

## **AJUSTE COORDENADO DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES ESTABILIZADORES DE SISTEMA DE POTÊNCIA VIA ALGORITMO GENÉTICO DE CHU-BEASLEY ESPECIALIZADO**

**Elenilson de Vargas Fortes**

Instituto Federal de Goiás

Rua Maria Vieira Cunha 775, Residencial Flamboyant, 75804-714, Jataí, GO, Brazil

elenilson.fortes@ifg.edu.br

**Percival Bueno de Araujo, Leonardo H. Macedo, Bruno Rafael Gamino**

Universidade Estadual Paulista

Av. Brasil 56, Centro, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

percival@dee.feis.unesp.br, leohfmp@gmail.com, gaminobr@gmail.com

**Ednei L. Miotto**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rua Cristo Rei 19, Vila Becker, 85902-490, Toledo PR, Brasil

edneimiotto@utfpr.edu.br

### **RESUMO**

Neste artigo é apresentada uma proposta de ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores Estabilizadores de Sistema de Potência utilizando um Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado. O objetivo é inserir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas de baixa frequência presentes no Sistema Elétrico de Potência. Para validar a metodologia proposta, o desempenho do algoritmo apresentado foi comparado com um Algoritmo Genético. Dos resultados obtidos, foi possível concluir que o Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado possui melhor desempenho que o Algoritmo Genético, credenciando-o como ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações. Os resultados foram obtidos por simulações no sistema Sul Brasileiro reduzido, que possui 10 geradores, 45 barras e 73 linhas de transmissão.

**PALAVRAS CHAVE.** Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado. Estabilizadores do Sistema de Potência. Estabilidade a Pequenas Perturbações.

**Tópico:** EN - PO na Área de Energia

### **ABSTRACT**

This paper presents a proposal for the coordinated tuning of the parameters of the Power System Stabilizers controllers using a Specialized Chu-Beasley's Genetic Algorithm. The goal is to introduce supplementary damping to the low frequency oscillations present in the Electric Power System. To validate the proposed methodology, the performance of the presented algorithm was compared to a Genetic Algorithm. From the results, it was concluded that the Specialized Chu-Beasley's Genetic Algorithm had a better performance than the Genetic Algorithm, accrediting it as a tool for small signal stability analysis. The results were obtained from simulations using the Reduced Southern Brazilian system, which has 10 generators, 45 buses, and 73 transmission lines.

**KEYWORDS.** Specialized Chu-Beasley's Genetic Algorithm. Small Signal Stability. Power System Stabilizers.

**Paper Topic:** EN - OR Area of Energy

## 1. Introdução

Sistemas Elétricos de Potência (SEP) interligados são uma realidade na atual conjuntura energética global. Há vantagens e desvantagens de se interligar os SEP. Como vantagens, há um melhor aproveitamento do potencial energético e ainda, maior confiabilidade no SEP, já que se por alguma razão certa eventualidade ocorrer em determinada unidade geradora, esta pode ter suas demandas atendidas por outra unidade geradora. Como desvantagens, em geral, SEP interligados são caracterizados por longas linhas de transmissão (altas impedâncias), o que limita a transferência de potência entre áreas, podendo ocasionar o comprometimento da operação no SEP. Outra desvantagem está no fato de que toda essa diversidade na geração, transmissão e na distribuição encontrada atualmente nos SEP faz com que sua correta e segura operação seja mais complexa, sendo exposta aos mais variados tipos de eventualidades como, por exemplo, oscilações eletromecânicas de baixa frequência que podem afetar a estabilidade do sistema [Hassan et al., 2014].

A estabilidade relaciona-se com a capacidade que os SEP possuem de permanecerem em equilíbrio dadas as condições normais de operação, e que devem evoluir para um novo ponto de equilíbrio aceitável após a ocorrência de perturbações que podem ser de pequena ou de grande magnitude [Kundur, 1994]. Em particular, quando se tratam de variações normais da carga nos barramentos do SEP o estudo é denominado de estabilidade a pequenas perturbações [Kundur, 1994].

Essas oscilações presentes nos SEP podem ser classificadas como do tipo local (0,8 – 2,0 Hz), interárea (0,2 – 0,7 Hz) ou intraplanta (1,5 – 2,5 Hz) e podem ser identificadas a partir da análise da sua frequência de ocorrência [Larsen e Swann, 1981]. Nesse trabalho, em particular, é dada ênfase às oscilações eletromecânicas de baixa frequência classificadas como de modo local. Normalmente, tal tipo de oscilação ocorre quando geradores síncronos de determinada unidade geradora oscilam contra o restante do sistema ou, simplesmente, contra outra unidade geradora dentro da mesma área onde ambas estão inseridas.

O estudo dessas oscilações presentes no SEP não é recente e foi inicialmente apresentado por De Mello e Concordia [1969]. Neste trabalho, foi apresentado o controlador conhecido como Estabilizador de Sistema de Potência (ESP). Quando este dispositivo é adicionado à malha de controle dos Reguladores Automáticos de Tensão (RAT) este atua produzindo torque elétrico em fase com as variações da velocidade angular do rotor (torque de amortecimento). Mais tarde, foi verificado que esse dispositivo também pode atuar inserindo amortecimento adicional às oscilações do tipo local [Larsen e Swann, 1981], desde que os seus parâmetros de controle (constantes de tempo e ganho) sejam corretamente ajustados para tal fim.

Na literatura, o ajuste dos parâmetros desse controlador para inserir amortecimento desejado ao SEP tem sido realizado de diversas formas. Com sucesso, técnicas baseadas no controle clássico têm sido empregadas nesta tarefa e apresentaram ao longo do tempo resultados confiáveis [Yang et al., 1998; Chen e Hsu, 1987; Araujo e Zaneta, 2001; Valle e Araujo, 2015]. Atualmente, técnicas de otimização, como por exemplo o *Bacterial Foraging Optimization Algorithm* (BFO) [Menezes et al., 2014; Abd-Elazim e Ali, 2012], *Particle Swarm Optimization* (PSO) [Hasanvand et al., 2016; Shayeghi et al., 2010] e o Algoritmo Genético (AG) [Hassan et al., 2014] foram empregadas com sucesso no ajuste dos parâmetros dos ESP, apresentando excelentes resultados.

Nesse trabalho, propõe-se realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos ESP por meio de uma técnica de otimização que é baseada nos Algoritmos Genéticos (AGs) [Glover e Kochenberger, 2003], sendo denominada Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado (AGCBE), que está fundamentada nos trabalhos de Chu e Beasley [1997] e Uzinski et al. [2015].

Para validar a metodologia proposta neste trabalho, o algoritmo proposto (AGCBE) teve seu desempenho comparado ao AG tradicional, o qual foi prontamente adaptado para resolver problemas multi-restritos.

Para representar o SEP e conseqüentemente realizar uma análise da estabilidade a pequenas perturbações é utilizado um modelo linear conhecido como Modelo de Sensibilidade de

Corrente (MSC) [Pádua Júnior et al., 2013]. Neste contexto, as principais contribuições deste trabalho são: 1) utilizar o AGCBE para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores ESP; 2) validar o AGCBE como técnica de otimização no ajuste dos parâmetros dos controladores ESP.

## 2. Modelo de Sensibilidade Corrente

As equações não lineares que representam o comportamento dinâmico do SEP podem ser linearizadas quando há ocorrência de perturbações suficientemente pequenas no SEP. Em sua forma linearizada, as equações diferenciais que descrevem o comportamento de todos os elementos presentes no SEP podem ser representadas na forma de espaço de estados, o que torna possível determinar se o sistema é estável ou instável por meio do Método de Lyapunov [Pai, 1981], ao analisar os autovalores de interesse da matriz de estados.

Recentemente tem sido objeto de estudo um modelo fundamentado na Lei de Kirchhoff para correntes nos nós, conhecido como Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC). Neste modelo, o somatório das correntes que entram em determinado nó de um barramento qualquer no SEP deve ser equivalente à soma das correntes que estão por deixar o mesmo nó, em todo e qualquer processo dinâmico no SEP. Este processo deve ser ininterruptamente satisfeito, sendo utilizado para obter as equações algébricas do referido modelo [Pádua Júnior et al., 2013]. Em um SEP com  $ng$  geradores e  $nb$  barras, o SEP modelado pelo MSC é representado pelas equações (1)–(4).

$$[\Delta x] = \left[ [\Delta\omega_1 \cdots \Delta\omega_{ng}] [\Delta\delta_1 \cdots \Delta\delta_{ng}] \left[ \Delta E'_{q_1} \cdots \Delta E'_{q_{ng}} \right] \left[ \Delta E_{fd_1} \cdots \Delta E_{fd_{ng}} \right] \right]^t \quad (1)$$

$$[\Delta u] = \left[ [\Delta P_{m_1} \cdots \Delta P_{m_{ng}}] \left[ \Delta V_{ref_1} \cdots \Delta V_{ref_{ng}} \right] \left[ \Delta P_{l_1} \cdots \Delta P_{l_{nb}} \right] \left[ \Delta Q_{l_1} \cdots \Delta Q_{l_{nb}} \right] \right]^t \quad (2)$$

$$[\Delta z] = \left[ [\Delta\theta_1 \cdots \Delta\theta_{nb}] \left[ \Delta V_1 \cdots \Delta V_{nb} \right] \right]^t \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} [\Delta u] \quad (4)$$

Nas equações (1)–(4) as variáveis de estado são  $\Delta x$ , enquanto que  $\Delta u$  e  $\Delta z$  são as de entrada e algébricas, respectivamente. As variáveis de estados são representados por:  $\Delta\omega$  (velocidade angular do gerador síncrono),  $\Delta\delta$  (ângulo interno do rotor do gerador),  $\Delta E'_q$  (tensão interna do eixo em quadratura) e  $\Delta E_{fd_k}$  (tensão de campo do gerador).  $\Delta P_m$  (potência mecânica),  $\Delta V_{ref}$  (tensão de referência do RAT de cada gerador),  $\Delta P_l$  e  $\Delta Q_l$  (variações das potências ativa e reativa das cargas) são as variáveis de entrada, enquanto que  $\Delta V$  e  $\Delta\theta$  são a magnitude e a fase das tensões das barras do SEP. No MSC,  $A = J1 - J2J4^{-1}J3$  é a matriz de estados e  $B = B1 - J2J4^{-1}B2$  é a matriz de entradas.

## 3. Estabilizadores do Sistema de Potência

Do ponto vista da estabilidade, o aparecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência pode ser um obstáculo [Rogers, 2000]. Conforme já relatado, uma solução viável para este tipo de problema é instalar os ESP na malha de controle dos RAT e inserir um sinal estabilizante na malha de regulação dos geradores. O diagrama de blocos mostrado na Figura 1 representa a estrutura básica deste controlador.

Ao analisar o diagrama de blocos mostrado na Figura 1 são obtidas, por inspeção, as equações (5)–(8). Elas definem o comportamento dinâmico dos controladores ESP.

$$\Delta \dot{V}_{1_k} = \Delta \dot{\omega}_k K_{ESP} - \frac{1}{T_\omega} \Delta V_{1_k} \quad (5)$$

$$\Delta \dot{V}_{2_k} = \frac{1}{T_2} \Delta V_{1_k} + \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{V}_{1_k} - \frac{1}{T_2} \Delta V_{2_k} \quad (6)$$

$$\Delta \dot{V}_{sup} = \frac{1}{T_4} \Delta V_{2_k} + \frac{T_3}{T_4} \Delta \dot{V}_{2_k} - \frac{1}{T_4} \Delta V_{sup} \quad (7)$$

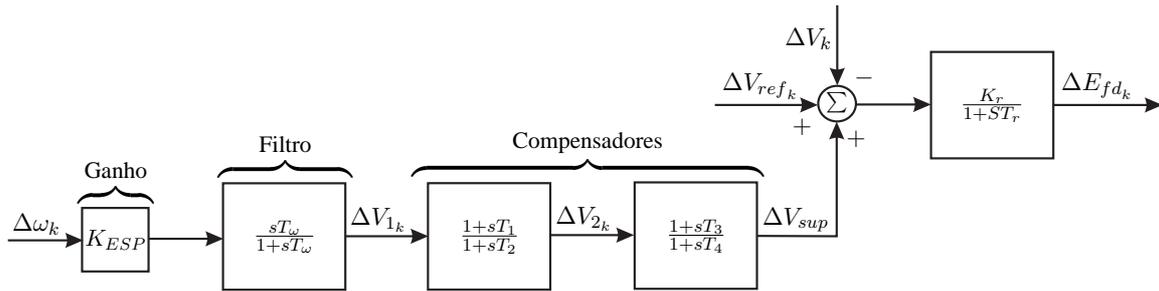


Figura 1: Modelo dinâmico para o ESP.

$$\Delta \dot{E}_{fd_k} = \frac{K_r}{T_r} (\Delta V_{sup} + \Delta V_{ref_k} - \Delta V_k) - \frac{1}{T_r} \Delta E_{fd_k} \quad (8)$$

Nas equações (5)–(8) e na Figura 1, verifica-se que o ESP é composto por um ganho estático  $K_{ESP}$  (responsável por inserir amortecimento desejado ao SEP), um bloco *washout* (filtro), determinado pela constante de tempo  $T_\omega$  e um conjunto de blocos de avanço-atraso de fase, responsáveis pela compensação de fase necessária do sinal de entrada escolhido para gerar torque de amortecimento, representado pelas constantes de tempo  $T_1, T_2, T_3$  e  $T_4$ , sendo usual  $T_1 = T_3$  e  $T_2 = T_4$  [Kundur, 1994]. O sinal de entrada escolhido no ESP é a variação da velocidade angular do rotor ( $\Delta\omega_k$ ) enquanto que o de saída é representado por  $\Delta V_{sup}$  e atua na malha de controle dos RAT dos geradores.

#### 4. Técnica de Otimização para o Ajuste de Parâmetros do Controlador ESP

Para inserir amortecimento desejado ao SEP é necessário o correto ajuste dos parâmetros dos controlador ESP. Para tal efeito, nesta seção serão apresentados dois algoritmos: o Algoritmo Genético [Holland, 1992] e um Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado baseado na proposta de Chu e Beasley [1997].

##### 4.1. Algoritmo Genético

Os AGs são métodos de otimização cujo princípio fundamental está baseado na seleção natural proposta por Charles Darwin. Originalmente, o algoritmo genético foi formulado por John Holland na década de 70 em seu livro “*Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*” [Holland, 1992]. Os AGs compõem uma categoria de algoritmos que possuem métodos de busca eficazes, explorando todo o espaço de busca e ao mesmo tempo um ótimo aproveitamento das melhores soluções [Michalewicz, 1994].

No AG tradicional, a geração da população inicial é aleatória. No passo seguinte, são selecionados dois indivíduos para se reproduzirem. No AG esta etapa é medida por uma função de adaptação conhecida como *fitness*. Os indivíduos selecionados passam por uma etapa de recombinação e mutação. A nova população corrente formada ( $P'$ ) substitui integralmente os indivíduos da população inicial ( $P$ ). A estrutura de funcionamento do AG é mostrada no Algoritmo 1.

##### 4.2. Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado

A proposta de Chu e Beasley [1997] para o AG (AGCB) inclui a representação de uma proposta de solução de forma específica para cada tipo de problema, avaliações de *fitness* e *unfitness* de forma separada, proporcionando uma análise diferenciada ao substituir um indivíduo em uma população e uma etapa de melhoria local. As modificações propostas para o AGCB são apresentadas a seguir. Detalhes sobre a estrutura de funcionamento do AGCBE podem ser analisado no Algoritmo 2.

**1. Implementar uma etapa de melhoria da população inicial:** Verificou-se experimentalmente que, aplicando um algoritmo de busca local aos indivíduos da população inicial, reduz-se o esforço computacional na resolução do problema;

---

### Algoritmo 1 Algoritmo Genético Tradicional

---

- 1: **Especificar Parâmetros:** Número de indivíduos ( $np$ ) da população  $P$ , número máximo de gerações ( $ng$ ), tipo de codificação, taxas de recombinação e mutação,  $ni \leftarrow 0$ ;
  - 2: Gerar uma população aleatória  $P$ ; avaliar cada indivíduo da população;
  - 3: Atualizar a incumbente;
  - 4: **while**  $ni < ng$  **do**
  - 5:     Inicializar a nova população  $P'$  como vazia;
  - 6:     **while**  $P'$  não estiver completa **do**
  - 7:         Selecionar 2 indivíduos de  $P$  pelo método de seleção por torneio;
  - 8:         Aplicar o operador de recombinação para obter dois indivíduos novos;
  - 9:         Aplicar o operador de mutação;
  - 10:        Adicionar os dois novos indivíduos a  $P'$ ;
  - 11:     **end while**
  - 12:     Avaliar cada indivíduo da nova população  $P'$ ;
  - 13:     Atualizar a incumbente;
  - 14:      $P \leftarrow P'$
  - 15:      $ni = ni + 1$ ;
  - 16: **end while**
- 

**2. Utilizar uma população com tamanho reduzido:** O problema é caracterizado pela presença de variáveis contínuas. Neste caso, a etapa de melhoria local pode demandar um alto esforço computacional na melhoria da população inicial. Portanto, recomenda-se uma população inicial de tamanho reduzido;

**3. Operador de variação:** A recombinação do AGCB original é modificada para considerar variáveis contínuas. Considera-se a geração de dois descendentes fazendo-se a mistura de componentes das duas soluções escolhidas no processo de seleção. A proposta consiste em fazer a combinação elemento por elemento das soluções, em que cada componente do primeiro descendente é obtida como sendo a soma das componentes das duas soluções geradoras, multiplicadas cada uma por um fator de ponderação aleatório  $\beta$ ,  $0 \leq \beta \leq 1$ , de forma que a soma dos dois fatores seja igual a um (utiliza-se  $\beta$  e  $(1 - \beta)$ );

**4. Manutenção do descendente com o melhor valor de *fitness*:** Na proposta original de Chu e Beasley, a escolha do descendente que será melhorado é aleatória. A proposta deste trabalho é escolher o descendente com o melhor (menor) valor de *fitness* para ser melhorado. Espera-se, desta forma, que este seja o mais promissor para encontrar soluções de melhor qualidade;

**5. Eliminar a etapa de mutação:** A mutação é utilizada no AG tradicional para que características que não estão presentes na população possam aparecer. Entretanto, a etapa de melhoria local elimina esta necessidade.

---

### Algoritmo 2 Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado

---

- 1: **Especificar Parâmetros:** Número de indivíduos ( $np$ ) da população  $P$ , número máximo de iterações ( $nt$ ), tipo de codificação, manipulação das infactibilidades e o operador de variação,  $ni \leftarrow 0$ ;
  - 2: Gerar uma população inicial aleatória;
  - 3: Encontrar o *fitness* e *unfitness* de cada indivíduo da população corrente  $P$ ;
  - 4: Implementar a fase de melhoria local na população corrente  $P$ ;
  - 5: Avaliar cada indivíduo da população.
  - 6: **while**  $ni < nt$  **do**
  - 7:     Selecionar 2 indivíduos pelo método de seleção por torneio e preservar o que possui o melhor *fitness*; Repetir;
  - 8:     Implementar o operador de variação e preservar o descendente com o menor valor de *fitness*;
  - 9:     Implementar a fase de melhoria local no descendente;
  - 10:     Decidir se o descendente melhorado entra na população corrente  $P$  considerando o *fitness* e o *unfitness*;
  - 11:      $ni = ni + 1$ ;
  - 12: **end while**
  - 13: A solução do problema é a melhor solução da última população;
-

### 4.3. Busca Local

A Busca Local proposta neste trabalho é uma estratégia que consiste em discretizar o espaço de busca e realizar modificações aleatórias nas variáveis do problema. Considere que a solução  $x^r$  seja a preservada após a operação de variação. Define-se então a função de avaliação de  $x^r$ ,  $F(x^r)$ , como mostrado em (9)–(11).

$$F(x^r) = f(x^r) + \rho h(x^r) \quad (9)$$

$$f(x^r) = \sum_{i=1}^n \left| \lambda_i^{calc} - \lambda_i^{des} \right| \quad (10)$$

$$h(x^r) = \sum_{i=1}^n \left| \xi_i^{calc} - \xi_i^{des} \right| \quad (11)$$

Em (9),  $F(x^r)$  é uma função objetivo penalizada, sendo  $f(x^r)$  uma função objetivo e  $h(x^r)$  a sua infactibilidade. Além disto,  $\rho \gg 1$  é um parâmetro de penalização e  $n$  indica o número de autovalores de interesse (equações (10) e (11)). A equação (10) minimiza a distância entre os autovalores de interesse calculados ( $\lambda_i^{calc}$ ) e os autovalores de interesse desejados ( $\lambda_i^{des}$ ). Cada  $\lambda_i^{des}$  é obtido a partir da definição por parte do operador do sistema do amortecimento desejado ( $\xi_i^{des}$ ) enquanto que cada  $\lambda_i^{calc}$  é determinado a cada iteração realizada pelos algoritmos AG e AGCBE a partir do cálculo do amortecimento ( $\xi_i^{calc}$ ).

Para cada indivíduo da população defini-se um vetor de sensibilidades,  $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_{n_v}]$  ( $n_v$  é o número de variáveis do problema). Inicialmente  $s_i = 0, \forall i \in \{1 \dots n_v\}$ . Em seguida, são determinados os valores de cada passo de discretização das variáveis ( $\Delta_i$ ) como mostrado em (12), onde  $u_i$  e  $l_i$  são, respectivamente, o limite superior e inferior da variável  $x_i^r$  e  $\Gamma$  é o número inteiro de discretizações.

$$\Delta_i = \frac{u_i - l_i}{\Gamma} \quad i = 1, \dots, n_v \quad (12)$$

Aleatoriamente, escolhe-se uma variável do problema para ter o valor modificado. Suponha que a variável  $x_k^r$  seja escolhida. Na Figura 2 é mostrado como  $x_k^r$  é discretizada.

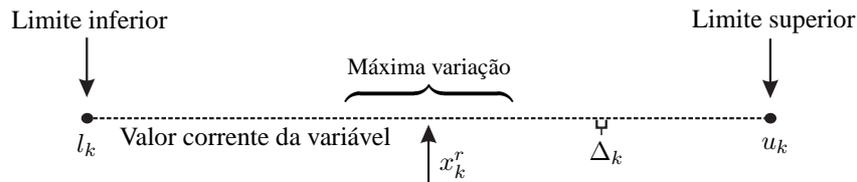


Figura 2: Discretização de uma variável na melhoria local.

Na equação (13) tem-se o valor da variação  $\delta_k$ , em que  $\varphi$  é um número aleatório ( $0 \leq \varphi \leq 1$ ),  $\gamma$  é um fator de escala e  $\lceil \cdot \rceil$  representa a função teto, que arredonda o valor de  $(\gamma\varphi)$  para o número inteiro imediatamente superior. Após a atualização  $\delta_k$ , é determinado o novo valor de  $x_k^r$ , equação (14).

$$\delta_k = \lceil \gamma\varphi \rceil \Delta_k \quad (13)$$

$$\tilde{x}_k^r = x_k^r \pm \delta_k \quad (14)$$

Em (14), como inicialmente  $s_k = 0$ , escolhe-se, com igual probabilidade, aumentar ou diminuir o valor da variável  $x_k^r$ . Note que em (14),  $\tilde{x}_k^r$  pode violar o limite inferior  $l_k$  ou superior  $u_k$ . Neste caso considere a correção (15).

$$\hat{x}_k^r = \begin{cases} \tilde{x}_k^r, & \text{se } l_k \leq \tilde{x}_k^r \leq u_k \\ l_k, & \text{se } \tilde{x}_k^r < l_k \\ u_k, & \text{se } \tilde{x}_k^r > u_k \end{cases} \quad (15)$$

Ao atualizar a solução  $\hat{x}_k^r$  é obtida uma nova solução  $\hat{x}^r$ . Calcula-se a função de avaliação ( $F(\hat{x}^r)$ ) para verificar a qualidade da nova solução proposta. Duas situações distintas podem ocorrer:  $F(\hat{x}^r) < F(x^r)$  ou  $F(\hat{x}^r) \geq F(x^r)$ . No primeiro caso, define-se  $s_k = 1$  se em (14)  $x_k^r$  foi incrementada, ou  $s_k = -1$  se em (14)  $x_k^r$  foi decrementada e atualiza-se a solução corrente  $x \leftarrow \hat{x}^r$ . No segundo caso, define-se  $s_k = -1$  se em (14)  $x_k^r$  foi incrementada ou  $s_k = 1$  se em (14)  $x_k^r$  foi decrementada e não há atualização da solução corrente.

O procedimento descrito é então repetido, isto é, escolhe-se outra variável para ter o valor modificado. Na equação (14), entretanto, deve-se considerar o valor de  $s_k$ , ou seja, se  $l_k < x_k^r < u_k$  e  $s_k = 1$ , então deve-se incrementar o valor de  $x_k^r$ , se  $s_k = -1$  decrementa-se o valor de  $x_k^r$ , e se  $s_k = 0$  escolhe-se aleatoriamente entre incrementar ou decrementar  $x_k^r$ . Agora, para as situações em que  $x_k^r = l_k$  ou  $x_k^r = u_k$ , deve-se considerar incrementar (se  $x_k^r = l_k$ ) ou decrementar (se  $x_k^r = u_k$ )  $x_k^r$ , independente do valor de  $s_k$ .

Este processo é repetido até que nenhuma melhoria seja obtida ou até um número máximo de iterações sem melhoria,  $\Upsilon$ . O fator  $\gamma$  deve ser ajustado dinamicamente durante o processo, ou seja, a partir de  $\tau$  iterações,  $\tau < \Upsilon$ , sem melhoria da função de avaliação, atualiza-se  $\gamma \leftarrow \frac{\gamma}{2}$  em (13).

A melhoria local é aplicada nos indivíduos da população inicial e no indivíduo escolhido após operador de variação. Neste trabalho foram adotados  $\rho = 10^3$ ,  $\Gamma = 100$  e  $\gamma = 20$ . No Algoritmo 3 é apresentado o pseudocódigo da busca local proposta.

#### 4.4. Limites da Variáveis

Considere um SEP equipado com  $n$  controladores ESP em  $n$  máquinas síncronas. Cada indivíduo de ambos os métodos de otimização propostos neste trabalho (AG e AGCBE) serão representados pelos parâmetros dos controladores ESP. A constante de tempo do bloco *washout* ( $T_\omega$ ) é especificada 10 segundos, sendo desnecessário seu ajuste. Na Figura 3 é mostrada uma representação de uma proposta de solução para o problema.

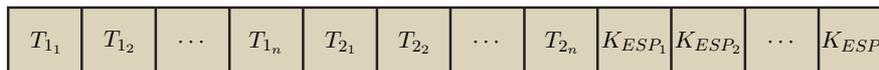


Figura 3: Representação de um indivíduo para o AG e AGCBE.

Na Figura 3,  $T_{1_i}$ ,  $T_{2_i}$  e  $K_{ESP_i}$  ( $1 \leq i \leq n$ ) representam, respectivamente,  $n$  constantes de  $T_1$  e  $T_2$  e,  $n$  ganhos estáticos  $K_{ESP}$  de  $n$  controladores ESP. Cada variável que compõe um indivíduo está sujeita aos seus respectivos limites, indicados na equação (16).

$$1, 0 \leq K_{ESP} \leq 10, 0; \quad 0, 01 \leq T_{1_i} \leq 0, 2; \quad 0, 01 \leq T_{2_i} \leq 0, 1 \quad (16)$$

Na abordagem proposta, o objetivo é resolver um *constraint satisfaction problem* [Glover e Kochenberger, 2003], em que os amortecimentos desejados são considerados restrições do problema e qualquer ajuste fornecido aos parâmetros dos ESP que forneçam os amortecimentos desejados são considerados uma solução. Serão consideradas duas situações: 1) Num primeiro momento os algoritmos serão testados a fornecer amortecimento desejado a todos os autovalores de interesse com no mínimo 10% ( $\xi_i^{des} \geq 10\%$ ); 2) Repetir a situação 1), no entanto considerando  $\xi_i^{des} \geq 15\%$ .

#### 5. Simulações e Resultados

O sistema que será utilizado para realizar as simulações neste trabalho é o Sul Brasileiro Reduzido [Valle, 2014]. Trata-se de um sistema real, baseado na região sul do Brasil composto por 10 geradores, 45 barras e 73 linhas de transmissão (Figura 4).

---

### Algoritmo 3 Busca Local

---

```

1: Especificar Parâmetros:  $\rho, \Gamma, \gamma, \tau, \Upsilon$ ; Inicializar o vetor de sensibilidade,  $\mathbf{s}$ , com todas posições iguais a zero; Calcular o passo de discretização de cada variável;  $\Delta_i \leftarrow (u_i - l_i)/\Gamma, i = 1, \dots, n_v; t \leftarrow 0; m \leftarrow 0;$ 
2: while  $t \leq \Upsilon$  do
3:   Escolher aleatoriamente uma variável  $k$  que terá o valor modificado,  $x_k^r$ , na solução inicial da busca local  $x^r$ ;
4:   Calcular o valor da variação  $\delta_k \leftarrow \lceil \gamma \varphi \rceil \Delta_k;$ 
5:   Calcular o valor de  $\tilde{x}_k^r;$ 
6:   if  $l_k < x_k^r < u_k$  then
7:     if  $s_k = 0$  then
8:       Escolher incrementar ou decrementar o valor de  $x_k^r$ :  $\tilde{x}_k^r \leftarrow x_k^r \pm \delta_k$ , com igual probabilidade;
9:     else if  $s_k = 1$  then
10:       $\tilde{x}_k^r \leftarrow x_k^r + \delta_k;$ 
11:     else
12:       $\tilde{x}_k^r \leftarrow x_k^r - \delta_k;$ 
13:     end if
14:     else if  $x_k^r = l_k$  then
15:       $\tilde{x}_k^r \leftarrow x_k^r + \delta_k;$ 
16:     else
17:       $\tilde{x}_k^r \leftarrow x_k^r - \delta_k;$ 
18:     end if
19:     Verificar se a variável  $\tilde{x}_k^r$  pertence ao intervalo  $[l_k, u_k];$ 
20:     if  $l_k < \tilde{x}_k^r < u_k$  then
21:        $\hat{x}_k^r \leftarrow \tilde{x}_k^r;$ 
22:     else if  $\tilde{x}_k^r < l_k$  then
23:        $\hat{x}_k^r \leftarrow l_k;$ 
24:     else
25:        $\hat{x}_k^r \leftarrow u_k;$ 
26:     end if
27:     Montar uma nova solução  $\hat{x}^r$ , copiando  $x^r$  com o valor de  $\hat{x}_k^r$  na posição  $k;$ 
28:     Calcular a função de avaliação da nova solução,  $F(\hat{x}^r);$ 
29:     Atualizar a solução corrente e a posição  $k$  do vetor  $\mathbf{s};$ 
30:     if  $F(\hat{x}^r) < F(x^r)$  then
31:        $x_k^r \leftarrow \hat{x}_k^r; F(x^r) \leftarrow F(\hat{x}^r); s_k \leftarrow 1$  if  $x_k^r$  foi incrementado;  $s_k \leftarrow -1$  caso contrário;  $m \leftarrow 0;$ 
32:     else
33:        $s_k \leftarrow -1$  if  $x_k^r$  foi incrementado;  $s_k \leftarrow 1$  caso contrário;  $m \leftarrow m + 1; t \leftarrow t + 1;$ 
34:     end if
35:     if  $m > \tau$  then
36:        $\gamma \leftarrow \gamma/2; m \leftarrow 0;$ 
37:     end if
38: end while

```

---

Tabela 1: Autovalores de interesse, coeficientes de amortecimento e frequências naturais não amortecidas.

Modo	Autovalores	$\xi_i$ (pu)	$\omega_{n_i}$ (Hz)
$\lambda_1$	$0,1057 \pm j7,3355$	$-0,0144$	$1,1676$
$\lambda_2$	$-0,0198 \pm j7,8735$	$0,0025$	$1,2531$
$\lambda_3$	$0,0907 \pm j6,4558$	$-0,0140$	$1,0276$
$\lambda_4$	$0,1506 \pm j8,1420$	$-0,0185$	$1,2961$
$\lambda_5$	$-0,2892 \pm j9,8105$	$0,0295$	$1,5621$
$\lambda_6$	$-0,1373 \pm j9,7449$	$0,0141$	$1,5511$
$\lambda_7$	$0,0191 \pm j7,2037$	$-0,0027$	$1,1465$
$\lambda_8$	$0,0825 \pm j6,8709$	$-0,0120$	$1,0936$
$\lambda_9$	$-0,0526 \pm j8,7498$	$0,0060$	$1,3926$

### 5.1. Autovalores de Interesse do Sistema Sul Brasileiro

Na Tabela 1 são mostrados os autovalores de interesse ( $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$ ), os coeficientes de amortecimento ( $\xi_i = -\sigma_i/|\lambda_i|$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_{n_i} = |\lambda_i|/2\pi$ ) do sistema

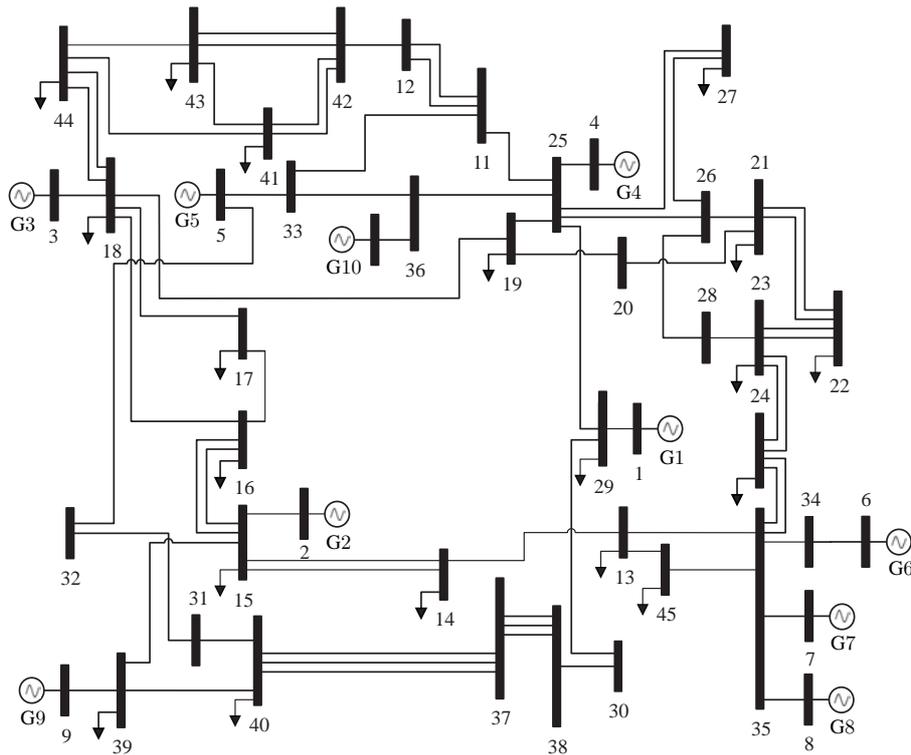


Figura 4: Diagrama unifilar do sistema Sul Brasileiro Reduzido.

Sul Brasileiro.

Dos dados apresentados na Tabela 1 verifica-se que o sistema Sul Brasileiro possui nove modos locais, sendo cinco com parte real positiva ( $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_7$  e  $\lambda_8$ ) o que classifica o sistema como instável, ou seja, é caracterizado com curvas de oscilação de amplitudes crescentes. Para resolver o problema da instabilidade verificado para este sistema teste se propõe instalar nove ESP nos geradores G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9 e G10. Os locais de instalação desses dispositivos no sistema Sul Brasileiro foi determinado por meio dos fatores de participação [Kundur, 1994].

## 5.2. Performance do AGCBE e do AG

A performance do AGCBE e do AG frente a análise da estabilidade a pequenas perturbações foi avaliada considerando o seguinte: 1) 100 testes limitados a 2000 cálculos da função objetivo; 2) Em cada teste simulado, tanto o AGCBE quanto o AG foram submetidos a realizar ajustes nos parâmetros dos controladores ESP de tal forma que todos os autovalores de interesse mostrados nas Tabelas 1 fossem alocados com no mínimo 10% amortecimento desejado; 3) Refazer o caso 2) considerando 15%.

Nos testes realizados com AGCBE e o AG (Tabela 2), considerou-se as restrições mostradas na equação (16) e a função de avaliação (9)–(11). Além disso, foi estabelecido uma população de 5 indivíduos para o AGCBE, enquanto que no AG considerou-se uma população de 20 indivíduos, seleção por torneio e uma taxa de mutação fixa de 10%. Em todos os testes realizados foram considerados, para efeito de comparação, apenas os testes que alcançaram a convergência.

Em se tratando da primeira faixa de amortecimento mostrada na Tabela 2 ( $\zeta_i^{des} \geq 10$ ) verifica-se que tanto o AGCBE quanto o AG possuem desempenhos semelhantes, ou seja, não apresentam grandes diferenças quando a faixa de amortecimento exigida é a superior a 10%. A principal diferença está no número de iterações e neste caso o AGCBE é mais eficiente. Quando é aumentado o amortecimento mínimo desejado ( $\zeta_i^{des} \geq 15$ ) fica explícito o melhor desempenho do AGCBE frente ao AG, convergindo em 88% dos testes realizados enquanto o AG convergiu em 79% das simulações. No quesito número de iterações, novamente o AGCBE obteve um melhor desempenho.

Tabela 2: Comparação de desempenho entre os algoritmos AGCBE e AG.

Algoritmo	Faixa de amortecimento (%)	Número de soluções encontradas a cada 10 testes										Número de iterações	
												Médio	Máx.
AGCBE	$\xi_i^{des} \geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	42	226
	$\xi_i^{des} \geq 15$	10	10	8	9	8	9	10	10	8	6	447	1954
AG	$\xi_i^{des} \geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	115	507
	$\xi_i^{des} \geq 15$	9	8	7	6	8	9	8	8	7	9	1230	1965

### 5.3. Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações do Sistema Sul Brasileiro

O ajuste dos parâmetros dos controladores ESP foi realizado pelo AGCBE (por razões justificadas na Subseção 5.2), considerando duas restrições de projeto:  $\xi_i^{des} \geq 10\%$  e  $\xi_i^{des} \geq 15\%$ . Os resultados obtidos podem ser verificados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Ganhos e constantes de tempo dos controladores ESP ajustados pelo AGCBE.

Dispositivo	$\xi_i^{des} \geq 10\%$			$\xi_i^{des} \geq 15\%$		
	$T_1(T_{p1})(s)$	$T_2(T_{p2})(s)$	$K_{ESP}(K_{pod})(p.u.)$	$T_1(T_{p1})(s)$	$T_2(T_{p2})(s)$	$K_{ESP}(K_{pod})(p.u.)$
ESP G1	0,1550	0,0283	6,1624	0,1627	0,0130	7,8405
ESP G2	0,1100	0,1000	3,9975	0,1371	0,0760	7,8000
ESP G3	0,1100	0,0342	8,6789	0,1432	0,0468	10,000
ESP G4	0,1354	0,0740	9,2000	0,1338	0,0701	9,4400
ESP G6	0,0944	0,0780	2,8000	0,1276	0,0517	2,8000
ESP G7	0,0714	0,0817	2,3000	0,0920	0,0687	6,9400
ESP G8	0,1619	0,0283	4,1400	0,1599	0,0600	8,5500
ESP G9	0,1329	0,0539	8,5332	0,1580	0,0700	9,2864
ESP G10	0,0809	0,0921	6,7214	0,0841	0,0880	4,9914

Tabela 4: Autovalores de interesse, coeficientes de amortecimento e frequências naturais não amortecidas ajustados pelo AGCBE.

Modo	$\xi_i^{des} \geq 10\%$			$\xi_i^{des} \geq 15\%$		
	Autovalores	$\xi_i$ (p.u.)	$\omega_{n_i}$ (Hz)	Autovalores	$\xi_i$ (p.u.)	$\omega_{n_i}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-0,8823 \pm j5,9155$	0,1475	0,9519	$-0,9326 \pm j5,4302$	0,1693	0,8769
$\lambda_2$	$-0,9233 \pm j7,8401$	0,1170	1,2564	$-1,8571 \pm j6,6585$	0,2687	1,1002
$\lambda_3$	$-0,8687 \pm j7,3868$	0,1168	1,1837	$-1,0136 \pm j6,0134$	0,1662	0,9706
$\lambda_4$	$-0,8899 \pm j7,1936$	0,1228	1,1536	$-1,2019 \pm j7,6525$	0,1552	1,2329
$\lambda_5$	$-1,2927 \pm j8,7919$	0,1455	1,4143	$-1,4341 \pm j7,7900$	0,1810	1,2607
$\lambda_6$	$-1,0416 \pm j9,9566$	0,1040	1,5933	$-3,3460 \pm j9,1489$	0,3435	1,5504
$\lambda_7$	$-0,7014 \pm j6,4974$	0,1073	1,0401	$-1,7365 \pm j7,8698$	0,2155	1,2826
$\lambda_8$	$-0,9245 \pm j6,3487$	0,1441	1,0211	$-0,9850 \pm j6,2745$	0,1551	1,0108
$\lambda_9$	$-1,3717 \pm j9,1408$	0,1484	1,4711	$-1,2722 \pm j8,3619$	0,1504	1,3461

A princípio, é possível afirmar que os ajustes fornecidos aos controladores ESP realizados pelo AGCBE (Tabela 3) estão de acordo com as restrições (16). A partir dos ajustes obtidos foi possível obter um novo estado para o sistema Sul Brasileiro, conforme apresentado na Tabela 4. Observe que o sistema teste antes instável (Tabelas 1), torna-se estável (Tabela 4) com amortecimento desejado especificado em projeto ( $\xi_i^{des} \geq 10\%$  e  $\xi_i^{des} \geq 15\%$ ).

## 6. Conclusões

Nesse trabalho foi utilizado o Modelo de Sensibilidade de Corrente para representar o Sistema Elétrico de Potência, motivo pelo qual todos os dispositivos inclusos no sistema foram modelados por injeção de corrente. Para as simulações realizadas neste trabalho foi utilizado o Sistema Sul Brasileiro Reduzido.

Verificada a instabilidade no Sistema Sul Brasileiro, provocada por modos locais, foi proposta a utilização de controladores suplementares de amortecimento (Estabilizadores do Sistema de Potência) com o intuito de fornecer amortecimento adicional aos autovalores de interesse existentes no sistema.

Foi proposta uma técnica de otimização denominada Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado, a qual foi modificada especialmente para realizar o ajuste dos parâmetros dos controladores e inserir amortecimento desejado ao sistema, sendo esta comparada ao Algoritmo Genético. Dos resultados obtidos, considerando diferentes faixas de amortecimento ( $\xi_i^{des} \geq 10\%$  e  $\xi_i^{des} \geq 15\%$ ), concluiu-se que o Algoritmo Genético de Chu-Beasley Especializado apresentava melhor desempenho que o Algoritmo Genético, sendo portanto adequado para ser utilizado para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros. Após os ajustes dos parâmetros dos controladores, concluiu-se que atuação deste dispositivo pode tornar sistemas antes instáveis em sistemas estáveis.

## 7. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo nº 141084/2016-2, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2014/23741-9, pelo apoio financeiro.

## Referências

- Abd-Elazim, S. e Ali, E. (2012). Coordinated design of PSSs and SVC via bacteria foraging optimization algorithm in a multimachine power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 41(1):44 – 53.
- Araujo, P. B. e Zaneta, L. C. (2001). Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. *International Journal of Electrical Power System & Energy Systems*, 23 (3):173–178.
- Chen, C.-L. e Hsu, Y.-Y. (1987). Coordinated synthesis of multimachine power system stabilizer using an efficient decentralized modal control (DMC) algorithm. *Power Engineering Review, IEEE, PER-7(8):32–33*.
- Chu, P. e Beasley, J. (1997). A genetic algorithm for the generalised assignment problem. *Computers & Operations Research*, 24(1):17–23.
- De Mello, F. P. e Concordia, C. (1969). Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 88(4):316–329.
- Glover, F. e Kochenberger, G. (2003). *Handbook of Metaheuristics*, volume 57 of *International Series in Operations Research & Management Science*. Springer US.
- Hasanvand, H., Arvan, M. R., Mozafari, B., e Amraee, T. (2016). Coordinated design of PSS and TCSC to mitigate interarea oscillations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78:194 – 206.
- Hassan, L. H., Moghavvemi, M., Almurib, H. A. F., e Muttaqi, K. M. (2014). A coordinated design of PSSs and UPFC-based stabilizer using genetic algorithm. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(5):2957–2966.

- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Bradford book. MIT Press.
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. McGraw-Hill, New York.
- Larsen, E. e Swann, D. (1981). Applying power system stabilizers part II: Performance objectives and tuning concepts. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100(6):3025–3033.
- Menezes, M. M., Araujo, P., e Fortes, E. V. (2014). Bacterial foraging optimization algorithm used to adjust the parameters of power system stabilizers and thyristor controlled series capacitor-power oscillation damping controller. In *Industry Applications (INDUSCON), 2014 11th IEEE/IAS International Conference on*, p. 1–6.
- Michalewicz, Z. (1994). *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. Springer, Berlin, 2nd edition.
- Pádua Júnior, C. R., Takahashi, A. L. M., Furini, M. A., e Araujo, P. (2013). Proposta de um modelo para análise de estabilidade a pequenas perturbações baseado na lei de Kirchhoff para correntes. In *SBAI/DINCON 2013, Fortaleza – CE*, volume 3, p. 1–6.
- Pai, M. (1981). *Power System Stability: Analysis by the Direct Method of Lyapunov*. North-Holland systems and control series. North-Holland Publishing Company.
- Rogers, G. J. (2000). *Power system oscillation*. Kluwer Academic Publishers, London.
- Shayeghi, H., Safari, A., e Shayanfar, H. A. (2010). PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system. *Energy Conversion and Management*, 51(12): 2930 – 2937.
- Uzinski, H., Macedo, L. H., e Romero, R. (2015). Resolução de problemas multimodais usando um algoritmo genético de Chu-Beasley modificado com uma busca local eficiente. In *SBPO 2015, Porto de Galinhas - Ipojuca PB*.
- Valle, D. B. (2014). A influência do controlador GUPFC no sistema elétrico de potência visando a estabilidade a pequenas perturbações. Doutorado, Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista - SP.
- Valle, D. e Araujo, P. (2015). The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 65: 299–306. ISSN 0142-0615.
- Yang, N., Liu, Q., e McClellan, J. D. (1998). TCSC controller design for damping interarea oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(14):1304–1310.