

Algoritmo Híbrido para o Projeto de Controladores de Sistemas de Potência

Wesley Peres, Valceres V. R. Silva, Francisco C. R. Coelho

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de São João del-Rei
São João del-Rei, Brasil

wesley.peres@ufsj.edu.br, vvrsilva@ufsj.edu.br, franciscocoelho@ufsj.edu.br

Resumo— Esse artigo apresenta um algoritmo híbrido para a solução do problema do projeto coordenado de estabilizadores de sistemas de potência. É proposto um passo adicional no Algoritmo de Otimização baseado na Ecolocalização de Morcegos com o objetivo de se fazer uma busca local através do Método do Gradiente. O procedimento de ajuste é formulado como um problema de otimização que objetiva a otimizar o amortecimento do sistema considerando um conjunto pré especificado de condições operativas.

Palavras-Chave — *Bat Algorithm, Método do Gradiente, Estabilizadores de Sistemas de Potência, Estabilidade Dinâmica.*

I. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) têm operado próximos aos seus limites de capacidade, o que faz que problemas relacionados à estabilidade tornem-se mais frequentes. Na ocorrência de variações de carga ou mudanças de topologia, tem-se a origem de desequilíbrios entre os torques elétricos e mecânicos das unidades geradoras, originando as oscilações eletromecânicas associadas aos rotores das máquinas síncronas. As oscilações eletromecânicas não amortecidas comprometem a estabilidade do sistema e limitam a quantidade de potência transferida entre áreas [1].

Com o objetivo de adicionar amortecimento às oscilações do rotor, pode-se modular a tensão de excitação das máquinas síncronas através dos Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP). Um estabilizador consiste em uma estrutura de controle composta por um bloco de ganho e estágios de compensação de fase que recebe um sinal medido no sistema (desvio de velocidade no terminal da máquina) e injeta um sinal de controle no sistema de excitação das máquinas síncronas [2].

Considerando que cada gerador possui o seu estabilizador e que um SEP possui vários geradores, o projeto desses controladores deve ser feito de forma coordenada (simultânea) com o objetivo de reduzir interações indesejáveis, conforme descrito em [3]. Além disso, o controlador projetado deve ser robusto, isto é, apresentar desempenho adequado para as diferentes condições operativas do sistema (mudanças de topologia e níveis de carregamento).

Do exposto acima, observa-se que o projeto de estabilizadores é uma tarefa que exige considerável esforço por parte do projetista. Conforme, [4] os métodos de projeto de

estabilizadores podem ser divididos nas seguintes categorias: (i) técnicas baseadas em controle clássico tais como alocação de polos e resposta em frequência e (ii) técnicas baseadas em otimização.

As técnicas de otimização possuem a vantagem de ajustar os parâmetros dos controladores de forma coordenada com o objetivo de otimizar um determinado índice de desempenho implícito ou explícito do sistema em malha fechada. Quando são considerados índices implícitos, tem-se os métodos de Projeto baseados em Otimização Analítica, tais como o método do Regulador Quadrático (LQR) e o método baseado em Inequações Lineares (LMI). Conforme [4], tais métodos requerem grande esforço computacional e não possuem convergência garantida.

Em contrapartida, os métodos que usam índices explícitos em malha fechada, denominados de métodos de Otimização Paramétricos, permitem que o projetista escolha o índice a ser otimizado (tais como índices de desempenho e robustez) e o método a ser utilizado para a solução do problema. Como vantagem desses métodos, cita-se a possibilidade do emprego de algoritmos evolutivos, que é uma classe de métodos frequentemente empregada na solução de problemas de engenharia.

Na literatura técnica, existem diversos trabalhos focados no projeto de estabilizadores usando algoritmos evolutivos ou bio-inspirados, tais como: Algoritmos Genéticos [5] e Otimização baseada em Enxame de Partículas [6]. Entretanto, visando aumentar a eficiência dessa classe de métodos, diversos algoritmos têm sido propostos recentemente.

Entre os métodos apresentados recentemente, encontra-se o Algoritmo Bio-Inspirado na Ecolocalização dos Morcegos (*Bat Algorithm - BA*) [7]. Esse algoritmo pertence à classe de métodos evolutivos baseados no comportamento de enxames e tem sido aplicado com sucesso em problemas de engenharia elétrica. Em [8] é apresentada uma metodologia para projeto coordenado de ESP usando o BA.

Esse trabalho apresenta um aperfeiçoamento do método apresentado por *Peres et al.* em [8]. É proposto um algoritmo híbrido que aproveita a capacidade de busca global do BA e a capacidade de busca local do Método do Gradiente Descendente [9].

O objetivo é ajustar os parâmetros de estabilizadores visando a otimização do amortecimento do sistema

considerando um conjunto de pontos de operação pré-definidos. Para isso, o sistema é representado em espaço de estados considerando os modelos dinâmicos das máquinas síncronas e o modelo da rede elétrica.

Os resultados preliminares são apresentados para um sistema de sete barras, equivalente brasileiro, bastante difundido na literatura.

II. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A. Modelo do Sistema em Malha Aberta

Para o projeto de controladores o sistema de potência é modelado em espaço de estados. Para isso as equações que descrevem o comportamento dinâmico do sistema são linearizadas em torno de um ponto de operação j , conforme descrito na equação (1).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_{aj}x + B_{aj}u \\ y &= C_{aj}x + D_{aj}u \end{aligned} \quad (1)$$

em que x são as variáveis de estado (velocidade das máquinas, ângulos e fluxos), u representa as variáveis de entrada (tais como os sinais de controle: tensão de referência dos reguladores de tensão) e y são as variáveis de saída (como a velocidade terminal das máquinas). As matrizes em malha aberta em uma condição operativa j são: estados (A_{aj}), entrada (B_{aj}), saída (C_{aj}) e transmissão direta (D_{aj}).

Em malha aberta os geradores possuem somente os reguladores automáticos de tensão. Portanto, o sistema não possui estabilizadores.

A estrutura das matrizes da formulação em espaço de estados para o problema em questão, pode ser obtida em [1].

A estabilidade do sistema em um determinado ponto de operação pode ser avaliada através do coeficiente de amortecimento dos autovalores da matriz de estados: os sistemas instáveis possuem coeficientes de amortecimento negativos [1].

B. Estrutura de Controle

A estrutura de controle empregada nesse trabalho corresponde ao controle descentralizado, onde o estabilizador de cada gerador é alimentado pelo sinal terminal do próprio gerador (sinal local). A estrutura é apresentada na Fig. 1.

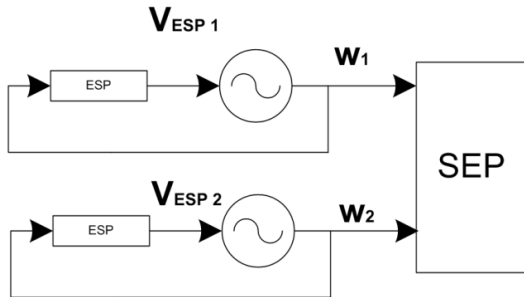


Fig. 1. Estrutura de controle descentralizada.

A estrutura empregada nesse trabalho para cada controlador p está apresentada em (2).

$$ESP_p(s) = K_p \times \frac{(s.T_w)}{(1 + s.T_w)} \times \frac{\left(1 + s \frac{\sqrt{\alpha_p}}{\omega_p}\right)^2}{\left(1 + s \frac{1}{\omega_p \cdot \sqrt{\alpha_p}}\right)^2} \quad (2)$$

em que T_w é a constante de tempo do filtro *washout*, usado para que o estabilizador atue somente no regime transitório (essa constante é conhecida). Os parâmetros a serem ajustados para o controlador são: o ganho K_p , o parâmetro de compensação de fase α_p e a frequência onde ocorre a máxima compensação de fase ω_p .

Conforme [4], a estrutura de controle descentralizada pode ser colocada na forma da equação (3).

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c + B_c u_c \\ y_c &= C_c x_c + D_c u_c \end{aligned} \quad (3)$$

em que x_c são as variáveis de estados dos controladores, u_c são os sinais de desvio de velocidade e y_c são as variáveis com os sinais adicionais estabilizantes (tensões).

C. Sistema em Malha Fechada

O sistema em malha fechada para o ponto de operação j considerando a estrutura de controle projetada será dada por (4).

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= A_{fj}x_f + B_{fj}u_f \\ y_f &= C_{fj}x_f + D_c u_f \end{aligned} \quad (4)$$

em o índice f está associado à representação em malha fechada, que considera as variáveis de estado em malha aberta e do controlador.

D. Problema de Otimização

O problema de ajuste é formulado como um problema de otimização com o objetivo de otimizar o coeficiente de amortecimento dos autovalores do sistema em malha fechada considerando um conjunto de pontos de operação pré-definidos.

A função objetivo do problema corresponde ao mínimo amortecimento obtido considerando todos os autovalores em malha fechada em todas as condições de operação $(\xi_k)_j$. A equação (5) apresenta a função objetivo:

$$f_{ob} = \begin{cases} 0 & \text{se algum } (\xi_k)_j < 0 \text{ (instável)} \\ \xi_{\min} & \text{se todos os } (\xi_k)_j \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

A formulação do problema de otimização é apresentada na equação (6).

$$\begin{cases} \text{Min} & -f_{ob} \\ & K_p \min \leq K_p \leq K_p \max \\ \text{s. a.} & \alpha_p \min \leq \alpha_p \leq \alpha_p \max \\ & \omega_p \min \leq \omega_p \leq \omega_p \max \end{cases} \quad (6)$$

em que as restrições de canalização representam o espaço de busca considerando os limites dos parâmetros a serem ajustados para cada estabilizador.

E. Estrutura dos Indivíduos

O algoritmo baseado na ecolocalização de morcegos consiste na aplicação de operadores evolutivos baseados na estratégia de caça dos morcegos pertencentes a uma população. A estrutura de cada indivíduo da população é representado na equação (7).

$$[K_1 \quad \dots \quad K_p \mid \alpha_1 \quad \dots \quad \alpha_p \mid \omega_1 \quad \dots \quad \omega_p] \quad (7)$$

F. Comentários Adicionais

No presente trabalho, as matrizes em espaço de estados para as diversas condições operativas são geradas através da versão acadêmica do programa PacDyn. Uma vez projetadas as estruturas de controle, simulações não lineares são conduzidas usando a versão acadêmica do programa Anatem, com o objetivo de se validar as estruturas considerando as não linearidades do sistema. Ambos os programas são desenvolvidos pelo CEPTEL [10]. Essa prática de projeto é adotada pelas concessionárias de energia elétrica e é indicada em [3].

Os autovalores do sistema em malha aberta e fechada são calculados utilizando-se as rotinas internas do MATLAB®.

III. ALGORITMO HÍBRIDO PROPOSTO

A. Conceituação do Algoritmo Proposto

De forma geral, o Algoritmo original dos Morcegos é baseado no processo de ecolocalização, que é a emissão de sons e captação dos ecos, realizado para a busca de presas. O som emitido é modulado através da variação da frequência, da taxa de emissão e do volume.

O algoritmo híbrido proposto consiste em incluir no método de otimização original bio-inspirado na ecolocalização de morcegos, uma etapa adicional baseada no método do gradiente descendente. Com isso, pretende-se fazer uma busca local direcionada pelo vetor gradiente da função objetivo a partir do ponto ótimo fornecido pelo método dos Morcegos.

Essa etapa é realizada internamente a cada 10 iterações (valor empírico) do método original. Entretanto, somente os ganhos dos estabilizadores são ajustados e os parâmetros de compensação de fase são fixados nos valores correspondentes a melhor solução do algoritmo dos Morcegos. Essas estratégias visa reduzir o esforço computacional adicional requerido pelo Método do Gradiente.

Dessa forma, tem-se a combinação das vantagens e a superação das desvantagens de cada um dos métodos [11]:

a) os algoritmos bio-inspirados possuem a vantagem de fornecer soluções de boa qualidade através de uma busca global, porém podem ter a convergência demorada;

b) os algoritmos baseados no gradiente da função objetivo possuem a vantagem de convergirem para ótimos locais com rapidez e a desvantagem de serem altamente sensíveis às condições iniciais e não fazerem uma busca global.

B. Algoritmo dos Morcegos

Conforme [7], as seguintes hipóteses são consideradas:

- os morcegos voam randomicamente com velocidade v_i na posição x_i variando a frequência f_{r_i} de um valor mínimo ($f_{r_{min}}$) a um valor máximo ($f_{r_{max}}$) para alcançar as presas. Estes podem, automaticamente, variar o volume do som emitido A_i e a taxa de emissão de pulsos r_i de acordo com a estratégia de caça;

- o volume do som diminui de um valor alto A_0 até um valor baixo A_{min} durante o processo de busca.

O movimento dos morcegos no espaço de busca é dado pelas equações:

$$f_{r_i} = f_{r_{min}} + (f_{r_{max}} - f_{r_{min}}) \cdot \beta \quad (8)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x^*) \cdot f_{r_i} \quad (9)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (10)$$

em que: $\beta \in [0,1]$ é um escalar randômico e x^* é a melhor posição (ou solução) atual.

Em (9) o vetor de velocidades v_i possui a mesma dimensão do vetor de posições (ou soluções). De acordo com (10) a cada iteração t são geradas novas posições x_i^t (soluções) ao redor das posições anteriores x_i^{t-1} .

Durante o processo de busca, pode-se fazer uma intensificação gerando novas posições (soluções) em torno da melhor solução corrente x^* de acordo com a equação (11).

$$x_i^t = x^* + \varepsilon \quad (11)$$

em que ε é um vetor de números randômicos e reais de baixo módulo.

O volume do som A_i e a taxa de emissão de pulsos r_i variam durante o processo de busca. A atualização desses parâmetros é dada pelas equações (12)-(13):

$$A_i^{t+1} = \mu \cdot A_i^t \quad (12)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 \cdot [1 - e^{-\gamma \cdot t}] \quad (13)$$

Onde μ e γ são parâmetros cujos valores foram ajustados em 0,9 conforme [7]. O valor inicial adotado para o volume do som foi de 0,25 ($A_i^0 = 0,25$). Para a taxa de emissão de pulsos adotou-se ($r_i^0 = 0,5$). Observa-se que a posição ótima será obtida quando:

$$A_i^t \rightarrow 0 \text{ e } r_i^t \rightarrow r_i^0 \text{ quando } t \rightarrow \infty \quad (14)$$

C. Algoritmo Proposto

O Algoritmo Híbrido proposto é esquematizado na Fig. 3. A modificação proposta corresponde ao nono passo, destacado

na figura. Como anteriormente mencionado, o método do algoritmo descendente é executado para o refinamento dos ganhos a cada 10 iterações da metodologia proposta. Por exemplo, se o método bio-inspirado na eco-localização dos morcegos for executado com 100 gerações (iteraões), o método do gradiente descendente será executado 10 vezes.

Outros aspectos do algoritmo dos morcegos constam na literatura e podem ser destacados, tais como:

- a) **passo 2:** deve-se inicializar a população com indivíduos viáveis, isto é, deve-se ter: $x_i \in [x_{i \min} \quad x_{i \max}]$;
- b) **passo 4:** observa-se que a taxa de pulsos controla a intensificação da busca em torno da melhor solução obtida. Se o número randômico for maior que a taxa de emissão de pulsos, significa que provavelmente o morcego está distante da sua presa (solução ótima). Dessa forma é executada uma busca ao redor da melhor solução;
- c) **passo 5:** a análise de viabilidade corresponde à verificação se as novas soluções geradas estão dentro dos limites mínimo e máximo. Caso ocorra alguma violação, a variável deve ser ajustada no limite violado;
- d) **passo 6:** observa-se que a aceitação das novas soluções é controlada pelo volume do som;
- e) **passo 7:** proposto em [12], esse passo permite que uma porcentagem dos morcegos (aqui usada 30%) se desloque livremente no espaço de busca visando aumentar a capacidade exploratória do método;
- f) **passo 10:** o critério de parada adotado é o número máximo de iterações.

| <u>Algoritmo do Método do Gradiente</u> | <u>Passo</u> |
|---|--------------|
| Início | |
| $k \leftarrow 0$ | 1 |
| Repita | |
| $g_k \leftarrow \text{gradiente}(f_{\text{ob}}(\cdot), x_k)$ | 2 |
| $d_k \leftarrow -g_k$ | 3 |
| $\alpha_k \leftarrow \arg \min_{\alpha} (x_k + \alpha \cdot d_k)$ | 4 |
| $x_{k+1} \leftarrow x_k + \alpha_k \cdot d_k$ | 5 |
| $k \leftarrow k + 1$ | 6 |
| Até critério de parada atingido | 7 |
| Fim | |

Fig. 2. Algoritmo do método do gradiente.

| <u>Algoritmo Híbrido baseado na eco-localização dos morcegos e no Método do Gradiente</u> | <u>Passo</u> |
|---|--------------|
| Início | |
| Definir a Função Objetivo $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$ Definir o número de indivíduos e o número máximo de gerações | 1 |
| Definir a taxa inicial de emissão de pulsos r_0 , a frequência inicial f_0 e o volume A_0 | |
| Inicializar a população de morcegos com sua posição inicial x_i e velocidade inicial v_i Avaliar a função objetivo $f(x)$ para cada indivíduo x | 2 |
| Repita | |
| Para $i = 1$ até número de indivíduos | |
| Gerar novas soluções ajustando-se a frequência e atualizando a velocidade e a posição dos morcegos (solução do problema): equações (8)-(10) | 3 |
| Se (número randômico $> r_i$) Gerar uma solução local ao redor da melhor solução: equação (11) | 4 |
| Fim Se | |
| Avaliar a viabilidade da solução Avaliar a função objetivo $f(x_i)$ | 5 |
| Se (número randômico $< A_i$ e $f(x_i) < f(x_{\text{melhor}})$) Aceitar a nova solução Aumentar r_i e reduzir A_i : equações (12)-(13) | 6 |
| Fim Se | |
| Fim Para | |
| Substituir uma porcentagem dos piores indivíduos da população por indivíduos gerados de forma aleatória | 7 |
| Ranquear as posições dos morcegos Encontrar a melhor posição atual para os morcegos x_{melhor} | 8 |
| A cada 10 iterações faça | |
| Execute o método do gradiente descendente partindo do ponto ótimo x_{melhor} O método deve ser executado para refinar os ganhos dos estabilizadores. O ajuste de fase é fixo nos valores de x_{melhor} | 9 |
| Até critério de parada atingido | |
| Fim | |

Fig. 3. Algoritmo híbrido proposto.

D. Método do Gradiente

Conforme [9], o método do gradiente consiste em um método de otimização local com base em uma direção de busca dada pelo negativo do gradiente da função objetivo, pois nessa direção a função decresce mais rapidamente. O método do gradiente é ilustrado na Fig. 2.

As restrições de canalização das variáveis podem ser colocadas como restrições do tipo $g(x) \leq 0$. Observa-se que não existe um passo para o tratamento de violações de limites das variáveis (no caso, somente os ganhos são otimizados pelo algoritmo do gradiente). Portanto, a fim de penalizar as

soluções infactíveis, foi preciso modificar a função objetivo conforme apresentado a seguir.

$$f_{ob} = f_{ob} + 10^4 \cdot \max\left(0, \sum g(x)\right) \quad (15)$$

Algumas observações sobre o algoritmo do gradiente são apresentadas a seguir.

No **passo 2** observa-se que o gradiente da função é requerido. Nesse caso, este foi calculado numericamente por diferenças finitas.

No **passo 4** tem-se um problema de otimização unidimensional com o objetivo de determinar o melhor passo a ser dado em direção ao ótimo. Foi utilizado o Algoritmo da Seção Áurea conforme apresentado em [9]. Como critério de parada no **passo 7** foram utilizadas 30 iterações.

IV. ESTUDO DE CASO

A. Considerações Iniciais

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos com a metodologia proposta. Foi utilizada a plataforma MATLAB®, versão 2012b e um computador com as seguintes configurações: processador Intel® Core™ i5, 2.8GHz, 4GB de memória RAM e sistema operacional 64 Bits.

B. Descrição do Sistema e Desempenho em Malha Aberta

O diagrama unifilar do sistema equivalente Sul-Sudeste é apresentado na Fig. 4.

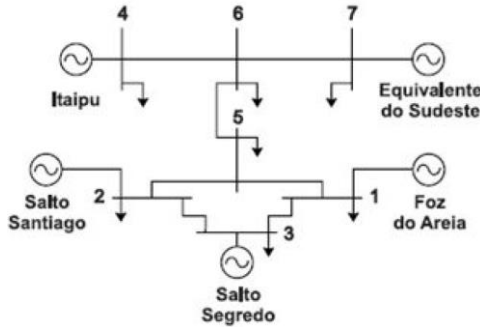


Fig. 4. Sistema equivalente Sul-Sudeste.

Este sistema é composto por cinco máquinas síncronas, sendo que a máquina da barra 7 representa o sistema equivalente da região sudeste do Brasil. Os reguladores de tensão são do tipo estático (com baixa constante de tempo e alto ganho). Os dados completos desse sistema podem ser obtidos em [13]. A análise modal desse sistema pode ser obtida em [4] e [13]. Para o sistema equivalente da barra 7 não será projetado um estabilizador.

O procedimento de ajuste é realizado considerando três pontos de operação pré-selecionados para o sistema, descritos na TABELA I. (através da variação das reatâncias das linhas de transmissão indicadas, tem-se condições diferentes de fluxo de potência nessas linhas) O mínimo amortecimento em malha aberta para cada ponto é apresentado.

TABELA I. CARACTERÍSTICA DE MALHA ABERTA

| Caso | Configuração | | ξ_{\min} (%) |
|----------|---------------------|---------------------|------------------|
| 1 (Base) | $X_{5-6} = 0,39 pu$ | $X_{6-7} = 0,57 pu$ | -11,90 |
| 2 | $X_{5-6} = 0,50 pu$ | $X_{6-7} = 0,57 pu$ | -12,11 |
| 3 | $X_{5-6} = 0,80 pu$ | $X_{6-7} = 0,57 pu$ | -12,66 |

A dimensão da matriz de espaço de estados é 30x30 em malha aberta e 42x42 em malha fechada.

C. Resultados

Para o projeto de estabilizadores são considerados dois blocos de compensação e uma constante de tempo de 3 segundos para o filtro *washout*. Os limites dos demais parâmetros são apresentados na TABELA II. Os valores dos limites de α e ω foram obtidos da literatura e estão associados com a faixa de frequência de interesse [5]. Os limites dos ganhos foram reduzidos levando-se em consideração que ganhos altos estão associados a um maior esforço por parte dos controladores.

TABELA II. LIMITES DOS PARÂMETROS

| Parâmetros | Inferior | Superior | Inicial |
|------------|----------|----------|---------|
| K | 0,01 | 20 | 10,005 |
| α | 0,10 | 10 | 5,050 |
| ω | 1,25 | 30 | 15,625 |

São considerados 25 indivíduos e 50 gerações. A metodologia original (considerando o passo proposto em [12]) e a proposta nesse artigo são comparadas, sendo que foram executadas 3 simulações para cada uma delas partindo da mesma condição inicial. Os resultados apresentados na TABELA III mostram que o método proposto é capaz de fornecer melhores resultados.

TABELA III. RESULTADOS

| Método | Amortecimento Mínimo (%) | | | Tempo Médio (min) |
|----------|--------------------------|-----------|-----------|-------------------|
| | 3º Melhor | 2º Melhor | 1º Melhor | |
| Original | 8,67 | 9,21 | 12,22 | 1,60 |
| Proposto | 12,45 | 13,03 | 13,23 | 3,10 |

Uma análise detalhada considerando a melhor solução de cada método é apresentada na TABELA IV. Observa-se que o terceiro cenário possui o menor amortecimento em todos os casos considerados.

TABELA IV. MÍNIMO AMORTECIMENTO (%)

| Caso | Sem ESP | Com ESP (Original) | Com ESP (Proposto) |
|------|---------|--------------------|--------------------|
| 1 | -11,90 | 12,27 | 13,28 |
| 2 | -12,11 | 12,25 | 13,26 |
| 3 | -12,66 | 12,22 | 13,23 |

Os parâmetros projetados para os estabilizadores associados às melhores soluções são apresentados na TABELA V.

TABELA V. PARÂMETROS DOS ESTABILIZADORES

| Generator | Original | | | Proposta | | |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | K | α | ω | K | α | ω |
| 01 | 6,20 | 3,32 | 13,21 | 16,85 | 1,34 | 18,59 |
| 02 | 9,96 | 0,82 | 1,35 | 7,41 | 9,22 | 18,26 |
| 03 | 10,07 | 1,60 | 2,06 | 13,83 | 0,96 | 10,01 |
| 04 | 20,00 | 8,48 | 6,89 | 12,85 | 6,90 | 5,06 |

Com o objetivo de validar o projeto de controle realizado, simulações não lineares foram conduzidas para o terceiro cenário. Foi aplicado um curto trifásico na barra 5. Esse curto foi eliminado após 50ms através da abertura da linha 1-5 e logo após 50ms essa linha foi religada. A Fig. 5 apresenta o gráfico do ângulo do gerador de Itaipu, onde a curva destacada (traço-e-ponto) está associada ao controlador obtido com o método proposto. Observa-se um menor nível de oscilação quando são considerados os estabilizadores projetados com a metodologia proposta.

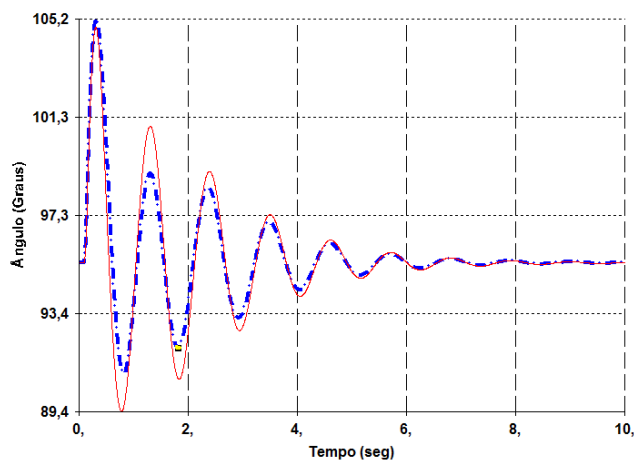


Fig. 5. Ângulo no gerador de Itaipu.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um algoritmo híbrido para a solução do projeto coordenado de estabilizadores de sistemas de potência. O procedimento de ajuste foi formulado como um problema de otimização com o objetivo de otimizar o amortecimento mínimo do sistema considerando múltiplas condições operativas.

O algoritmo proposto associa a vantagem da busca global feita pelo algoritmo bio-inspirado na ecolocalização dos morcegos com a rapidez da busca local feita pelo método do gradiente descendente.

Os resultados apresentados mostraram que o algoritmo proposto possui a capacidade de apresentar resultados de boa qualidade e superiores em relação à metodologia já utilizada. Isto se deve ao refinamento do ganho realizado através do método do gradiente. Foi observado ao longo das simulações, que na ocorrência de estagnação da solução por parte do algoritmo dos morcegos, a etapa do método do gradiente conseguia direcionar a busca para soluções de melhor qualidade.

Ressalta-se que testes adicionais são necessários, principalmente para definir uma estratégia que reduza o

esforço computacional do método proposto. Uma possível solução seria fazer a busca baseada no gradiente somente quando a solução do algoritmo dos morcegos estagnasse durante um número pré-definido de gerações. Os autores estão trabalhando nesse sentido para melhorar o método.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de São João del-Rei pelo uso dos recursos computacionais e ao CEPEL pelo uso das versões acadêmicas dos programas computacionais neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*: McGraw-Hill Professional, 1994.
- [2] Graham Rogers, *Power System Oscillations*: Kluwer international series in engineering and computer science: Power electronics & power systems, 2000.
- [3] N. Martins, *Impact of Interactions Among Power System Controls (Task Force 38.02.16)*, 166th ed., N. Martins, Ed.: CIGRÉ, 2000.
- [4] G.K. Dill and A.S. e Silva, "Robust Design of Power System Controllers Based on Optimization of Pseudospectral Functions," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, no. 2, pp. 1756-1765, May 2013.
- [5] A.L.B. Do Bomfim, G.N. Taranto, and D.M. Falcao, "Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 1, pp. 163-169, Feb 2000.
- [6] Y. del Valle, G.K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, and R.G. Harley, "Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 2, pp. 171-195, April 2008.
- [7] Xin-She Yang, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms: Second Edition*: Luniver Press, 2010.
- [8] W. Peres, E. J. de Oliveira, João A. P. Filho, and Ivo C. da Silva Junior, "Coordinated tuning of power system stabilizers using bio-inspired algorithms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, no. 0, pp. 419-428, 2015.
- [9] D. Luenberger, *Linear and nonlinear programming*, 2nd ed.: Springer, 2003.
- [10] CEPEL, "Small Signal Stability Analysis and Control - PACDYN - User's Manual," 2011.
- [11] M.F. Castoldi, D.S. Sanches, M.R. Mansour, N.G. Bretas, and R.A. Ramos, "A hybrid algorithm to tune power oscillation dampers for FACTS devices in power systems," *Control Engineering Practice*, vol. 24, no. 0, pp. 25-32, 2014.
- [12] F.C.R. Coelho, "Alocação de Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica via Otimização Bio-Inspirada na Ecolocalização de Morcegos - Dissertação de Mestrado," Juiz de Fora (MG), 2013.
- [13] N. Martins and L.T.G. Lima, "Eigenvalue and frequency domain analysis of small-signal electromechanical stability problems," 1989.