda

na Figura 7, é apresentado o comportamento da potência reativa (Q). Consta-se que o parque eólico consome Q da rede antes do período de falta e depois de retirada da mesma, sempre com o intuito de manter a tensão terminal em $1p.u.$. Contudo, durante a falta o GIDA fornece potência reativa ajudando na sustentação dos níveis de tensão durante o período de falta do sistema. Também, picos de potência reativa são observados, tanto no início quanto na remoção da falta.

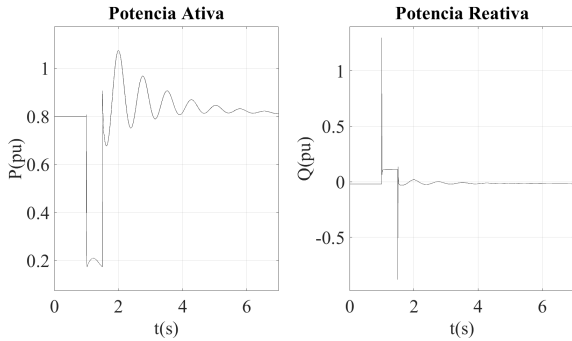


Figura 7. Potências Ativa e Reativa do GIDA

Na Figura 8, nota-se que as velocidades do rotor (ω_r) e da turbina (ω_t) iniciam a simulação com o mesmo valor pré-falta, e logo do início da falta elétrica ambas apresentam oscilações as quais são amortecidas após a eliminação da perturbação transitória. Ainda, observa-se que 20 segundos após a remoção da falta, ω_r e ω_t não apresentam oscilações e convergem para o valor pré-falta. Considerando que o coeficiente de rigidez torsional (K_s) tem um valor pequeno (Ackermann (2005)), constata-se o forte amortecimento inserido pelo sistema de controle sintonizado com o algoritmo.

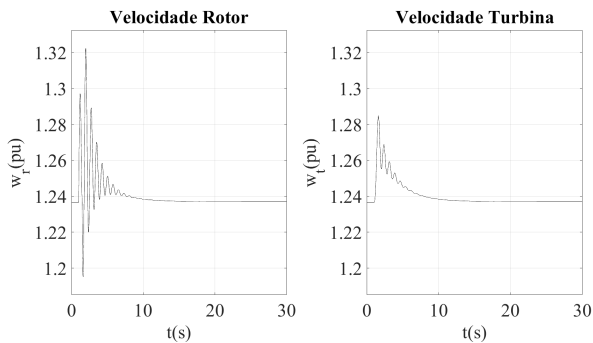


Figura 8. Velocidades do rotor e turbina sujeitos a falta

6. CONCLUSÃO

Através das análises feitas, entende-se que o PSO é útil para minimizar o valor da função objetivo e que através da renovação da população, consegue-se diminuir ainda mais o valor do *Fitness*.

Também, compreende-se a grande importância da correta ponderação das partes da função objetivo, pois dos valores dos α dependem o grau de importância que será dado a cada função objetivo.

Sempre que esteja sintonizado adequadamente, um GIDA com o sistema de controle com regulação de tensão e potência ativa é adequado para os requisitos de desempenho

e amortecimento estabelecidos, pois através do ajuste dos valores dos controladores PI do conversor do lado do rotor, conseguiu-se atender todos os objetivos de sintonia.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, a Universidade Estadual do Oeste do Paraná e Fundação Parque Tecnológico Itaipu por apoiar esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*, volume 140. Stockholm, Sweden.
- Aguilar, M.E.B. and Reginatto, R. (2016). Sintonia dos controladores PI de aerogeradores DFIG para desempenho durante faltas elétricas utilizando o algoritmo PSO. *Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2016*, 6.
- 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., and Hughes, M. (2009). *Wind energy generation: modelling and control*, volume 1. United Kingdom.
- Anilkumar, R., Devriese, G., and Srivastava, A.K. (2018). Voltage and Reactive Power Control to Maximize the Energy Savings in Power Distribution System with Wind Energy. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(1), 656–664.
- Bonyadi, M., Sc, B., and Sc, M. (2014). *Particle Swarm Optimization : Theoretical analysis , modifications , and applications to constrained optimization problems*. Ph.D. thesis, The University of Adelaide.
- Kamel, O.M., Diab, A.A.Z., Do, T.D., and Mossa, M.A. (2020). A Novel Hybrid Ant Colony-Particle Swarm Optimization Techniques Based Tuning STATCOM for Grid Code Compliance. *IEEE Access*, 8, 41566–41587.
- Labdai, S., Hemici, B., Nezli, L., Bounar, N., Boulkroune, A., and Chrifi-Alaoui, L. (2019). Control of a DFIG Based WECS with Optimized PI controllers via a duplicate PSO algorithm. *2019 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*, 1–6.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2017). Submódulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. Technical report, ONS, Brazil.
- Prajapat, G.P., Senroy, N., and Kar, I.N. (2017). Identification and Tuning of Dominant Controller Parameters of DFIG with Damping Control. *2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*, 1–6.
- Reyes-Sierra, M. and Coello Coello, C.A. (2006). Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 2(3), 287–308.
- Zamzoum, O., El Mourabit, Y., Derouich, A., and El Ghzizal, A. (2016). Study and implementation of the MPPT strategy applied to a variable speed wind system based on DFIG with PWM-vector control. *Proceedings of 2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2016*.