

Estratégias de Controle para Sintonização Ótima de PSS Utilizando Crow Search Algorithm

Raimundo N. D. Costa Filho¹, Éder D. C Pereira²

¹Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica– Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Balsas, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial– Universidade Federal do Maranhão (UFMA), São Luís, Brasil

raimundo.diniz@ufma.br, ederpereira1805@gmail.com

Abstract - *This work applies three different strategies to tune the Power System Stabilizer (PSS) parameters in multi-machine electrical systems. The difference between the three strategies is based on the number of decision variables used in the optimization process, while the objective function aims to maximize the minimum damping of the electrical system considering several operating points. The optimization technique used is the metaheuristic called CSA (Crow Search Algorithm). CSA is a recent metaheuristic that is based on the intelligent behavior of crows. The results and discussions are obtained using an electrical system with 5 generators and 7 buses.*

Resumo- *Este trabalho aplica três diferentes estratégias para sintonizar os parâmetros Power System Stabilizer (PSS) em sistemas elétricos multimáquina. A diferença entre as três estratégias fundamenta-se no número de variáveis de decisão utilizadas no processo de otimização, enquanto que a função objetivo almeja maximizar o amortecimento mínimo do sistema elétrico considerando vários pontos de operação. A técnica de otimização empregada é a metaheurística denominada de CSA (Crow Search Algorithm). O CSA é uma recente metaheurística que é baseada no comportamento inteligente dos corvos. Os resultados e discussões são obtidos com o emprego de um sistema elétrico de 5 geradores e 7 barras.*

1. Introdução

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) estão constantemente submetidos à ocorrência de perturbações, que podem ser causadas por diferentes razões. Estas perturbações podem provocar oscilações eletromecânicas de baixa frequência no sistema elétrico. Tais oscilações, dependendo de sua frequência, podem ser de modo interárea (0,1-0,7 Hz), modo local (0,7-2,0 Hz) e modo intraplanta (0,7-2,0 Hz). No modo interárea um grupo de geradores de uma determinada área oscila contra outro grupo de geradores de outra área. No modo local as unidades geradas de um determinado local ficam oscilando contra o restante do sistema elétrico de potência. Finalmente, no modo intraplanta há oscilações entre unidades geradoras de uma mesma planta [Kundur 1994].

Para atenuar estas oscilações, diferentes tipos de controladores são utilizados, e o mais comum são os PSS (Power Systems Stabilizers) [Kundur 1994], [Rogers 2000]. Os PSS do tipo convencional são os mais utilizados na literatura, visto que, este tipo de PSS pode ser facilmente sintonizado em um ambiente online e a incerteza da estabilidade relacionada a outras estruturas de PSS. Os PSS do tipo convencional são constituídos por um ganho, um bloco washout e dois blocos do tipo lead-lag. O ganho é representado pela constante K_{pss} , o bloco washout é retratado pela constante T_w e os blocos lead-lag são constituídos pelas constantes T_1 , T_2 , T_3 e T_4 . Na literatura, três estratégias foram exploradas na sintonização de PSS [Rabih et al. 2010], [Simfukwe et al. 2011]: a primeira envolve somente a otimização do ganho K_{pss} ; a segunda abrange a otimização do ganho K_{pss} e das constantes de tempo T_1 e T_2 e a terceira incluir os parâmetros da segunda estratégia juntamente com as constantes de tempo T_3 e T_4 .

As primeiras técnicas utilizadas para sintonizar PSS foram baseadas na teoria de controle clássico [Boukarim et al. 2000], porém com o advento e o aperfeiçoamento das técnicas metaheurísticas, os pesquisadores aplicaram tais técnicas para sintonização de PSS nos SEP, como exemplos: algoritmos genéticos [Bomfim et al. 2000], o algoritmo inspirado na ecolocalização de morcegos [Ali 2014], otimização por enxame de partículas em [Abido 2002], colônia de formigas [Peres et al. 2015] e algoritmo dos vaga-lumes [Singh et al. 2019]. O objetivo deste trabalho é em analisar a influência das estratégias relacionadas na sintonização de PSS utilizando uma recente metaheurística denominada de CSA (*Crow Search Algorithm*). A escolha do algoritmo CSA é baseada na rápida convergência conforme as aplicações relatadas em [Hussien et al. 2020].

O trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta a descrição do problema e o modelo do PSS utilizado nas simulações, a Seção 3 descreve os principais passos do algoritmo CSA, a Seção 4 apresenta os resultados obtidos nas simulações e na Seção 5 são expostas as conclusões desta pesquisa.

2. Descrição do problema

2.1 Avaliação da estabilidade angular a pequena perturbação

O estudo da estabilidade a perturbação pequena nos sistemas de energia elétrica é representado pelo conjunto de equações diferenciais- algébricas. A análise da estabilidade a pequenas perturbações envolve a linearização das referidas equações em torno de um ponto de operação (x_0, r_0) obtido por um programa de fluxo de potência (Neste trabalho foi utilizado o software ANAREDE) [Kundur 1994]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta r \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde o vetor x representa o conjunto das variáveis de estado e r é o vetor das variáveis algébricas.

Assumindo que a matriz Jacobiana J_4 é não singular, a matriz de estado do sistema pode ser obtida eliminando o vetor das variáveis algébricas Δr [Kundur 1994]:

$$\dot{\Delta x} = (J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3) \Delta x = A \Delta x \quad (2)$$

Onde o símbolo A representa a matriz de estado do sistema.

A avaliação da estabilidade a perturbação pequena está baseada na análise dos autovalores da matriz de estado do sistema. Os autovalores podem ser reais ou complexos conjugados [Kundur 1994]:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (3)$$

A parte real σ está relacionada ao crescimento exponencial da resposta. Já a parte imaginária determina a frequência de oscilação do respectivo modo de oscilação. A frequência do modo de oscilação em Hz é dada por $f = \frac{\omega}{2\pi}$ [Kundur 1994]. A razão de amortecimento para esta frequência é dada pela Equação (4) [Kundur 1994]. Sistemas estáveis apresentam razão de amortecimento positiva.

$$\zeta(\%) = \left(\frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \right) \times 100 \quad (4)$$

2.2 Modelo do sistema de potência

Os geradores são descritos pelo modelo de quarta ordem do programa PacDyn [PacDyn 2011]. Os reguladores de tensão, ou simplesmente AVR (*Automatic Voltage Regulator*) são descritos pelo modelo com um ganho K_a e uma constante de tempo T_a . Relativo aos PSS, o modelo empregado é apresentado na Figura 1 (junto com o AVR). Ademais, a estrutura de controle empregada neste trabalho corresponde ao controle descentralizado, onde o PSS de cada gerador é alimentado pelo sinal terminal do próprio gerador.

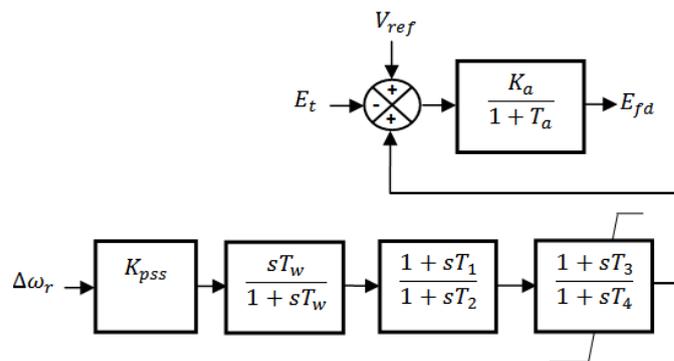


Figura 1. Modelo do PSS e AVR.

Fonte: Os autores.

2.3 Função objetivo

Três estratégias foram utilizadas para sintonizar e coordenar PSS. As estratégias 1, 2 e 3 são descritas nas equações (5) - (7), respectivamente. A Equação (5) indica que devemos maximizar a razão de amortecimento sujeito aos limites mínimos e máximos dos ganhos cada PSS. Para esta estratégia os valores das constantes de tempo dos blocos *lead-lag* são pré-definidas antes do processo de otimização. Na Equação (6) a função

objetivo é mesma da Equação (5), porém os valores de T_1 e T_2 são otimizados junto com o ganho e supondo que $T_3 = T_1$ e $T_4 = T_2$. Na Equação (7), idem equação (6), mas com todas as constantes dos PSS participando do processo de otimização.

A utilização de dois "min" na função objetivo se deve ao fato que o primeiro calcula o mínimo amortecimento de cada matriz de estado em malha fechada A_i ($1 \leq i \leq N_{po}$) e N_{po} é a quantidade de pontos de operação, e o segundo "min" determina o menor amortecimento dentre todos os encontrados pelo primeiro. Desta maneira, assegura-se robustez no processo de sintonização dos PSS. As restrições são responsáveis pelos limites inferiores e superiores dos parâmetros dos controladores PSS.

$$f_{obj} = \{100 - \min [\min(\zeta)]\}^2 \quad (5)$$

sujeito a: $K^{min} \leq K \leq K^{max}$

$$f_{obj} = \{100 - \min [\min(\zeta)]\}^2 \quad (6)$$

sujeito a: $\begin{cases} K^{min} \leq K \leq K^{max} \\ T_1^{min} \leq T_1 \leq T_1^{max} \\ T_2^{min} \leq T_2 \leq T_2^{max} \end{cases}$

$$f_{obj} = \{100 - \min [\min(\zeta)]\}^2 \quad (7)$$

sujeito a: $\begin{cases} K^{min} \leq K \leq K^{max} \\ T_1^{min} \leq T_1 \leq T_1^{max} \\ T_2^{min} \leq T_2 \leq T_2^{max} \\ T_3^{min} \leq T_3 \leq T_3^{max} \\ T_4^{min} \leq T_4 \leq T_4^{max} \end{cases}$

3. CSA

Os corvos são considerados uma das aves mais inteligentes. O seu cérebro é proporcionalmente do mesmo tamanho do ser humano. Um dos comportamentos inteligentes dos corvos é que este pássaro esconde seu alimento e engana seu colega, fazendo de conta que guardou a comida em outro lugar.

Ademais, os corvos têm um hábito ganancioso pelo qual seguem os outros pássaros para descobrir onde escondem seus alimentos. Desta maneira, os corvos encontram a comida escondida pelos outros pássaros e depois a roubam. Baseado neste comportamento inteligente, Askarzadeh desenvolveu o algoritmo CSA [Askarzadeh 2016]. Os princípios básicos do CSA são:

- i. Os corvos vivem na forma de população.
- ii. Os corvos possuem memória com o objetivo de memorizar suas melhores experiências
- iii. Os corvos tentam se aproximar do esconderijo dos outros corvos.
- iv. De modo a evitar serem roubados, os corvos tomam precauções.

Semelhantemente as outras metaheurísticas baseadas em população, o algoritmo CSA é inicializado aleatoriamente em um espaço d -dimensional, onde d é a dimensão do problema (número de variáveis de decisão). A posição de cada corvo é uma solução factível do problema considerado. A cada iteração t , a posição de um corvo i é especificada por $x^{i,t} = [x_1^{i,t}, x_2^{i,t}, \dots, x_d^{i,t}]$. Cada corvo possui uma memória cujo objetivo é memorizar a posição dos esconderijos. Na iteração t , a posição dos esconderijos do corvo i é dado por $m^{i,t} = [m_1^{i,t}, m_2^{i,t}, \dots, m_d^{i,t}]$. Para atualizar a posição do corvo i , as seguintes etapas são desempenhadas:

Etapa 1: Um corvo j é selecionado aleatoriamente ($1 \leq j \leq N$), onde N é o tamanho da população. O corvo i tentará seguir o corvo j para encontrar a posição do esconderijo (m^j). Neste caso, baseado na consciência do corvo j que está sendo seguido pelo corvo i , duas situações podem ocorrer: (1) o corvo j sabe que está sendo seguido ou (2) o corvo j não sabe que está sendo seguido. Para simular estas situações, um número com distribuição uniforme, no intervalo $[0,1]$, é gerado. Se este valor é maior do que um parâmetro denominado de probabilidade de consciência (*AP- Awareness Probability*), então siga para a etapa 2. Caso contrário, pule para a etapa 3.

Etapa 2: nesta etapa, um corvo j não sabe que está sendo seguido por um corvo i . Então, o corvo i irá se aproximar do esconderijo do corvo j empregando a Equação (8).

$$x^{i,t+1} = x^{i,t} + r_1 \times fl \times (m^{j,t} - x^{i,t}) \quad (8)$$

Onde $x^{i,t+1}$ é a posição do corvo i na iteração $t+1$, $x^{i,t}$ é a posição do corvo i na iteração t , $m^{j,t}$ é posição memorizada do corvo j na iteração t , r_1 é um número aleatório uniforme e fl é denominado de comprimento do voo.

Etapa 3: o corvo j sabe que está sendo seguido pelo corvo i . Logo, para proteger seu esconderijo o corvo j jengana o corvo i seguindo aleatoriamente para outra posição do ambiente (espaço de busca).

As etapas 1-3 podem ser resumidas na Equação (9).

$$x^{i,t+1} = \begin{cases} x^{i,t} + r_1 \times fl \times (m^{j,t} - x^{i,t}), & r_j \geq AP \\ rand, & \text{senão} \end{cases} \quad (9)$$

Após a atualização da posição, o corvo i atualizará sua memória através da Equação (10).

$$m_i^{i,t+1} = \begin{cases} x^{i,t+1}, & f(x^{i,t+1}) < f(m^{i,t}) \\ m^{i,t}, & \text{senão} \end{cases} \quad (10)$$

Onde $f(.)$ indica o valor da função objetivo

Estas etapas são repetidas até um número pré-definido de iterações (t_{max}). O fluxograma do CSA é apresentado na Figura 2.

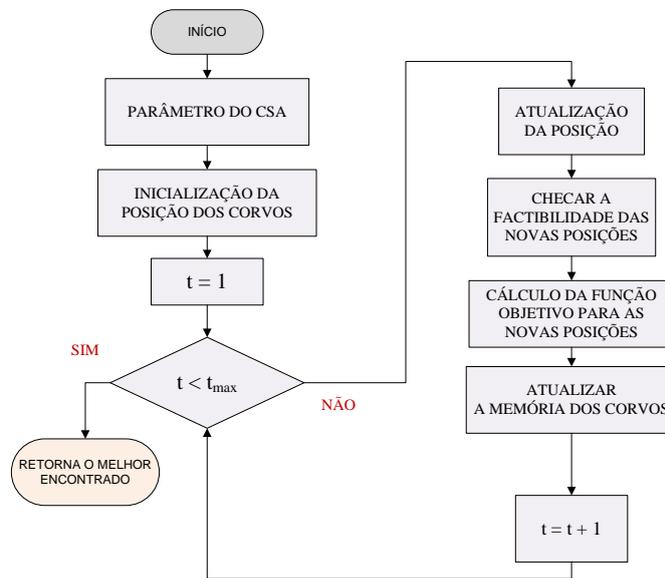


Figura 2. Fluxograma do algoritmo CSA.

Fonte: Os autores.

4. Simulações e resultados

No presente trabalho, o sistema teste utilizado denomina-se JcIta. Este sistema teste possui 7 barras e 5 geradores. O diagrama unifilar é ilustrado na Figura 3 e seus dados podem ser encontrados em [Martins and Lima 1989]. Todas as matrizes de estado foram obtidas através do programa PacDyn [PacDyn 2011]. Várias funções foram escritas em linguagem Matlab para resolver o problema abordado. Os limites dos parâmetros dos PSS são: $0,01 \leq K_{gain} \leq 50$; $0,001 \leq T_1, T_2, T_3, T_4 \leq 2$ [Wang 2013]. Todos os geradores são equipados com AVR com ganho $K_a = 30$ pu e constante de tempo $T_a = 0,05$ segundos. O valor da constante T_w foi de 3 segundos. Os parâmetros utilizados na simulação da técnica CSA são: tamanho da população = 50; máximo número de iterações = 70; $AP = 0,1$ e $fl = 2,0$.

Para a aplicação da metodologia têm-se cinco Pontos de Operação (PO) ou casos diferentes, retirado de [Boukarim et al. 2000] e apresentados na Tabela 1. Observa-se

que o menor valor de amortecimento é dado no Caso 5 com -16,58% e frequência de oscilação de 0,796 Hz. A Figura 4a ilustra o mapa de pólos dos cinco pontos de operação em malha aberta.

Depois de entender o estado do sistema para os cinco pontos de operação, realizou-se o estudo do resíduo. Os resíduos indicam que dois PSS serão instalados no sistema. Portanto, os geradores que serão equipados com PSS são: Segredo (barra 3) e Itaipu (barra 4).

Tabela 1. Condições de operação consideradas no sistema Jclta.

Fonte: Os autores.

Caso #	X_{5-6}	X_{6-7}	Modo 1		Modo 2	
	pu	pu	f(Hz)	$\zeta(\%)$	f(Hz)	$\zeta(\%)$
1	0,39	0,57	0,858	-11,90	0,935	3,83
2	0,50	0,57	0,855	-12,10	0,918	3,50
3	0,80	0,57	0,851	-12,66	0,877	2,77
4	0,39	0,63	0,830	-14,04	0,931	4,04
5	0,39	0,70	0,796	-16,58	0,926	4,18

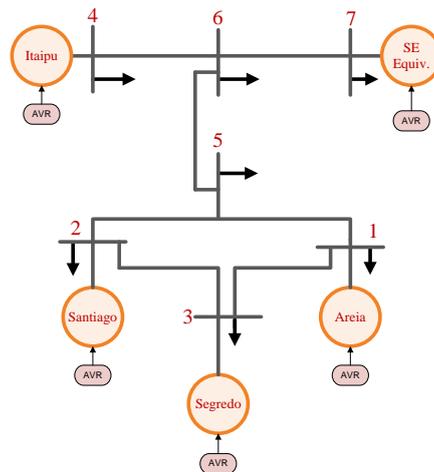


Figura 3. Diagrama unifilar do sistema Jclta.

Fonte: Os autores.

Com o objetivo de armazenar os melhores amortecimentos, o algoritmo foi executado 20 vezes para cada estratégia (o que significa 60 vezes, pois são 3 estratégias empregadas). A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos através do algoritmo CSA para as três estratégias apresentadas anteriormente. Para a estratégia 3, onde somente os ganhos dos PSS foram otimizados, a função de transferência dos PSS dos geradores Segredo e Itaipu são dadas pelas Equações (11) e (12), respectivamente [Boukarim et al. 2000]. Estes resultados podem ser visualizados através dos mapas de malha fechada do sistema com PSS das Figuras 4 (b) - (d).

$$PSS_3(s) = K_{pss_3} \left(\frac{3s}{1+3s} \right) \left(\frac{1+0,3s}{1+0,02s} \right) \left(\frac{1+0,1s}{1+0,008s} \right) \quad (11)$$

$$PSS_4(s) = K_{pss_4} \left(\frac{3s}{1+3s} \right) \left(\frac{1+0,3s}{1+0,03s} \right) \left(\frac{1+0,3s}{1+0,03s} \right) \quad (12)$$

Observa-se que a estratégia 2 apresentou os melhores resultados e a estratégia 1 foi a de menor desempenho. Estes resultados indicam que se o projeto da sintonização dos PSS necessitar de um critério mais rigoroso, como por exemplo, um amortecimento crítico acima do exigido (10%), pode-se efetuar as estratégias 3 e 2, porém se o critério estabelecido na sintonização for mais flexível, pode-se utilizar a estratégia 1, onde são sintonizados somente os ganhos dos PSS. Os resultados obtidos sugerem que para a sintonização de PSS a dimensão do problema de otimização influencia nos resultados. A Tabela 3 mostra as diferentes razões de amortecimento para todas as estratégias utilizadas. Ademais, os valores da Tabela 3 são os melhores de cada estratégia alcançados dentre as 20 execuções do algoritmo CSA.

Tabela 2. Parâmetro dos PSS obtidos para o sistema Jclta

Fonte: Os autores.

	K_{pss}	T_1	T_2	T_3	T_4
Estratégia 3					
PSS_3	41,166	1,6224	0,0010	0,2443	1,6825
PSS_4	6,2724	0,7685	0,0010	1,0939	0,0010
Estratégia 2					
PSS_3	50,000	0,4821	0,0010	-	-
PSS_4	44,164	0,9457	0,0010	-	-
Estratégia 1					
PSS_3	50,000	-	-	-	-
PSS_4	50,000	-	-	-	-

Tabela 3: Quadro resumo das razões de amortecimento para todas as estratégias utilizando o CSA.

Fonte: Os autores.

PO #	Estratégia 3 ζ_{min} (%)	Estratégia 2 ζ_{min} (%)	Estratégia 1 ζ_{min} (%)
1	14,7348	18,3662	12,5488
2	14,7172	18,3549	11,8942
3	14,6390	18,0573	10,4861
4	14,7515	18,3767	10,5303
5	14,7741	18,1301	8,2618

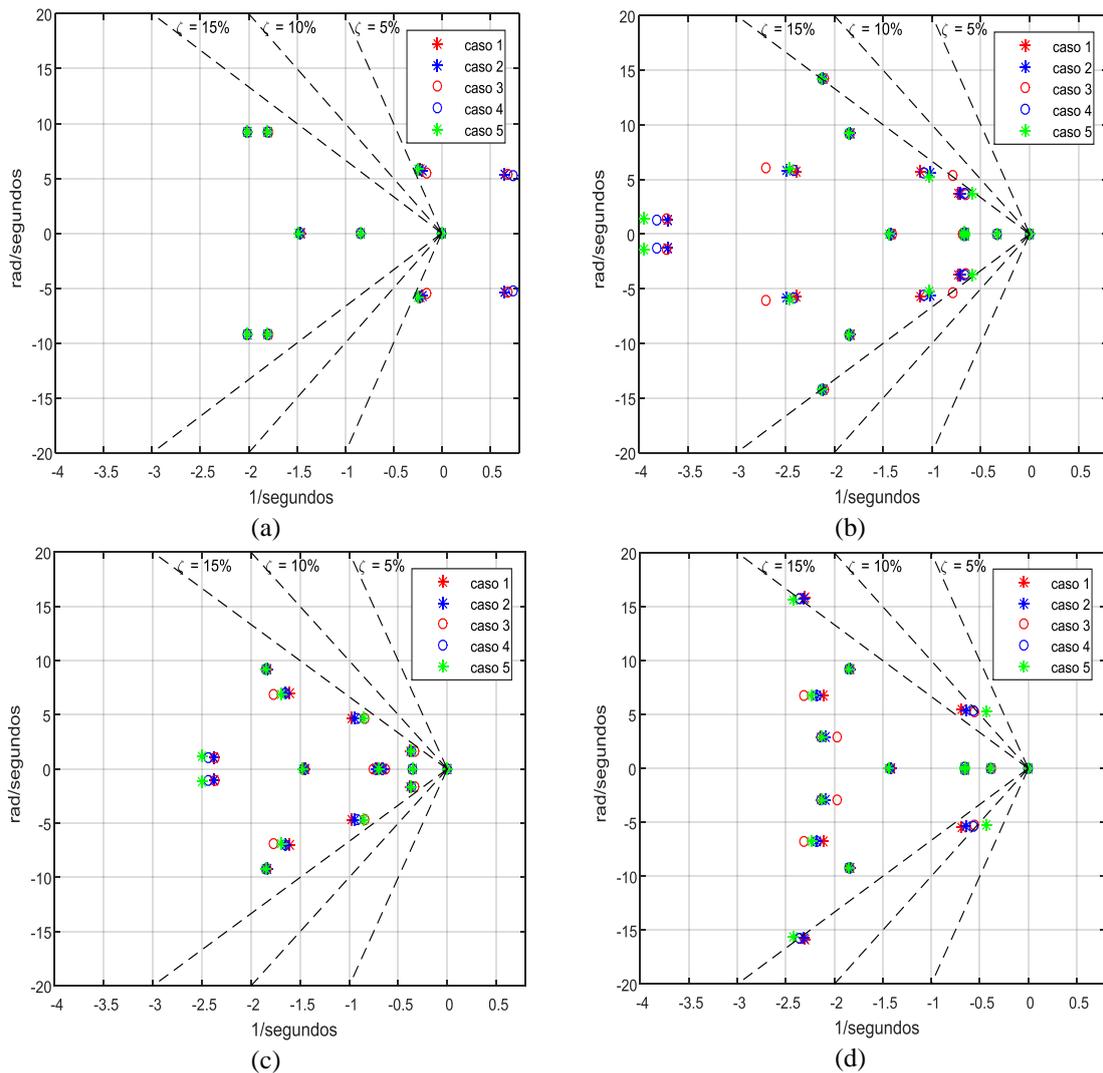


Figura 4. (a) Mapa de pólos em malha aberta, (b) Mapa de pólos em malha fechada com estratégia 1, (c) Mapa de pólos em malha fechada com estratégia 2 e (d) Mapa de pólos em malha fechada com estratégia 3. Fonte: os autores.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou a utilização da metaheurística CSA para a solução do problema de ajuste robusto e coordenado de PSS. Três estratégias de controle foram utilizadas onde basicamente a diferença entre elas se caracteriza pela quantidade de variáveis de decisão dentro do problema de otimização.

A partir da análise dos resultados obtidos utilizando um sistema de 5 máquinas síncronas e 7 barras foi possível concluir que a estratégia 2 apresentou os melhores resultados e a estratégia 1 foi a de menor desempenho.

Estes resultados indicam que se o projeto da sintonização dos PSS necessitar de um critério mais rigoroso, como por exemplo, um amortecimento crítico acima do exigido (por exemplo, 15%), pode-se efetuar as estratégias 3 e 2, porém se o critério estabelecido na sintonização for mais flexível, pode-se utilizar a estratégia 1, onde são sintonizados somente os ganhos dos PSS.

6. Referências

- Abido, M. A. (2002). Optimal Design of Power System Stabilizers Using Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 3, pp. 406- 413.
- Ali, E. S. (2014). Optimization of Power System Stabilizers Using BAT Search Algorithm. *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 61, pp. 683- 690.
- Askarzadeh, A. (2016). A Metaheuristic Method for Solving Constrained Engineering Optimization Problems: Crow Search Algorithm. *Computers & Structures*, vol. 169, pp. 1-12.
- Bomfim, A. L. B.; Taranto, G. N. and Falcão, D. M. (2000). Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Power System*, vol. 15, no. 1, pp. 163- 169.
- Boukarim, G. E., et al. (2000). A Comparison of Classical, Robust and Decentralized Control Designs for Multiple Power System Stabilizers. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 5, pp. 1287-1292.
- Hussien, A. G., et al (2020). Crow Search Algorithm: Theory, Recent Advances, and Applications. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 173548-173565.
- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. McGraw- Hill.
- Martins, N. and Lima, L. T. G. (1989). Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small-Signal Electromechanical Stability Problems. *IEEE Special Publication on Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance*, pp. 17-33.
- PacDyn- Small Stability Analysis and Control V. 9.3.4. (2011). CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, User's Manual.
- Peres, W., Oliveira, E. J., Passo Filho, J. A. and Silva Junior, I. C. (2015). Coordinated Tuning of Power System Stabilizers Using Bio-Inspired Algorithms. *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 419-428.
- Rabih, A. J.; Pal, B. C. and Martins, N. (2010). A Sequential Conic Programming Approach for the Coordinated and Robust Design of Power System Stabilizers. *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 1627-1637.
- Rogers, G (2000). Power System Oscillations. Kluwer Academic Publisher.
- Simfukwe, D. D., Pal, B. C., Jabr, R. A. and Martins, N. (2011). Robust and Low-Order Design of Flexible AC Transmission Systems and Power System Stabilisers for Oscillation Damping. *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 5, pp. 445-452.
- Singh, M., Patel, R. N., Neema, and D. D. (2019). Robust Tuning of Excitation Controller for Stability Enhancement Using Multi-objective Metaheuristic Firefly Algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 44, pp. 136-147.
- Wang, S. K. A Novel Objective Function and Algorithm for Optimal PSS Parameter Design in a Multi-Machine Power System. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 522-531.