

ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA DA INFLUÊNCIA DO GENERALIZED UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

EDNEI LUIZ MIOTTO*, BRUNO RAFAEL GAMINO[§], ELENILSON DE VARGAS FORTES[¥], PERCIVAL BUENO DE ARAUJO[§], LUÍS FABIANO BARONE MARTINS[†]

* *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Toledo
Rua Cristo Rei, 19, 85902-490, Toledo, Paraná, Brasil*

[§] *Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Av. Brasil, 56, 15385-000, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil*

[¥] *Instituto Federal de Goiás, Campus Jataí
Rua Maria da Cunha Vieira, 775, 75804-714, Jataí, Goiás, Brasil*

[†] *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Toledo
Av. Doutor Tito, s/n, 86400-000, Jacarezinho, Paraná, Brasil*

Emails: edneimiotto@utfpr.edu.br, gaminobr@gmail.com,
elenilson.fortes@ifg.edu.br, Percival@dee.feis.unesp.br,
luis.martins@ifpr.edu.br

Abstract — This paper analyzes the performance of the *Generalized Unified Power Flow Controller* device for voltage control on the bars of an electric power system of medium-sized (system New England) to improved voltage stability. Are also presented promising results related to the coordinated adjustment of parameters of *Power System Stabilizers* as well as of the *Generalize Unified Power Flow Controller- Power Oscillation Damping* using the *Particle Swarm Optimization* algorithm, for the introduction of desired rates damping to oscillatory modes low frequency present in analyzed system.

Keywords — Additional controllers, Particle Swarm Optimization, Power System Stabilizers, Small signal stability,

Resumo — Este trabalho analisa a atuação do dispositivo *Generalize Unified Power Flow Controller* em um sistema de potência de médio porte (Sistema *New England*). São avaliados o controle de tensão nas barras (análise estática) e a influência que o dispositivo exerce na estabilidade a pequenas perturbações (análise dinâmica). No que se refere às pequenas perturbações, são apresentados resultados promissores relacionados com o ajuste coordenado dos parâmetros de Estabilizadores de Sistema de Potência e do conjunto *Generalize Unified Power Flow Controller- Power Oscillation Damping* (o algoritmo utilizado para o ajuste é a otimização por enxame de partículas).

Palavras-chave — Controladores suplementares, Estabilidade a pequenas perturbações, Estabilizadores de Sistema de Potência, *Generalize Unified Power Flow Controller*, Otimização por Enxame de Partículas

1 Introdução

As dificuldades operacionais e de manutenção da estabilidade dos sistemas elétricos de potência (SEPs) foram aumentando à medida que estes sistemas cresciam e interligavam-se, o que acarreta a associação de uma série de equipamentos com características dinâmicas distintas.

Analisar o comportamento do SEP quando submetido a uma pequena ou grande perturbação é uma tarefa dos engenheiros da área de estabilidade. 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 denominada de estabilidade a pequenas perturbações, a qual será o foco deste trabalho (Kundur et al., 2004).

Uma pequena perturbação é vista como um pequeno desvio no estado do sistema, o que possibilita a linearização, em torno de um ponto de equilíbrio, das equações que o descrevem. Com isto, todas as técnicas de análise de sistemas lineares podem ser utilizadas.

Essa peculiaridade possibilita representar o SEP por modelos lineares. Neste trabalho utiliza-se o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) proposto por Deckmann e Costa (1994), cujo princípio fundamental baseia-se no balanço de potências ativa e reativa em cada barra do sistema, durante todo o processo dinâmico.

A presença de oscilações eletromecânicas de baixa frequência pode comprometer a operação do SEP, motivo pelo qual estratégias de controle para introduzir amortecimento a estas oscilações tornam-se necessárias.

Os primeiros passos para o projeto de Estabilizadores de Sistema de Potência (ESPs) foram dados por DeMello e Concordia (1969), e teve sua continuidade com as pesquisas realizadas por e Larsen e Swann (1981). Tais estabilizadores são

comumente utilizados para agregar amortecimento, principalmente nos modos de oscilação do tipo local.

Ao longo do tempo, novos dispositivos foram incorporados ao SEP para melhorar seu controle e torná-lo mais flexível e seguro. São os chamados

Flexible AC Transmission Systems (FACTS) (Hingorani and Gyugyi, 2000), em que se destaca o *Generalize Unified Power Flow Controller* (GUPFC) (Lubis et al., 2011; Valle and Araujo, 2015). Estudos posteriores mostraram que se à malha de controle deste dispositivo for acoplado um controlador *Power Oscillation Damping* (POD), é possível inserir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas do SEP, em especial nas do tipo interárea (Furini et al., 2011).

No entanto, para que os controladores ESPs e o conjunto GUPFC-POD desempenhem satisfatoriamente o papel de inserir amortecimento aos modos oscilatórios do SEP, o ajuste de seus parâmetros é fundamental. Diferentes métodos de otimização vêm sendo utilizados com sucesso para este ajuste, como uma alternativa aos métodos clássicos já bastante consolidados na literatura.

Para ajustar os parâmetros dos controladores neste trabalho é utilizado um método de otimização baseado no algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) proposto por Kennedy e Eberhart (1995). Este algoritmo já foi utilizado em diferentes aplicações e se destacou com os resultados obtidos. Em Ravi e Rajaram (2013) o PSO foi utilizado para a localização ótima de dispositivos FACTS no SEP. Em Singh et al. (2014) o PSO foi utilizado na solução do fluxo de potência ótimo em dois sistemas testes onde atuam dispositivos FACTS.

Este trabalho também é analisada a atuação do dispositivo GUPFC no controle de fluxo de potência com o intuito de corrigir as subtensões apresentadas por algumas barras do SEP analisado.

Para a validação da metodologia proposta foram realizadas simulações utilizando-se o *software* MatLab® em um sistema teste considerado de médio porte conhecido como *New England*.

2 Modelo de Injeção de Potência do GUPFC

O modelo de injeção de potência para representar o GUPFC no fluxo de potência é baseado na configuração mais simples do dispositivo, que utiliza apenas três conversores fonte de tensão (VSCs) conectados entre si através de um link comum de corrente contínua (Lubis et al., 2011).

As equações a seguir são baseadas na Fig. 1. Esta 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 a susceptância (b_{in}) que modela os transformadores de acoplamento. É através da modulação 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, como mostrado na Fig. 1 (Valle and Araujo, 2015).

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

Em (1), r_n e γ_n são os parâmetros das tensões série injetadas, sendo $r_n = \tilde{V}_{sin}/\tilde{V}_i$, e γ_n o ângulo relativo de $\tilde{V}_{sin}$ com a respectiva tensão da barra $\tilde{V}_i$.

As grandezas $\tilde{V}'_j$ 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 potências ativa e reativa no ramo $i-j$, saindo da barra j , P_{ki} e Q_{ki} são os fluxos de potências 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.

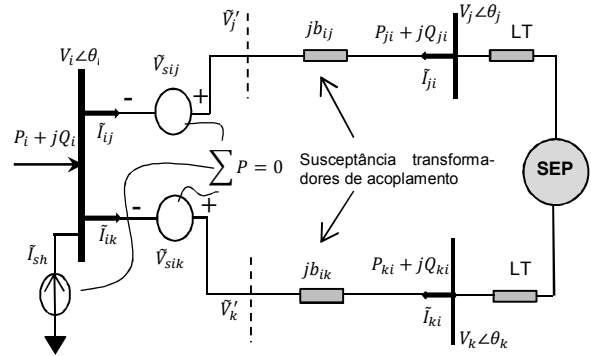


Figura 1. Circuito equivalente do GUPFC.

A tensão controlável ($\tilde{V}_{sin}$) pode ser decomposta nas componentes em quadratura (V_{pn}) e em fase (V_{qn}) com a tensão ($\tilde{V}_i$) da barra comum de instalação, conforme eqs. (2) e (3) (ver diagrama fasorial da Fig. 2).

$$V_{pn} = r_n V_i \sin(\gamma_n) \quad (2)$$

$$V_{qn} = r_n V_i \cos(\gamma_n) \quad (3)$$

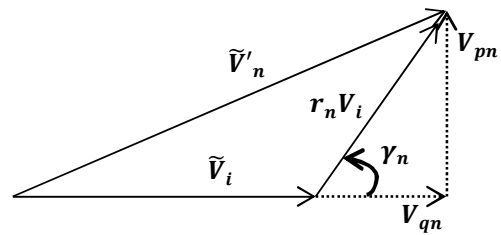


Figura 2. Diagrama fasorial do GUPFC.

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 (4).

$$\tilde{I}_{sh} = (i_p - j i_q) e^{j\theta_i} \quad (4)$$

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 desconsideradas, toda a potência ativa fornecida pelo

conversor *shunt* VSC1 deve ser igual à potência entregue ao sistema CA pelos conversores série VSC2 e VSC3 como mostrado na eq. (5) (Lubis et al., 2011).

$$P_{sh} = -\sum_{(m=i,j,k)} P_{se,m} \quad (5)$$

Considerando a restrição apresentada em (5), o circuito equivalente do GUPFC ilustrado na Fig. 1 e as eqs. (1)–(4), chega-se ao modelo de injeção de potência do dispositivo FACTS GUPFC (eqs. (6)–(9)), baseado no modelo apresentado em (Valle and Araujo, 2015), que representa a soma das contribuições séries das fontes de tensão síncronas e a contribuição *shunt* da fonte de corrente ideal.

$$P_{inj,i} = -\sum_{(n=j,k)} b_{in} V_n [V_{qn} \sin(\theta_{in}) + V_{pn} \cos(\theta_{in})] \quad (6)$$

$$Q_{inj,i} = -V_i \sum_{(n=j,k)} b_{in} V_{qn} - V_i i_q \quad (7)$$

$$P_{inj,n} = b_{in} V_n [V_{qn} \sin(\theta_{in}) + V_{pn} \cos(\theta_{in})] \quad (8)$$

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

As eqs. (6)–(9) descrevem 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 na 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. Na Fig. 3 é ilustrado o modelo de injeção de potência e os fluxos de potências ativa e reativa (P_{Lj} , Q_{Lj} , P_{Lk} e Q_{Lk}) controlados nas duas LTs que o GUPFC gerencia.

O modelo apresentado também facilita a inclusão do GUPFC nos programas de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo, já 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.

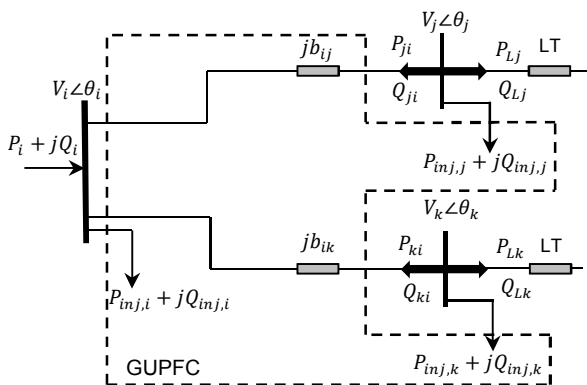


Figura 3. Controle dos fluxos de potência pelo GUPFC.

Em (10) e (11) são apresentados os balanços de potências ativa e reativa nas barras de instalação do dispositivo, sendo $m = i, j, k$.

$$0 = P_{gm} - P_{inj,m} - P_{cm} - P_{calc,m} \quad (10)$$

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

Em (10) e (11), P_{gm} e Q_{gm} são as gerações de potências ativa e reativa entrando na barra m , P_{cm} e Q_{cm} são possíveis cargas ativa e reativa conectadas à barra m , e $P_{calc,m}$ e $Q_{calc,m}$ são as potências ativa e reativa transmitidas através das LTs, deixando a barra m . $P_{inj,m}$ e $Q_{inj,m}$ são as potências ativa e reativa referentes às injeções de potência controladas pelo GUPFC. O balanço de potências ativa e reativa nas barras controladas pelo dispositivo resultam nas expressões dos fluxos controlados que são representados por (12) e (13), sendo $n = j, k$.

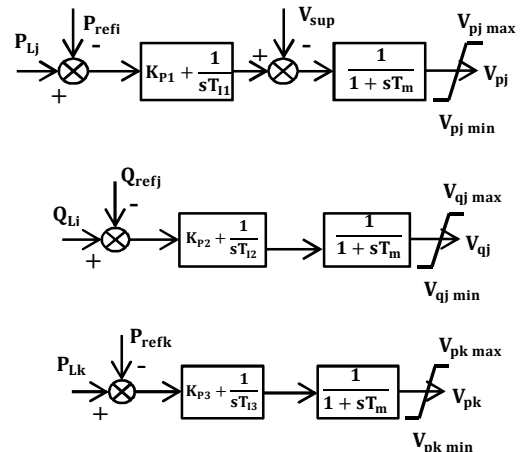
$$P_{Ln} = -P_{ni} - P_{inj,n} \quad (12)$$

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

Nas equações (12) e (13) P_{ni} e Q_{ni} são os fluxos convencionais de potências 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.

2.1 Estrutura do Sistema de Controle do GUPFC

A estrutura de controle utilizada para representar a dinâmica do dispositivo é apresentada na Fig. 4, onde cada controlador PI está relacionado com uma variável das fontes de tensão que representam os conversores VSCs série e *shunt* (Valle and Araujo, 2015). Na Fig. 4 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. 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 (Hingorani and Gyugyi, 2000). 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.



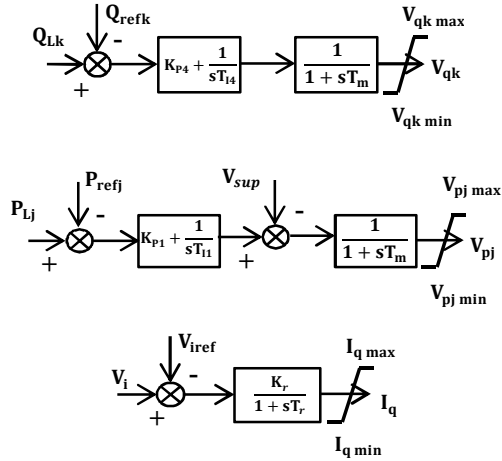


Figura 4. Estrutura do sistema de controle do GUPFC.

Na Fig. 4 P_{refj} e Q_{refj} são os valores especificados pelo operador do sistema para o fluxo de potências 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.

3 Estrutura dos Controladores ESP e POD

A fim de introduzir amortecimento às oscilações do SEP é necessária a inclusão de controladores suplementares de amortecimento como o ESP e o POD.

Na Fig. 5 é apresentada uma estrutura genérica que pode ser utilizada para ambos os controladores ESP e POD.

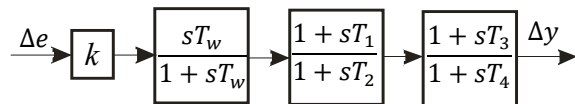


Figura 5. Estrutura para os controladores ESP e POD.

As semelhanças entre esses dois controladores 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 . Para o POD a entrada é o 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_s), inserida como sinal adicional à malha de controle do Regulador Automático de Tensão (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.

4 Particle Swarm Optimization

A técnica *Particle Swarm Optimization* foi desenvolvida por Kennedy e Eberhart (1995). 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.

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 (Shi and Eberhart, 1998). Valores de β entre 0,8 e 1,20 dão 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 (14).

$$v_{ij}^{t+1} = \beta v_{ij}^t + \rho_1 r_{1j}^t (p_i^t - x_{ij}^t) + \rho_2 r_{2j}^t (p_g - x_{ij}^t) \quad (14)$$

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 Bratton e Kennedy (2007) 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 $\rho_1 = \rho_2 = 2,0$. Também foi considerado uma população de 20 partículas e limitado a um número máximo de 500 testes da função objetivo.

Na eq. (15) é representada a função objetivo considerada neste trabalho, cujo cálculo é realizado 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 $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$.

$$Fo = \min \sum_{i=1}^{np} |\lambda_{is} - \lambda_i| \quad (15)$$

O PSO minimiza (15), sujeita ao conjunto de restrições definidas por (16) que impõem um amortecimento mínimo para cada autovalor, isto é, $\xi_i \geq$

ξ_{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 têm parte real negativa, garantindo a estabilidade do sistema, independente dos parâmetros ajustados (K , $T_1=T_3$ e $T_2=T_4$) pelo PSO.

$$\begin{aligned} \xi_i &\geq \xi_{iesp} \\ \sigma_i &\leq 0 \\ K^{min} &\leq K \leq K^{max} \\ T_1^{min} &\leq T_1 \leq T_1^{max} \\ T_2^{min} &\leq T_2 \leq T_2^{max} \end{aligned} \quad (16)$$

5 Simulações e Resultados

A fim de validar os ajustes dos controladores ESP e POD pelo PSO e a eficiência do GUPFC no controle do fluxo de potência e aumento da margem de estabilidade do SEP, várias simulações foram realizadas. O sistema teste utilizado foi *New England*, cujo diagrama unifilar é mostrado na Fig. 6. Este sistema é composto de 10 geradores, 41 barras (incluindo as duas barras fictícias relacionadas com o GUPFC) e 48 linhas de transmissão e está disposto em duas áreas: a área 1 é representada de maneira compacta pelo gerador equivalente 10 (sistema *New York*) e a área 2 pelos demais geradores (sistema *New England*). Seus dados completos podem ser encontrados em Araujo and Zanetta (2001).

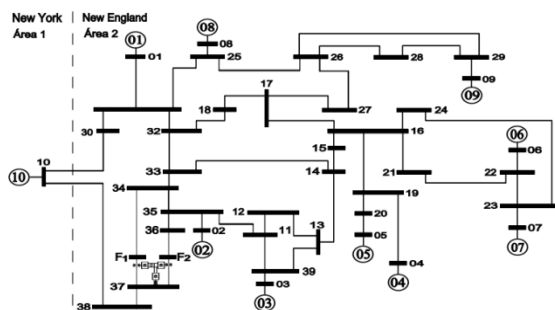


Figura 6. Diagrama unifilar: sistema *new england*.

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 os mesmos utilizados em Valle and Araujo, 2015.

O perfil das tensões para o caso base é mostrado na Fig. 7 onde se observa que a tensão está abaixo de 0,95 pu em seis barras do SEP (barras 12, 15, 33, 34, 36 e 37). Para melhorar o perfil de tensão do sistema como um todo, o GUPFC irá atuar no controle do fluxo de potência ativa e injeção de potência reativa. Esta ação de controle será chamada de Caso 2.

O local escolhido para instalação do dispositivo FACTS fica próximo à maioria das barras com pro-

blemas de tensão, sendo a barra 37 escolhida como barra comum para a instalação do GUPFC.

Para o Caso 2 ocorre um aumento e uma inversão dos fluxos de reativo em ambos os trechos controlados pelo dispositivo (barra *F1* à barra 34 e barra *F2* à barra 36), através da atuação dos conversores série e *shunt*, conforme apresentado na Tabela 3. Essa ação provocou a melhoria global do perfil de tensão do sistema mostrado na Fig. 7.

Considerando ainda este mesmo caso, foram calculados os autovalores da matriz de estados do sistema teste e na Tabela 1 são mostrados os modos oscilatórios de interesse, coeficiente de amortecimento ξ , e frequência natural não amortecida ω_n para ambas as situações, ou seja, Caso Base e Caso 2. Uma rápida análise dessa tabela permite concluir que a atuação do GUPFC pouco influenciou no amortecimento dos modos eletromecânicos de interesse, sendo necessárias outras ações de controle para garantir taxas adequadas de amortecimentos a estes modos oscilatórios.

Na Tabela 1 são apresentados os nove modos oscilatórios de interesse, sendo os oito primeiros modos locais e o último o modo interárea. Considerando o Caso 2 nas análises seguintes, têm-se três modos locais instáveis e um modo interárea fracamente amortecido, caracterizando instabilidade no SEP.

Tabela 1. Autovalores Dominantes, ξ e ω_n – Caso Base e Caso 2.

Caso Base – GUPFC Desligado			
Modo	Autovalores	ξ (pu)	ω_n (Hz)
L ₁	-0,2399 ± j 8,309	0,02886	1,3224
L ₂	-0,1824 ± j 8,264	0,02207	1,3152
L ₃	-0,2641 ± j 8,083	0,03265	1,2865
L ₄	-0,2116 ± j 7,167	0,02951	1,1406
L ₅	0,08495 ± j 6,848	-0,0124	1,0899
L ₆	0,1719 ± j 5,912	-0,02906	0,9409
L ₇	0,1251 ± j 6,355	-0,01968	1,0115
L ₈	-0,1087 ± j 6,451	0,01685	1,0267
I	0,0042 ± j 3,505	-0,00121	0,5578
Caso 2 – GUPFC Atuando			
Modo	Autovalores	ξ (pu)	ω_n (Hz)
L1	-0,2411 ± j 8,323	0,02896	1,3251
L2	-0,1887 ± j 8,277	0,02279	1,3177
L3	-0,266 ± j 8,096	0,03286	1,2892
L4	-0,232 ± j 7,199	0,03216	1,1464
L5	0,0733 ± j 6,839	-0,01072	1,0885
L6	0,1802 ± j 5,914	-0,0305	0,9417
L7	0,1612 ± j 6,395	-0,0252	1,018
L8	-0,1367 ± j 6,484	0,02108	1,0322
I9	-0,00457 ± j 3,560	0,00128	0,5667

Para resolver o problema da instabilidade no sistema teste serão instalados nove ESPs na malha de controle dos RATs das unidades geradoras 1 a 9 e um controlador POD na malha de controle do GUPFC a fim de fornecer amortecimento adicional aos modos oscilatórios de interesse. Para a localização dos ESPs no SEP foi realizada uma análise dos fatores de participação (Milano, 2010).

Após o processamento do algoritmo PSO foram determinados os parâmetros dos controladores suplementares (Tabela 2), respeitando o conjunto de restrições apresentado em (8) através de limites máximos e mínimos de cada variável.

Tabela 2. Parâmetros dos Controladores ESP e TCSC – POD.

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G1	0,7921	0,0972	12,821
ESP G2	0,6322	0,0971	10,176
ESP G3	0,4407	0,1793	13,678
ESP G4	0,7812	0,1276	8,860
ESP G5	0,7940	0,0967	11,356
ESP G6	0,7737	0,1247	7,131
ESP G7	0,4166	0,1761	10,798
ESP G8	0,4358	0,0993	13,895
ESP G9	0,4475	0,1890	7,1728
GUPFC – POD	0,2485	0,2496	0,3079

Considerando a atuação dos ESPs e do conjunto GUPFC-POD foram calculados os autovalores da matriz de estados e os modos oscilatórios de interesse são mostrados na Tabela 4. Analisando os dados apresentados conclui-se que o ajuste dos controladores realizado pelo PSO cumpriu o objetivo que era fornecer um amortecimento mínimo de 10% para todos os modos de interesse (locais e interárea).

Tabela 4. Autovalores Dominantes, ξ e ω_n – Controladores Adicionais em Operação.

Modo	Autovalores	ξ (pu)	ω_n (Hz)
L ₁	-1,629 ± j 9,1396	17,55	1,4775
L ₂	-1,455 ± j 8,5934	16,70	1,3872
L ₃	-1,0931 ± j 7,419	14,58	1,1935
L ₄	-0,690 ± j 7,1796	10,01	1,1479
L ₅	-0,928 ± j 7,1028	12,95	1,14
L ₆	-2,206 ± j 6,865	30,60	1,1477
L ₇	-1,5313 ± j 6,860	21,78	1,1187
L ₈	-1,692 ± j 6,0447	26,95	0,9990
I	-0,541 ± j 3,6454	14,68	0,5865

6 Conclusões

Este trabalho utilizou o PSO para ajustar de forma coordenada e simultânea os parâmetros dos controladores suplementares ESPs e do conjunto GUPFC-POD, instalados em um SEP multimáquinas modelado através do 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 PSO no ajuste coordenado dos parâmetros desses controladores, de modo a fornecer amortecimento mínimo estipulado a todos os modos de interesse (Modos Locais e Modos Interárea).

Outro problema observado neste trabalho está relacionado com o nível de tensão (abaixo de 0,95 pu para o caso base) apresentado por algumas barras do sistema *New Engalnd*, o que pode comprometer a estabilidade de tensão. Neste caso, após a atuação do controlador Facts GUPFC, a tensão nestas barras foi elevada para níveis acima de 0,95 pu melhorando significativamente a margem de estabilidade de tensão do SEP analisado.

Referências Bibliográficas

- Araujo, P. B. and Zanetta, L. C. (2001). Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. *International Journal of Electric Power and Energy Systems* 23(3): 173-178.
- Bratton, D. and Kennedy, J. (2007). Defining a standard for particle swarm optimization. *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, Honolulu. Proceedings. Honolulu: IEEE. pp. 120–127.
- DeMello, F. P. and Concordia, C. (1969). Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Trans. on PAS* 88(4): 316-329.
- Deckmann, S. M. and Da Costa, V. (1994). A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. *IEEE Trans. on PAS* 9(2): 965-971.
- Furini, M. A.; Pereira, A. L. S. and Araujo, P. B. (2011). Pole Placement by Coordinated Tuning of Power System Stabilizers and FACTS-POD Stabilizers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 33(3): 615-622.
- Hingorani, N. G. and Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE press, New York.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization, *Neural Networks, 1995. Proceedings, IEEE International Conference on*, vol. 4, pp. 1942-1948.
- Kundur, P., et al, (2004). Definition and classification of power system stability. *IEEE transactions on power systems* 19(2): 1387-1401.
- Larsen, E. V. and Swann, D. A. (1981). Applying System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS*, pp. 3025-3033.
- Lubis, R. S., et al, (2011). Modeling of the generalized unified power flow controller for optimal power flow. *Proc. International conference on electrical engineering and informatics*, pp. 1 – 6.
- Milano, F. (2010). Power system modeling and scripting. *London: Springer*, pp. 558, 2010.
- Ravi, K. and Rajaram, M. (2013). Optimal location of FACTS devices using Improved Particle Swarm Optimization. *Electrical Power and Energy Systems*. No 49(2013), pp. 333-338.
- Shi, Y. and Eberhart, R. (1998). A modified particle swarm optimizer. *Proceedings., IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Anchorage: IEEE*, pp. 69–73.
- Singh, R. P., et al. (2014). Particle swarm optimization with an aging leader and challengers algorithm for optimal power flow problem with FACTS devices. *Electrical Power and Energy Systems*. No 64(2015), pp. 1185-1196.
- Valle, D. and Araujo, P. (2015). The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems, *International*

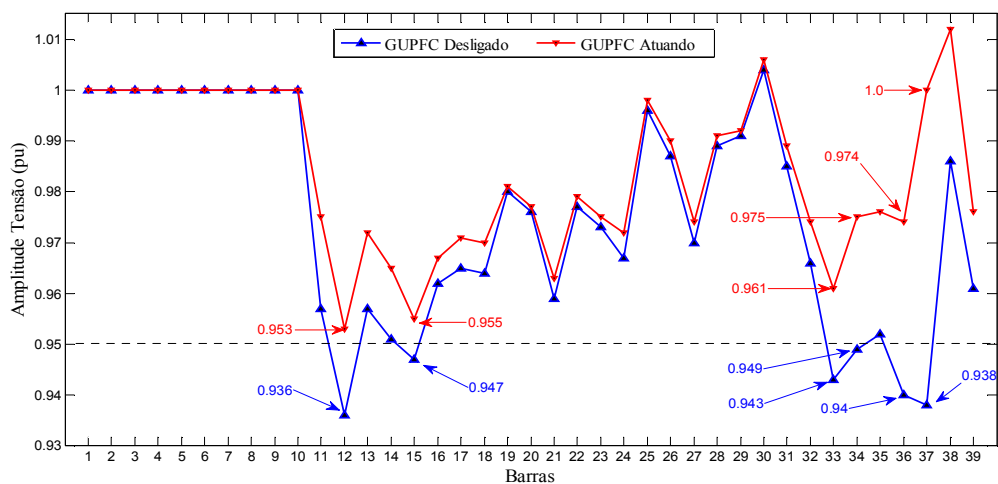


Figura 7. Perfil das tensões antes e após a atuação do GUPFC no sistema *New England*

Tabela 3. Fluxo de Potência Controlado pelo GUPFC no Sistema *New England*

Linha	Com GUPFC - Desligado				Com GUPFC – Caso 2			
	P _{km}	Q _{km}	Perdas		P _{km}	Q _{km}	Perdas	
			P	Q			P	Q
38 - 10	-33,90	-110,65	0,04	1,00	15,34	-13,99	0,024	0,61
37 - 38	-33,48	-139,24	0,422	6,65	15,37	-52,01	0,03	0,48
F1 - 34	-280,36	-41,5	0,72	10,07	-308,40	83,0	0,856	11,99
F2 - 36	-208,16	-9,23	0,197	2,26	-228,97	92,32	0,258	2,97
36 - 35	-441,35	-88,61	1,37	21,01	-462,23	12,78	1,353	20,75
2 - 35	543,77	231,01	0,00	87,26	542,69	133,25	0,00	78,07
11 - 35	348,39	25,12	0,936	10,96	366,30	-48,42	1,001	11,73
35 - 34	448,51	71,05	0,456	5,92	444,41	11,03	0,415	5,39
34 - 33	166,97	30,68	0,26	4,15	134,74	94,91	0,239	3,83

Journal of Electrical Power & Energy Systems 65:
299-306.