

PROJETO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA UTILIZANDO SINAIS REMOTOS VIA PSO

WESLEY PERES, VALCERES V. R. SILVA

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), São João del-Rei, MG, Brazil

wesley.peres@ufsj.edu.br; vvrsilva@ufsj.edu.br

IVO C. SILVA JUNIOR, JOÃO A. P. FILHO

Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brazil

ivo.junior@ufjf.edu.br; joao.passos@ufjf.edu.br

Abstract— This paper presents an application of the Particle Swarm Optimization technique to design a hierarchical control structure for power system oscillation damping. The parameters of controllers are tuned in order to maximize the damping coefficient of the least damped electromechanical mode taking a set of operating conditions into account. The control scheme is composed of two levels: the first one (local level) is based on the use of local signals and the second one (called centralized level) is based on the use of remote signals measured by phasor measurement units. Time delays are included in the design and a case study is conducted for a Brazilian Equivalent System.

Keywords— Power system stabilizers, hierarchical control, Particle Swarm Optimization.

Resumo — O presente trabalho apresenta a aplicação do método de Otimização baseado em Enxame de Partículas no projeto de uma estrutura de controle hierárquica para o amortecimento de oscilações eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência. Os parâmetros dos controladores são ajustados de forma a maximizar o coeficiente de amortecimento do autovalor dominante do sistema. A estrutura de controle é composta por dois níveis: o nível local que utiliza sinais locais e o nível central que utiliza sinais remotamente medidos por Unidades de Medição Fasoriais Sincronizadas. Os tempos de atraso na transmissão de sinais são devidamente tratados na fase de projeto e um estudo de caso é conduzido para um sistema equivalente brasileiro.

Palavras-Chave — Estabilizadores de sistemas de potência, controle hierárquico, otimização baseada em enxame de partículas.

1 Introdução

O problema de oscilações eletromecânicas de baixa frequência em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) tem sido objeto de estudo desde a década de setenta (Demello & Concordia 1969). Essas oscilações se originam a partir do desbalanço entre os torques elétrico e mecânico nos geradores síncronos após a ocorrência de distúrbios. Caso não sejam amortecidas, estas podem gerar desgastes mecânicos nas unidades geradoras, limitar a potência transferida entre áreas e causar blecautes (Pal & Chaudhuri 2005).

A natureza dessas oscilações está associada à frequência de oscilação, podendo ser: (i) local, (ii) inter-área, (iii) intra planta, etc. As oscilações locais possuem uma frequência na faixa de 1-3 Hz e correspondem à oscilação de um gerador contra o resto do sistema. Por outro lado, as oscilações inter-área possuem uma frequência na faixa de 0,3 a 0,7 Hz e correspondem à oscilação entre geradores de diferentes áreas do sistema elétrico (Kundur 1994).

Visando amortecer as oscilações, Demello e Concórdia propuseram, no início da década de setenta, o uso de um controlador denominado de Estabilizador de Sistema de Potência (ESP) (Demello & Concordia 1969). Compostos por estágios de compensação de fase e de ganho, os ESPs possuem a função de modular a tensão de referência do sistema de excitação para amortecer as oscilações eletromecânicas. O sinal de entrada do controlador pode ser

local ou remoto (Dotta, Silva & Decker 2009). Comumente são utilizados os desvios de velocidade como sinais de entrada.

Considerando a existência de diversos geradores no SEP (e consequentemente diversos ESPs), o projeto desses controladores é uma tarefa árdua e complexa. Dois requisitos devem ser satisfeitos na fase de projeto (Pal & Chaudhuri 2005): (i) coordenação e (ii) robustez.

A coordenação corresponde ao ajuste simultâneo dos diversos controladores para se evitar interações indesejadas. A robustez indica que os controladores devem apresentar desempenho satisfatório diante das incertezas associadas às condições operativas do sistema (variações de potência e de topologia) (Dill & Silva 2012).

O amortecimento dos modos de oscilação de natureza local pode ser realizado com sucesso através dos estabilizadores instalados nos geradores síncronos (baseados no uso de sinais locais de velocidade). Já o amortecimento dos modos inter-área também pode ser realizado pelos estabilizadores que utilizam sinais locais, desde que o ajuste coordenado dos vários controladores seja considerado. Outras alternativas para o amortecimento dos modos inter-área são: (i) uso de sinais estabilizantes nos dispositivos FACTS e (ii) uso de sinais remotos na entrada dos ESPs dos geradores síncronos. O uso de sinais remotos são atrativos por possuírem maior observabilidade em relação aos modos inter-área (Dotta, Silva & Decker 2009).

Uma das estruturas de controle baseadas em sinais remotos é a *Hierárquica*, composta por dois níveis. O primeiro nível é denominado de *Controlador Local* (também chamado de *Descentralizado*), que utiliza sinais locais de desvio de velocidade. O segundo, denominado *Controlador Central*, utiliza sinais remotos medidos por Unidades de Medição Fasorial Sincronizada (UMFS). Dessa forma, cada gerador que participe do Controle Hierárquico recebe dois sinais estabilizantes: um do controle local e outro do controle central (Dotta 2009). As UMFS são equipamentos capazes de medir fasores de tensão e corrente em pontos geograficamente distantes em uma referência comum de tempo (Zhang & Bose 2008).

Conforme (Cárdenas 2011), a implementação do controle hierárquico não é justificada se o interesse for o aumento do amortecimento: o ajuste coordenado do controle descentralizado (local) é suficiente. Entretanto, se o ajuste coordenado não for possível devido à fatores técnicos e econômicos, o controle hierárquico é uma opção atrativa.

O problema de ajuste do controle hierárquico foi recentemente tratado utilizando técnicas de controle moderno (robusto) e técnicas de otimização paramétrica. Dentre os trabalhos utilizando controle moderno cita-se: Regulador Linear Quadrático (LQR) (Dotta, Silva & Decker 2009) e Inequações Matriciais Lineares (LMI) (Zhang & Bose 2008).

Quando comparadas com as técnicas de controle moderno, as técnicas baseadas em otimização paramétrica são mais atrativas por: (i) trabalharem com a otimização de índices explícitos que quantificam o desempenho do sistema em malha fechada, (ii) existirem diversos métodos de otimização que podem ser utilizados e (iii) o projeto ser realizado de forma automática com a mínima interferência do projetista. Além disso, cita-se que controladores de ordem reduzida podem ser obtidos com facilidade utilizando-se os métodos de otimização paramétricos.

Dentre os métodos de otimização paramétrica utilizados para o projeto do Controle Hierárquico cita-se: Método Híbrido (baseado em um acoplamento dos métodos Quasi-Newton, Feixes e Gradiente Amostrado) (Dotta 2009) e Algoritmos Genéticos (Cárdenas 2011).

Um recente estudo comparativo entre os métodos LQR, LMI e AG para o projeto de uma estrutura de controle hierárquica pode ser encontrado em (Bento, Dotta & Ramos, 2016).

Com base na revisão bibliográfica realizada, foi identificado que o projeto do controle hierárquico utilizando métodos de otimização paramétrica é um campo frutífero para novas investigações.

Nesse sentido, o presente trabalho visa investigar a potencialidade do emprego da técnica de otimização baseada em Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO) (Kennedy & Eberhart 1995) na solução do problema de projeto do controlador hierárquico.

A modelagem dinâmica do sistema é feita em espaço de estados. O procedimento de ajuste coordenado (simultâneo) é formulado como um problema de otimização que visa maximizar o coeficiente de amortecimento do autovalor dominante em malha fechada considerando diferentes pontos de operação. A consideração de múltiplos pontos de operação visa atender o requisito de robustez diante das incertezas de topologia e geração/carga do sistema.

Os resultados obtidos para um Sistema Equivalente Brasileiro elucidam a potencialidade do método PSO para o projeto de Controladores Hierárquicos.

2 Apresentação do Problema

2.1 Controle Hierárquico

A Figura 1 ilustra as estruturas de controle descentralizada e centralizada em um SEP composto de dois geradores que participam de ambos os níveis do controle hierárquico. No controle centralizado, baseado no uso de sinais remotos, o tempo de atraso na transmissão do sinal é considerado (*Atraso*). Observa-se que cada gerador recebe um sinal do controle local e um do controle central. O sinal de controle é utilizado para modular a tensão de referência do Regulador Automático de Tensão (RAT).

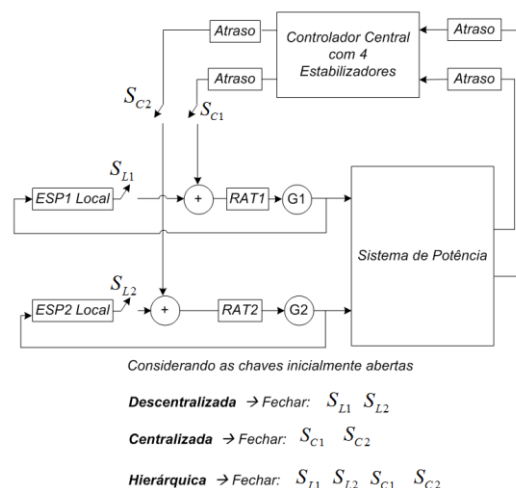


Figura 1. Estruturas de controle consideradas (Dotta 2009)

2.2 Modelo do Estabilizador

A função de transferência de cada estabilizador do controle hierárquico (em ambos os níveis) é apresentada na equação (1).

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

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 .

2.3 Modelo do Sistema em Malha Aberta

Para o projeto de controladores, o sistema de potência é modelado em espaço de estados (no domínio do tempo). 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 (2).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_{aj}x + B_{aj}u \\ y &= C_{aj}x + D_{aj}u\end{aligned}\quad (2)$$

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 (Kundur 1994).

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 (Kundur 1994).

2.4 Modelo das Estruturas de Controle

Os controladores local e central podem ser expressos matricialmente considerando-se seus respectivos estabilizadores.

Considerando-se q estabilizadores no controlador local (descentralizado), pode-se representar essa estrutura de controle por uma matriz diagonal $ESP_{local}(s)$ conforme a equação (3).

$$ESP_{local}(s) = \begin{bmatrix} ESP_1(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & ESP_q(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

O controlador central pode ser representado por uma matriz genérica $ESP_{central}(s)$ de ordem $(q \times p)$ conforme a equação (4). Nesse caso: q é o número de saídas do controlador (número de geradores que recebem sinais do controlador central) e p é o número de entradas do controlador (número de geradores que enviam seus sinais remotos de velocidade para o controle central).

$$ESP_{central}(s) = \begin{bmatrix} ESP_{11}(s) & \dots & ESP_{1p}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ESP_{q1}(s) & \dots & ESP_{qp}(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.5 Modelo dos Tempos de Atraso

O tempo de atraso na transmissão de sinais remotos foi modelado usando a Aproximação de Padé conforme a equação (5). Essa aproximação foi adotada em (Dotta, Silva & Decker 2009; Cárdenas 2011) e apresenta uma resposta nula em $t = 0$, sendo adequada para a modelagem de sistemas com atraso.

$$e^{-sT} = \frac{-(2T).s + 6}{(T^2).s^2 + (4T).s + 6} \quad (5)$$

2.6 Processo de Realimentação

Neste trabalho, o processo de inclusão dos controladores no sistema (processo de realimentação) é feito em duas etapas.

Inicialmente o controlador local é inserido no sistema. O controlador $ESP_{local}(s)$ pode ser representado em espaço de estados conforme a equação (6).

$$\begin{aligned}\dot{x}_c &= A_c x_c + B_c u_c \\ y_c &= C_c x_c + D_c u_c\end{aligned}\quad (6)$$

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).

Em seguida, o controlador central é inserido considerando os tempos de atraso de transmissão do sinal. O controlador central $ESP_{central}(s)$ considerando os tempos de atraso também pode ser representado de acordo com a equação (6).

2.7 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 (7).

$$\begin{aligned}\dot{x}_f &= A_{fj}x_f + B_{fj}u_f \\ y_f &= C_{fj}x_f + D_c u_f\end{aligned}\quad (7)$$

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

2.8 Problema de Otimização

Neste trabalho, o ajuste dos controladores local e central é realizado de forma independente (mas o problema de otimização segue a mesma formulação).

O procedimento de ajuste é formulado como um problema de otimização com o objetivo de otimizar o coeficiente de amortecimento do autovalor dominante do sistema considerando um conjunto de condições operativas.

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 (8) apresenta a função objetivo:

$$f_{ob} = \begin{cases} 0 & \text{se algum } (\xi_k)_j < 0 \text{ (instável)} \\ \xi_{\min} & \text{se todos os } (\xi_k)_j \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

A formulação do problema de otimização é apresentada na equação (9).

$$\begin{cases} \text{Min} & -f_{ob} \\ & K_{p \min} \leq K_p \leq K_{p \max} \\ \text{s. a.} & \alpha_{p \min} \leq \alpha_p \leq \alpha_{p \max} \\ & \omega_{p \min} \leq \omega_p \leq \alpha_{p \max} \end{cases} \quad (9)$$

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

2.9 Estrutura dos Indivíduos

A estrutura de cada indivíduo da população do PSO é representado na equação (10).

$$x_k = [K_1 \quad \dots \quad K_p | \alpha_1 \quad \dots \quad \alpha_p | \omega_1 \quad \dots \quad \omega_p] \quad (10)$$

Para cada indivíduo constrói-se a função de transferência da equação (1) e o modelo em espaço de estados da equação (6). Em seguida calcula-se as matrizes de espaço de estados para todos os pontos de operação (equação (7)) e os coeficientes de amortecimento do sistema em malha fechada. A função aptidão será o coeficiente de amortecimento do autovalor dominante.

2.10 Considerações 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 (CEPEL 2009). Os autovalores do sistema em malha aberta e fechada são calculados utilizando-se as rotinas internas do MATLAB®.

3 Otimização baseada em Enxame de Partículas

O método de Otimização baseado em Enxames de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*) foi proposto em (Kennedy & Eberhart 1995) e baseia-se no comportamento social de bandos de pássaros na busca por alimentos. Os indivíduos (pássaros) da população (bando) se movimentam no espaço sofrendo influência das suas melhores experiências anteriores (fator cognitivo) e das melhores experiências de suas vizinhas (fator social).

Em uma determinada geração t , a cada partícula i está associada: (i) uma velocidade v_i^t , (ii) uma posição x_i^t e (iii) uma memória da sua melhor posição durante o processo de busca $pbest_i$ (fator cognitivo). Essas grandezas são vetores N-dimensionais (mesma dimensão do espaço de busca: três vezes o número de estabilizadores, pois são três parâmetros para cada ESP). As coordenadas da melhor posição corrente de toda a população (aquela que fornece o menor valor para a função aptidão entre todas as partículas) são armazenadas em um vetor $gbest$ (fator social).

As equações (11)-(13) governam o movimento das partículas durante o processo de otimização.

$$v_i^{t+1} = w^t \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest - x_i^t) \quad (11)$$

$$w^t = w_{\max} - \left(\frac{w_{\max} - w_{\min}}{t_{\max}} \right) \cdot t \quad (12)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (13)$$

em que c_1 e c_2 são constantes de aceleração positivas (iguais à 2), r_1 e r_2 são números randômicos, w^t é a constante de inércia na geração t que controla a capacidade de busca global e local do método (esta sofre um decréscimo de $w_{\max} = 0,9$ até $w_{\min} = 0,4$) e $t_{\max}$ é o número de gerações. A velocidade é limitada entre $[-4, 4]$ e as posições (vetor de soluções da equação (10)) são limitadas de acordo com a equação (9). Quando ocorrem violações, as variáveis são colocadas em seus limites violados.

O algoritmo do PSO é apresentado na Figura 2.

Início
Definir a função objetivo e as variáveis do problema e inicializar os parâmetros do algoritmo
Inicializar contador de iterações $t \leftarrow 0$
Inicializar as posições x_i^t e velocidades v_i^t de todas as partículas dentro dos limites permitidos
Calcular a função aptidão associada à cada partícula
Para todas as partículas fazer: $pbest_i = x_i^t$ e encontrar a melhor posição global $gbest$
Repita
Para Todas as Partículas Faça
Atualizar a velocidade v_i^{t+1} e testar a factibilidade
Atualizar a posição x_i^{t+1} e testar a factibilidade
Calcular a função aptidão associada à partícula
Se o valor da função aptidão for menor que a da melhor posição individual corrente, fazer: $pbest_i = x_i^{t+1}$
Fim-Para
Encontrar a melhor solução corrente $gbest$
$t \leftarrow t + 1$
Fim-Repita
Fim

Figura 2. Algoritmo do PSO

4 Estudo de Caso

Nessa seção é apresentado um estudo de caso para um sistema equivalente brasileiro. Foi utilizada a plataforma MATLAB® 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.

4.1 Descrição do Sistema em Malha Aberta

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

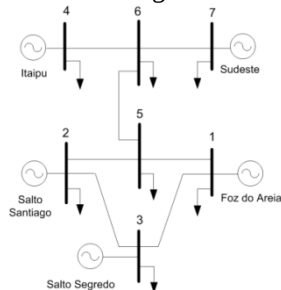


Figura 3. Sistema equivalente Sul-Sudeste

Este sistema é composto por cinco máquinas síncronas, sendo que a máquina da barra 7 representa o sistema equivalente da região sudeste do Brasil (portanto não possui estabilizador). 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 (Martins & Lima 1989). A análise modal 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 1. O mínimo amortecimento em malha aberta para cada ponto é apresentado: observa-se que o sistema é instável.

Tabela 1. Característica em Malha Aberta.

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

4.2 Inclusão do Controle Local

O controlador local (descentralizado), pode ser ajustado utilizando-se a metodologia descrita na seção 2. Entretanto, o mesmo procedimento adotado em (Dotta, Silva & Decker 2009) será utilizado: parte-se do princípio que as empresas configuraram os seus respectivos estabilizadores de acordo com métodos de projeto normatizados pela concessionária. Nesse sentido, o ajuste não coordenado proposto em (Martins & Lima 1989) será utilizado (técnicas

de controle clássico foram empregadas), vide Tabela 2.

Tabela 2. Controle Local.

Geradores	K_p	α	ω
01, 02, 03	10,000	4,000	6,667
04	16,000	8,000	5,439
São considerados dois blocos de compensação de fase e a constante de tempo do filtro washout é igual a 3 segundos			

Com o controle local, o sistema é estável nas seis condições operativas consideradas. Entretanto um amortecimento mínimo de 2,95% é obtido para o quinto cenário. No presente trabalho, a melhoria do amortecimento será feita através do ajuste do controlador central utilizando o método PSO.

4.3 Estrutura do Controle Central

A Figura 4 apresenta o esquema do controlador centralizado, composto por 16 estabilizadores (os 4 geradores participam do controle central). Existem portanto, 48 parâmetros a serem otimizados. Inicialmente os sinais remotos de velocidade são medidos pelas Unidades de Medição Fasorial Sincronizadas (UMFS) e enviados ao controlador central. Em seguida, os sinais processados no controle central são reenviados para os geradores.

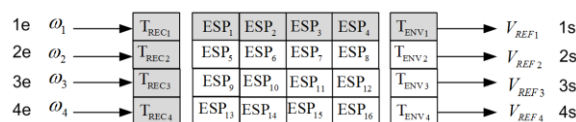


Figura 4. Estrutura do controlador central

Os tempos de recepção dos sinais remotos ($T_{REC} = 200ms$) e de envio do sinal de controle ($T_{ENV} = 200ms$) são considerados. Como exemplo, o sinal de controle a ser injetado no gerador 1 é uma composição dos sinais remotos processados no controlador central, conforme destacado na Figura 1. Os índices (1s) e (1e) indicam, respectivamente, a primeira saída do controlador central (a ser injetada em G1) e a primeira entrada (sinal remoto medido em G1). A mesma notação é aplicada aos demais sinais.

Para efeitos de informação, a dimensão da matriz de estados é igual: a 30 em malha aberta, 42 em malha fechada com o controle local e 154 em malha fechada com o controle hierárquico.

As seguintes constantes são associadas ao controlador central: $T_w = 3$ seg e $nb = 2$. Os limites das variáveis são dados pela equação (14).

$$\begin{aligned} 0,01 &\leq K_p \leq 20,00 \\ 0,10 &\leq \alpha_p \leq 10,00 \\ 1,25 &\leq \omega_p \leq 30,00 \end{aligned} \quad (14)$$

São considerados 30 indivíduos e 50 gerações. São executadas 3 simulações para o método PSO partindo de uma mesma população inicial (posição e velocidade). A melhor solução da população inicial corresponde a um amortecimento de 4,66% em ma-

lha fechada considerando todos os seis cenários operativos.

4.4 Resultados

A Tabela 3 apresenta os resultados para as três simulações realizadas. Observa-se que o sistema, com a presença do controlador central, apresenta coeficientes de amortecimento satisfatórios.

Tabela 3. Resultados Obtidos.

Amortecimento Mínimo (%)			Tempo Médio (min)
Pior	Intermediária	Melhor	
13,64	14,59	15,88	14,95

A Tabela 4 apresenta os parâmetros de ajuste dos estabilizadores do controlador central.

Tabela 4. Parâmetros de Ajuste.

ESP	K_p	α	ω	ESP	K_p	α	ω
01	11,66	10,00	13,42	09	8,42	0,88	19,40
02	0,01	2,99	22,14	10	14,46	0,10	10,51
03	0,01	10,00	23,27	11	11,49	10,00	22,46
04	7,68	5,11	26,67	12	0,01	3,67	3,72
05	15,94	10,00	21,09	13	4,38	5,43	27,33
06	4,53	8,49	23,59	14	5,01	7,20	7,62
07	1,77	1,10	10,99	15	13,20	0,10	1,25
08	0,01	0,10	4,04	16	4,61	7,11	7,78
Amortecimento Mínimo: 15,88 % no 3º cenário							

Uma comparação com os resultados apresentados na literatura é apresentada na Tabela 5. Observa-se que o resultado obtido pelo PSO é melhor do que os existentes para o sistema sob análise (partindo-se de um mesmo controle local). Acrescenta-se que nas referências (b) e (c), a ordem do sistema foi reduzida para redução da complexidade, o que não foi necessário no presente artigo.

Tabela 5. Comparação com a Literatura.

Ref.	Estrutura / Método	ξ_{min} (%)
--	Hierárquico (PSO)	15,88
(a)	Somente Controle Local	2,95
(b)	Hierárquico (Controle Moderno - LQR)	9,67
(c)	Hierárquico (Método Híbrido)	9,14

(a) (Martins & Lima 1989), (b) (Dotta, Silva & Decker 2009) e (c) (Dotta 2009)

Com o objetivo de validar o controlador ajustado pelo PSO, simulações não lineares foram conduzidas. O evento simulado corresponde à aplicação de 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.

As simulações foram conduzidas para o quinto cenário, uma vez que este apresentou o menor fator de amortecimento na maioria dos casos (malha aberta e controle local). Na Figura 5, o desempenho do sistema com o controlador descentralizado (nível local com o ajuste da literatura e com 2,95% de amortecimento) é comparado com o controlador hierárquico (amortecimento de 15,88%). Portanto, as simulações não lineares validam a eficiência dos controladores projetados.

5 Conclusões

O presente artigo apresentou a aplicação do método de otimização baseado em enxame de partículas no problema de projeto coordenado e robusto de um controlador hierárquico para o amortecimento de oscilações eletromecânicas. O procedimento de ajuste foi formulado como um problema de otimização visando a maximização do coeficiente de amortecimento do autovalor dominante do sistema diante de várias condições operativas. Comparações com a literatura foram realizadas e simulações não lineares validaram a eficiência dos estabilizadores projetados.

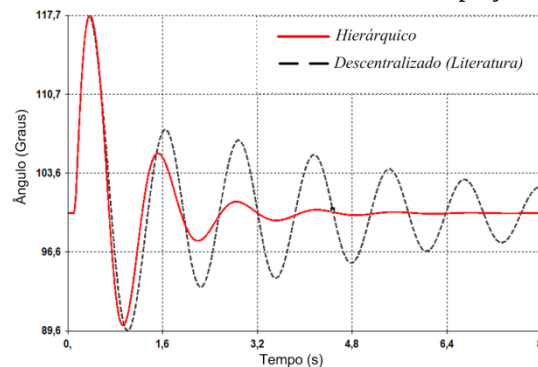


Figura 5. Ângulo do gerador de Itaipu - cenário 5

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.

Referências

- Bento, M.E.C., Dotta, D. and Ramos, R.A. (2016), Performance Analysis of Wide Area Damping Control Design Methods, 2016. Proceedings., IEEE Power & Energy Society General Meeting.
- Cárdenas, S.L.E. (2011). Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência utilizando Sinais Remotos via Algoritmos Genéticos (Doutorado em Engenharia Elétrica), Rio de Janeiro (RJ).
- CEPEL (2009), PacDyn - Small Signal Stability Analysis and Control v9.1: User's Manual, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobrás).
- Demello, F.P. and Concordia, C. (1969), Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-88, no. 4, pp. 316-329.
- Dill, GK and Silva, A.S. (2012), Robust Design of Power System Controllers Based on Optimization of Pseudospectral Functions, IEEE Transactions on Power Systems, vol 28, no. 2, pp. 1756-1765.
- Dotta, D. (2009), Controle Hierárquico usando Sinais de Medição Fasorial Sincronizada (Doutorado em Engenharia Elétrica), Florianópolis (SC).
- Dotta, D. Silva, A.S. and Decker, I.C. (2009), Wide-Area Measurements-Based Two-Level Control Design Considering Signal Transmission Delay, IEEE Transactions on Power Systems, vol 24, no. 1, pp. 208-216.

- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995), Particle swarm optimization, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on Neural Networks.
- Kundur, P. (1994), Power System Stability and Control, 1st ed, McGraw-Hill, 1196 p.
- Martins, N. and Lima, L.T.G. (1989), Eigenvalue and frequency domain analysis of small signal electromechanical stability problems, IEEE Special Publication on Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance, pp. 17-33.
- Pal, B. and Chaudhuri, B. (2005), Robust Control in Power Systems, 1st ed, Springer, 190 p.
- Zhang, Y. and Bose, A. (2008), Design of Wide-Area Damping Controllers for Interarea Oscillations, IEEE Transactions on Power Systems, vol 23, no. 3, pp. 1136-1143.