

## Sintonia de controlador utilizando Recozimento Simulado para amortecimento das oscilações eletromecânicas

Elayne Holanda Madruga\*, Alexandre César de Castro\*, Yuri Percy Molina Rodriguez\*

\* Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil  
(e-mails: elayne.madruga@cear.ufpb.br, castro@cear.ufpb.br, molina.rodriguez@cear.ufpb.br)

---

**Abstract:** Some disturbances can affect power system stability and generate electromechanical oscillations. In this paper, a robust controller design is presented, whose main objective is to damp the electromechanical oscillation modes and ensure power system stability. In order to guarantee the robustness of the controller, singular values and Relative Gain Matrix were used to select the most significant input-output pairs in the system. The designed controller was of low order and its parameters were adjusted using Simulated Annealing. It was observed, when these parameters were used, the system was damped and it met the robustness condition. A comparison was also made of the result with other optimization methods. Simulated Annealing showed a good comparative performance and it proved efficient for nonhigh uncertainties.

**Resumo:** Alguns distúrbios podem prejudicar a estabilidade e gerar oscilações eletromecânicas nos sistemas elétricos de potência. Aqui, é apresentado um projeto de controlador robusto que possui como principal objetivo amortecer os modos de oscilações eletromecânicas e garantir estabilidade ao sistema. Com o intuito de assegurar a robustez do controlador, utilizaram-se valores singulares e Matriz de Ganhos Relativos para selecionar os pares entrada-saída mais significativos do sistema. O controlador projetado foi de baixa ordem e os seus parâmetros foram ajustados utilizando Recozimento Simulado. Observou-se que, ao usar esses parâmetros, o sistema foi amortecido e atendeu à condição de robustez. Foi feita, ainda, uma comparação do resultado com outros métodos de otimização. O Recozimento Simulado apresentou um bom desempenho comparativo e se mostrou eficiente para incertezas não elevadas.

**Keywords:** Simulated Annealing; Power Systems Stability; Robust Controller; Electromechanical oscillations; Optimization Methods.

**Palavras-chaves:** Recozimento Simulado; Estabilidade de Sistemas de Potência; Controlador Robusto; Oscilações Eletromecânicas; Métodos de Otimização.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) estão sujeitos a perturbações que podem ser provenientes de diferentes causas: eventos naturais, partida de grandes cargas, mudança de rede, falha de equipamentos na rede, descargas elétricas, erros operacionais. As perturbações de um sistema podem ser de ângulo, de frequência ou de tensão e, independentemente de serem grandes ou pequenas, elas geram oscilações, que prejudicam a estabilidade.

Estabilidade de sistemas elétricos de potência é a habilidade da rede de voltar à sua condição normal de operação após ter sido submetida a uma perturbação (Kundur *et. al.*, 2004). No contexto de mercado de energia competitivo, a capacidade de manutenção da estabilidade do sistema tem um efeito significativo sobre os preços da eletricidade. A condição de operação que um sistema alcança após uma perturbação deve respeitar um ponto de equilíbrio onde as variáveis estejam dentro dos níveis toleráveis definidos pelos operadores do sistema (Gómez-Expósito *et. al.*, 2011).

Devido a isso, quando ocorre uma perturbação, é necessário que se recupere um estado de equilíbrio original do SEP. A Regulação Própria e a Regulação Primária do sistema não são

suficientes para amortecer as oscilações e, portanto, é necessário utilizar a Regulação Secundária. Nessa regulação, os controladores, além de possuírem maior capacidade de amortecimento, podem ser programados para considerar as variações de característica da carga (pesada ou leve) ao longo do dia.

Diante disso, com base em estudos existentes sobre o amortecimento de oscilações eletromecânicas, como os de Rogers (2000), Larsen e Swann (2005), Castro *et al.* (2011) e Silva Filha *et al.* (2016) será proposta, neste trabalho, a sintonia de um controlador. Ela será baseada na regulação secundária, para atuar em pequenas perturbações.

O controlador a ser modelado utilizará a técnica de Recozimento Simulado e será descentralizado e de baixa ordem. Antes de aplicá-lo no sistema em estudo, serão selecionadas, simultaneamente, as entradas e saídas mais significativas deste sistema, utilizando Matriz de Ganhos Relativos (MGR) e valores singulares. Após isso, o controlador será aplicado ao sistema para assegurar robustez e amortecer as oscilações eletromecânicas.

## 2. ANÁLISE DE SINAIS

Vários modos de oscilação (MO) podem ocorrer nos sistemas elétricos de potência. Para conter tais modos, são utilizados controladores. Aqui, será apresentado o procedimento usado para análise dos pares-entrada saída mais significativos do sistema para controle descentralizado.

### 2.1 Análise de Controlabilidade e Observabilidade

Controlabilidade, de acordo com Van de Wal e De Jager (2001), é a habilidade que um sistema possui para amortecer o modo de oscilação (MO) e alcançar um desempenho aceitável com entradas e saídas limitadas. Observabilidade, por sua vez, é definida como a contribuição do MO na resposta do sistema.

A controlabilidade e a observabilidade dos modos podem ser afetadas de maneira significativa pelos zeros de um sistema (Skogestad e Postlethwaite, 2001). A única forma de se evitar zeros é com a seleção prévia de entradas e saídas adequadas no projeto e na aplicação dos controladores.

O sistema elétrico de potência com  $n$  unidades,  $m$  entradas de controle e  $r$  sinais de saída é representado por (1).

$$Y(j\omega) = G(j\omega) \cdot U(j\omega) \quad (1)$$

Onde  $G(j\omega)$  é a matriz de funções de transferência de respostas frequenciais (MFTfr), com dimensão  $m \times r$ .

Segundo Castro (2006), para análise de controlabilidade e observabilidade de sistemas multivariáveis nos domínios de frequência, são usados os valores singulares da MFTfr. No caso da matriz  $G(j\omega)$ , esses valores são definidos por:

$$\sigma_i(j\omega) = \sqrt{\lambda_i G^H G} = \sqrt{\lambda_i (G G^H)}, i = 1, \dots, k \quad (2)$$

Em que  $\lambda_i$  é o  $i$ -ésimo autovalor da matriz  $G^H G$  ou  $G G^H$ ;  $G^H$  é a matriz conjugada e transposta de  $G$ ;  $k$  é o  $\min(m, r)$ , onde  $m$  (entradas) é o número de linhas da matriz  $G$  e  $r$  (saídas) é o número de colunas.

Os valores singulares são reais e não negativos. Aqui, será definido  $\sigma_{\max}$  como o maior valor singular e  $\sigma_{\min}$  como o menor valor. A relação  $\gamma = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$  também é importante e é conhecida como número de condição.  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  e  $\gamma$  são essenciais para análise e projeto de controladores em sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (Rogers, 2000).

Skogestad e Postlethwaite (2001) e Castro e Araújo (2002) pontuam algumas propriedades importantes para a análise e projeto de controladores. São elas:

- $\sigma_{\max}$  na frequência de um MO indica o grau de observabilidade e  $\sigma_{\min}$  corresponde ao grau de controlabilidade do modo;
- Sistemas robustos, bem amortecidos e fracamente observáveis apresentam pequenos picos de  $\sigma_{\max}$ ;
- Uma depressão no gráfico de  $\sigma_{\min}$  indica a presença de um zero influente na referida frequência;

- Necessita-se de  $\sigma_{\min} \gg 1$  na frequência de um MO para que ele seja fortemente controlável;
- Um número de condição elevado ( $\gamma > 10$ ) aponta dificuldade de controle. No entanto, se  $\sigma_{\min} \gg 1$ , é possível realizar o controle mesmo com  $\gamma > 10$ ;
- Sabe-se que  $\|G\| = \sigma_{\max}(G)$  e que  $\|G^{-1}\| = 1/\sigma_{\min}(G)$ .

Para analisar o efeito dos valores singulares num sistema submetido a perturbações, é preciso conhecer seu esquemático. Na Fig. 1, o sistema,  $G(s)$ , é representado com controladores na realimentação,  $H(s)$ , com entradas de referência,  $R$ , e com distúrbio,  $d$ .

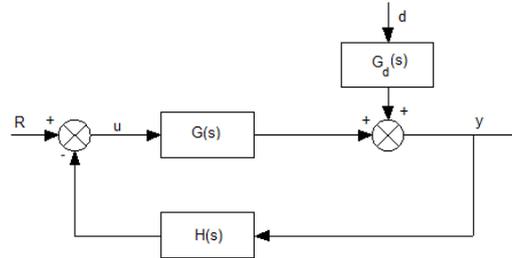


Fig. 1 Sistema de potência com controladores.

Por meio da Fig. 1, pode-se obter a relação em (3):

$$y = (I + GH)^{-1}GR + (I + GH)^{-1}G_d d \quad (3)$$

Em que  $I$  é a matriz identidade,  $S = (I + GH)^{-1}$  é a MFTfr de sensibilidade e  $T = S \cdot G$  é a MFTfr de malha fechada do sistema. Essas matrizes são comumente utilizadas para analisar o comportamento do sistema (Castro, 2006).

### 2.2 Interações no domínio da frequência

Para analisar as interações em sistemas multivariáveis, além dos valores singulares, utiliza-se a Matriz de Ganhos Relativos (MGR). Para  $G$  ( $m \times m$ ), ou seja, quando  $r = m$ , ela é definida por:

$$\Lambda(G(j\omega)) = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{r1} & \dots & \lambda_{rm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde  $\lambda_{ij} = g_{ij} b_{ij}$ ,  $g_{ij}$  é o elemento  $ij$  de  $G$  e  $b_{ij}$  é o elemento  $ji$  da matriz inversa generalizada de  $G$ , dada por  $G^+ = (G^H G)^{-1} G^H$ . Além disso, define-se  $\lambda_{ij}$  como uma medida de interação entre entrada  $j$  e saída  $i$ . De acordo com Castro (2006), a matriz  $\Lambda$  pode ser utilizada na seleção de entradas para aplicação de controladores e de sinais de saída para serem realimentados através desses controladores.

### 2.3 Condições para descentralização

Neste trabalho, deseja-se obter um controle descentralizado para o sistema elétrico de potência a ser estudado. Segundo Castro (2006), podem ser destacadas determinadas regras usadas na seleção de entradas e saídas para controle descentralizado do sistema. São elas:

- Os pares selecionados não devem ter zeros à direita do plano complexo até a frequência de corte ( $\omega_c$ ) e nem próximos da origem, pois têm um grande efeito na resposta, o que dificulta o controle do MO. Define-se a frequência de corte como a frequência em que  $\sigma_{\text{máx}} = 1$ , quando  $\sigma_{\text{máx}}$  está decrescendo;
- Não se deve utilizar o par saída-entrada correspondente a  $\lambda_{ij}$  negativo no estado estacionário ( $\omega = 0$ ) para evitar instabilidade por interações em baixa frequência;
- Os valores absolutos da MGR devem resultar em números pequenos, preferencialmente menores do que 1, para que o sistema seja mais facilmente controlável;
- Quanto mais próximo da matriz identidade resultar  $\Lambda(G)$ , mais independentes serão os pares entrada-saída e consequentemente menores serão as interações que ocorrerão entre os controladores. Pode-se aceitar como descentralizado o conjunto que resultar em  $\Lambda(G(j\omega)) \cong I$  para  $\omega = \omega_c$  (Skogestad e Postlethwaite, 2001). Uma medida de proximidade de  $\Lambda(G)$  com a matriz identidade é definida por:

$$MGR_N = \|\Lambda(G) - I\| \quad (5)$$

Em que  $MGR_N$  é o número da MGR e é uma norma da matriz quadrada. Para  $MGR_N \cong 0$ , a descentralização é boa, entretanto essa condição é apenas suficiente. Devido a isso, propõe-se um limite, tornando uma medida independente da matriz que é definida. Para uma matriz  $n \times n$ , define-se  $MGR_N \cong \epsilon n^2$ , em que  $n$  é a ordem da matriz e  $\epsilon$  representa o limite da média das magnitudes dos elementos de  $\|I - \Lambda(G)\|$ . Para uma boa descentralização,  $\epsilon$  deve ser pequeno ( $\epsilon \leq 0,1$ ).

Milanovic e Duque (2001) usaram algumas propriedades usuais da MGR para escolher os pares entrada-saída mais influentes no sistema. No entanto, a aplicação isolada da MGR nessa seleção possui certas limitações, como por exemplo a impossibilidade de selecionar a saída mais eficaz entre sinais de uma mesma unidade de geração.

Diante disso, Castro e Araújo (2002) propuseram, então, um método que emprega MGR e valores singulares para selecionar os pares entrada-saída mais eficazes para utilização de controladores descentralizados. Essa é uma técnica que provou ser efetiva e segura para a seleção de sinais.

#### 2.4 Procedimento para seleção de entradas e saídas

Devido à insuficiência da seleção de pares entradas-saídas apenas pela aplicação da MGR, será utilizado o método apresentado por Castro e Araújo (2002). Este método seleciona simultaneamente o conjunto mais eficiente de saídas e entradas e somente depois aplica os controladores. O procedimento para sua utilização efetiva será descrito a seguir:

1 - Determinar a MGR completa na frequência  $\omega = 0$ , para obter, portanto, a matriz  $\Lambda(0)$  (estado estacionário), que considera as entradas e saídas de todas as unidades;

2 - Desconsiderar para seleção todos os pares para os quais  $\lambda_{ij} < 0$  e, para cada unidade, desconsiderar a(s) saída(s) com  $\sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \ll 1$ ;

3 - Analisar as saídas com valores maiores de  $\sum_{j=1}^m \lambda_{ij}$  e os pares com valores grandes de  $\lambda_{ij} > 0$ ;

4 - Eliminar os sinais e entradas pouco efetivos ou que provoquem interações indesejáveis;

5 - Formar todos os conjuntos com  $p$  entradas e  $p$  saídas, considerando que  $p$  controladores são suficientes para amortecer os modos de oscilação com controle robusto do sistema;

6 - Testar os conjuntos para verificar a descentralização na frequência  $\omega = \omega_c$  e descartar os conjuntos com fortes interações entre as unidades (fraca descentralização);

7 - Comparar os conjuntos restantes através dos valores singulares, a fim de eleger o conjunto com boa descentralização e com a maior controlabilidade ( $\sigma_{\text{máx}}$  maior) na faixa de modos de oscilação. Esse conjunto deve, então, ser escolhido para aplicação de controladores descentralizados.

### 3. PROJETO DE CONTROLADOR

Aqui, será apresentado o projeto de controlador robusto descentralizado, que resultará numa função objetivo. A finalidade é minimizar a função objetivo de modo a encontrar os valores dos parâmetros do controlador que satisfaçam a condição de robustez, alcançando, assim, o amortecimento das oscilações. O controlador com os parâmetros adequados será aplicado em um sistema carga-frequência com três áreas.

Os controladores são projetados levando em consideração os erros de modelagem, também conhecidos como incertezas. O termo incertezas diz respeito às diferenças ou erros entre os modelos e a realidade. A configuração completa do sistema com incertezas resulta em um controlador centralizado e de ordem elevada (Castro, 2006).

Devido à ordem elevada do controlador resultante e ao problema de centralidade, propõe-se a técnica em que os controladores são projetados usando diretamente o modelo na forma frequencial, considerando o sistema multivariável e representado pela configuração apresentada na Fig. 2.

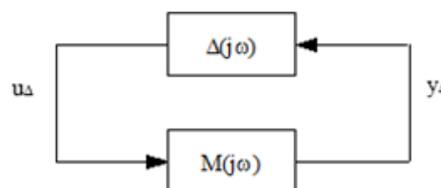


Fig. 2 Configuração M-  $\Delta$  utilizada para análise de estabilidade robusta.

$\Delta(j\omega)$  simboliza as incertezas e  $M(j\omega)$  inclui o sistema nominal representado pela matriz  $G$ , pelo controlador  $H$  e pelos pesos  $W_a(s)$  e  $W_b(s)$ , que representam os limites das incertezas. Esta configuração, conhecida como  $M-\Delta$ , será utilizada neste trabalho para projetar o controlador.

Skogestad e Postlethwaite (2001) apresentam dois teoremas distintos para garantia da estabilidade. No primeiro teorema, conhecido por teorema de sistemas com incertezas estruturadas, assume-se que  $M(j\omega)$  e  $\Delta(j\omega)$  são estáveis, então o sistema  $M-\Delta$  será estável para todas as incertezas com  $\sigma_{\max}(\Delta(j\omega)) \leq 1, \forall \omega$ , se e somente se:

$$\mu(M(j\omega)) < 1, \forall \omega \quad (6)$$

Onde  $\mu(M)$  é o valor singular estruturado de  $M$ .

No segundo teorema, conhecido por teorema de sistemas com incertezas não-estruturadas, assume-se que  $M(j\omega)$  e  $\Delta(j\omega)$  são estáveis, mas  $\Delta(j\omega)$  é uma matriz cheia – matriz onde a maior parte dos elementos são nulos – devido a erros de modelagem, variações de ponto de operação e exclusão de partes dinâmicas dos geradores e da rede de transmissão. Nesse caso, o sistema  $M-\Delta$  será estável para todas as incertezas com  $\sigma_{\max}(\Delta(j\omega)) \leq 1, \forall \omega$ , se e somente se:

$$\sigma_{\max}(M(j\omega)) \leq 1, \forall \omega \quad (7)$$

Após conhecer os teoremas, admite-se que o controlador é de estrutura conhecida: descentralizado e de ordem reduzida. Para atingir a robustez, os parâmetros do controlador  $H(s)$  são ajustados com o objetivo de solucionar o problema de otimização dado por (8).

$$\min \left[ \sup \left( \sigma_{\max}(M(j\omega)) \right) \right] \quad (8)$$

Onde  $\sup(\sigma_{\max}(M))$  significa o valor superior ou pico máximo de  $\sigma_{\max}(M)$ .

Se após a minimização de (8) o valor mínimo do maior  $\sigma_{\max}(M)$  for igual ou maior que 1, isso indica que a robustez estabelecida pelo teorema de sistemas com incertezas não-estruturadas não foi atingida. Nesse caso, aumenta-se a ordem do controlador e repete-se o problema de otimização.

Para obter os parâmetros do controlador, como  $\sigma_{\max}(M)$  não é função explícita destes parâmetros, existe a necessidade de usar algum método que não necessite calcular as derivadas da função. Devido a isso, será proposto o método do Recozimento Simulado. Antes de explicar o método, no entanto, será apresentado um equacionamento simplificado para facilitar sua aplicação.

Os pesos das incertezas podem ser assim reescritos:  $W_a(s) = \omega_a(s) \cdot I$  e  $W_b(s) = \omega_b(s) \cdot I$ . De acordo com Castro (2006),  $\omega_a \omega_b$  indica o único limite superior, representando o pior caso associado a todos os canais de controle. Assim, a matriz  $M$  é dada por:

$$M = -\omega_a \omega_b TH \quad (9)$$

Como o sinal negativo não afeta o resultado, ele pode ser desprezado. Obtém-se então:

$$\sigma_{\max}(M) = \omega_a \omega_b \sigma_{\max}(TH) \quad (10)$$

Reorganizando (10), chega-se a:

$$\sigma_{\max}(T) < \sigma_{\max} \left( \frac{H^{-1}}{\omega_a \omega_b} \right), \forall \omega \quad (11)$$

Assim, o intuito é otimizar a função objetivo ( $M$ ), através do método de Recozimento Simulado, para obter grandezas dos parâmetros do controlador ( $K, T_1$  e  $T_2$ ), de tal modo que seja satisfeita a condição de robustez, descrita por (11). O valor singular máximo de  $M$  está diretamente relacionado aos modos de oscilação, ou seja, ao minimizá-lo, serão minimizados, também, os picos relacionados aos modos de oscilação, resultando em uma maior estabilidade do sistema.

#### 4. RECOZIMENTO SIMULADO

O Recozimento Simulado, também conhecido como *Simulated Annealing*, é uma técnica meta-heurística proposta por Metropolis *et al.* (1953). Inicialmente, consistia apenas em um método de busca randômica para solucionar problemas de otimização termodinâmica e foi assim nomeado pelo fato de simular o processo de recozimento – ou recristalização – de metais.

Kipkpatrick *et al.* (1983) estenderam este método de otimização termodinâmica para o problema de otimização combinatorial. Devido a isso, é possível fazer uma analogia entre um problema de otimização e o processo de recozimento de metais. De acordo com Viegas e Affonso (2017), as soluções do espaço de busca são comparadas aos estados possíveis de um metal, o valor da função objetivo equivale à energia em cada estado, e a solução ótima local – provavelmente global – corresponde à energia mínima.

Assim, com base nesse conhecimento, é possível definir, segundo Soeiro *et al.* (2016) e Viegas e Affonso (2017), o passo-a-passo do algoritmo de Recozimento Simulado para o processo de otimização em estudo:

- 1- Escolher, de maneira randômica, soluções iniciais para os parâmetros de controle. Estas soluções passam a ser as soluções atuais,  $K, T_1$  e  $T_2$ , e ótimas,  $K^*, T_1^*$  e  $T_2^*$ .
- 2 - Definir uma temperatura inicial,  $T_0$ , cujo valor depende do tipo de problema analisado, mas deve ser suficientemente grande para que todas as transições sejam inicialmente aceitas;
- 3 - Selecionar, de forma aleatória, soluções  $K', T_1'$  e  $T_2'$ , que são soluções vizinhas a  $K, T_1$  e  $T_2$ ;
- 4 - Calcular o valor da variação da função objetivo:  $\Delta M = f(K', T_1' e T_2') - f(K, T_1 e T_2)$ ;
- 5 - Caso a variação da função objetivo seja menor ou igual a zero ( $\Delta M \leq 0$ ), o método aceita o movimento e  $K', T_1'$  e  $T_2'$  passam a ser as soluções atuais ótimas ( $K^* = K', T_1^* = T_1', T_2^* = T_2'$ );
- 6 - Se a variação da função objetivo for maior que zero ( $\Delta M > 0$ ), gera-se um número aleatório *rand* entre 0 e 1, indicando que soluções piores foram encontradas em  $K', T_1'$  e  $T_2'$ . O valor de probabilidade de transição  $p = \exp(-\Delta M/T)$  é computado e comparado com *rand*. Se  $p > rand$ , os novos

pontos são aceitos,  $K^*$ ,  $T_1^*$  e  $T_2^*$  são atualizados e o algoritmo se move numa direção de subida. Se  $p < rand$ , então  $K'$ ,  $T_1'$  e  $T_2'$  são rejeitados e volta-se ao passo 3.

7 – Caso os novos pontos tenham sido aceitos, atualizar o valor de temperatura e verificar se a temperatura do sistema ainda é maior do que a temperatura final mínima pré-estabelecida. Caso seja, volta-se ao passo 3 e a busca continua até que ela fique menor que a temperatura final pré-definida. No término, a melhor solução encontrada para o problema proposto estará contida nas variáveis soluções finais,  $K^*$ ,  $T_1^*$  e  $T_2^*$ .

Ainda de acordo com Soeiro *et al.* (2016), uma temperatura baixa reduz a probabilidade de movimentos ascendentes. Isso produz um alto número de pontos rejeitados e, portanto, diminui os comprimentos dos passos. Além disso, o primeiro ponto a ser testado em uma nova temperatura é o ótimo atual. Passos pequenos e início no ótimo atual significam que será explorada a área do espaço de projeto que for mais promissora.

Nota-se, portanto, que, no início do recozimento simulado, tem-se uma estimativa grosseira do espaço de projeto, uma vez que os parâmetros iniciais são definidos aleatoriamente pelo usuário. Isso faz com que as movimentações aconteçam com passos maiores. À medida que a temperatura cai, o método vai focalizando lentamente a área onde o mínimo global deve estar localizado. No fim do algoritmo, com temperaturas muito baixas, o método só aceita transições para soluções melhores.

## 5. RESULTADOS

Aqui, serão mostrados, inicialmente, os resultados referentes à seleção dos sinais de entradas e saídas adequados para um sistema interligado de 3 áreas. Após isso, será colocado um controlador de baixa ordem em cada área do sistema, com parâmetros obtidos por Recozimento Simulado, para amortecer as oscilações. Em seguida, o resultado do amortecimento com os parâmetros resultantes do Recozimento será comparado com diferentes métodos de controle, propostos por outros autores, utilizados para o mesmo sistema: Algoritmo Genético, abordado por Silva Filha (2012), Enxame de Partículas, estudado por Silva (2018), *Tabu Search*, apresentado por Santos (2019) e *Pattern Search*, adotado por Castro (2006).

### 5.1 Seleção de sinais em um sistema de 3 áreas

O sistema de potência de controle de carga-frequência adotado possui três áreas interligadas. O modelo dinâmico, representado por espaço de estado é apresentado por Calvert e Titli (1989) e os parâmetros do sistema em estudo são:

- $T_{p1} = T_{p2} = T_{p3} = 20$  s;
- $K_{p1} = K_{p2} = K_{p3} = 240$  Hz/pu MW;
- $R_1 = R_2 = R_3 = 2,4$  Hz/pu MW;
- $T_{G1} = 0,08$  s;  $T_{G2} = 0,2$  s;  $T_{G3} = 0,3$  s;
- $T_{S1} = 0,3$  s;  $T_{S2} = 0,4$  s;  $T_{S3} = 0,5$  s;
- $T_{12}^0 = T_{32}^0 = 0,0866$  pu MW;

- $a_{12} = a_{32} = -0,5$ .

Os modos de oscilação de um sistema estão vinculados a autovalores. Através do MATLAB®, é possível encontrar os autovalores da matriz que representa este sistema. São eles:

- $\lambda_1 = -0,1759 \pm j3,0010$  s<sup>-1</sup>;
- $\lambda_2 = -0,1199 \pm j4,0102$  s<sup>-1</sup>;
- $\lambda_3 = -0,1893 \pm j4,6410$  s<sup>-1</sup>.

Vê-se, pela frequência, que o sistema possui três modos de oscilação do tipo interárea. Assim, será necessária a atuação de controladores para amortecer os modos nas três áreas.

Por meio de código em MATLAB®, é possível obter a MGR no estado estacionário. Aplicando-se a MGR nesse sistema e considerando-se apenas entradas e saídas que podem ser usadas para controle, acompanhada da soma de cada uma das linhas, tem-se:

$$\Lambda(0) = \begin{bmatrix} \Delta P_{C1} & \Delta P_{C3} & \Delta P_{C2} \\ 0,0834 & 0,0834 & 0,1667 \\ 0,7500 & -0 & 0,2500 \\ 0,0834 & 0,0834 & 0,1667 \\ -0 & 0,7500 & 0,2500 \\ 0,0834 & 0,0834 & 0,1667 \end{bmatrix} \begin{matrix} \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \\ 0,3335 \rightarrow \Delta f_1 \\ 1 \rightarrow \Delta P_{tie1} \\ 0,3335 \rightarrow \Delta f_2 \\ 1 \rightarrow \Delta P_{tie2} \\ 0,3335 \rightarrow \Delta f_3 \end{matrix}$$

Ao se analisar  $\Lambda(0)$ , observa-se que todos os seus elementos são menores que 1. Isso indica a grande probabilidade de o controle do sistema ser fácil. Vê-se, ainda, de acordo com a magnitude dos valores, que os conjuntos entradas-saídas mais efetivos para aplicação de controladores são  $(\Delta P_{C1}, \Delta P_{tie1})$  e  $(\Delta P_{C3}, \Delta P_{tie2})$ . Nota-se, por fim, que apenas dois pares de entrada-saída são completamente ineficazes:  $(\Delta P_{C3}, \Delta P_{tie1})$  e  $(\Delta P_{C1}, \Delta P_{tie2})$ . Essa consideração também é válida para  $\omega \neq 0$ .

Como já foi mencionado, a MGR não é suficiente para analisar o desempenho dos pares entrada-saída do sistema. Devido a isso, são calculados os valores singulares da matriz de transferência. Para esse sistema, os valores singulares de  $G(0)$  são  $\sigma_{m\acute{a}x} = 2,539$  e  $\sigma_{m\acute{i}n} = 0,811$ , resultando em  $\gamma = 3,13$ . Esse número de condição pequeno confirma a previsão de que o controle do sistema será simples de ser realizado.

Por meio do MATLAB®, utilizando-se a função sigma, foram encontrados os valores singulares para os pares entrada-saída selecionados,  $(\Delta P_{C1}, \Delta P_{tie1})$  e  $(\Delta P_{C3}, \Delta P_{tie2})$ . Eles podem ser vistos na Fig. 3. Nela, os valores singulares do sistema são apresentados em dB *versus*  $\omega$  em rad/s.

Pela Fig. 3, é possível observar que os três MO são influentes em virtude dos picos de  $\sigma_{m\acute{a}x}$ . O MO 1, no entanto, é praticamente não controlável devido à existência de um vale, que indica a presença de um zero influente,  $z = -0,2755 \pm j2,9905$ . Apesar de ele não ser localizado no semiplano direito, está muito próximo e com a mesma frequência desse modo, exercendo influência negativa sobre ele.

Devido à restrição provocada pela existência do zero, foi necessário acrescentar um novo par entrada-saída para melhor controle do sistema. O par escolhido foi  $(\Delta P_{C2}, \Delta f_2)$ . Ao gerar

os valores singulares do novo conjunto,  $(\Delta P_{C1}, \Delta P_{tie1})$ ,  $(\Delta P_{C3}, \Delta P_{tie2})$ , e  $(\Delta P_{C2}, \Delta f_2)$ , chega-se ao gráfico da Fig. 4.

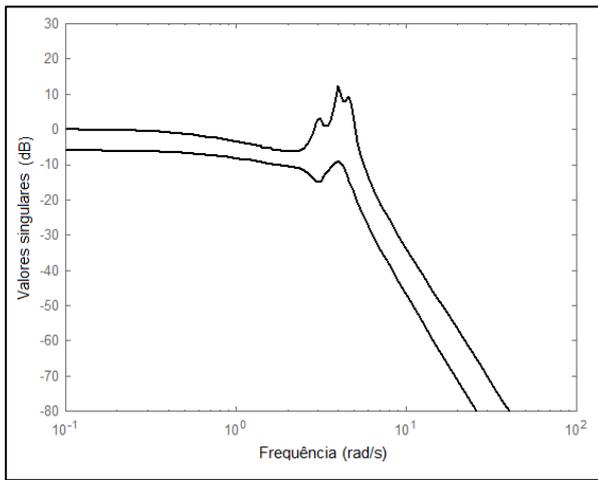


Fig. 3 Valores singulares do sistema em dB versus em rad/s para os 2 pares selecionados.

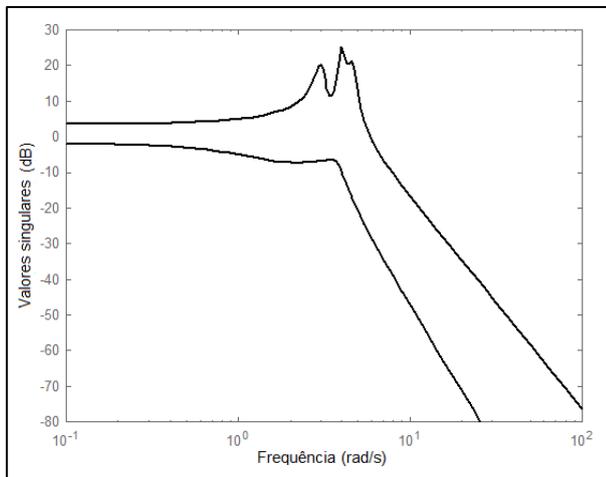


Fig. 4 Valores singulares do sistema em dB versus em rad/s para os 3 pares selecionados.

Para o caso da Fig. 4, o vale foi eliminado e o valor singular  $\sigma_{\min}$  é maior em toda faixa de frequência de maior interesse. Isso indica maior controlabilidade dos modos.

Com o objetivo de melhorar a descentralização do controlador, considerou-se a representação do sistema com composição de sinais de saída, que é um recurso bastante utilizado na prática. Ele pode ser visto em (12).

$$y_2^T = [P_{tie1} + Bf_1 \quad P_{tie2} + Bf_3 \quad -P_{tie2} + Bf_2] \quad (12)$$

O termo B é o fator Bias, aqui adotado como  $B_1 = B_2 = B = 0,417 \text{ MW/Hz}$ . Já a relação  $P_{tie1} + Bf$  é o Erro de Controle de Área (ECA), o qual pode ser positivo, que indica que a área deve diminuir a geração, negativo, que deve aumentar, ou nulo, que representa o estado de equilíbrio alcançado. A partir dessa combinação, os sinais de  $y_2$  com as entradas  $u$  resultaram em uma descentralização muito boa.

Obteve-se, após isso, a MGR na frequência de corte (quando  $\sigma_{\max}$  corta o 0 dB), ou seja, em  $\omega_c = 6 \text{ rad/s}$ . Ela pode ser vista a seguir:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1,064 - j0,038 & 0 & -0,064 + j0,038 \\ -0,005 - j0,003 & 1,0 - j0,11 & 0,005 + j0,11 \\ -0,059 + j0,041 & -0,0001 + j0,11 & 1,059 - j0,152 \end{bmatrix}$$

Observa-se que a matriz acima apresenta uma MGR próxima da matriz identidade. Como já foi visto nas propriedades da MGR, isso justifica o controle descentralizado, ou seja, a colocação de um controlador em cada área. Além disso, ao calcular a  $MGR_N$  via MATLAB®, obtém-se o valor 0,27. Com essa matriz, chega-se, também, a um  $\varepsilon \cong 0,03$ . Esses dois fatores garantem a boa descentralização.

Pelo fato de as áreas serem semelhantes, serão aplicados controladores idênticos de primeira ordem do tipo  $h_1 = K(1 + sT_1)/(1 + sT_2)$  em cada área. Os parâmetros do controlador são ajustados para minimizar a função M, e, por consequência, diminuir  $\sigma_{\max}(T)$ . Para encontrá-los, será utilizado o método de otimização Recozimento Simulado.

### 5.2 Resultado de amortecimento das oscilações com parâmetros de Recozimento Simulado

Os parâmetros do controlador, K,  $T_1$  e  $T_2$ , para amortecer as oscilações do sistema, foram obtidos através do método de Recozimento Simulado. Foram adotados chutes iniciais e considerou-se a restrição prática, onde  $T_1/T_2$  deve ser maior ou igual a 0,1 e menor ou igual a 10. Após implementar, no MATLAB®, o código que seguiu o passo-a-passo da seção 4, os resultados obtidos foram:  $K = 0,5$ ,  $T_1 = 0,01$  e  $T_2 = 0,001$ .

Desenvolveu-se, então, o código para analisar o amortecimento e a robustez do controle. Nele, os três controladores, modulados em termo de espaço de estados, foram alocados no sistema. A partir disso, foram plotadas duas figuras para observar os resultados. Na primeira delas, a Fig. 5, é possível observar o amortecimento dos picos dos modos de oscilação do valor singular máximo do sistema. Nota-se que os 3 picos anteriormente existentes no sistema foram amortecidos após a aplicação dos controladores.

Na Fig. 6, por sua vez, pode-se observar a robustez do controle. A condição de robustez foi apresentada em (11). Vê-se, em preto, o gráfico de  $\sigma_{\max}(T)$ , em que T é a matriz de malha fechada do sistema, e, em vermelho, o gráfico de  $\sigma_{\max}(H^{-1}/\omega_a\omega_b)$ , onde H é o controlador e  $\omega_a\omega_b$  são os pesos que representam as incertezas refletidas nos sinais de saída.

No código desenvolvido, utilizou-se  $\omega_a\omega_b = (0,25s + 0,15)/(0,5s + 1)$ . Esses valores na expressão são comumente usados na literatura para atender às condições desejadas. Vê-se, pelos gráficos, que (11) foi atendida, e, portanto, o controle robusto do sistema foi alcançado utilizando controladores descentralizados de 1ª ordem.

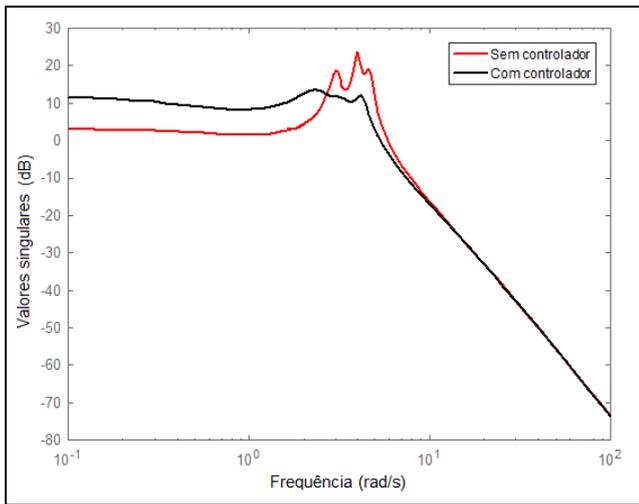


Fig. 5 Sistema antes e depois do controle com parâmetros de Recozimento Simulado.

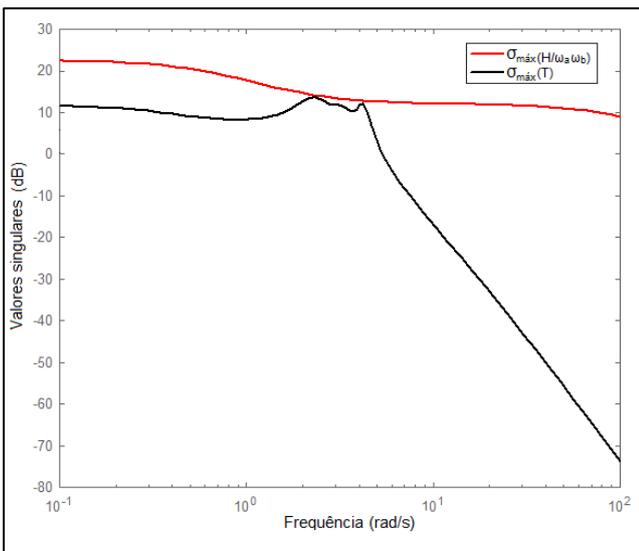


Fig. 6 Robustez do sistema controlado com parâmetros de Recozimento Simulado.

### 5.3 Comparação do amortecimento com outros métodos de obtenção de parâmetros de controle

Neste tópico, serão apresentadas as comparações do sistema amortecido por controlador obtido por Recozimento Simulado com os controladores alcançados por outras técnicas propostas na literatura. Será utilizado o mesmo sistema de potência para todos os métodos. As simulações aqui apresentadas representam a média dos resultados após várias simulações, que demonstraram repetitividade.

O método Algoritmo Genético, estudado por Silva Filha (2012), é um método de busca aleatória que pode gerar respostas diferentes para uma mesma função, com um mesmo conjunto de condições iniciais. Ele difere dos demais métodos de buscas aleatórias por considerar informações históricas para contrar novos pontos de busca, onde há maior probabilidade de bom desempenho. Eles são adequados para funções multimodais e de perfis complexos. Os parâmetros

encontrados por esse método para o sistema em estudo foram:  $K = 0,4$ ,  $T_1 = 0,001$  e  $T_2 = 0,01$ .

O Enxame de Partículas, método abordado por Silva (2018), é de fácil implementação, tem poucos parâmetros a serem ajustados e é desenvolvido com base no conceito de posição e velocidade. Possui capacidade de memória maior que do Algoritmo Genético, mas, em contrapartida, no Algoritmo Genético, as piores soluções são eliminadas e a busca é realizada baseada em um grupo de melhores posições. Os parâmetros obtidos pelo Enxame de Partículas foram:  $K = 0,5$ ,  $T_1 = 0,01$  e  $T_2 = 0,001$ .

O método *Tabu Search*, estudado por Santos (2019), tem como principal característica a capacidade de iniciar o procedimento com uma implementação simples, que pode ser atualizada ao longo do tempo, por meio da incorporação de elementos mais avançados. Além disso, ele tem memória de curto prazo, que indica uma forma de exploração agressiva que torna possível o melhor movimento, sujeito a exigir escolhas disponíveis para satisfazer as restrições. Por meio desse método, foram obtidos:  $K = 0,4$ ,  $T_1 = 0,009$  e  $T_2 = 0,009$ .

Por fim, o *Pattern Search*, abordado por Castro (2006), consiste num algoritmo com duas fases principais, que são repetidas. Essas fases são denominadas busca exploratória e pattern search. Na busca exploratória, uma só variável é testada de cada vez, o que torna o processo lento; já na pattern search, as variáveis são variadas simultaneamente na direção definida pela busca exploratória. Os parâmetros encontrados por esse método foram:  $K = 0,7$ ,  $T_1 = 0,05$  e  $T_2 = 0,009$ .

Na Fig. 7, vê-se as curvas do sistema amortecido com controlador projetado pelo Recozimento Simulado e pelos outros 4 métodos de otimização.

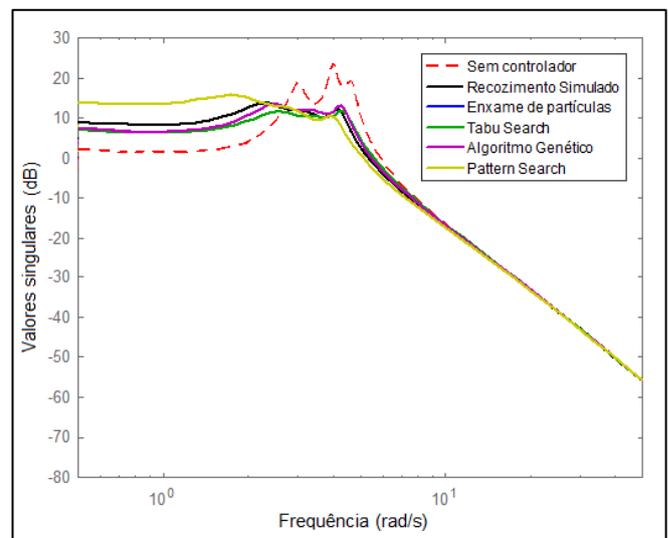


Fig. 7 Comparação entre Recozimento Simulado e todos os outros métodos.

O método de melhor desempenho em termo de amortecimento de picos de oscilação foi o *Pattern Search*, porém ele teve um alto tempo de resposta. O Recozimento Simulado teve uma performance idêntica à do Enxame de Partículas, pois os parâmetros obtidos foram exatamente iguais. Além disso,

apresentou resultados melhores do que o Algoritmo Genético, que alcançou picos maiores. No entanto, ele teve resultados um pouco menos eficazes do que o *Tabu Search*, que apresentou picos um pouco menores. De maneira geral, todos os métodos tiveram um bom desempenho e os picos amortecidos ficaram próximos.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, abordou-se o projeto de controladores para amortecer oscilações eletromecânicas em sistemas elétricos de potência, através do método de Recozimento Simulado.

O controlador de primeira ordem sintonizado por tal método se mostrou eficaz para incertezas não elevadas, pois os picos dos modos de oscilação do sistema estudado foram amortecidos e a robustez foi atendida. A eficácia foi comparada com outros métodos existentes e notou-se que o Recozimento Simulado apresentou um desempenho muito bom comparado a eles, comportando-se melhor ou de forma muito semelhante a métodos bem consolidados.

Para trabalhos futuros, sugere-se que o Recozimento Simulado seja utilizado para obtenção de parâmetros de controlador de ordem maior, de modo que seja possível verificar a manutenção da robustez diante de maiores perturbações. Propõe-se, ainda, que também seja aplicado em sistemas diferentes do que foi utilizado, com mais geradores ou mais áreas interligadas.

## REFERÊNCIAS

- Calvert, J.L., Titli, A. (1989). Overlapping vs Partitioning in Block-Iteration Methods: Application in Large-Scale Theory, *Automatica*, v.25, pp.137-145.
- Castro, A. C., Araújo, C. S. (2002). Análise de Sinais para Controle Descentralizado em Sistemas de Potência. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática, pp. 1188-1193, Natal.
- Castro, A. C. (2006). Projeto de controladores robustos descentralizados de ordem reduzida para amortecimento de oscilações em sistemas elétricos de potência. Tese de Doutorado - Universidade Federal da Paraíba, Automatica.
- Castro, A. C., Araújo, J. M., Santos, E. T. F., Silva, F.G.S., Araújo, C. S. (2011). A novel technique for designing decentralized stabilizers for robust control in power systems using an H criterion. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol 7, nº 3. pp. 1387-1396.
- Gómez-Expósito, A; Conejo, A. J.; Cañizares. (2011). C. Sistemas de energia elétrica: análise e operação. Rio de Janeiro: LTC,
- Kipkpatrick, S.; Gelatt, C; Vecchi, M. (1983). Optimization by Simulated Annealing, *Science, New Series*, Vol. 220, pp. 671-680.
- Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Anderson, G., Bose, A., Canizares, C., Halziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., Vittal, V. (2004). Definition and Classification of Power System Stability. *IEEE Transactions on Power Systems*.
- Larsen, E.V., Swann, D.A.. Applying Power System Stabilizers. (2005). *IEEE Transactions*, v.PAS-100, pp. 3017-3046, 1981.Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).
- Metropolis, N.; Rosenbluth, A.W.; Rosenbluth, M.N.; Teller, A.H. (1953). Equations of state calculations by fast computing machines, *Journal of Chemical Physics*, v. 21, p. 1087-1092.
- Milanovic, J.V., Duque, A.C.S. (2001). The Use of Relative Gain Array for Optimal Placement of PSS. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.16, pp. 992-996.
- Rogers, G. (2000). *Power System Oscillation*, 1 ed. Boston, Kluwer Academic Publishers,
- Santos, C. J. S. (2019). Amortecimento de oscilações eletromecânicas em um sistema carga-frequência utilizando tabu search. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba. Paraíba.
- Silva Filha, B. G. (2012). Projeto de controladores robustos para amortecimento de oscilações eletromecânicas em um sistema de carga-frequência. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador.
- Silva Filha, B.G., Castro, A.C., Moreira, F.A. e Araújo, J.M. (2016). Design of a robust H controller for a load-frequency power system, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.12, nº.1, pp.321-331.
- Silva, F. F. (2018). Sintonia de controladores robustos para amortecimento de oscilações utilizando enxame de partículas. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa.
- Soeiro, F. J. C. P.; Becceneri, J. C.; Silva Neto, A. J. (2016). Recozimento Simulado (Simulated Annealing). In: Antônio José da Silva Neto; José Carlos Becceneri; Haroldo Fraga de Campos Velho. (Org.). *Inteligência Computacional Aplicada a Problemas Inversos em Transferência Radiativa*. 1ed. Rio de Janeiro - RJ: EDUERJ - Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, v. 1, p. 63-73.
- Skogestad, S., Postlethwaite, I. (2001). *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*. John Wiley & Sons.
- Van De Wal, M., De Jager, B. (2001). A Review of Methods for Input/Output Selection. *Automatica*, v. 37, p. 487-510.
- Viegas, M. A. A.; Affonso, C. M. (2017). Gerenciamento de energia utilizando recozimento simulado em um sistema de energia elétrica contendo veículos elétricos. XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Porto Alegre.