

# PROJETO DE CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO USANDO O ALGORITMO DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL

ELENILSON DE VARGAS FORTES\* LEONARDO H. MACEDO† EDNEI LUIS MIOTTO‡ LUIS FABIANO BARONE MARTINS§ PERCIVAL BUENO DE ARAUJO† CARLOS E. PUPIN¶

\**Instituto Federal de Goiás, Rua Maria Vieira Cunha 775, Residencial Flamboyant, CEP 75804-714 Jataí, GO, Brasil*

†*Universidade Estadual Paulista, Av. Brasil 56, Centro, Caixa Postal 31, CEP 15385-000 Ilha Solteira, SP, Brasil*

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

§*Instituto Federal do Paraná, Av. Doutor Tito, sn, Jardim Panorama, CEP 86400-000 Jacarezinho, PR, Brasil*

¶*Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Av. Senador Atilio Fontana 591-E, CEP 89809-000 Chapecó, SC, Brasil*

Email: elenilson.fortes@ifg.edu.br, leohfmp@ieee.org, edneimiotto@utfpr.edu.br, luis.martins@ifpr.edu.br, percival@dee.feis.unesp.br, carlos.pupin@unochapeco.edu.br

**Abstract**— This paper proposes a variable neighborhood search optimization algorithm for the design of power system stabilizers. The main objective is to ensure minimum damping levels to the low-frequency oscillatory modes present in multi-machine power systems. The dynamics of the electric power system is represented in this work by the current sensitivity model. To validate the proposed technique, simulations were performed using the Reduced Southern Brazilian system. The performance of the proposed method was compared with a multi-start algorithm, where a superior performance of the variable neighborhood search was evidenced. Finally, it was concluded that power system stabilizers are extremely effective in providing additional damping to the low-frequency oscillatory modes present in the studied system.

**Keywords**— Electric power system, power system stabilizers, small-signal stability, variable Neighborhood Search.

**Resumo**— Este artigo propõe um algoritmo de busca em vizinhança variável para o projeto de controladores suplementares de amortecimento, os estabilizadores de sistema de potência. O objetivo principal é garantir taxas de amortecimento mínimo aos modos oscilatórios de baixa frequência presentes em sistemas de potências multimáquinas. A dinâmica do sistema elétrico de potência é representada neste trabalho pelo modelo de sensibilidade de corrente. Para validar a técnica proposta, simulações foram realizadas em um sistema teste conhecido na literatura como sistema Sul Brasileiro Reduzido. O desempenho do algoritmo de busca em vizinhança variável foi comparado ao do algoritmo multi-start, onde ficou evidenciado uma performance superior do primeiro. Por fim, concluiu-se que os estabilizadores de sistema de potência são extremamente eficazes para fornecer amortecimento adicional aos modos oscilatórios de baixa frequência presentes no sistema Sul Brasileiro Reduzido.

**Palavras-chave**— Busca em vizinhança variável, estabilidade a pequenas perturbações, estabilizadores de sistema de potência, sistema elétrico de potência.

## 1 Introdução

A estabilidade é uma das vertentes da operação e planejamento dos sistemas elétricos de potência (SEP). Estes estudos analisam o desempenho do sistema elétrico quando submetido a grandes perturbações (retirada de linhas de transmissão e/ou de unidades geradoras, por exemplo) e é chamada de estabilidade transitória. Quando se tratam de variações normais da carga nos barramentos do SEP, o estudo é denominado de estabilidade a pequenas perturbações (Kundur, 1994), foco deste trabalho. Essas oscilações podem ser identificadas a partir da análise da sua frequência de ocorrência ( $\omega_n$ ) e são classificadas como do tipo local (0,8 a 2,0 Hz), interárea (0,2 a 0,8 Hz) ou intraplanta (1,5 a 2,5 Hz) (Kundur, 1994). A presença dessas oscilações no SEP, em particular as classificadas como sendo do tipo local, analisadas nesse trabalho, podem comprometer a sua operação, motivo pelo qual estratégias de controle para fornecer amortecimento adicional a estes modos oscilatórios devem ser considerados.

Normalmente, os controladores utilizados para inse-

rir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas de baixa frequência presentes no SEP são os estabilizadores do sistema de potência (ESP) (De Mello and Concordia, 1969). Os ESPs são conhecidos por possuírem atuação destacada, inserindo amortecimento adicional aos modos locais, quando estes são adicionados à malha de controle dos reguladores automáticos de tensão (RATs) (Fortes, Araujo, Macedo, Gamino and Martins, 2016).

Para que os ESPs desempenhem sua função no SEP (inserir amortecimento adicional aos modos locais), o correto ajuste de seus respectivos parâmetros de controle é fundamental, pois dependendo dos resultados obtidos, modos locais antes estáveis podem se tornar instáveis (Moura et al., 2012). Na literatura, técnicas baseadas em controle clássico, tais como *Decentralized Modal Control* (DMC) (Valle and Araujo, 2015) e Resíduos (Yang et al., 1998) têm sido, com sucesso, empregadas no ajuste dos parâmetros desses controladores. Recentemente, métodos heurísticos para resolver de forma genérica proble-

mas de otimização passaram a integrar o rol de possibilidades e têm sido utilizados no ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs. Algoritmos tais como o *bacterial foraging optimization algorithm* (BFO) (Menezes et al., 2014; Miotto, Araujo, Gamino, Fortes and Martins, 2016; Fortes et al., 2015), *particle swarm optimization* (PSO) (Pupin et al., 2015; Miotto, Araujo, Gamino, Fortes and Martins, 2016; Miotto, Gamino, Fortes, Araujo and Martins, 2016; Martins, Fortes, Araujo and Gamino, 2016), *artificial bee colony* (ABC) (Martins, Gamino, de Araujo, Fortes and Miotto, 2016; Martins et al., 2017), multi-start (MS) (Fortes, Araujo, Macedo and Gamino, 2016; Fortes et al., 2018), *fireworks algorithm* (FA) (Fortes et al., 2017) e o *genetic algorithm* (GA) (Gamino et al., 2016; Fortes, Araujo and Macedo, 2016; Fortes, Araujo, Macedo, Gamino and Miotto, 2016) são exemplos de métodos de otimização que foram utilizados com sucesso no ajuste dos parâmetros desses controladores.

Neste trabalho, uma meta-heurística conhecida como algoritmo de busca em vizinhança variável (VNS) (Hansen and Mladenović, 2001) é usada para realizar o projeto dos controladores de amortecimento ESPs. O algoritmo VNS mostrou excelentes resultados no campo de Pesquisa Operacional, mas ainda é pouco explorado em problemas de otimização na Engenharia Elétrica. A principal vantagem da técnica proposta é que ela não requer a definição e ajuste de parâmetros, como o tamanho da população, a taxa de mutação, etc., que são exigidos, por exemplo, nos GAs. A maioria dos métodos existentes apresentados na literatura exige ajustes do algoritmo para cada instância do problema, enquanto o método VNS proposto pode ser aplicado para resolver problemas em diferentes instâncias sem a necessidade de qualquer modificação. O método proposto adota uma estratégia de pesquisa local baseada em um método cíclico coordenado que utiliza o método de Fibonacci para realizar a busca unidimensional. Para validar a técnica proposta, o desempenho do algoritmo VNS foi comparado com um algoritmo multi-start (Glover and Kochenberger, 2003).

Para representar o SEP foi utilizado o modelo de sensibilidade de corrente (MSC) (Pádua Júnior et al., 2013), e todos os demais dispositivos e componentes inseridos no SEP foram modelados por injeção de corrente.

As simulações neste trabalho são realizadas no sistema teste conhecido como Sul Brasileiro Reduzido e seus dados podem ser consultados em Fortes et al. (2018). Todos os resultados neste trabalho foram obtidos através de modelagens e implementações no *software* Matlab<sup>®</sup>.

Do exposto, as principais contribuições deste trabalho são: 1) utilizar e analisar a eficiência do algoritmo VNS para o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores ESPs; 2) analisar a eficiência dos controladores ESPs quando o objetivo é inserir amortecimento adicional aos modos locais; 3) validar o VNS como ferramenta para análise da estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

## 2 Modelo de Sensibilidade de Corrente

Neste trabalho, o modelo de sensibilidade de corrente (MSC) foi utilizado para representar o conjunto de equações diferenciais e algébricas que modelam o SEP. Assim como o modelo de sensibilidade de potência (MSP) proposto por Deckmann and Da Costa (1994), o MSC é uma ferramenta de análise linear para os SEPs. Além de preservar a rede externa, ele facilita a inclusão de novos dispositivos ao SEP, e preserva a barra terminal do gerador. Estas características, não presentes no modelo de Heffron e Phillips (MHP) (Heffron and Phillips, 1952), são pontos determinantes para a escolha do MSC.

A essência do MSC está baseada na aplicação da Lei de Kirchhoff das correntes nos nós. As equações algébricas do referido modelo são obtidas a partir do balanço nodal de correntes, fato este que deve ser observado em todo e qualquer processo dinâmico no SEP. Para dedução do MSC considera-se: condições balanceadas, ausência de saturação e a máquina síncrona é representada por três enrolamentos no estator e um enrolamento no rotor. Pode-se mostrar que em SEP multimáquinas ( $ng$  geradores e  $nb$  barras), as variáveis de estado ( $\Delta x$ ), de entrada ( $\Delta u$ ) e algébricas ( $\Delta z$ ) podem ser representadas pelo MSC conforme mostrado nas eqs. (1)–(4).

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} [\Delta\omega_1 \cdots \Delta\omega_{ng}] & [\Delta\delta_1 \cdots \Delta\delta_{ng}] & [\Delta E'_{q1} \cdots \Delta E'_{qn_g}] \\ [\Delta E_{fd1} \cdots \Delta E_{fd_{n_g}}] \end{bmatrix}^t \quad (1)$$

$$[\Delta u] = \begin{bmatrix} [\Delta P_{m1} \cdots \Delta P_{m_{ng}}] & [\Delta V_{ref1} \cdots \Delta V_{ref_{ng}}] \\ [\Delta P_{l1} \cdots \Delta P_{l_{nb}}] & [\Delta Q_{l1} \cdots \Delta Q_{l_{nb}}] \end{bmatrix}^t \quad (2)$$

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

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

Nas eqs. (1)–(4), as variáveis de estados são representadas pela velocidade angular do gerador síncrono ( $\Delta\omega$ ), ângulo interno do rotor do gerador ( $\Delta\delta$ ), tensão interna do eixo em quadratura ( $\Delta E'_q$ ) e pela tensão de campo do gerador ( $\Delta E_{fd_k}$ ). As variáveis de entrada encontram-se representadas pela potência mecânica ( $\Delta P_m$ ), pela tensão de referência do RAT de cada gerador ( $\Delta V_{ref}$ ) e pelas variações das potências ativa ( $\Delta P_l$ ) e reativa ( $\Delta Q_l$ ) das cargas. A magnitude e o ângulo de fase da tensão das barras do SEP são rerepresentadas por  $\Delta V$  e  $\Delta\theta$  e constituem as variáveis algébricas. Pode-se mostrar que  $A = J1 - J2J4^{-1}J3$  representa a matriz de estados, e  $B = B1 - J2J4^{-1}B2$  a matriz de entradas.

## 3 Estrutura de Controle dos ESPs

Do ponto vista da estabilidade, o aparecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência pode ser um obstáculo a manutenção da estabilidade no SEP (Rogers, 2000). Desta forma, para melhorar o desempenho dinâmico do sistema, controladores ESPs podem ser utilizados. Esses dispositivos são acoplados à malha de controle dos RATs e neste caso, seu objetivo é inserir um sinal estabilizante ( $\Delta V_{sup}$ ) na malha de regulação dos geradores. Na Fig. 1 é mostrada a estrutura básica do controlador ESP.

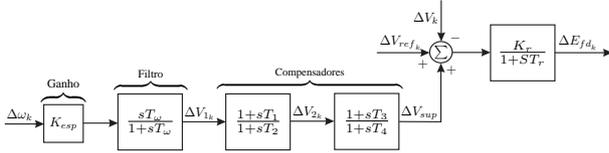


Figura 1: Modelo dinâmico para o ESP.

Conforme mostrado na Fig. 1, o sinal de entrada usado para o ESP são as variações da velocidade angular do rotor do gerador  $k$  ( $\Delta\omega_k$ ). Os parâmetros de controle dos ESP encontram-se representados pelas constantes de tempo  $T_1$  a  $T_4$  (em segundos) e pelo ganho  $K_{esp}$  (em p.u.), sendo usual adotar  $T_1 = T_3$  e  $T_2 = T_4$  (Kundur, 1994).

Ainda na Fig. 1, o RAT do  $k$ -ésimo gerador é representado por um ganho estático ( $K_{rk}$ ) e pela constante de tempo ( $T_{rk}$ ). A tensão de campo é  $E_{fdk}$ ,  $\Delta V_k$  é a magnitude da tensão terminal e  $\Delta V_{refk}$  é tensão de referência do  $k$ -ésimo gerador.

As equações que definem o comportamento dinâmico dos controladores suplementares de amortecimento ESP são obtidas por inspeção na Fig. 1 e são descritas nas eqs. (5)–(8).

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

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

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

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

#### 4 Técnica de Ajuste dos Parâmetros dos Controladores ESP

Esta seção apresenta o algoritmo VNS proposto neste trabalho para o projeto dos controladores ESPs. Seus resultados foram comparados com o algoritmo multi-start (MS) que também é descrito de forma resumida.

##### 4.1 Algoritmo VNS

Os métodos exatos existentes para a otimização não lineares só podem funcionar bem quando vários requisitos são satisfeitos no problema, como a continuidade da função objetivo e das restrições, a existência da primeira e segunda derivadas da função objetivo e restrições, e a convexidade da região viável (Bazarra et al., 2006). O problema abordado neste trabalho, além de apresentar equações algébricas não lineares na formulação, tem equações diferenciais que tornam impossível obter um modelo matemático exato e completo de otimização a ser resolvido usando esses métodos exatos. Por esta razão, esta seção apresenta uma meta-heurística para resolver o problema.

Uma estratégia de busca local para otimização não linear é capaz de encontrar um ótimo local de um problema que apresenta muitas soluções diferentes de boa qualidade, ou seja, um problema multimodal. Quando métodos de otimização exatos são aplicados diretamente para resolver este tipo de problema, é provável que somente soluções ótimas locais, fortemente dependentes do

ponto inicial, sejam encontradas. Para superar esta limitação, Hansen and Mladenović (2001) apresentaram uma meta-heurística simples e eficiente, chamada de busca em vizinhança variável (Algoritmo 1), que pode ser obtida estendendo-se um algoritmo de busca local para realizar mudanças sistemáticas nas vizinhanças, para resolver problemas complexos. Ao contrário da maioria das técnicas de busca local, o algoritmo VNS não segue uma trajetória, mas explora vizinhanças mais distantes da melhor solução atual.

---

##### Algoritmo 1: Busca em Vizinhança Variável

---

1. **Inicialização.** Defina o conjunto de estruturas de vizinhança  $\mathcal{N}_k$ ,  $k = 1, \dots, k_{\max}$ , que será usado na busca; encontre uma solução inicial  $\mathbf{x}$ ; defina um critério de parada;
  2. **Repita** os seguintes passos até que o critério de parada seja satisfeito:
    - (a) Faça  $k \leftarrow 1$ ;
    - (b) Até  $k = k_{\max}$ , repita os seguintes passos:
      - i. Gere um ponto  $\mathbf{x}'$  aleatoriamente da  $k$ -ésima vizinhança de  $\mathbf{x}$  ( $\mathbf{x}' \in \mathcal{N}_k(\mathbf{x})$ );
      - ii. Aplique algum métodos de busca local com  $\mathbf{x}'$  sendo a solução inicial; Denote por  $\mathbf{x}''$  o ótimo local obtido;
      - iii. Se esse ótimo local é melhor que a incumbente, atualize-a ( $\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}''$ ), e continue a busca com  $\mathcal{N}_1$  ( $k \leftarrow 1$ ); caso contrário, faça  $k \leftarrow k + 1$ , se  $k > k_{\max}$ , faça  $k \leftarrow 1$ .
- 

De acordo com o Algoritmo 1, inicialmente, uma sequência de vizinhanças  $\mathcal{N}_k$ ,  $k = 1, \dots, k_{\max}$  é definida. Como o problema neste trabalho apresenta variáveis contínuas, as vizinhanças são definidas de acordo com a distância do ponto  $\mathbf{x}'$  da solução corrente  $\mathbf{x}$ . Assim, se um ponto  $\mathbf{x}'$  pertence ao hiper-retângulo com centro em  $\mathbf{x}$ , no qual cada aresta  $i$  tem comprimento  $\varphi_k(\bar{x}_i - \underline{x}_i)$ , onde  $\underline{x}_i$  e  $\bar{x}_i$  são os limites inferior e superior da variável  $i$ , respectivamente, e  $0 < \varphi_k \leq 1$ ,  $\varphi_1 < \varphi_2 < \dots < \varphi_{k_{\max}}$ , então  $\mathbf{x}' \in \mathcal{N}_k(\mathbf{x})$ .

Uma solução inicial  $\mathbf{x}$  é gerada e sua qualidade é avaliada usando a função objetivo  $F(\mathbf{x})$  apresentada na próxima seção. Neste trabalho, esta solução é gerada aleatoriamente dentro dos limites das variáveis. O processo iterativo começa com  $k \leftarrow 1$ , e a solução  $\mathbf{x}'$  é gerada aleatoriamente na vizinhança  $\mathcal{N}_1(\mathbf{x})$ .

No próximo passo, uma busca local é realizada com  $\mathbf{x}'$  sendo uma solução inicial. A próxima subseção apresentará a etapa de busca local, e a solução encontrada nesta etapa é denotada por  $\mathbf{x}''$ .

Podem ocorrer três situações:

1.  $\mathbf{x}'' = \mathbf{x}$ , ou seja,  $\mathbf{x}$  é a melhor solução da vizinhança. Neste caso,  $k \leftarrow k + 1$ , e o algoritmo continua na próxima vizinhança;
2.  $\mathbf{x}'' \neq \mathbf{x}$  e  $F(\mathbf{x}'') \geq F(\mathbf{x})$ . Neste caso, obteve-se um novo ótimo local, mas com pior qualidade do que a solução atual. O algoritmo continua na próxima vizinhança ( $k \leftarrow k + 1$ );
3.  $\mathbf{x}'' \neq \mathbf{x}$  e  $F(\mathbf{x}'') < F(\mathbf{x})$ . Indica que uma nova solução, melhor do que a solução atual, foi encontrada. A solução atual é atualizada ( $\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}''$ ), e a busca reinicia na primeira vizinhança ( $k \leftarrow 1$ ) de  $\mathbf{x}$ .

Se o último vizinho for alcançado ( $k > k_{\max}$ ) e nenhuma melhoria é obtida, então a busca é reiniciada na primeira vizinhança  $k \leftarrow 1$ .

## 4.2 Algoritmo de Busca Local

O passo de busca local do algoritmo VNS é realizado usando o método cíclico coordenado (Bazaraa et al., 2006) (Algoritmo 2). Este método pode ser utilizado diretamente para otimizar funções não lineares e não-diferenciáveis. Uma busca unidimensional é repetidamente aplicada nas direções  $\mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_n$ , onde  $\mathbf{d}_i$  é um vetor onde o elemento  $i$  vale “1” e todos os outros elementos são zero, a partir de um ponto inicial  $\mathbf{x}_1$ . A ordem das direções adotada neste trabalho é aleatória. Entretanto, para realizar uma busca local, somente uma fração do intervalo  $\underline{x}_i$  e  $\bar{x}_i$  de cada variável é utilizada, em torno da solução corrente do algoritmo VNS. O intervalo considerado para cada variável é de 20% da amplitude total em cada direção da solução corrente  $\mathbf{x}$ , i.e.,  $x_i - \rho(\bar{x}_i - x_i) \leq x_i \leq x_i + \rho(x_i - \underline{x}_i)$ ,  $\rho = 0,2$ . Se uma variável viola o limite  $\underline{x}_i$  ou  $\bar{x}_i$ , o valor é fixado no limite violado.

Por outro lado, para validar esta proposta, o método cíclico coordenado é aplicado diretamente ao problema no algoritmo MS, considerando os intervalos completos para cada variável.

O método de busca unidimensional de Fibonacci (Bazaraa et al., 2006) (Algoritmo 3), que é um algoritmo que não utiliza derivadas, foi escolhido para minimizar  $F$  em uma dada direção  $\mathbf{d}_i$ . Este método minimiza uma função estritamente quase convexa em um intervalo limitado  $[a_1, b_1]$ . A sequência de Fibonacci  $\{\mathcal{F}_k\}$ , definida como  $\mathcal{F}_{k+1} \leftarrow \mathcal{F}_k + \mathcal{F}_{k-1}$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , com  $\mathcal{F}_0 = \mathcal{F}_1 = 1$ , é usada na redução do intervalo de incerteza.

## 4.3 Algoritmo Multi-Start

O algoritmo MS (Algoritmo 4) é uma meta-heurística simples, que consiste em gerar soluções aleatórias e melhorá-las, por meio de uma heurística de refinamento. Basicamente, a técnica apresentada neste artigo consiste em dois passos: gerar uma solução aleatória e realizar um passo de melhoria. Estas duas etapas devem ser repetidas até que o critério de parada seja satisfeito. A estratégia de busca utilizada é a mesma utilizada no algoritmo VNS (considerando, neste caso, os intervalos completos para cada variável). A eficiência do algoritmo MS será comparada ao algoritmo VNS, para avaliar o desempenho deste último.

## 5 Função de Avaliação e Restrições

Considere  $\mathbf{x}$  uma solução obtida pelos algoritmos discutidos na seção anterior. Sua função de avaliação,  $F(\mathbf{x})$ , é definida em (9).

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \max \left\{ \xi_i - \xi_i, 0 \right\} \quad (9)$$

Em (9),  $n$  é o número de autovalores de interesse,  $\xi_i$  é o amortecimento do autovalor  $i$  na solução  $\mathbf{x}$ , e  $\underline{\xi}_i$  é o amortecimento mínimo desejado para o autovalor  $i$ , definido pelo operador do sistema. Além disso, cada  $\xi_i$  é determinado pelo MSC.

A função de avaliação assumirá valor zero quando cada autovalor de interesse  $i$  apresentar um amortecimento maior do que  $\underline{\xi}_i$ .

O objetivo dos algoritmos avaliados (VNS e MS) consiste na realização do ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores ESPs. Considere para isso, um sistema multimáquinas com  $n$  geradores síncronos equipados com  $n$  controladores ESPs, e que as constantes de tempos dos blocos *washout* sejam especificadas ( $T_w = 10$  segundos). Assim, a representação de uma proposta de solução nos algoritmos VNS e MS pode ser ilustrada de acordo com a Fig. 2.

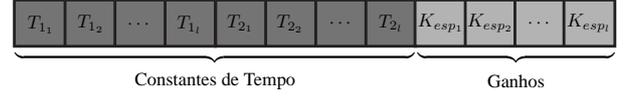


Figura 2: Representação de uma solução nos algoritmos VNS e MS

Na Fig. 2,  $T_{1l}$ ,  $T_{2l}$  e  $K_{esp_l}$  ( $1 \leq l \leq n$ ) são, respectivamente, as constantes de tempo e ganhos dos controladores ESPs. Cada variável de uma proposta de solução está sujeita aos limites indicados pelas eqs. (9) e (10).

$$1, 0 \leq K_{esp_l} \leq 12, 0 \quad (10)$$

$$0, 01 \leq T_{1l} \leq 0, 50; 0, 01 \leq T_{2l} \leq 0, 25 \quad (11)$$

Nas eqs. (10) e (11) os ganhos estão representados em p.u. e as constantes de tempos em segundos.

## 6 Simulações e Resultados

A Figura 3 apresenta o diagrama unifilar do sistema Sul Brasileiro Reduzido. Este é composto por 10 geradores, 45 barras e 75 linhas de transmissão. Os dados das barras e linhas de transmissão encontram-se disponíveis em Fortes et al. (2018).

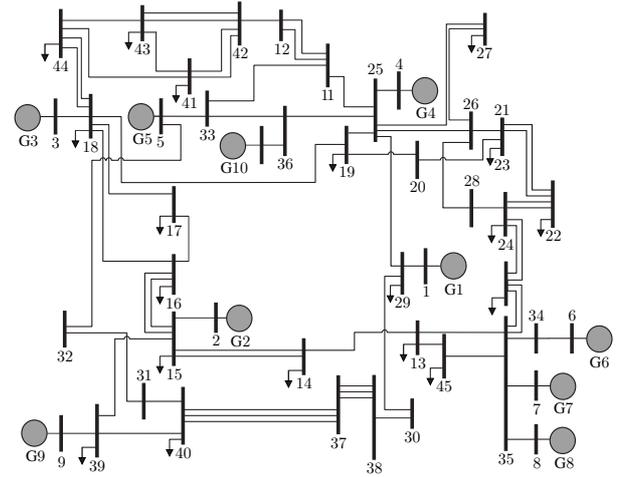


Figura 3: Diagrama unifilar do sistema Sul Brasileiro Reduzido.

Na Tabela 1 são apresentados os autovalores de interesse ( $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$ ), coeficientes de amortecimento ( $\xi_i = -\sigma_i/|\lambda_i|$ ) e as respectivas frequências naturais não amortecidas ( $\omega_{n_i} = |\lambda_i|/2\pi$ ) do sistema Sul Brasileiro Reduzido obtidos após simulações no MSC.

---

**Algoritmo 2:** Método Cíclico Coordenado

---

- 1. Inicialização.** Escolha um escalar  $\epsilon > 0$  a ser usado como critério de parada e seja  $\mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_n$  as direções coordenadas. Escolha um ponto inicial  $\mathbf{x}_1$ , faça  $\mathbf{y}_1 \leftarrow \mathbf{x}_1$ , faça  $k \leftarrow 1$  e  $j \leftarrow 1$ , e vá para o **passo principal**;
  - 2. Passo Principal.**
    - (a) Seja  $\gamma_j$  a solução ótima do problema de minimização de  $F(\mathbf{y}_j + \gamma \mathbf{d}_j)$  sujeito a  $\gamma \in [a_1, b_1]$  e faça  $\mathbf{y}_{j+1} \leftarrow \mathbf{y}_j + \gamma_j \mathbf{d}_j$ ; Se  $j < n$ , substitua  $j$  por  $j + 1$ , e repita o passo (a). Caso contrário, se  $j = n$ , vá para o passo (b);
    - (b) Faça  $\mathbf{x}_{k+1} \leftarrow \mathbf{y}_{k+1}$ . Se  $\|\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k\| < \epsilon$ , então pare. Caso contrário, faça  $\mathbf{y}_1 \leftarrow \mathbf{x}_{k+1}$ , faça  $j \leftarrow 1$ , e  $k \leftarrow k + 1$ , e vá para o passo (a).
- 

**Algoritmo 3:** Busca Unidimensional de Fibonacci

---

- 1. Inicialização.** Defina um valor de intervalo de incerteza final adequado  $l > 0$  e uma constante  $\epsilon > 0$ . Considere  $[a_1, b_1]$  o intervalo de incerteza inicial, e defina o número de cálculos  $n$  tal que  $\mathcal{F}_n > (b_1 - a_1)/l$ ; Faça  $\gamma_1 \leftarrow a_1 + (\mathcal{F}_{n-2}/\mathcal{F}_n)(b_1 - a_1)$  e  $\mu_1 \leftarrow a_1 + (\mathcal{F}_{n-1}/\mathcal{F}_n)(b_1 - a_1)$ . Calcule  $F(\mathbf{y}_j + \gamma_1 \mathbf{d}_j)$  e  $F(\mathbf{y}_j + \mu_1 \mathbf{d}_j)$ . Faça  $k \leftarrow 1$ , e vá para o **passo principal**;
  - 2. Passo Principal.**
    - (a) Se  $F(\mathbf{y}_j + \gamma_k \mathbf{d}_j) > F(\mathbf{y}_j + \mu_k \mathbf{d}_j)$ , vá para o passo (b); e se  $F(\mathbf{y}_j + \gamma_k \mathbf{d}_j) \leq F(\mathbf{y}_j + \mu_k \mathbf{d}_j)$ , vá para o passo (c);
    - (b) Faça  $a_{k+1} \leftarrow \gamma_k$  e  $b_{k+1} \leftarrow b_k$ . Além disso, faça  $\gamma_{k+1} \leftarrow \mu_k$ , e faça  $\mu_{k+1} \leftarrow a_{k+1} + (\mathcal{F}_{n-k-1}/\mathcal{F}_{n-k})(b_{k+1} - a_{k+1})$ . Se  $k = n - 2$ , vá para o passo (e); caso contrário, avalie  $F(\mathbf{y}_j + \mu_{k+1} \mathbf{d}_j)$  e vá para o passo (d);
    - (c) Faça  $a_{k+1} \leftarrow a_k$  e  $b_{k+1} \leftarrow \mu_k$ . Além disso, faça  $\mu_{k+1} \leftarrow \gamma_k$ , e faça  $\gamma_{k+1} \leftarrow a_{k+1} + (\mathcal{F}_{n-k-2}/\mathcal{F}_{n-k})(b_{k+1} - a_{k+1})$ . Se  $k = n - 2$ , vá para o passo (e); caso contrário, avalie  $F(\mathbf{y}_j + \gamma_{k+1} \mathbf{d}_j)$  e vá para o passo (d);
    - (d) Faça  $k \leftarrow k + 1$  e vá para o passo (a);
    - (e) Faça  $\gamma_n \leftarrow \gamma_{n-1}$  e  $\mu_n \leftarrow \mu_{n-1} + \epsilon$ . Se  $F(\mathbf{y}_j + \gamma_n \mathbf{d}_j) > F(\mathbf{y}_j + \mu_n \mathbf{d}_j)$ , faça  $a_n \leftarrow \gamma_n$  e  $b_n \leftarrow b_{n-1}$ . Caso contrário, se  $F(\mathbf{y}_j + \gamma_n \mathbf{d}_j) \leq F(\mathbf{y}_j + \mu_n \mathbf{d}_j)$ , faça  $a_n \leftarrow a_{n-1}$  e  $b_n \leftarrow \gamma_n$ . Pare; a solução ótima está no intervalo  $[a_n, b_n]$ .
- 

---

**Algoritmo 4:** Algoritmo Multi-Start

---

- 1. Inicialização.** Faça  $k \leftarrow 1$ ;
  - 2. passo principal.** Até  $k = k_{\max}$ , repita as seguintes etapas:
    - (a) **Geração.** Construa a solução  $\mathbf{x}_k$ ;
    - (b) **Busca.** Aplique um método de busca para melhorar  $\mathbf{x}_k$ ; faça  $\mathbf{x}'_k$  ser a solução obtida;
    - (c) **Atualize.** Se  $\mathbf{x}'_k$  é melhor que a incumbente, atualize-a; faça  $k \leftarrow k + 1$ .
- 

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

Modo	Autovalores	$\xi_i$ (p.u.)	$\omega_{n_i}$ (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

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 1 verifica-se que o sistema Sul Brasileiro Reduzido possui um total de nove modos oscilatórios. Todos os modos obtidos possuem suas respectivas frequências naturais não amortecidas dentro faixa de  $0,8 - 2,0$  Hz, definindo-os como modos locais. Dos modos obtidos,  $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_7$  e  $\lambda_8$  possuem parte real positiva o que classifica o sistema como instável, ou seja, as oscilações têm amplitudes crescentes caracterizando uma instabilidade oscilatória como pode ser visualizado na Fig. 4.

Na Fig. 4 são apresentadas as variações angulares dos geradores G1, e G3 a G10, onde G2 é utilizado como gerador de referência, após este ter sofrido uma perturbação de 0,05 p.u. em sua potência mecânica. Ao analisar

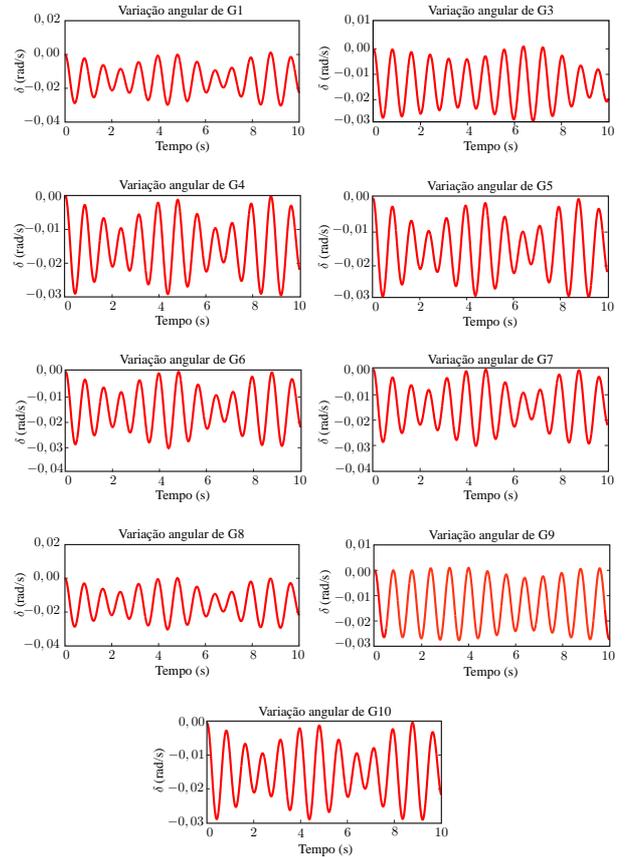


Figura 4: Variação angular dos geradores G1, G3 a G10 do sistema Sul Brasileiro Reduzido.

a Tabela 1 e a Fig. 4 é possível concluir que o sistema Sul Brasileiro Reduzido opera na instabilidade para o ponto de operação considerado (Fortes et al., 2018). Conforme mencionado, este problema pode ser solucionado com instalação de ESPs no SEP. Neste caso, os RATs dos geradores síncronos foram equipados com nove ESPs. O

objetivo é realizar o ajuste coordenado dos parâmetros de controle (constantes de tempo e ganhos) dos ESPs e inserir amortecimento mínimo desejado ( $\xi_i \geq 10\%$ ) aos modos de interesse do sistema teste de acordo com a função de avaliação mostrada em (9) e as respectivas restrições apresentadas nas eqs. (10) e (11).

### 6.1 Desempenho do Algoritmo VNS e MS

Para analisar o desempenho dos algoritmos VNS e MS no que tange a análise da estabilidade a pequenas perturbações no sistema teste, considerou-se: 1) 100 testes limitados a 1000 cálculos da função de avaliação mostrada em (9) e as restrições apresentadas nas eqs. (10) e (11); 2) Em cada teste simulado, ambos os algoritmos 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 amortecimento mínimo desejado de 10%.

Ao considerar a instalação de ESPs nos geradores G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8 e G9 (geradores com maior participação nos modos oscilatórios instáveis e com baixo amortecimento) definidos a partir dos fatores de participação (Kundur, 1994), são processados os algoritmos VNS e MS para o ajuste dos respectivos parâmetros. Na Tabela 2 são mostrados os resultados obtidos pelos algoritmos. O objetivo é alterar os níveis de amortecimentos apresentados na Tabela 1 para os modos de interesse do sistema Sul Brasileiro Reduzido para níveis de amortecimentos iguais ou maiores que 10% em todos os modos oscilatórios relacionados aos geradores síncronos com os ESPs instalados.

Tabela 2: Comparação de desempenho entre os algoritmos VNS e MS.

Algoritmos	$\xi_i$	Soluções Encontradas	Encontradas		
			Médio	Mín.	Máx.
VNS	$\geq 10\%$	100	150	09	876
MS	$\geq 10\%$	75	352	42	782

Ao analisar a Tabela 2 verifica-se que o algoritmo VNS possui melhor desempenho que o MS. De fato, como pode ser comprovado na Tabela 2, o algoritmo VNS é mais eficiente que o MS, já que este convergiu em 100% dos testes realizados, enquanto que o MS em 75%. Além disso, em média, o algoritmo VNS têm melhor desempenho que o MS. Ficou constatado que o algoritmo VNS encontra uma solução em 150 iterações contra 352 do MS. Na prática isso significa dizer que VNS é mais rápido que o MS. Nos testes simulados no sistema Sul Brasileiro Reduzido, verificou-se que o algoritmo VNS encontra uma solução nas condições apresentadas neste trabalho em aproximadamente 45 segundos contra 110 segundos do MS.

### 6.2 Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações

Para o ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs é utilizado o algoritmo VNS (por razões justificadas na Subsecção 6.1), considerando as restrições de projeto apresentadas neste artigo. Para um caso válido obtido a partir das simulações realizadas e descritas na Tabela 2 é obtida a Fig. 5.

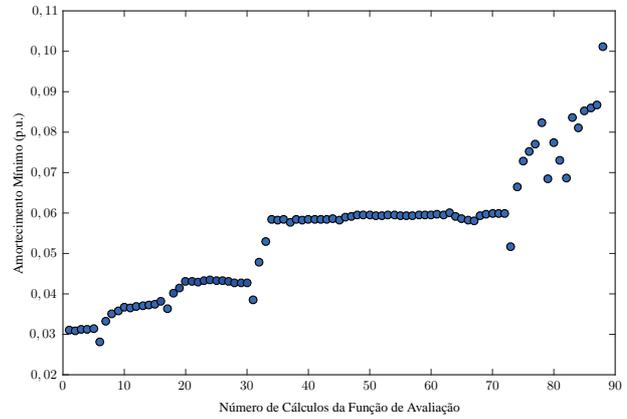


Figura 5: Evolução do Algoritmo VNS.

Na Fig. 5 é possível observar a evolução do algoritmo VNS até que uma solução factível fosse encontrada. Observa-se que o algoritmo convergiu após 88 cálculos da função de avaliação, bem abaixo do valor médio de iterações utilizadas pelo MS para encontrar uma solução factível para o problema (veja Tabela 2).

A Tabela 3 apresenta o ajuste obtido após o processamento do algoritmo VNS considerando o caso ilustrado na Fig. 5.

Tabela 3: Ganhos e constantes de tempo dos controladores ESPs ajustados pelo VNS.

Dispositivo	$\xi_i \geq 10\%$		
	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$K_{esp}$ (p.u.)
ESP G1	0,3147	0,1111	5,1611
ESP G2	0,2816	0,0803	5,6884
ESP G3	0,3329	0,1146	3,4999
ESP G4	0,3000	0,0968	4,4846
ESP G6	0,2754	0,1354	5,2360
ESP G7	0,2201	0,0956	5,6023
ESP G8	0,3488	0,0861	2,2232
ESP G9	0,2782	0,1192	3,3883
ESP G10	0,2026	0,1580	3,7713

Ajustando os controladores ESPs com os dados da Tabela 3, o sistema teste é novamente simulado. Os ajustes obtidos pelo VNS deverão ser capazes de alterar os níveis de amortecimento apresentados na Tabela 1 para níveis maiores ou iguais a 10%, como pode ser observado na Tabela 4.

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

Modo	Autovalores	$\xi_i$ (p.u.)	$\omega_{n_i}$ (Hz)
$\lambda_1$	$-1,5099 \pm 5,5320$	0,2633	0,9126
$\lambda_2$	$-0,8788 \pm 5,9398$	0,1464	0,9556
$\lambda_3$	$-0,6390 \pm 5,7379$	0,1107	0,9189
$\lambda_4$	$-0,7959 \pm 7,7014$	0,1028	1,2322
$\lambda_5$	$-2,9258 \pm 6,4263$	0,4144	1,1238
$\lambda_6$	$-2,5510 \pm 6,6588$	0,3578	1,1349
$\lambda_7$	$-0,6552 \pm 6,4499$	0,1011	1,0318
$\lambda_8$	$-0,7617 \pm 6,4292$	0,1176	1,0304
$\lambda_9$	$-0,9664 \pm 8,5493$	0,1123	1,3693

Ao analisar as Tabelas 3 e 4 algumas considerações

devem ser elencadas: (1) em relação a Tabela 3 é possível verificar que todos os parâmetros de controle encontrados pelo VNS para os ESPs estão em acordo com as restrições apresentadas nas eqs. (9) e (10); (2) verifica-se a partir da Tabela 3 que os modos antes instáveis ou com amortecimento inferior a 10% mostrados na Tabela 1 agora encontram-se com amortecimento maior ou igual a 10% conforme especificado em projeto; (3) os modos oscilatórios ajustados apresentam frequências naturais não amortecidas na faixa de 0,8 – 2,0 Hz mostrando a eficiência do algoritmo VNS para o ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs aplicados em pesquisas de estabilidade a pequenas perturbações no SEP.

Como mostrado na Fig. 4, na Fig. 6 são apresentadas as variações angulares dos geradores G1, e G3 a G10, sendo que o gerador G2 foi usado como referência, após este ter sofrido uma perturbação de 5% em sua potência mecânica.

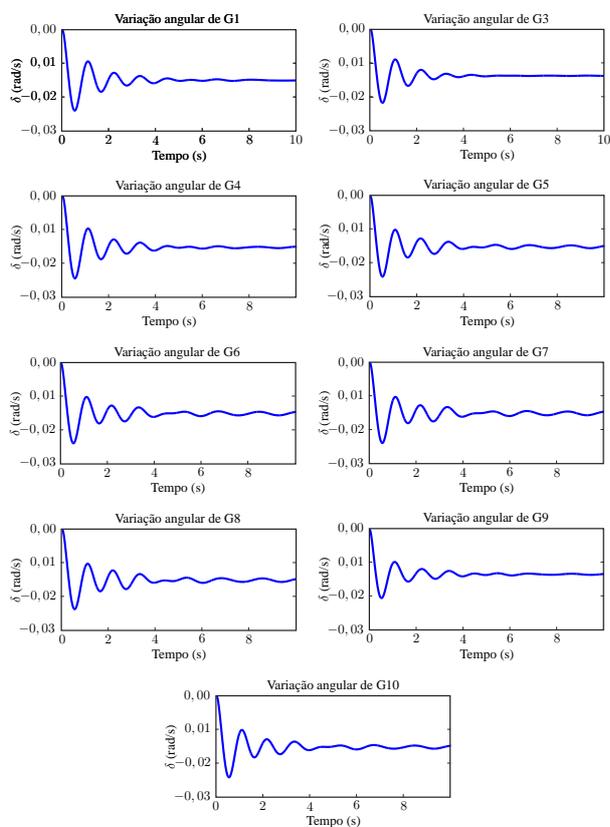


Figura 6: Variação angular dos geradores G1, G3 a G10 do sistema Sul Brasileiro Reduzido.

As curvas apresentadas na Fig. 6 foram simuladas a partir do ajuste encontrado pelo VNS (veja Tabela 3). Já era esperado a partir desse ajuste que o sistema apresentasse um perfil de curvas bem amortecidas, pois foi mostrado na Tabela 4 que todos os modos oscilatórios do sistema estão com amortecimento igual ou superior a 10%. Ao analisar a Fig. 6 verifica-se após a perturbação o sistema estabiliza-se em aproximadamente 5 segundos, evidenciando graficamente sua alta margem de estabilidade a pequenas perturbações.

## 7 Conclusões

Neste trabalho o algoritmo VNS foi proposto para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controla-

dores de amortecimento ESPs. O objetivo foi introduzir amortecimento adicional aos modos de oscilação eletromecânica de baixa frequência, e assim, garantir a estabilidade a pequenas perturbações para o sistema teste, Sul Brasileiro Reduzido, utilizado nas simulações.

O método proposto obteve alta taxa de convergência, e se comparado ao algoritmo multi-start, encontrou soluções factíveis para o problema com um número de iterações médio bem menor. Uma análise dinâmica do sistema teste foi realizada considerando um amortecimento mínimo desejado superior a 10%. Concluiu-se que o método proposto foi capaz de estabilizar o sistema quando o mesmo foi submetido a perturbações bem como aumentou sua margem de estabilidade.

Em vista do exposto, o VNS pode ser credenciado como uma ferramenta de qualidade no ajuste coordenado dos controladores de amortecimento ESPs, sendo possível explorar o método em outras aplicações importantes na análise da estabilidade a pequenas perturbações, como o ajuste de outros controladores e dispositivos do SEP.

## Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), proc. 2014/23741-9.

## Referências

- Bazaraa, M. S., Sherali, H. D. and Shetty, C. M. (2006). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*, 3 edn, Wiley-Interscience.
- De Mello, F. P. and Concordia, C. (1969). Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **88**(4): 316–329.
- Deckmann, S. M. and Da Costa, V. F. (1994). A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies, *IEEE Transactions on Power Systems* **9**(2): 965–971.
- Fortes, E. V., Araujo, P. B. and Macedo, L. H. (2016). Coordinated tuning of the parameters of PI, PSS and POD controllers using a specialized Chu-Beasley's genetic algorithm, *Electric Power Systems Research* **140**: 708 – 721.
- Fortes, E. V., Araujo, P. B., Macedo, L. H. and Gamino, B. R. (2016). Ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores ESP e IPFC-POD usando um algoritmo multi-start, *Congresso Brasileiro de Automação (CBA)*, Vitória - ES, pp. 1–6.
- Fortes, E. V., Araujo, P. B., Macedo, L. H., Gamino, B. R. and Martins, L. F. B. (2016). Analysis of the influence of PSS and IPFC-POD controllers in small-signal stability using a simulated annealing algorithm, *IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Curitiba - PR, pp. 1–8.

- Fortes, E. V., Araujo, P. B., Macedo, L. H., Gamino, B. R. and Miotto, E. L. (2016). Ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores estabilizadores de sistema de potência via algoritmo genético de chu-beasley especializado, *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, Vitória - ES, pp. 1–12.
- Fortes, E. V., Macedo, L. H., Araujo, P. B. and Romero, R. (2018). A VNS algorithm for the design of supplementary damping controllers for small-signal stability analysis, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **94**: 41–56.
- Fortes, E. V., Macedo, L. H., Martins, L. F. B. and Miotto, E. L. (2017). A fireworks metaheuristic for the design of PSS and TCSC-POD controllers for small-signal stability studies, *Latin American Congress on Generation, Transmission and Distribution (CLAGTEE)*, Mar del Plata - AG, pp. 1–6.
- Fortes, E. V., Miotto, E., Araujo, P. B., Pupin, C. and Menezes, M. M. (2015). Ajuste dos parâmetros de controladores suplementares de amortecimento utilizando o algoritmo bacterial foraging optimization, *Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE)*, Campina Grande - PB, pp. 1–6.
- Gamino, B. R., Araujo, P. B., Fortes, E. V., Martins, L. F. B. and Miotto, E. L. (2016). Coordinated tuning of PSS and TCSC-POD controller using an elite genetic algorithm, *IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Curitiba - PR, pp. 1–8.
- Glover, F. and Kochenberger, G. (2003). *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic, Norwell MA, USA.
- Hansen, P. and Mladenović, N. (2001). Variable neighborhood search: Principles and applications, *European Journal of Operational Research* **130**(3): 449–467.
- Heffron, W. G. and Phillips, R. A. (1952). Effect of a modern amplidyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators [includes discussion], *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems* **71**(1): 692–697.
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*, MacGraw-Hill, New York.
- Martins, L. F. B., de Araujo, P. B., de Fortes, E. V. and Macedo, L. H. (2017). Design of the PI–UPFC–POD and PSS damping controllers using an artificial bee colony algorithm, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* **28**: 762–773.
- Martins, L. F. B., Fortes, E. V., Araujo, P. B. and Gamino, B. R. (2016). Atuação do FACTS SSSC modelado por injeções de corrente no sistema elétrico de potência, *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Natal - RN, pp. 1–6.
- Martins, L. F. B., Gamino, B. R., de Araujo, P. B., Fortes, E. V. and Miotto, E. L. (2016). Comparison between artificial bee colony and particle swarm optimization algorithms in the tuning of PSS and UPFC-POD controllers, *IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Curitiba - PR, pp. 1–8.
- Menezes, M. M., Araujo, P. and 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, *IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, IEEE, Juíz de Fora - MG, pp. 1–6.
- Miotto, E. L., Araujo, P. B., Gamino, B. R., Fortes, E. V. and Martins, L. F. B. (2016). Coordinated tuning of the parameters of supplementary controllers damping using bio-inspired algorithms, *IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Curitiba - PR, pp. 1–8.
- Miotto, E. L., Gamino, B. R., Fortes, E. V., Araujo, P. B. and Martins, L. F. B. (2016). Análise estática e dinâmica da influência do generalized unified power flow controller no sistema elétrico de potência, *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, Vitória - ES, pp. 1–6.
- Moura, R. F., Furini, M. A. and Araujo, P. B. (2012). Estudo das limitações impostas ao amortecimento de oscilações eletromecânicas pelos zeros da FTMA de controladores suplementares, *Controle & Automação* **23**: 190–201.
- Pádua Júnior, C. R., Takahashi, A. L. M., Furini, M. A. and Araujo, P. (2013). Proposta de um modelo para análise de estabilidade a pequenas perturbações baseado na lei de kirchhoff para correntes, *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*, Fortaleza - CE, pp. 1–6.
- Pupin, C. E., Araujo, P. B., Menezes, M. M. and Fortes, E. V. (2015). Ajuste de controladores ESP e POD de sistemas de potência pela técnica particle swarm optimization, *Latin American Congress on Generation, Transmission and Distribution (CLAGTEE)*, São José dos Campos - Brazil, pp. 1–6.
- Rogers, G. J. (2000). *Power system oscillation*, Kluwer Academic Publishers, London.
- Valle, D. and 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.
- Yang, N., Liu, Q. and McClell, J. D. (1998). TCSC controller design for damping interarea oscillations, *IEEE Transactions on Power System* **13**(14): 1304–1310.