

Bat Algorithm hibridizado com o Método de Hooke Jeeves para o Projeto Robusto e Coordenado de Estabilizadores de Sistemas de Potência

Wesley Peres, Valceres V. R. Silva
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ
São João del-Rei, Brasil
wesley.peres@ufsj.edu.br, vvrsilva@ufsj.edu.br

Ivo C. Silva Junior, João Alberto Passos Filho
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Juiz de Fora, Brasil
ivo.junior@ufjf.edu.br, joao.passos@ufjf.edu.br

Abstract— Esse artigo apresenta um algoritmo híbrido para projeto coordenado e robusto 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 de Hooke-Jeeves. O procedimento de ajuste é formulado como um problema de otimização que visa otimizar o fator de amortecimento em malha fechada do sistema considerando um conjunto pré-especificado de condições operativas.

Palavras-Chave —Bat Algorithm, Método de Hooke Jeeves, 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 com que problemas relacionados à estabilidade tornem-se mais frequentes. Na ocorrência de variações de carga ou topológicas, tem-se a origem de desequilíbrios entre os torques elétricos e mecânicos das unidades geradoras, originando as oscilações eletromecânicas de baixa frequência 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 importante, exigindo 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 (como alocação de pólos e resposta em frequência), (ii) controle robusto (tais como o Regulador Quadrático (LQR) e o método baseado em Inequações Lineares (LMI)) e (iii) métodos de otimização paramétrica.

Os métodos baseados em otimização paramétrica possuem a vantagem de ajustar os parâmetros dos controladores de forma coordenada com o objetivo de otimizar um determinado índice de desempenho explícito do sistema em malha fechada. Essas metodologias 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 populacionais bioinspirados, que é uma classe de métodos frequentemente empregada na solução de problemas de engenharia.

Algumas aplicações desses métodos no projeto de controladores foram propostas na literatura: Algoritmos Genéticos [5], Enxame de Partículas [6], *Bat Algorithm* [7], *Cuckoo Search* [8], Colônia de Bactérias [9], etc.

Conforme [10], o princípio fundamental dos métodos populacionais bioinspirados consiste em, partindo de uma população inicial, aplicar técnicas de busca com o objetivo de melhorar a solução considerando que os indivíduos são evoluídos de acordo com regras especificadas que consideram o intercâmbio de informações entre os indivíduos. Adicionalmente sabe-se que o sucesso desses métodos está associado ao correto balanceamento entre as etapas de diversificação (busca global) e intensificação (busca local).

Uma vez que a busca global tenha posicionado os indivíduos em regiões de boas soluções, o processo de intensificação deve ser realizado para efetuar a busca local. O problema é que na maioria dos métodos populacionais essa busca é realizada somando-se escalares randômicos (provenientes de uma distribuição uniforme) de pequena magnitude à melhor solução corrente. Devido à essa estocasticidade, pode-se empregar bastante esforço computacional sem que a região seja satisfatoriamente explorada em nível local.

Nesse contexto, surgem os Algoritmos Meméticos, que consistem em métodos de otimização baseados em população que possuem um algoritmo interno específico para a busca local [11]. Uma das possibilidades é a integração dos métodos populacionais com os métodos de otimização baseados em direção de busca sem derivadas (métodos de busca direta) [12]. Entre os métodos de direção de busca sem derivadas cita-se o método de Hooke-Jeeves [13]. Aplicações do método de Hooke-Jeeves para o projeto de controladores podem ser obtidas em [14].

Esse trabalho apresenta um aperfeiçoamento do método apresentado por *Peres et al.* em [7]. É proposto um algoritmo híbrido que aproveita a capacidade de busca global do *Bat Algorithm* e a capacidade de busca local do Método de Hooke-Jeeves.

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 teste da 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 tensões de campo), 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 [15].

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 função de transferência dos estabilizadores é apresentada na equação (2).

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

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) e nb é o número de compensadores de atraso e/ou avanço utilizados (parâmetro também conhecido). 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 .

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 pela equação (4).

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

em que o índice f está associado à representação em malha fechada, que considera as variáveis de estado em malha aberta e do controlador. Ressalta-se que o vetor de estados em malha fechada x_f não possui a mesma dimensão do vetor de estados da planta em malha aberta (x).

D. Problema de Otimização

O procedimento 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:

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

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

$$\begin{cases} \text{Min} & -fob \\ \text{s. a.} & K_{p \min} \leq K_p \leq K_{p \max} \\ & \alpha_{p \min} \leq \alpha_p \leq \alpha_{p \max} \\ & \omega_{p \min} \leq \omega_p \leq \omega_{p \max} \end{cases} \quad (6)$$

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 baseados na estratégia de caça dos morcegos pertencentes a uma população. A estrutura de cada indivíduo da população é representado na equação (7).

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

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 no tempo 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 CEPEL [16]. 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

O Algoritmo dos Morcegos foi proposto em [17] e 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 de Hooke-Jeeves. O método de Hooke-Jeeves foi proposto na década de 1960 para otimizar funções sem a necessidade de que estas sejam contínuas ou diferenciáveis. O método testa pontos padrões a partir do ponto inicial.

Essa etapa é realizada internamente a cada n_{local} gerações (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 à melhor solução corrente do algoritmo dos Morcegos. Dessa forma, tem-se a combinação das vantagens e a superação das desvantagens de cada um dos métodos:

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

b) o método de Hooke-Jeeves possui as vantagens de convergir para ótimos locais com rapidez e não precisar da

avaliação de derivadas e as desvantagens de ser sensível às condições iniciais e não fazer uma busca global.

Com base na literatura técnica sabe-se que o problema sob análise é de natureza não convexa, possuindo múltiplos pontos de ótimos locais. É de conhecimento que os métodos bioinspirados são adequados para lidar com problemas dessa natureza, uma vez que trabalham com múltiplas soluções e podem explorar o espaço de busca mais eficientemente.

Adicionalmente, sabe-se que o método de Hooke-Jeeves não foi desenvolvido para problemas de otimização não convexos. Isso significa que, se o problema de ajuste de controladores fosse resolvido somente pelo método de Hooke-Jeeves, este poderia estagnar-se em soluções de má qualidade. Nesse sentido, a metodologia proposta é adequada para a solução do problema sob análise, por combinar estratégias de busca global e local.

Ressalta-se que a metodologia proposta foi baseada no trabalho [18], onde executa-se o algoritmo genético e um método de otimização analítico de forma desacoplada para o projeto de controladores. O presente trabalho, diferencia-se na inclusão de um método de otimização baseado em direção de busca internamente ao método populacional.

B. Algoritmo dos Morcegos

Conforme [17], as seguintes hipóteses são consideradas:

- os morcegos voam randomicamente com velocidade v_i na posição x_i variando a frequência f_{ri} entre um valor mínimo (f_{rmin}) e um valor máximo (f_{rmax}) 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:

$$f_{ri} = f_{rmin} + (f_{rmax} - f_{rmin}) \cdot \beta \quad (8)$$

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

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

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 estocástica 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 [17]. O valor inicial adotado para o volume do som foi de 0,25 ($A_i^t = 0,25$). 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. Método de Hooke-Jeeves

O método baseia-se em uma sequência de movimentos exploratórios, começando em um ponto base inicial e dois outros pontos definidos por uma pequena perturbação aplicada ao ponto inicial (adição ou subtração) com base em um passo pré-definido. Se um dos novos pontos produzir decréscimo no valor da função objetivo, este ponto é a nova solução. Caso contrário, o valor do passo é reduzido e o processo continua. O critério de parada adotado é o número de iterações (valor igual a quatro neste trabalho). O algoritmo é apresentado na Fig.1.

<u>Algoritmo de Hooke-Jeeves</u>	<u>Etapa</u>
Início	1
Definir o ponto inicial z_k com dimensão N e o vetor de passos com dimensão N	2
Para $k = 1$ até número máximo de iterações	3
$z_0 = z_k$	4
Para $i = 1$ até N	5
Se $f(z_{0i} + passo_i) < f(z_{0i})$	6
$z_{ki} = z_{0i} + passo_i$	7
Senão se $f(z_{0i} - passo_i) < f(z_{0i})$	8
$z_{ki} = z_{0i} - passo_i$	9
Senão $passo_i = passo_i / 2$	10
Fim se	11
Fim Para	12
Se $f(z_k) < f(z_0)$	13
$z_k = z_0 + \lambda(z_k - z_0)$	14
Fim se	15
Fim Para	16
Fim	17

Fig.1. Algoritmo de Hooke-Jeeves.

O passo inicial utilizado foi de 0,1. Na **etapa 14**, foi adotado $\lambda = 0,3$, embora o valor deste parâmetro poderia ter sido obtido por um processo de otimização unidimensional. Nas **etapas 7, 9 e 14** é aplicada uma análise de viabilidade: a variável é colocada no seu limite violado.

D. Algoritmo Proposto

O Algoritmo Híbrido proposto é esquematizado na Fig.2. A modificação proposta corresponde à **11ª etapa**, destacada na figura. Como anteriormente mencionado, o método de Hooke-Jeeves é executado para o refinamento dos ganhos a cada $nlocal$ gerações da metodologia proposta. Por exemplo, se o método bio-inspirado na eco-localização dos morcegos for executado com $nger$ gerações (iteraões), o método de Hooke-Jeeves será executado $nger/nlocal$ vezes.

Na **etapa 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. Na **etapa 5**, variáveis que violaram os limites são fixadas no limite violado. Nem todas as soluções são aceitas (**passo 6**): a aceitação depende do volume do som.

<u>Algoritmo Híbrido</u>	<u>Etapa</u>
Início	1
Definir a Função Objetivo $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$	
Definir o número de indivíduos e o número máximo de gerações	2
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	3
Avaliar a função objetivo $f(x)$ para cada indivíduo x	
Repita	4
Para $i = 1$ até número de indivíduos	5
Gerar novas soluções ajustando-se a frequência e atualizando a velocidade e a posição dos morcegos (solução do problema): equações (8)-(10)	6
Se (número randômico $> r_i$)	
Gerar uma solução local ao redor da melhor solução: equação (11)	7
Fim Se	
Avaliar a viabilidade da solução	
Avaliar a função objetivo $f(x_i)$	8
Se (número randômico $< A_i$ e $f(x_i) < f(x_{melhor})$)	
Aceitar a nova solução	
Aumentar r_i e reduzir A_i : equações (12)-(13)	9
Fim Se	
Fim Para	
Ranquear as posições dos morcegos	
Encontrar a melhor posição atual para os morcegos x_{melhor}	10
A cada $nlocal$ gerações faça	
Execute o método de Hooke-Jeeves 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}	11
Até número máximo de gerações	12
Fim	13

Fig.2. Algoritmo híbrido proposto.

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 i7, 2,93GHz com 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7-64 bits.

B. Descrição do Sistema e Desempenho em Malha Aberta

O diagrama unifilar do sistema equivalente Sul-Sudeste é apresentado na Fig.3.

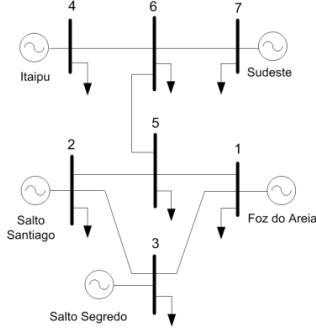


Fig.3. Sistema equivalente Sul-Sudeste.

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 [19]. A análise modal [19] desse sistema, indica dois modos inter-área críticos: um associado à oscilação entre Sudeste e Itaipu e outro associado à oscilação entre o sistema Sul (G1, G2 e G3) e Sudeste mais Itaipu.

O procedimento de ajuste é realizado considerando seis pontos de operação pré-selecionados para o sistema, descritos na TABELA I. O mínimo amortecimento em malha aberta para cada ponto é apresentado: observa-se que o sistema é instável. A dimensão da matriz de espaço de estados é 30x30 em malha aberta e 42x42 em malha fechada.

TABELA I. CARACTERÍSTICA DE MALHA ABERTA

Caso	Configuração	$\xi_{min} (%)$
1	$X_{5-6} = 0,39 \text{ pu}$ $X_{6-7} = 0,57 \text{ pu}$	-11,90
2	$X_{5-6} = 0,50 \text{ pu}$ $X_{6-7} = 0,57 \text{ pu}$	-12,10
3	$X_{5-6} = 0,80 \text{ pu}$ $X_{6-7} = 0,57 \text{ pu}$	-12,66
4	$X_{5-6} = 0,39 \text{ pu}$ $X_{6-7} = 0,63 \text{ pu}$	-14,04
5	$X_{5-6} = 0,39 \text{ pu}$ $X_{6-7} = 0,70 \text{ pu}$	-16,59
6	Caso 1 com redução de 2,4% de carregamento	-12,68

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 são 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
K	0,01	20
α	0,10	10
ω	1,25	30

São considerados 25 indivíduos e 50 gerações. A metodologia original e a proposta nesse artigo são comparadas, sendo que foram executadas 3 simulações para cada uma delas partindo-se da mesma população inicial (posição e velocidade). A melhor solução da população inicial corresponde a um amortecimento de 5,20 % em malha fechada considerando todos os seis cenários operativos.

Os resultados apresentados na TABELA III mostram que o método proposto é capaz de fornecer bons resultados. Entretanto a inclusão da etapa de busca local corresponde a um aumento aproximado de 39% no tempo computacional.

TABELA III. RESULTADOS

Método	Amortecimento Mínimo (%)			Tempo Médio (min)
	3º Melhor	2º Melhor	1º Melhor	
Original	12,36	12,80	12,82	2,53
Proposto	13,67	13,70	14,03	3,53

Uma análise detalhada considerando a melhor solução de cada método é apresentada na TABELA IV.

TABELA IV. MÍNIMO AMORTECIMENTO (%)

Caso	Sem ESP	Com ESP (Original)	Com ESP (Proposto)
1	-11,90	14,52	14,03
2	-12,10	14,66	14,18
3	-12,66	14,98	14,50
4	-14,04	15,01	14,52
5	-16,59	12,82	14,09
6	-12,68	14,59	14,10

A Fig.4 apresenta o valor do amortecimento antes e após a aplicação do método de Hooke-Jeeves, correspondente à 2ª melhor solução da TABELA III.

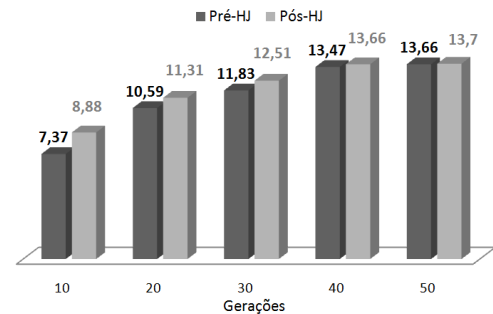


Fig.4. Variação do amortecimento (%) após a busca local.

A partir da Fig.4 é possível perceber a potencialidade do método proposto, baseada no correto balanceamento entre as

etapas de busca local (Hooke-Jeeves) e global (Algoritmo dos Morcegos). Considere como exemplo as soluções pré e pós gradiente na 10ª geração. Observa-se que a busca local por gradiente permitiu um aumento de 1,5% em valores absolutos de amortecimento. Duas análises podem ser feitas: (i) esse aumento não seria obtido somente com a busca local estocástica do Algoritmo Original dos Morcegos e (ii) se a solução estivesse sendo realizada somente com o método de Hooke-Jeeves, a solução poderia estagnar-se no valor de 8,88%, por não realizar uma busca global: observa-se que a busca global do Algoritmo dos Morcegos elevou o amortecimento para 10,59% na 20ª geração.

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

TABELA V. PARÂMETROS DOS ESTABILIZADORES

Gerador	Original			Proposta		
	K	α	ω	K	α	ω
01	9,200	1,050	15,556	11,454	2,889	16,707
02	18,417	6,780	23,982	8,139	5,996	22,936
03	13,140	1,560	14,922	16,129	0,974	14,217
04	16,577	9,860	6,351	16,845	10,000	6,370

A Fig.5 ilustra a convergência do método original e do método proposto (melhor solução da TABELA IV).

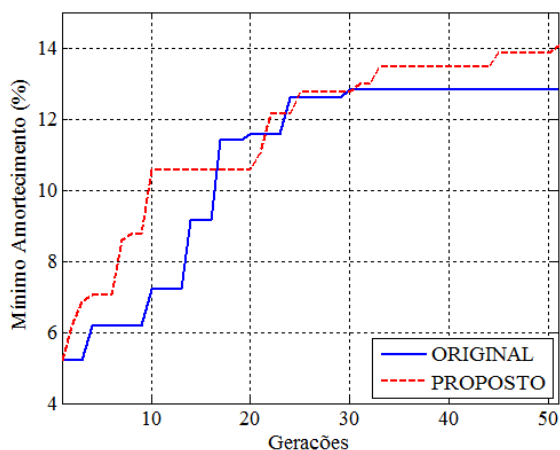


Fig.5. Convergência dos métodos original e proposto.

A TABELA VI apresenta um comparativo das soluções obtidas pelos métodos proposto e original com os apresentados na literatura técnica (considerando os 5 cenários operativos). Observa-se que a metodologia proposta apresenta o melhor resultado.

TABELA VI. COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Referência	Método	$\xi_{min} (%)$
--	Híbrido Proposto	14,03
	Ecolocalização de Morcegos Original	12,82
[19]	Controle Clássico	2,95
[20]	Algoritmos Genéticos	13,09
[21]	Controle Robusto (LMI)	10,10
[22]	Alocação de Pólos utilizando Resíduos da Função de Transferência	10,10

Com o objetivo de validar o controlador ajustado com a metodologia proposta, simulações não lineares foram conduzidas para o quinto cenário. Foi aplicado um curto circuito trifásico na barra 5. Esse curto-circuito foi eliminado após 50ms através da abertura da linha 1-5 e logo após 50ms essa linha foi religada. A Fig.6 apresenta o gráfico do ângulo do gerador de Itaipu, que ilustra o amortecimento das oscilações eletromecânicas. Observa-se que o ajuste proposto permite o amortecimento das oscilações.

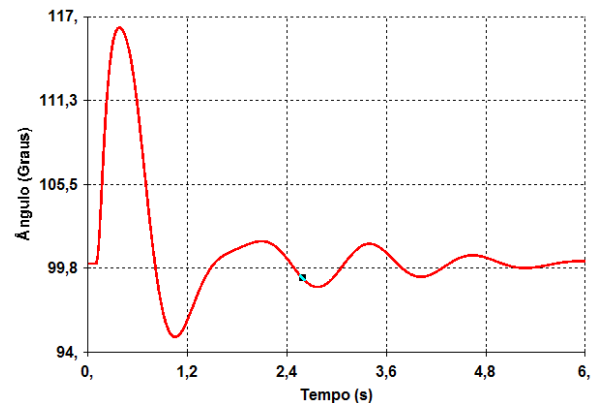


Fig.6. Ângulo no gerador de Itaipu.

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 (para garantir a robustez do controle projetado).

O algoritmo proposto associa a vantagem da busca global feita pelo algoritmo bio-inspirado na ecolocalização dos morcegos com a busca local eficiente realizada pelo método de Hooke-Jeeves (método de busca direta).

Os resultados apresentados mostraram que o algoritmo proposto possui a capacidade de apresentar resultados de boa qualidade e superiores em relação à metodologia original. Isto se deve ao refinamento do ganho realizado através do método de Hooke Jeeves. Foi observado ao longo das simulações, que na ocorrência de estagnação da solução por parte do algoritmo dos morcegos, a etapa de busca local conseguia direcionar a busca para soluções de melhor qualidade. Adicionalmente, testes preliminares para sistemas de maior porte (embora não apresentados), indicam que a metodologia proposta alcança um amortecimento mínimo pré-especificado com maior rapidez.

Como esperado, a inclusão de uma etapa de busca local implica em um aumento do tempo computacional. Entretanto, o esforço computacional pode ser reduzido através: (i) de um algoritmo que selecione os geradores mais apropriados para o refinamento de ganhos (podem ser utilizados os resíduos da função de transferência) e (ii) aplicação de computação paralela.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEPEL pela permissão de uso das versões acadêmicas dos programas computacionais neste trabalho. Adicionalmente, agradecimentos são prestados à FAPEMIG, ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro.

REFERENCES

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
- [2] G. 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): 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 2012.
- [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] M. Eslami, H. Shareef, M. Taha, and M. Khajehzadeh, "Adaptive Particle Swarm Optimization for simultaneous design of UPFC damping controllers," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 57, pp. 116-128, 2014.
- [7] W. Peres, J. A. Passos Filho, and I. C. da Silva Junior, "Coordinated tuning of power system stabilizers using bio-inspired algorithms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 419-428, 2015.
- [8] W. Peres, J.A. Passos Filho, D.N. Arcanjo, I.C. Silva Junior, and L.W. Oliveira, "Power system stabilizers tuning using bio-inspired algorithm," in *PowerTech (POWERTECH)*, 2013 IEEE Grenoble, June 2013, pp. 1-5.
- [9] M.M. Menezes, "Métodos de Otimização Aplicados no Ajuste de ESPs e Controladores de Amortecimento Inseridos no FACTS TCSC em Sistemas de Potência," Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" - Câmpus de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, Ph.D. dissertation 2014.
- [10] A. B. S. Serapião, "Fundamentos de Otimização por Inteligência de Enxames: uma Visão Geral," *Revista SBA Controle & Automação*, vol. 20, pp. 271-304, Sep. 2009.
- [11] F. Neri and C. Cotta, "Memetic algorithms and memetic computing optimization: A literature review," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 2, pp. 1-14, 2012.
- [12] C. Blum, J. Puchinger, G.R. Raidl, and A. Roli, "Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 6, pp. 4135-4151, 2011.
- [13] R.H.C. Takahashi, "Otimização Escalar e Vetorial (Notas de Aula)," Universidade Federal de Minas Gerais: Departamento de Matemática, <http://www.mat.ufmg.br/~taka/>, 2007.
- [14] G.K. Dill and A.S. Silva, "Projeto de Controladores para Sistemas de Potência Utilizando Algoritmos Clássicos e Heurísticos," in *9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2011*, 2011.
- [15] D. Mondal, A. Chakrabarti, and A. Sengupta, *Power System Small-Signal Stability Analysis and Control*, 1st ed.: Academic Press (Elsevier), 2014, 316 p.
- [16] CEPEL, "PacDyn - Small Signal Stability Analysis and Control v9.1: User's Manual," Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobrás), Tech. rep. 2009.
- [17] X.S. Yang, "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm," in *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, Juan R. Gonzalez et al., Eds.: Springer Berlin Heidelberg, 2010b, vol. 284, pp. 65-74.
- [18] M.F. Castoldi, "Algoritmo Híbrido para Projeto de Controladores de Amortecimento de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Algoritmos Genéticos e Gradiente Descendente," Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Ph.D. dissertation 2011.
- [19] N. Martins and L.T.G. Lima, "Eigenvalue and frequency domain analysis of small-signal electromechanical stability problems," 1989.
- [20] S.L.E. Cárdenas, "Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência utilizando Sinais Remotos via Algoritmos Genéticos," Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Ph.D. dissertation 2011.
- [21] G.E. Boukarim, S. Wang, J.H. Chow, G.N. Taranto, and N. Martins, "A comparison of classical, robust, and decentralized control designs for multiple power system stabilizers," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 4, pp. 1287-1292, Nov 2000.
- [22] J.C.R. Ferraz, "Avanços na utilização de Análise Linear em Sistemas Elétricos de Potência," Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Ph.D. dissertation 2002.