

Análise da Estabilidade Dinâmica em Sistemas Multimáquinas Considerando a Atuação dos Controladores de Amortecimento ESP e TCSC-POD Ajustados pelo Algoritmo Simulated Annealing

Bruno Rafael Gamino¹, Percival Bueno de Araujo¹, Ednei Luiz Miotto², Luís Fabiano Barone Martins³

¹Universidade Estadual Paulista (UNESP), Av. Brasil, 56, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Cristo Rei, 19, 85902-490, Toledo, PR, Brasil

³Instituto Federal do Paraná, Av. Dr. Tito, s/n, 86400-000, Jacarezinho, PR, Brasil

E-mails: gaminobr@gmail.com, percival@dee.feis.unesp.br, edneimiotto@utfpr.edu.br, luis.martins@ifpr.edu.br

Resumo — Neste artigo, o algoritmo *Simulated Annealing* é aplicado no ajuste coordenado dos controladores suplementares de amortecimento. O objetivo é inserir amortecimento adicional aos modos oscilatórios de baixa frequência (locais e interárea) inerentes ao sistema elétrico de potência teste conhecido como simétrico de duas áreas (4 geradores, 10 barras e 15 ramos). O modelo de sensibilidade de corrente é utilizado para representar o sistema elétrico de potência. Os resultados apresentados indicam que o *Simulated Annealing* é capaz de obter soluções ótimas factíveis utilizando baixos tempos computacionais, destacando-se como uma ferramenta de qualidade na análise da estabilidade a pequenas perturbações.

Palavras-chaves — Estabilidade Dinâmica, Estabilizadores de Sistemas de Potência, Power Oscillation Damping, Simulated Annealing, Thyristor Controlled Series Capacitor.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEPs) devem operar de maneira segura e confiável, evitando assim, prejuízos aos usuários decorrentes de interrupções no fornecimento de energia elétrica. Entretanto, em diversos sistemas pelo mundo encontram-se interligações eletricamente fracas originadas nas longas linhas de transmissão, alto carregamento e a atuação dos reguladores automáticos de tensão (RATs) com ganhos elevados e baixas constantes de tempo. Todos os fatores citados contribuem para o surgimento de modos oscilatórios eletromecânicos de baixa frequência, que podem levar o SEP à instabilidade [1].

A análise da estabilidade a pequenas perturbações (estabilidade dinâmica) considera apenas pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio e abrange o estudo dos modos oscilatórios [2], que podem ser classificados de acordo com sua frequência, sendo comum a existência de dois tipos: modo local (0,7-2,0 Hz) e modo interárea (0,1-0,8 Hz).

Considerando variações suficientemente pequenas em torno de um ponto de equilíbrio, torna-se possível representar o SEP por um modelo linear, como por exemplo, o Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC), que é baseado na lei das correntes nos nós de Kirchhoff [3].

Com o objetivo de inserir amortecimento adicional aos modos oscilatórios inerentes ao SEP, o controlador ESP (Estabilizador de Sistema de Potência) é tradicionalmente adicionado na malha de controle dos RATs [4]. Desta forma, quando ajustado de maneira adequada, o ESP é capaz de introduzir amortecimento adicional ao sistema, com atuação destacada sobre os modos oscilatórios do tipo local [5].

O advento dos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) possibilitou a introdução de um controlador de amortecimento denominado *Power Oscillation Damping* (POD), que é acoplado à malha de controle do FACTS originando um conjunto FACTS-POD, capaz de atuar de maneira eficaz sobre os modos oscilatórios interárea [5], [6]. Os dispositivos FACTS são baseados na eletrônica de potência e foram concebidos com o objetivo de controlar e direcionar o fluxo de potência, tornando-se útil para a estabilidade dinâmica posteriormente [7], [8].

Neste trabalho é utilizado um FACTS composto por uma capacitância fixa em paralelo com um reator controlado a tiristores conhecido como *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) [8]. Para tal, um modelo dinâmico para o TCSC por injeção de corrente é utilizado.

Para que os controladores descritos insiram amortecimento ao sistema, seus parâmetros devem ser ajustados de maneira conveniente. Na literatura são encontradas técnicas clássicas, que apesar de possuírem limitações, são capazes de fornecer soluções confiáveis [6], [9], [10]. No decorrer dos anos, as meta-heurísticas ganharam destaque no ajuste coordenado dos controladores de amortecimento devido à alta capacidade de encontrar soluções ótimas sem conhecimento prévio do problema e da complexidade do sistema, dentre as técnicas encontradas na literatura é possível citar o Algoritmo Genético, o algoritmo *Particle Swarm Optimization* e o algoritmo *Bacterial Foraging Optimization* [11]-[15].

Neste trabalho é proposto a utilização de um algoritmo *Simulated Annealing* (SA) [16] no ajuste coordenado dos controladores de amortecimento ESP e TCSC-POD. O objetivo é garantir a estabilidade a pequenas perturbações, além de elevar o nível de amortecimento de todos os modos oscilatórios de baixa frequência presentes no sistema teste conhecido como sistema Simétrico de Duas Áreas [17].

Diante do exposto, as principais contribuições deste trabalho são: 1) O uso do SA no ajuste coordenado dos controladores de amortecimento ESP e TCSC-POD levando em consideração diferentes níveis de amortecimento; 2) Verificação da eficiência do método como ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações.

II. MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE - SISTEMA MULTIMÁQUINAS

O MSC é um modelo linear baseado na Lei das correntes nos nós de Kirchhoff. O modelo considera o balanço de correntes em todas as barras do SEP que deve ser satisfeito a todo instante de qualquer processo dinâmico. As equações do balanço de correntes são as equações algébricas do MSC. A representação no domínio do tempo para um sistema multimáquinas, modelado pelo MSC, que possui n_b barras e n_g geradores encontra-se expresso em (1)-(4) [3], [18].

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} \Delta u \quad (1)$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \dots \Delta \omega_{n_g} \\ \Delta E'_{q1} \dots \Delta E'_{q_{n_g}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \dots \Delta \delta_{n_g} \\ \Delta E_{fd1} \dots \Delta E_{fd_{n_g}} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} \Delta P_{m1} \dots \Delta P_{n_g} \\ \Delta P_{c1} \dots \Delta P_{c_{n_b}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{ref1} \dots \Delta V_{ref_{n_g}} \\ \Delta Q_{c1} \dots \Delta Q_{c_{n_b}} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\Delta z = \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \dots \Delta \theta_{n_b} \\ \Delta V_1 \dots \Delta V_{n_b} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

Em (1)-(4), Δx é o vetor das variáveis de estado formado por $\Delta \omega$ (variações da velocidade angular do rotor do gerador), $\Delta \delta$ (variações do deslocamento angular do rotor), $\Delta E'_q$ (variações da tensão interna do eixo em quadratura) e ΔE_{fd} (variações da tensão de campo). O vetor das variáveis de entrada Δu é composto por ΔP_m (variações na potência mecânica de entrada do gerador), ΔV_{ref} (variações na tensão de referência dos RATs), ΔP_c e ΔQ_c (variações na potência ativa e reativa das cargas). Finalmente, as variáveis $\Delta \theta$ e ΔV (variações dos ângulos e da magnitude das tensões em todas as barras do SEP) formam o vetor de variáveis algébricas Δz .

A representação no espaço de estados é obtida através da eliminação do vetor das variáveis algébricas conforme (5). A matriz de estados A encontra-se expressa em (6) e a matriz de entradas B é obtida de acordo com (7).

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (5)$$

$$A = J1 - J2 J4^{-1} J3 \quad (6)$$

$$B = B1 - J2 J4^{-1} B2 \quad (7)$$

III. MODELO DINÂMICO DO TCSC POR INJEÇÃO DE CORRENTE

O dispositivo TCSC é um compensador série composto por uma capacitância em paralelo com um reator controlado a tiristores associados em antiparalelo. Ao atuar sobre o ângulo de disparo dos tiristores, torna-se possível obter diversos níveis de compensação da reatância da linha de transmissão onde o TCSC encontra-se instalado, melhorando assim, o desempenho do sistema devido ao aumento da capacidade de transferência de potência.

Na Fig. 1 é mostrado um diagrama com o TCSC representado por uma reatância capacitiva equivalente x_{tcsc} e instalado entre duas barras k e m conectadas por uma linha de transmissão com impedância $\bar{Z}_{km}$ (8).

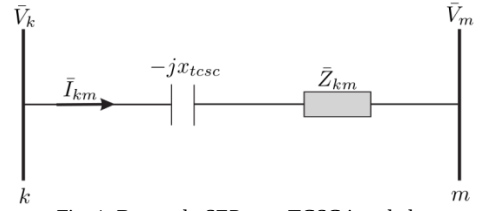


Fig. 1. Barras do SEP com TCSC instalado.

Dentre os modelos utilizados para o estudo da estabilidade, aqueles baseados em injeção de corrente geralmente apresentam maior velocidade na convergência do fluxo de potência [19]. O modelo utilizado neste trabalho é baseado no modelo de injeção de corrente apresentado em [13] e também encontrado em [12]. Para a dedução do modelo do TCSC, considera-se o diagrama mostrado na Fig. 1.

Quando a corrente $\bar{I}_{km}$ (9) flui pela reatância capacitiva ocorre uma queda de tensão que pode ser representada por uma fonte de tensão $\bar{V}_{tcsc}$ (10). A fonte de tensão pode ser transformada em uma fonte de corrente $\bar{I}_{tcsc}$ (11), definindo assim, as injeções das correntes em cada uma das barras desde que (12)-(13) sejam sempre válidas.

$$\bar{Z}_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (8)$$

$$\bar{I}_{km} = \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_{tcsc})} \quad (9)$$

$$\bar{V}_{tcsc} = -jx_{tcsc} \bar{I}_{km} \quad (10)$$

$$\bar{I}_{tcsc} = -j \left[\frac{x_{tcsc}}{r_{km} + jx_{km}} \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_{tcsc})} \right] \quad (11)$$

$$\bar{I}_{tcsc_k} = \bar{I}_{tcsc} \quad (12)$$

$$\bar{I}_{tcsc_m} = -\bar{I}_{tcsc} \quad (13)$$

Na Fig. 2 é mostrado o circuito equivalente após a consideração das injeções de corrente pelo TCSC.

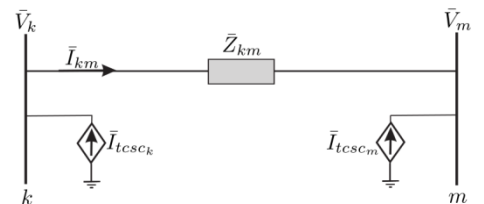


Fig. 2. Barras do SEP com injeção de corrente pelo TCSC.

As estruturas do ESP e POD são idênticas, diferindo apenas no modo de operação e nos sinais de entrada e saída. A estrutura é composta por um filtro *washout* de entrada que tem como função zerar a resposta em regime permanente e é formado pela constante de tempo T_w , um ganho estático K que atua no módulo do sinal processado e dois blocos compensadores *lead-lag* que realizam a compensação de fase através das constantes de tempo T_1 , T_2 , T_3 e T_4 . Em (14) é apresentada a função de transferência para os controladores.

$$H(s) = K \left(\frac{sT_w}{1+sT_w} \right) \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left(\frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right) \quad (14)$$

O ESP utiliza como sinal de entrada as variações da velocidade angular do gerador ($\Delta\omega_k$) e insere o sinal de saída (ΔV_{esp_k}) na malha de controle do RAT, que é representado por um ganho K_{rk} e a constante de tempo T_{rk} . Dessa forma, o controlador atua sobre a tensão de campo do gerador ΔE_{fd_k} conforme mostrado na Fig. 3(a), onde ΔV_{ref_k} e ΔV_k representam a tensão de referência e terminal do gerador.

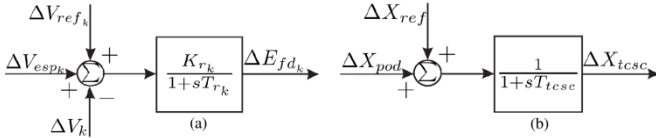


Fig. 3. Diagrama de blocos do estágio de saída: (a) ESP; (b) TCSC-POD.

O comportamento dinâmico do ESP é descrito por três novas variáveis de estado (15)-(17), além de modificar a tensão de campo (18), conforme apresentado em [18].

$$\Delta \dot{V}_{1k} = K_{esp} \Delta \dot{\omega}_k - \frac{1}{T_{\omega}} \Delta V_{1k} \quad (15)$$

$$\Delta \dot{V}_{2k} = \frac{1}{T_2} \Delta V_{1k} + \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{V}_{1k} - \frac{1}{T_2} \Delta V_{2k} \quad (16)$$

$$\Delta \dot{V}_{esp_k} = \frac{1}{T_4} \Delta V_{2k} + \frac{T_3}{T_4} \Delta \dot{V}_{2k} - \frac{1}{T_4} \Delta V_{esp_k} \quad (17)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd_k} = \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{esp_k} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{ref_k} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k - \frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fd_k} \quad (18)$$

Quanto ao POD, o sinal de entrada é a variação do fluxo de potência ativa (ΔP_{km}) na linha onde o FACTS está instalado. O sinal de saída (ΔX_{pod}) é inserido na malha de controle do TCSC, que é representado pela constante de tempo T_{tcsc} (modelo de 1ª ordem). O estágio de saída do TCSC-POD é mostrado na Fig. 3(b), onde ΔX_{ref} e ΔX_{tcsc} representam a reatância de referência e do TCSC, respectivamente. A instalação de um conjunto TCSC-POD gera a inserção de quatro novas variáveis de estado ao modelo (19)-(22).

$$\Delta \dot{X}_1 = \frac{1}{T_{\omega p}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta X_1) \quad (19)$$

$$\Delta \dot{X}_2 = \frac{1}{T_{p2}} \left[\left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}} \right) (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta X_1) - \Delta X_2 \right] \quad (20)$$

$$\Delta \dot{X}_3 = \frac{1}{T_{p4}} \left\{ \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}} \right) \left[\Delta X_2 + \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta X_1) \right] - \Delta X_3 \right\} \quad (21)$$

$$\Delta \dot{X}_{tcsc} = \frac{1}{T_{tcsc}} (\Delta X_{pod} + \Delta X_{ref} - \Delta X_{tcsc}) \quad (22)$$

A. Problema de Otimização

O problema de otimização consiste em atuar sobre os parâmetros dos controladores a fim de encontrar um ajuste que atenda ao amortecimento mínimo dos cenários em análise, respeitando integralmente as restrições relativas aos limites das variáveis envolvidas. Dessa forma, o problema pode ser formulado conforme mostrado em (23)-(27) [20].

$$\min \quad F_o(x) = \sum_{i=1}^n G_i \quad (23)$$

$$s. a. \quad T_1^{\min} \leq T_1 \leq T_1^{\max} \quad (24)$$

$$T_2^{\min} \leq T_2 \leq T_2^{\max} \quad (25)$$

$$K^{\min} \leq K \leq K^{\max} \quad (26)$$

$$G_i = \begin{cases} 0 & , \text{ se } \xi_i^{des} \leq \xi_i^{calc} \\ \xi_i^{des} - \xi_i^{calc} & , \text{ se } \xi_i^{des} > \xi_i^{calc} \end{cases} \quad (27)$$

A função objetivo $F_o(x)$ minimiza a diferença entre o amortecimento desejado (ξ_i^{des}) e o amortecimento calculado (ξ_i^{calc}) para n modos oscilatórios de interesse. O valor mínimo para a função objetivo é zero, neste caso, todos os modos oscilatórios dominantes possuem amortecimento superior ou igual ao mínimo desejado e especificado [20].

As restrições apresentadas de maneira compacta em (24)-(26) dizem respeito aos limites superiores e inferiores das variáveis envolvidas. Na literatura, é comum a utilização da relação $T_1 = T_3$ e $T_2 = T_4$ [2], logo os parâmetros a serem ajustados são as constantes de tempo T_1 e T_2 e o ganho K , tanto para os ESPs quanto para o conjunto TCSC-POD.

Na Fig. 4 é apresentada a codificação do vetor solução utilizado pelo método. As primeiras $3n$ posições são ocupadas pelos parâmetros dos n controladores ESPs [12].

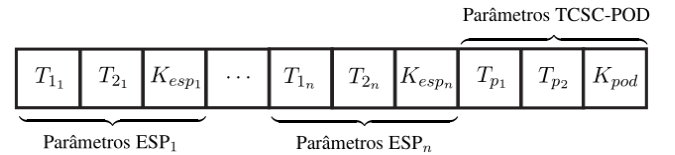


Fig. 4. Codificação do vetor solução.

B. Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* é uma meta-heurística inspirada no processo de obtenção de cristais perfeitos conhecido como *annealing* ou recozimento [16]. O processo consiste em esquentar o material até temperaturas elevadas gerando um alto grau de movimentação molecular e um novo arranjo dos átomos. Na sequência, o material é esfriado de maneira lenta e controlada com o objetivo de preservar o chamado quase equilíbrio termodinâmico, aumentando a possibilidade de que o material se torne um cristal perfeito.

O algoritmo SA tradicional gera uma solução inicial (p_i) aleatoriamente e a transforma na solução corrente (p_c). O processo de tentativa de transição para outras soluções se inicia com a geração de uma solução vizinha (p_v). Neste trabalho, a solução vizinha é gerada a partir de uma

perturbação na solução corrente. A cada geração, um parâmetro k da solução corrente é escolhido aleatoriamente, sendo aplicada uma pequena perturbação (positiva ou negativa, com igual probabilidade de ocorrência) a este parâmetro de acordo com (28)-(29). A solução vizinha é idêntica à solução corrente, exceto no parâmetro perturbado.

$$p_v(k) = p_c(k) \pm \Delta k \quad (28)$$

$$\Delta k = \alpha(k_{max} - k_{min}) \quad (29)$$

A perturbação (Δk) considera uma taxa de perturbação (α) que atua sobre a diferença entre o limite máximo (k_{max}) e mínimo (k_{min}) da variável envolvida. Caso o valor a ser assumido pelo parâmetro k , após a perturbação, extrapolar os limites definidos, aplica-se um mecanismo de correção e o valor assumido pelo parâmetro se torna igual ao limite extrapolado, evitando assim, a geração de soluções infactíveis pelo próprio método.

Após a geração de uma solução vizinha, considerando a minimização da função objetivo $F_o(x)$, o SA avalia as duas soluções para tomada de decisão de acordo com (30)-(31).

$$\Delta F_o(p_v) = F_o(p_v) - F_o(p_c) \quad (30)$$

$$prob(p_v) = \begin{cases} 1, & \text{se } \Delta F_o(p_v) \leq 0 \\ \exp\left[\frac{-\Delta F_o(p_v)}{T_k}\right], & \text{se } \Delta F_o(p_v) > 0 \end{cases} \quad (31)$$

Se a solução vizinha é melhor que a solução corrente, a solução vizinha necessariamente se torna a solução corrente. Caso contrário, existe uma probabilidade denominada $prob(p_v)$ de que a solução vizinha seja aceita como a nova solução corrente, esta probabilidade assume valores entre 0 e 1, sendo calculada ao considerar a diferença entre os valores da função objetivo da solução vizinha e da solução corrente, além do nível de temperatura T_k . A solução vizinha é aceita se a probabilidade for maior ou igual a um número gerado aleatoriamente no intervalo [0,1]. Na Fig. 5 encontra-se o pseudocódigo do SA utilizado neste trabalho.

Algoritmo 1: Simulated Annealing	
1	Inicializar: defina o critério de parada, a temperatura inicial T_0 o nº de tentativas no primeiro nível de temperatura N_0 , a taxa de perturbação α e os parâmetros de controle ρ e β ;
2	Gere a solução inicial aleatoriamente fazendo com que se torne a solução corrente (p_c), $i \leftarrow 1$, $k \leftarrow 1$, $N_k \leftarrow N_0$ e $T_k \leftarrow T_0$;
3	Enquanto (critério de parada não satisfeito) faça:
4	Repetir (até $i > N_k$):
5	Aplique uma perturbação na solução corrente gerando uma solução vizinha (p_v), avalie esta solução;
6	Se (solução vizinha p_v melhor que a corrente p_c):
7	$p_c \leftarrow p_v$;
8	Se não :
9	Calcule a probabilidade $prob(p_v)$ de aceitação da solução, gere um número aleatório no intervalo [0,1] e avalie se a solução vizinha deve ser aceita como solução corrente;
10	$i \leftarrow i + 1$;
11	Atualize a temperatura ($T_{k+1} \leftarrow \beta T_k$) e o número de tentativas para uma mesma temperatura ($N_{k+1} \leftarrow \rho N_k$), $k \leftarrow k + 1$;
12	Fim

Fig. 5. Pseudocódigo do Simulated Annealing.

O processo de tentativa de transição descrito é repetido N_k vezes para uma temperatura T_k . Caso o critério de parada não

seja atendido até que o número máximo de tentativas N_k seja alcançado, tanto N_k quanto T_k são atualizados respectivamente pelos parâmetros ρ e β , conforme mostrado em (32)-(33), simulando o processo de resfriamento.

$$N_{k+1} = \rho N_k \quad (32)$$

$$T_{k+1} = \beta T_k \quad (33)$$

VI. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O método de ajuste apresentado é implementado utilizando o software Matlab em um computador com processador Intel Core I5 3470 que dispõe de 8 GB de memória RAM. As simulações são realizadas considerando o sistema teste Simétrico de Duas Áreas [17] representado na Fig. 6. As condições iniciais são obtidas com a resolução do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson.

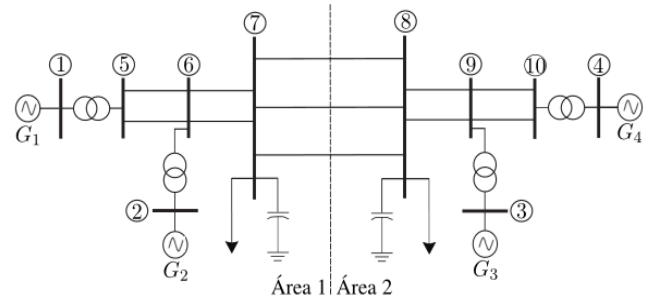


Fig. 6. Sistema Simétrico de Duas Áreas.

Com as condições iniciais calculadas, torna-se possível a obtenção dos autovalores da matriz de estados A do sistema teste. Na Tabela I encontram-se os autovalores dominantes (λ_i), assim como a frequência natural não amortecida (ω_n) e os coeficientes de amortecimento (ξ_i) associados aos autovalores do sistema.

TABELA I. AUTOVALORES DOMINANTES DO SISTEMA TESTE – CASO BASE.

Modo	Autovalores	ξ_i	ω_n (Hz)
λ_1	$-0,2327 \pm j6,3098$	0,0369	1,0049
λ_2	$-0,1584 \pm j5,8799$	0,0269	0,9361
λ_3	$0,0462 \pm j4,1659$	-0,0111	0,6631

Os dados apresentados na Tabela I mostram que o sistema possui três modos oscilatórios, sendo dois estáveis (parte real negativa do par complexo conjugado) e um instável (parte real positiva). Verifica-se também que os modos estáveis são modos oscilatórios locais, haja vista a faixa de ocorrência da frequência natural não amortecida, a mesma análise indica que o modo instável é um modo interárea. Por fim, é possível verificar que além da presença de um modo instável, os modos estáveis são fracamente amortecidos.

Neste trabalho é proposto a instalação de dois ESPs e um TCSC-POD com o objetivo de garantir a estabilidade a pequenas perturbações do sistema teste, além de elevar o amortecimento de todos os modos oscilatórios de interesse para níveis desejados. Os ESPs são instalados junto aos geradores G_2 e G_3 , a escolha é baseada nos fatores de participação [2]. O TCSC-POD é instalado na longa linha de transmissão que conecta as duas áreas do sistema (entre as barras 7 e 8) para compensar a reatância da linha.

A. Parâmetros e Desempenho do Método de Otimização

O algoritmo SA apresentado deve realizar o ajuste coordenado dos controladores suplementares ESPs e TCSC-POD considerando dois cenários de amortecimento mínimo desejado: $\xi_i \geq 10\%$ e $\xi_i \geq 15\%$. Para cada um dos cenários são realizados 100 testes utilizando a função objetivo e as restrições das variáveis apresentadas em (23)-(27). Os valores dos amortecimentos na $F_o(x)$ são multiplicados por 100 para eliminar o efeito da porcentagem, evitando que a diferença calculada pela função seja sempre muito pequena em módulo, o que causaria sempre a transição para as soluções vizinhas.

As restrições (24)-(26) com relação aos limites dos parâmetros dos controladores são mostrados na Tabela II. As constantes de tempo do filtro *washout* são fixadas em 10 segundos e 1 segundo para o ESP e POD, respectivamente. A constante de tempo do FACTS é de 0,005 segundos e a taxa de compensação realizada pelo TCSC é de 10%.

TABELA II. LIMITES DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES.

Limite	$T_1(s)$	$T_2(s)$	$K_{esp}(pu)$	$T_{p1}(s)$	$T_{p2}(s)$	$K_{pod}(pu)$
Mínimo	0,10	0,01	1,00	0,05	0,10	0,05
Máximo	1,00	0,50	3,00	0,10	1,00	0,50

A convergência do método acontece quando é possível encontrar uma solução que garanta o amortecimento mínimo, do cenário em análise, para todos os modos oscilatórios de interesse, respeitando os limites dos parâmetros dos controladores. Esta solução deve ser encontrada dentro do número limite de cálculos da função objetivo, do contrário, considera-se que o método falhou no teste realizado.

Os valores dos parâmetros do SA utilizado neste trabalho são: $T_0 = 100$, $N_0 = 60$, $\rho = 0,95$, $\beta = 0,5$ e a taxa de perturbação $\alpha = 15\%$. O critério de parada é o limite de cálculos da função objetivo (1000 cálculos) ou a obtenção de uma solução que atenda ao objetivo do problema.

Na Tabela III é apresentado o desempenho do SA utilizado neste trabalho considerando os dois cenários propostos.

TABELA III. DESEMPENHO DO MÉTODO DE AJUSTE.

Cenário	Taxa de Convergência	Tempo Médio (s)	Nº Cálculos F. Obj.	
			Mín.	Máx.
$\xi_i \geq 10\%$	100%	4,24	29	201
$\xi_i \geq 15\%$	100%	10,32	55	449

Analisando a Tabela III, torna-se possível concluir que o método obteve 100% de convergência para todos os testes utilizando, na média, baixos tempos computacionais. Verifica-se ainda que ao aumentar a complexidade do problema, o SA necessitou de um número maior de cálculos da função objetivo para alcançar a convergência, ainda assim, longe do limite previamente estabelecido.

O número elevado de cálculos da função objetivo em alguns dos testes realizados (cerca de 5%) para o cenário mais complexo, se deve à estagnação em ótimos locais distantes de regiões promissoras. Com a diminuição da temperatura no decorrer do processo, diminui também a probabilidade de aceitação de soluções que não sejam melhores que a solução corrente. Entretanto, na grande maioria dos testes realizados, o método foi capaz de migrar para regiões promissoras rapidamente, alcançando um ótimo desempenho no ajuste dos controladores.

B. Análise da Estabilidade Dinâmica

Diante do desempenho apresentado na Tabela III, o SA se credencia para a sequência da análise da estabilidade dinâmica. Na Tabela IV são mostrados os ajustes para os cenários simulados. Os ajustes amostrados foram escolhidos aleatoriamente dentre todos os testes realizados.

TABELA IV. AJUSTE DOS CONTROLADORES ESP E TCSC-POD.

Cenário	Controladores	$T_1(s)$	$T_2(s)$	$K(pu)$
$\xi_i \geq 10\%$	ESP G_2	0,5928	0,1372	1,1416
	ESP G_3	0,6737	0,2213	1,2878
	TCSC-POD	0,0733	0,4197	0,0600
$\xi_i \geq 15\%$	ESP G_2	0,7349	0,1823	1,3044
	ESP G_3	0,7936	0,2200	1,6945
	TCSC-POD	0,0786	0,4220	0,0767

Analisando a Tabela IV, torna-se possível concluir que os ajustes atendem aos limites dos parâmetros dos controladores envolvidos. Verifica-se ainda que apesar de distantes dos limites previamente estabelecidos, os ganhos projetados são compatíveis com o amortecimento exigido nos cenários simulados. Na Tabela V são mostrados os autovalores para o sistema com a inclusão dos controladores ESPs e TCSC-POD ajustados de acordo com os dados da Tabela IV.

TABELA V. AUTOVALORES DO SISTEMA COM CONTROLADORES INSTALADOS.

Cenário	Modo	Autovalores	ξ_i	$\omega_n (Hz)$
$\xi_i \geq 10\%$	λ_1	$-0,6372 \pm j5,8044$	0,1091	0,9294
	λ_2	$-0,6158 \pm j5,7255$	0,1069	0,9165
	λ_3	$-0,4384 \pm j4,1453$	0,1052	0,6634
$\xi_i \geq 15\%$	λ_1	$-0,8816 \pm j5,7378$	0,1519	0,9239
	λ_2	$-0,8403 \pm j5,3986$	0,1538	0,8696
	λ_3	$-0,6135 \pm j3,9964$	0,1517	0,6435

Analisando a Tabela V, torna-se possível concluir que todos os modos oscilatórios de interesse estão com o amortecimento mínimo dos cenários simulados. Desta forma, o sistema teste que anteriormente acusava instabilidade, após a inclusão dos controladores de amortecimento devidamente ajustados, tornou-se estável, além disso, apresenta níveis desejados de amortecimento do ponto de vista da estabilidade a pequenas perturbações. O deslocamento dos autovalores de interesse no plano complexo, considerando os cenários simulados, é mostrado na Fig. 7.

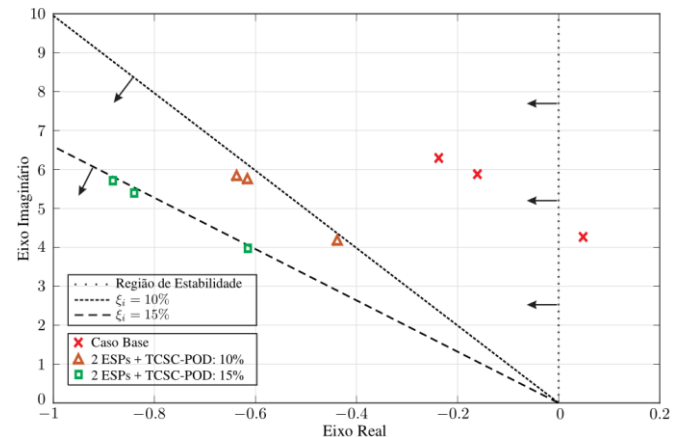


Fig. 7. Deslocamento dos autovalores do sistema teste.

Para análise da estabilidade no domínio do tempo é considerada uma perturbação do tipo degrau na potência mecânica do gerador G_4 (referência do sistema). Na Fig. 8 são apresentadas as variações na velocidade angular dos rotores dos outros geradores do sistema teste para o caso de maior amortecimento. Verifica-se que as três curvas são compostas por oscilações de amplitude decrescente com valor final tendendo a zero, ou seja, o sistema está amortecido e pode garantir a estabilidade a pequenas perturbações.

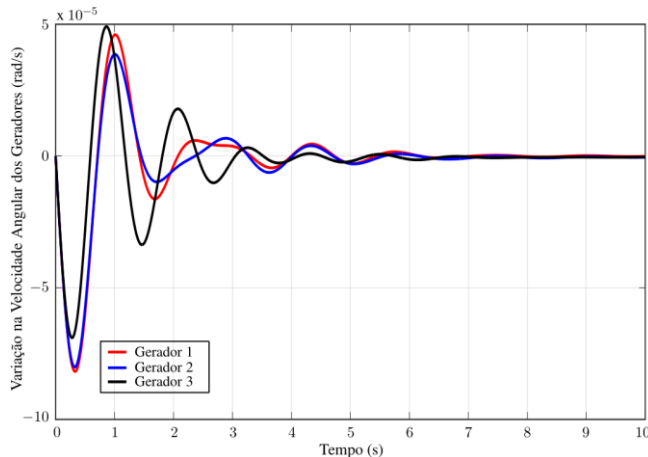


Fig. 8. Variação na velocidade angular dos geradores do sistema teste.

VII. CONCLUSÕES

Neste trabalho, um algoritmo *Simulated Annealing* foi utilizado no ajuste dos controladores suplementares de amortecimento com o objetivo de estabilizar o sistema teste conhecido como simétrico de Duas Áreas, além de elevar a taxa de amortecimento de todos os modos oscilatórios de interesse para níveis desejados do ponto de vista da estabilidade a pequenas perturbações.

O *Simulated Annealing* apresentou um ótimo desempenho no ajuste dos controladores suplementares de amortecimento, haja vista os baixos tempos computacionais exigidos, além da convergência de 100% nos testes realizados. Entretanto, ao aumentar a complexidade do problema de otimização, exigindo níveis de amortecimento mais elevados, o método necessitou de um número maior de cálculos da função objetivo para obter a convergência.

Diante desta questão, ao elevar ainda mais o nível de complexidade do problema de otimização, seja pelo aumento do amortecimento ou mesmo a aplicação do método em um sistema de grande porte com diversos modos oscilatórios, o *Simulated Annealing* deve necessitar de um número maior de cálculos para a convergência. Uma possível solução para este problema seria o aumento do limite de cálculos da função objetivo e, principalmente, a realização de adequações nos parâmetros do método para atender as peculiaridades do sistema de grande porte em análise, como por exemplo, o aumento do parâmetro β a fim de realizar o processo de resfriamento de maneira mais lenta, evitando a estagnação precoce em ótimos locais distantes das soluções desejadas.

Diante do exposto e dos resultados apresentados, o *Simulated Annealing* com seus parâmetros adequadamente estimados se torna uma ferramenta interessante na análise da estabilidade dinâmica.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] P. Anderson and A. A. Fouad, *Power system control and stability*. New York: Wiley-IEEE Press, 672p, 2003.
- [2] P. Kundur, *Power system stability and control*. New York: MacGraw-Hill, 1167p, 1994.
- [3] C. R. Pádua Junior, A. L. M. Takahashi, M. A. Furini and P. B. Araujo, "Proposta de um modelo para análise de estabilidade a pequenas perturbações baseado na lei de Kirchhoff para correntes," In: *SBAI/DINCON 2013*, Fortaleza, 2013, pp. 1-6.
- [4] F. P. DeMello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 88, no. 4, pp. 316-329, 1969.
- [5] L. J. Cai and I. Erlich, "Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 294-300, 2005.
- [6] D. B. Valle and P. B. Araujo, "The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 65, pp. 299-306, 2015.
- [7] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: concepts and technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York: Wiley-IEEE Press, 432p, 2000.
- [8] A. D. Del Rosso, C. A. Canizares and V. M. Dona, "A study of TCSC controller design for power system stability improvement," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, n. 4, pp. 1487-1496, 2003.
- [9] N. Yang, Q. Liu and J. D. McCalley, "TCSC controller design for damping interarea oscillations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, n. 4, pp. 1304-1310, 1998.
- [10] M. A. Furini, A. L. S. Pereira and P. B. Araujo, "Pole placement by coordinated tuning of power system stabilizers and FACTS-POD stabilizers," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, n. 3, pp. 624-631, 2011.
- [11] L. H. Hassan, M. Moghavvemi, H. A. F. Almurib and K. M. Muttaqi, "A coordinated design of PSSs and UPFC-based stabilizer using genetic algorithm," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, n. 5, pp. 2957-2966, 2014.
- [12] B. R. Gamino, P. B. Araujo, E. V. Fortes, L. F. B. Martins and E. L. Miotto, "Coordinated tuning of PSS and TCSC-POD controller using an Elite Genetic Algorithm," In: *12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON) 2016*, Curitiba, 2016, pp. 1-8.
- [13] H. Shayeghi, A. Safari and H. A. Shayanfar, "PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, n. 12, pp. 2930-2937, 2010.
- [14] H. Hasanvand, M. R. Arvan, B. Mozafari and T. Amraee, "Coordinated design of PSS and TCSC to mitigate interarea oscillations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, n. 1, pp. 194-206, 2016.
- [15] S. Abd-Elazim and E. Ali, "Coordinated design of PSSs and SVC via bacteria foraging optimization algorithm in a multimachine power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 41, n. 1, pp. 44-53, 2012.
- [16] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, vol. 220, n. 4598, pp. 671-680, 1983.
- [17] P. W. Sauer and M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*. New Jersey: Prentice Hall, 357p, 1998.
- [18] E. V. Fortes, P. B. Araujo and L. H. Macedo, "Coordinated tuning of the parameters of PI, PSS and POD controllers using a specialized Chu-Beasley's genetic algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 708-721, 2016.
- [19] A. Vinkovic and R. Mihalic, "A current-based model of an IPFC for Newton-Raphson power flow," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 1247-1254, 2009.
- [20] B. R. Gamino and P. B. Araujo, "Application of a Basic Variable Neighborhood Search algorithm in the coordinated tuning of PSS and POD controllers," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, pp. 1-12, 2017.