

Ajuste Coordenado dos Controladores ESP e GUPFC-POD Através do Particle Swarm Optimization

Ednei L. Miotto/UTFPR
Dept. Engenharia Eletrônica
Toledo/PR, Brasil
edneimiotto@utfpr.edu.br

Elenilson V. Fortes/IFG
Dept. Áreas Acadêmicas
Jataí/GO, Brasil
elenilson.fortes@ifg.edu.br

Percival B. de Araujo/UNESP
Dept. Engenharia Elétrica
Ilha Solteira/SP, Brasil
percival@dee.feis.unesp.com

Resumo—Este trabalho destaca o ajuste coordenado dos parâmetros de Estabilizadores de Sistema de Potência (ESP) e do conjunto *Generalize Unified Power Flow Controller - Power Oscillation Damping* (GUPFC-POD) utilizando o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO). O ajuste é realizado de modo a introduzir taxas de amortecimento desejadas aos modos oscilatórios de baixa frequência presentes no sistema elétrico de potência (SEP). A análise dos resultados das simulações, realizadas em um sistema de potência teste, comprovam a eficiência da metodologia proposta. Outro importante resultado apresentado neste trabalho está relacionado à atuação do GUPFC no controle de tensão em barras deficientes do SEP.

Keywords—Controladores Suplementares, estabilidade a pequenas perturbações, ESP, GUPFC-POD, PSO.

I. INTRODUÇÃO

Estabilidade no SEP está relacionada com o seu comportamento quando submetido a uma perturbação. Se a perturbação é de pequena magnitude (por exemplo, variações de carga ao longo do dia que levam a consequentes ajustes de geração) esta é chamada de estabilidade a pequenas perturbações, a qual será o foco deste trabalho [1].

Uma pequena perturbação pode ser descrita matematicamente como um pequeno desvio no estado do sistema. Dessa forma, todas as equações que descrevem o sistema podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio estável, assim, todas as propriedades aplicáveis à análise de sistemas lineares podem ser utilizadas.

Essa característica possibilita representar o SEP por modelos lineares, como por exemplo, o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP), cujo princípio fundamental baseia-se no balanço de potência ativa e reativa em cada barra do sistema, durante todo o processo dinâmico [2].

A presença de oscilações eletromecânicas de baixa frequência (principalmente as de Modo Local e Modo Interárea) pode comprometer a operação do SEP, motivo pelo qual um grande número de pesquisas relacionadas à estabilidade em sistemas elétricos venha sendo realizadas ao longo dos últimos anos e apresentando contribuições de

grande relevância nesta área.

Os primeiros passos para o controle dessas oscilações foram dados em [3], cujos autores introduziram os conceitos básicos para o projeto de Estabilizadores de Sistema de Potência (ESPs), mais tarde esse assunto foi retomado em [4]. Tais estabilizadores são largamente e efetivamente utilizados para o amortecimento de oscilações eletromecânicas, atuando junto aos reguladores automáticos de tensão (RATs) dos geradores. Desta forma, estes estabilizadores possuem grande atuação principalmente nos modos de oscilação do tipo local.

Com a evolução da eletrônica de potência, novos dispositivos automáticos de compensação foram sendo incorporados ao SEP para melhorar seu controle e torná-lo mais flexível e seguro. São os chamados *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS), onde se destaca o *Generalize Unified Power Flow Controller* (GUPFC) [5]. Estudos posteriores mostraram que se ao dispositivo FACTS for acoplado um controlador *Power Oscillation Damping* (POD), é possível fornecer amortecimento suplementar às oscilações do SEP, em especial as do tipo interárea [6].

Entretanto, para que os controladores ESP e o conjunto GUPFC-POD desempenhem satisfatoriamente o papel de inserir amortecimento aos modos oscilatórios do SEP, o ajuste de seus parâmetros é de fundamental importância. Diferentes métodos de otimização vêm sendo utilizados com sucesso por pesquisadores do SEP para o ajuste dos parâmetros destes controladores, como uma alternativa aos métodos clássicos já bastante consolidados na literatura.

Neste trabalho será utilizado para o ajuste dos parâmetros dos controladores um método de otimização baseado no algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) proposto em [7]. Este algoritmo já foi utilizado em diversas aplicações e se destacou com os resultados obtidos. Em [8] o PSO foi utilizado para a localização ótima de dispositivos FACTS no SEP. Em [9] o PSO foi utilizado na solução do fluxo de potência ótimo em dois sistemas testes onde atuam dispositivos FACTS, enquanto em [10], o PSO ajustou os parâmetros de controladores suplementares instalados em um

SEP multimáquinas modelado pelo Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC).

Para a validação do ajuste proposto foram realizadas simulações utilizando-se o *software* MatLab® em um sistema teste conhecido como sistema simétrico de duas áreas.

II. MODELO DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA DO GUPFC

Esta seção apresenta o modelo de injeção de potência para representar o GUPFC no fluxo de potência. A Fig. 1 mostra o dispositivo GUPFC conectado entre três barras (i, j e k) do SEP. Esta configuração utiliza três conversores fonte de tensão série (VSCs) conectados entre si através de um link comum de corrente contínua [11], [12]. Observa-se que o conversor VSC1 está conectado à barra comum de instalação do dispositivo (barra i) através de um transformador de acoplamento *shunt*. Já os conversores VSC2 e VSC3 estão conectados em série com as linhas de transmissão (LTs) gerenciadas pelo controlador, por meio dos transformadores de acoplamento série.

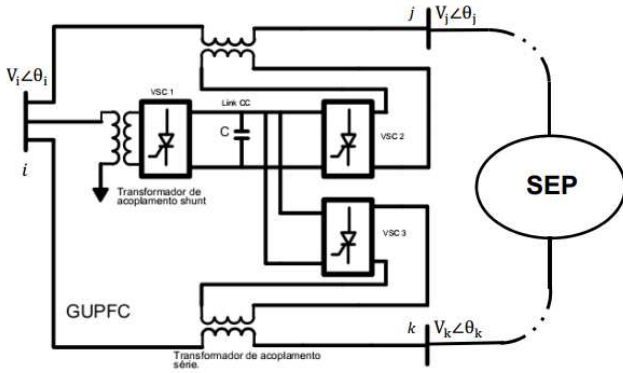


Figura 1. Diagrama esquemático do GUPFC.

As equações a seguir são baseadas na Fig. 2 que representa o circuito equivalente do GUPFC que será modelado por uma fonte de corrente ideal ($\tilde{I}_{sh}$) conectada em derivação com a barra comum i de instalação, e por duas fontes de tensão série que injetam no sistema tensões síncronas de amplitude e ângulo de fase controlável ($\tilde{V}_{sin}$). Em série com cada uma das fontes está uma susceptância (b_{in}) que modela os transformadores de acoplamento. E através do controle da amplitude e ângulo de fases da tensão série injetada $\tilde{V}_{sin}$, que o GUPFC controla os fluxos de potência nas LTs onde está instalado [13].

$$\tilde{V}_{sin} = r_n e^{j\gamma n} \tilde{V}_i, \text{ sendo } n = j, k \quad (1)$$

Em (1), r_n e γn são os parâmetros das tensões série injetadas, sendo $r_n = \tilde{V}_{sin}/\tilde{V}_i$, e γn o ângulo relativo de $\tilde{V}_{sin}$ com a respectiva tensão da barra $\tilde{V}_i$. A faixa controlável de magnitude relativa (r_n) e o ângulo (γn) de $\tilde{V}_{sin}$ são descritas em (2).

$$\begin{cases} 0 < r_n < r_{nmax} \\ 0 < \gamma_n < 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

Ainda com relação a Fig. 2, $\tilde{V}'_j$ e $\tilde{V}'_k$ correspondem às tensões nas barras fictícias utilizadas na modelagem do

dispositivo. P_i e Q_i é a injeção de potência complexa na barra i do sistema; P_{ji} e Q_{ji} são os fluxos de potência ativa e reativa no ramo $i-j$, saindo da barra j , P_{ki} e Q_{ki} são os fluxos de potência ativa e reativa no ramo $i-k$, saindo da barra k e, I_{ji} e I_{ki} , são as correntes nos ramos $i-j$ e $i-k$, saindo das barras j e k , respectivamente.

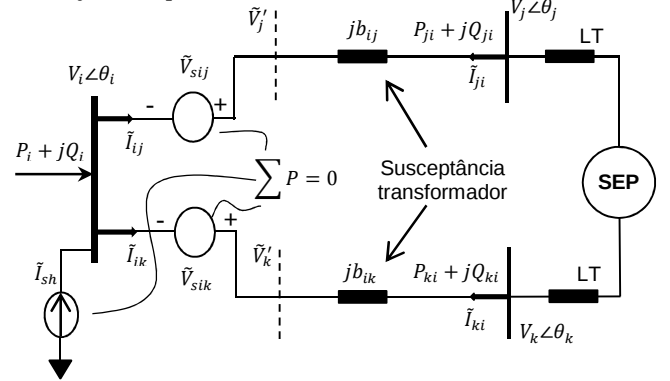


Figura 2. Circuito equivalente do GUPFC.

O diagrama fasorial apresentado pela Fig. 3 permite expressar as componentes em quadratura (V_{pn}) e em fase (V_{qn}) com a tensão ($\tilde{V}_i$) conforme (3) e (4).

$$V_{pn} = r_n V_i \sin(\gamma_n) \quad (3)$$

$$V_{qn} = r_n V_i \cos(\gamma_n) \quad (4)$$

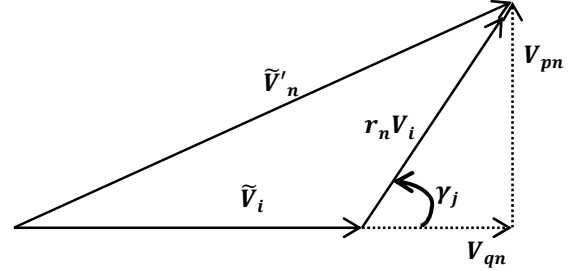


Figura 3. Diagrama fasorial do GUPFC.

No modelo de injeção de potência do GUPFC, a fonte de corrente ideal ($\tilde{I}_{sh}$) é decomposta em duas componentes, uma em fase (i_p) e outra em quadratura (i_q) com a tensão ($\tilde{V}_i$) da barra comum de instalação i , como descrito em (5).

$$\tilde{I}_{sh} = (i_p - ji_q) e^{j\theta_i} \quad (5)$$

Uma restrição importante que deve ser satisfeita para a correta implementação do GUPFC no fluxo de potência diz respeito à troca de potência ativa entre seus conversores. Assim, quando as perdas são desprezadas, toda a potência ativa fornecida pelo conversor *shunt* VSC1 deve ser igual à potência entregue ao sistema CA pelos conversores série VSC2 e VSC3 [14].

$$P_{sh} = -\sum_{(m=i,j,k)} P_{se,m} \quad (6)$$

Considerando a restrição apresentada em (6), o circuito equivalente do GUPFC ilustrado pela Fig. 2 e as equações (1) a (5), chega-se ao modelo de injeção de potência do

dispositivo FACTS GUPFC (equações (7) a (10)), baseado no modelo apresentado em [13], que representa a soma das contribuições séries das fontes de tensão síncronas e a contribuição *shunt* da fonte de corrente ideal.

$$P_{inj,i} = -\sum_{(n=j,k)} b_{in} V_n [V_{qn} \sin(\theta_{in}) + V_{pn} \cos(\theta_{in})] \quad (7)$$

$$Q_{inj,i} = -V_i \sum_{(n=j,k)} b_{in} V_{qn} - V_i I_q \quad (8)$$

$$P_{inj,n} = b_{in} V_n [V_{qn} \sin(\theta_{in}) + V_{pn} \cos(\theta_{in})] \quad (9)$$

$$Q_{inj,n} = b_{in} V_n [V_{qn} \cos(\theta_{in}) - V_{pn} \sin(\theta_{in})] \quad (10)$$

As equações (7) a (10) descreve o modelo de injeção de potência do GUPFC em termos das componentes em fase e quadratura da tensão do barramento comum de instalação do dispositivo ($\tilde{V}_i$). $P_{inj,i}$ e $Q_{inj,i}$ são as injeções de potência ativa e reativa no barra comum de instalação do dispositivo. $P_{inj,n}$ e $Q_{inj,n}$, com $n = j, k$, são as injeções de potência ativa e reativa nas barras j e k de instalação, respectivamente. Além disso, os parâmetros r_n e γ_n são suprimidos no conjunto de equações obtido. A Fig. 4 ilustra o modelo de injeção de potência e os fluxos de potência ativa e reativa (P_{Lj} , Q_{Lj} , P_{Lk} e Q_{Lk}) controlados nas duas LTs que o GUPFC gerencia.

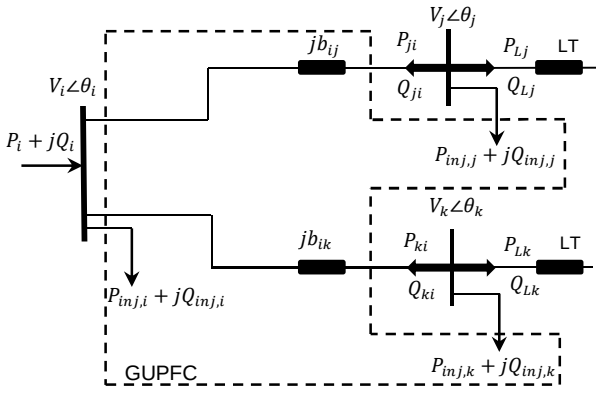


Figura 4. Controle dos fluxos de potência pelo GUPFC.

O modelo anterior também facilita a inclusão do GUPFC nos programas de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo, visto que mantém inalterada as equações de fluxo de potência convencional para as barras sem o dispositivo e considera as contribuições do GUPFC como injeções de potência ativa e reativa, nas barras onde está conectado [13]. Em (11) e (12) é apresentado os balanços de potência ativa e reativa nas barras de instalação do dispositivo, sendo $m = i, j, k$.

$$0 = P_{gm} - P_{inj,m} - P_{cm} - P_{calc,m} \quad (11)$$

$$0 = Q_{gm} - Q_{inj,m} - Q_{cm} - Q_{calc,m} \quad (12)$$

Em (11) e (12), P_{gm} e Q_{gm} são as gerações de potência ativa e reativa entrando na barra m . Sendo P_{cm} e Q_{cm} possíveis cargas ativa e reativa conectadas à barra m . E, $P_{calc,m}$ e $Q_{calc,m}$ as potências ativa e reativa transmitidas através das LTs, deixando a barra m . finalmente, $P_{inj,m}$ e $Q_{inj,m}$ são as potências ativa e reativa referentes às injeções de potência controladas pelo GUPFC. O balanço de potência ativa e reativa nas barras controladas pelo dispositivo resultam nas

expressões dos fluxos controlados que são representados por (13) e (14), sendo $n = j, k$.

$$P_{Ln} = -P_{ni} - P_{inj,n} \quad (13)$$

$$Q_{Ln} = -Q_{ni} - Q_{inj,n} \quad (14)$$

Onde P_{ni} e Q_{ni} são os fluxos convencionais de potência ativa e reativa e, P_{Ln} e Q_{Ln} são os fluxos controlados pelo dispositivo e servirão como entradas da estrutura de controle do GUPFC que será apresentada na próxima seção.

A. Estrutura do Sistema de Controle do GUPFC

A estrutura de controle utilizada para representar a dinâmica do dispositivo é apresentada na Fig. 5, onde cada controlador PI está relacionado com uma variável das fontes de tensão que representam os conversores VSCs série e *shunt* [13]. Na Fig. 5 os ganhos K_{p1} a K_{p4} e as constantes de tempo T_{i1} a T_{i4} são os parâmetros dos controladores PI. Já o ganho K_r e a constante de tempo T_r , estão relacionados com a regulação da tensão do barramento comum de instalação do GUPFC, e a constante de tempo T_m está relacionada com o tempo de processamento do sistema de controle do dispositivo, cuja faixa varia de 1ms a 10ms [5]. O sinal de controle suplementar V_{sup} (provido do controlador POD) modula a componente em quadratura (V_{pj}) da fonte de tensão do conversor VSC2, cujo objetivo é fornecer amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas do SEP.

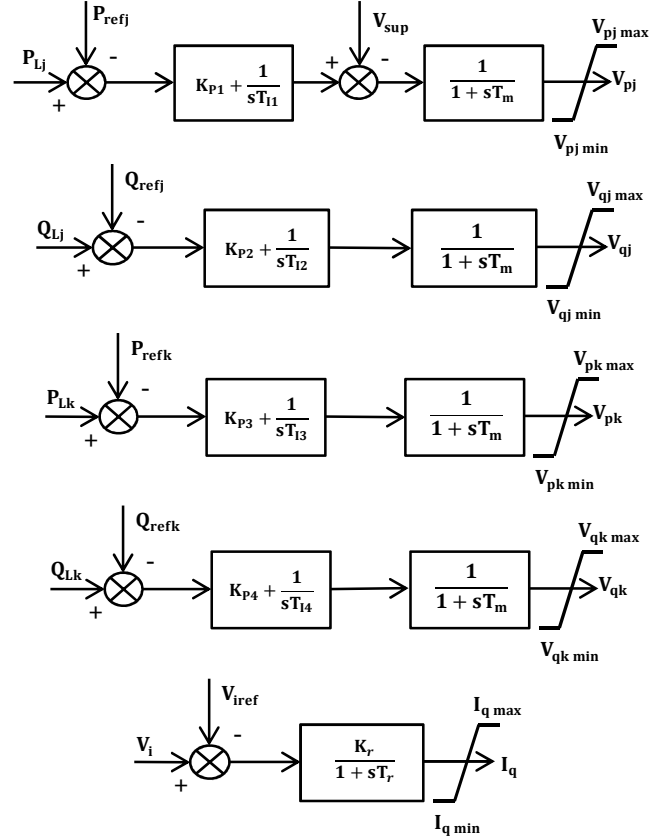


Figura 5. Estrutura do sistema de controle do GUPFC.

O comportamento dinâmico da estrutura de controle apresentada na Fig. 5 é dado pelo conjunto (15) a (23), obtidas por inspeção dos diagramas de blocos anterior.

$$\dot{V}_{pj} = \frac{K_{P1}}{T_m}(P_{refj} - P_{Lj}) + \frac{1}{T_m}X_1 - \frac{1}{T_m}V_{sup} - \frac{1}{T_m}V_{pj} \quad (15)$$

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_{I1}}(P_{refj} - P_{Lj}) \quad (16)$$

$$\dot{V}_{qj} = \frac{K_{P2}}{T_m}(Q_{refj} - Q_{Lj}) + \frac{1}{T_m}X_2 - \frac{1}{T_m}V_{qj} \quad (17)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_{I2}}(Q_{refj} - Q_{Lj}) \quad (18)$$

$$\dot{V}_{pk} = \frac{K_{P3}}{T_m}(P_{refk} - P_{Lk}) + \frac{1}{T_m}X_3 - \frac{1}{T_m}V_{pk} \quad (19)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{T_{P3}}(P_{refk} - P_{Lk}) \quad (20)$$

$$\dot{V}_{qk} = \frac{K_{P4}}{T_m}(Q_{refk} - Q_{Lk}) + \frac{1}{T_m}X_4 - \frac{1}{T_m}V_{qk} \quad (21)$$

$$\dot{X}_4 = \frac{1}{T_{I2}}(Q_{refk} - Q_{Lk}) \quad (22)$$

$$\dot{I}_q = \frac{K_r}{T_r}(V_{iref} - V_i) - \frac{1}{T_r}I_q = \frac{1}{T_r}[K_r(V_{iref} - V_i) - I_q] \quad (23)$$

Na Fig. 5, P_{refj} e Q_{refj} são os valores especificados pelo operador do sistema para o fluxo de potência ativa e reativa nas LTs $i - n$, onde $n = j, k$. V_{iref} é a tensão de referência na barra comum de instalação do FACTS, e V_i é a tensão na barra i controlada pelo GUPFC através da modulação da corrente I_q em quadratura do conversor VSC1 [13].

III. ESTRUTURA DOS CONTROLADORES PSS E POD

A fim de introduzir amortecimento às oscilações do SEP é necessária a inclusão de controladores suplementares de amortecimento como o ESP (inseridos na malha de controle dos RATs das unidades geradoras) e o POD (adicionado à malha de controle do dispositivo FACTS).

A Fig. 6 apresenta uma estrutura genérica que pode ser utilizada para ambos os controladores ESP e POD.

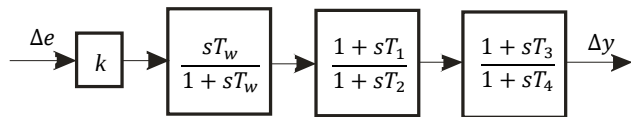


Figura 6. Estrutura dos controladores ESP e POD.

As semelhanças entre os controladores ESP e POD devem-se ao fato de ambos possuírem um bloco de filtro washout, blocos de avanço-atraso de fase e um ganho estático representado por K_{PSS} para o ESP e K_{POD} para o POD.

Como sinal de entrada Δe para o ESP é utilizada a variação de velocidade angular ($\Delta\omega_k$) do gerador k , e para o POD a entrada é desvio do fluxo de potência ativa (ΔP_{km}) na LT adjacente à de instalação do conjunto GUPFC-POD.

Quanto às saídas, Δy , no ESP é a tensão (ΔV_i), inserida como sinal adicional à malha de controle do RAT, que neste trabalho utiliza um modelo de primeira ordem para representá-lo. No POD é gerado um sinal estabilizante (ΔV_{sup}) que é somado à malha de controle do dispositivo FACTS

GUPFC, de forma a modular a componente em quadratura V_{pj} do conversor secundário do dispositivo.

A representação do SEP modelado pelo MSP, incluindo as equações diferenciais dos controladores ESPs e o conjunto GUPFC-POD, permite obter a matriz de estados do sistema completo e analisar sua estabilidade a pequenas perturbações.

IV. PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

A técnica *Particle Swarm Optimization* foi desenvolvida em [7]. Ela se baseia na metáfora do comportamento social que foi concebido a partir de observações de grupos de animais na natureza, tais como bando de pássaros e cardume de peixes. Esta população de indivíduos, mais comumente chamada de partículas, apresenta-se com capacidade individual limitada, porém, com comportamento coletivo inteligente.

A cada iteração do algoritmo, as partículas (possíveis soluções do problema) movem-se através de um espaço de busca (região *N-dimensional*) influenciadas por suas melhores experiências anteriores e também pelas melhores experiências de suas partículas vizinhas, na procura pelo ponto ótimo.

Dessa forma, cada partícula se autoavalia, comparando seu desempenho com o restante da população, e imitando apenas aqueles indivíduos com mais sucesso do que ela. A qualidade das soluções encontradas são medidas por uma função predefinida de aptidão (*fitness*), que depende das características do problema a ser resolvido.

A. Formulação Matemática do PSO

De modo a direcionar os voos das partículas para regiões mais promissoras do espaço de busca, um coeficiente de inércia β é utilizado pelo algoritmo para aumentar a sua capacidade de busca. Valores de β entre 0,8 e 1,20 dá ao PSO melhores chances de encontrar o ótimo global com um número moderado de iterações. Neste trabalho o valor de β foi fixado em 0,8 para todas as simulações realizadas. A equação da velocidade agregando o fator de inércia é apresentada em (24).

$$v_{ij}^{t+1} = \beta v_{ij}^t + \rho_1 r_{1j}^t (p_i^t - x_{ij}^t) + \rho_2 r_{2j}^t (p_g - x_{ij}^t) \quad (24)$$

O primeiro termo no lado direito da igualdade é chamado componente de inércia e fornece uma memória da direção dos voos anteriores da partícula. O segundo termo é conhecido como componente cognitivo e mede o desempenho das partículas em relação às suas performances anteriores. O último termo é chamado de componente social e mede a performance da partícula i em relação à sua vizinha.

Os coeficientes de aceleração ρ_1 e ρ_2 , juntamente com os valores randômicos r_1 e r_2 ponderam a influência estocástica dos fatores cognitivo e social da velocidade da partícula, respectivamente. Segundo [15] quando $\rho_1 + \rho_2 < 4,0$, pode levar o enxame de partículas a uma convergência lenta ou até mesmo não convergir. Porém, se $\rho_1 + \rho_2 > 4,0$, a convergência do método pode ser rápida e garantida. Este trabalho considerou $\rho_1 + \rho_2 = 4,0$, sendo que $\rho_1 = \rho_2 = 2,0$.

De acordo com a literatura, um enxame com 20 a 50 partículas apresenta bons resultados para um grande número

de problemas, garantindo uma boa convergência com um tempo computacional razoável [7]. Neste trabalho foi adotada uma população de 20 partículas e um número máximo de 100 iterações para todos os casos simulados.

A função objetivo (25) considerada neste trabalho é calculada a partir do módulo da diferença entre os autovalores calculados (λ_{is}) e os desejados (λ_i), sendo np o número de autovalores de interesse e $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$ [16].

$$Fo = \min \sum_{i=1}^{np} |\lambda_{is} - \lambda_i| \quad (25)$$

O PSO minimiza (25), sujeita ao conjunto de restrições definidas por (26) que impõem um amortecimento mínimo para cada autovalor, isto é, $\xi_i \geq \xi_{iesp}$ em que ξ_{iesp} representa o amortecimento especificado (neste trabalho serão especificados 10% de amortecimento mínimo para os modos local e interárea). A restrição $\sigma_i \leq 0$ verifica se todos os autovalores de interesse tem parte real negativa, garantindo a estabilidade do sistema, independente dos parâmetros ajustados ($K, T_1=T_3$ e $T_2=T_4$) pelo PSO.

$$\begin{aligned} \xi_i &\geq \xi_{iesp} \\ \sigma_i &\leq 0 \\ K^{min} &\leq K \leq K^{max} \\ T_1^{min} &\leq T_1 \leq T_1^{max} \\ T_2^{min} &\leq T_2 \leq T_2^{max} \end{aligned} \quad (26)$$

V. RESULTADOS

A fim de validar os ajustes dos controladores, ESP e POD pelo PSO, várias simulações foram realizadas em um sistema teste, conhecido na literatura como sistema simétrico de duas áreas, cujo diagrama unifilar é mostrado na Fig.7. Os dados completos para este sistema podem ser encontrados em [17]. É possível verificar que o GUPFC já encontra-se instalado entre a barra 7 e as duas barras fictícias ($F1$ e $F2$), sendo a barra 7 a barra comum de instalação do mesmo.

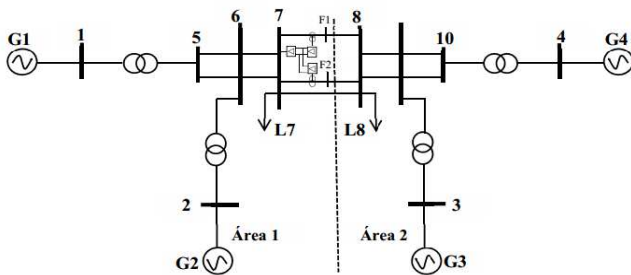


Figura 7. Diagrama sistema simétrico de duas áreas.

Neste trabalho será chamado de Caso Base aquele que considera o GUPFC instalado no sistema teste sem controlar o mesmo. Para todas as simulações foi considerado uma reatância de 0,01 pu para os transformadores de acoplamento série e os valores dos parâmetros dos controladores PIs são dados de acordo com a Tabela I.

TABELA I.
GANHOS E CONSTANTES DE TEMPO DOS CONTROLADORES PI DO GUPFC

Variáveis do sistema de controle do GUPFC				
$K_{p1} = 0,50$	$K_{p2} = 0,50$	$K_{p3} = 0,50$	$K_{p4} = 0,50$	$K_r = 100$
$T_{i1} = 0,10$	$T_{i2} = 0,10$	$T_{i3} = 0,10$	$T_{i4} = 0,10$	$T_r = 0,005$

O perfil de tensões para o caso base é mostrado na Fig. 8 onde se observa que a tensão na barra 7 está abaixo de 0,95 pu (0,937 pu), enquanto as demais barras do sistema operam com tensão acima de 0,95 pu. Para resolver este problema o GUPFC irá atuar sobre a tensão da barra 7 corrigindo seu valor para 1,0 pu, esta ação de controle será chamada de Caso 2 para diferenciarmos do Caso Base.

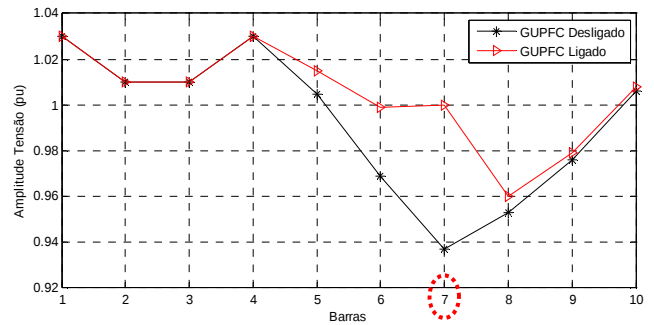


Figura 8. Perfil das tensões de barra para o sistema simétrico de duas áreas.

Para o Caso 2 o conversor shunt (VSC1) forneceu uma injeção de potência reativa de 306,12 MVar à barra 7 para manter a tensão controlada em 1,0 pu. Considerando ainda este mesmo caso, foram calculados os autovalores da matriz de estados do sistema teste e na Tabela II são mostrados os modos oscilatórios de interesse, coeficiente de amortecimento ξ , e frequência natural não amortecida ω_n .

TABELA II.
AUTOVALORES DOMINANTES, AMORTECIMENTO E FREQUÊNCIA

Mode	Eigenvalues	ξ (pu)	ω_n (Hz)
L1	$-0,495 \pm j 6,363$	0,07761	1,03
L2	$-0,318 \pm j 5,796$	0,05492	0,925
I1	$0,069 \pm j 4,411$	-0,01553	0,693

Analisando a frequência natural não amortecida dos autovalores apresentados na Tabela II se observa a existência de dois modos locais (L1 e L2) e um modo interárea (I1) com parte real positiva, o que caracteriza instabilidade do SEP.

Para resolver o problema de instabilidade no sistema teste, serão instalados dois ESPs na malha de controle do RAT de duas unidades geradoras e um controlador POD na malha de controle do dispositivo GUPFC de modo a fornecer amortecimento adicional aos modos oscilatórios de interesse. Para a localização dos ESPs no SEP foi realizada uma análise dos fatores de participação [18]. Simulações não apresentadas neste trabalho indicam que os melhores locais de instalação são nas unidades geradoras 2 e 3.

Após o processamento do algoritmo PSO foram determinados os parâmetros dos dois controladores ESPs e do conjunto GUPFC-POD, respeitando o conjunto de restrições apresentado em (26). Os valores obtidos são mostrados na

Tabela III e este ajuste deve ser capaz de impor taxas de amortecimento variando entre 10% e 15% para os modos oscilatórios observados na Tabela II.

TABELA III.
GANHOS E CONSTANTES DE TEMPO DOS CONTROLADORES ESP E POD

Parâmetros	ESP G2	ESP G3	GUPFC-POD
$T_1 = T_3$	0,5855	0,9830	0,9636
$T_2 = T_4$	0,8604	0,8980	0,1147
K	4,7025	4,8879	0,1957

Com os controladores atuando no SEP e ajustados com os parâmetros dados na Tabela III, foram recalculados os autovalores do sistema teste. Os novos valores são apresentados na Tabela IV. Conforme pode ser observado na Tabela III, este trabalho adotou $T_1=T_3$ e $T_2=T_4$, o que é bastante usual na literatura [19].

TABELA IV.
AUTOVALORES DOMINANTES, AMORTECIMENTO E FREQUÊNCIA

Mode	Eigenvalues	ξ (pu)	ω_n (Hz)
L1	$-0,663 \pm j 6,594$	0,10002	1,0548
L2	$-0,669 \pm j 5,941$	0,11203	0,9515
I1	$-0,506 \pm j 4,064$	0,1236	0,6519

Analizando a Tabela IV conclui-se que o ajuste dos controladores realizado pelo PSO cumpriu o objetivo que era um amortecimento na faixa entre 10% e 15% para todos os modos de interesse (modos locais e interárea). Considerando uma perturbação de 0,05 pu aplicada à potência mecânica da unidade geradora 1, a Fig. 9 apresenta a variação do fluxo de potência ativa (MW) no trecho entre a barra 6 e 7 antes e após o ajuste dos controladores ESPs e do conjunto GUPFC-POD pelo PSO.

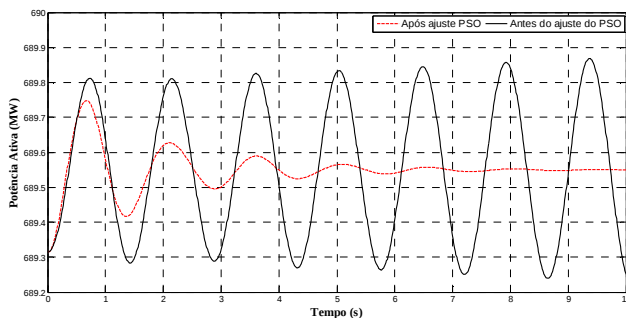


Figura 9. Variação do fluxo de potência ativa na LT entre a barra 6 e 7 antes e após o ajuste do algoritmo PSO

VII. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi utilizada uma técnica de otimização baseada na metaheurística PSO para o ajuste dos parâmetros de controladores suplementares ESPs e POD instalados em um SEP multimáquinas modelado pelo MSP.

Considerando a atuação no SEP desses controladores já ajustados pelo PSO, verificou-se que o sistema torna-se estável para o ponto de operação considerado no caso base. Conclui-se então pela eficácia do algoritmo no ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores, de modo a fornecer amortecimento mínimo estipulado em projeto a todos os modos oscilatórios de interesse.

Outro problema observado neste trabalho está relacionado com o nível de tensão na barra 7 (abaixo de 0,95 pu para o caso base) para o SEP analisado, e que pode comprometer a estabilidade de tensão. Neste caso, após a atuação do dispositivo FACTS, a tensão na barra 7 foi elevada e mantida fixa em 1,0 pu, deve-se aqui salientar que esta ação pouco influenciou no ajuste realizado pelo algoritmo PSO para fornecer amortecimento efetivo aos modos oscilatórios.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Kundur, et al, "Definition and classification of power system stability," *IEEE transactions on power systems*, vol. 19, n.2, pp. 1387-1401, 2004.
- [2] S. M. Deckmann and V. DA Costa, "A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 965-971, 1994.
- [3] F. P. DeMello; C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control," *IEEE Trans. on PAS*, vol. 88, n. 4, pp. 316-329, April 1969.
- [4] E. V. Larsen and D. a. Swann, "Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, PAS, pp. 3025-3033, June 1981.
- [5] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE press, New York, 2000.
- [6] M. A. Furini, A. L. S. Pereira and P. B. Araujo, "Pole placement by coordinated tuning of power system stabilizers and FACTS-POD stabilizers", *Int. J. Electr. Power Energy Systems*; 33(3):615-22, 2011.
- [7] J. Kenned and R. Eberhart, "Particle swarm optimization. International Conference on Neural Networks," *Perth. Proceedings...* Perth: IEEE. vol. 4, pp. 1942-1948, (1995).
- [8] K. Ravi and M. Rajaram, "Optimal location of FACTS devices using Improved Particle Swarm Optimization," *Electrical Power and Energy Systems*. pp. 333-338. No 49(2013).
- [9] R; P. Singh, et al, "Particle swarm optimization with an aging leader and challengers algorithm for optimal power flow problem with FACTS devices," *Electrical Power and Energy Systems*. pp. 1185-1196. No 64(2015),
- [10] E. L. Miotto, E. V. Fortes and P. B. Araujo, "Ajuste dos Parâmetros de Controladores Suplementares pelo Algoritmo Particle Swarm Optimization Utilizando o Modelo de Sensibilidade de Corrente". In: *XII Simpósio Brasileiro de Automação inteligente, 2015, Natal - RN*. Pp. 1-6, Anais XII SBAI, 2015.
- [11] R. S. Lubis, "Digital simulation of the generalized unified power flow controller system with 60-pulse GTO-based voltage source converter," *Int. J. Electr. Comput. Sci.* 3(2), pp. 91-6. (2012).
- [12] B. Vyakaranam and F. E. Villaseca, "Dynamic modeling and analysis of generalized unified power flow controller," *Elect. Power Systems. Research*. Vol. 106, pp. 1-11. (2014).
- [13] D. B. Valle and P. B. Araujo, "The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems," *Int. J. Electr. Power & Energy Systems*, vol. 65, pp. 299-306, Feb. 2015.
- [14] R. S. Lubis, S. P. Hadi and Tumiran, "Modeling of the generalized unified power flow controller for optimal power flow," In: *Proc, international conference on electrical engineering and informatics (ICEEI)*, pp. 1-6. Bandung; 2011.
- [15] D. Bratton and J. Kennedy, "Defining a standard for particle swarm optimization," *IEEE Swarm Intelligence Symposium, Honolulu. Proceedings...* Honolulu: IEEE. pp. 120-127. (2007).
- [16] M. M. Menezes, M.; P. B. Araujo and E. V. Fortes, "Bacterial Foraging Optimization algorithm used to adjust the parameters of Power System Stabilizers and Thyristor Controlled Series Capacitor-Power Oscillation Damping controller," in *Industry Applications (INDUSCON), 11 th IEEE/IAS International Conference*, pp. 1-6, Dec, 2014.
- [17] P. W. Sauer and M. A. Pai, *Power system dynamics and stability*, New Jersey: Printice-Hall, pp. 356, 1998.
- [18] F. Milano, *Power system modelling and scripting*. London: Springer, pp. 558, 2010.
- [19] P. Kundur, *Power system stability and control*. EUA: MacGraw-Hill, 1167p, 1994.