

Ajuste Ótimo de ESP e SVC-POD para Amortecimento de Oscilações

Wesley Peres*, Bruna C. Ferreira*, Fabrício C. Gonçalves*, Felipe L. S. Magalhães*, Junior N. N. Costa*, Paulo S. P. Pessim*, Rafael P. Souza*, Samuel J. S. Silva*, Victor F. Carvalho*, Anderson S. Santos*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João Del Rei (e-mail: wesley.peres@ufsj.edu.br)

Abstract: Power system oscillation damping is essential in power system operation. Undamped or poorly-damped oscillations can limit the power transfer capability as well as cause blackouts. To deal with this problem, power system stabilizers (PSS) installed on synchronous generators have been used since the seventies. Another option is to use a power oscillation damper controller (POD) fitted on FACTS devices like Static VAR Compensators (SVC). In order to improve the power system stability, robust and optimal design of stabilizers and POD must be done. Considering the good quality solutions provided by metaheuristics, this paper compares four techniques (Whale Optimization Algorithm, Grey Wolf Optimization, Gravitational Search Algorithm and Genetic Algorithm) in solving the optimization problem aforementioned. The oscillation damper controllers (PSS and POD) tuning is formulated as an optimization problem aiming at maximizing the damping ratio of the dominant eigenvalue in closed-loop operation taking into account several operating conditions to ensure robustness. Results for a two-area power system are discussed.

Resumo: O amortecimento de oscilações de potência é essencial na operação de sistemas de potência. Oscilações não amortecidas ou fracamente amortecidas podem limitar a capacidade de transferência de potência e causar blecautes. Para resolver esse problema, estabilizadores de sistemas de potência (ESP) instalados em geradores síncronos têm sido utilizados desde a década de setenta. Outra opção é utilizar um controlador denominado *Power Oscillation Damper (POD)* em dispositivos *FACTS* tais como o Compensador Estático de Reativos (CER). Com o objetivo de melhorar a estabilidade dos sistemas de potência, um projeto ótimo e robusto de ESP e *POD* deve ser realizado. Considerado as soluções de boa qualidade fornecidas por metaheurísticas, esse artigo compara quatro técnicas (*Whale Optimization Algorithm*, *Grey Wolf Optimization*, *Gravitational Search Algorithm* e Algoritmos Genéticos) na solução do problema de otimização mencionado. O ajuste de controladores ESP e *POD* é formulado como um problema de otimização com o objetivo de maximizar o coeficiente de amortecimento do autovalor dominante em malha fechada considerando vários pontos de operação para garantia de robustez. Resultados para um sistema de duas áreas são discutidos.

Keywords: Power System Oscillation; Power System Stabilizers; Power Oscillation Damper; Static VAR Compensator; Metaheuristics.

Palavras-chaves: Amortecimento de Oscilações de Potência; Estabilizadores de Sistemas de Potência; *Power Oscillation Damper*; Compensador Estático de Reativo; Metaheurísticas.

1. INTRODUÇÃO

Conforme (Kundur 1994), o amortecimento de modos de oscilação local e interárea é crucial para a operação dos sistemas elétricos. Enquanto o amortecimento de modos locais (1-3 Hz) é feito através dos Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) instalados em geradores síncronos (Demello and Concordia 1969), o amortecimento de modos interárea (0,1 – 1,0 Hz) necessita de uma estratégia de controle mais elaborada. A primeira opção é o ajuste coordenado (simultâneo) dos diversos ESP no sistema (Martins et al. 1993). Outra opção é a utilização de controladores de amortecimento denominados *Power Oscillation Damper (POD)* nos dispositivos *FACTS* (Hingorani and Gyugyi 2000). Os dispositivos *FACTS* são baseados em eletrônica de alta

potência e atuam nos parâmetros série e paralelo do sistema elétrico para efetuar o controle de potência e de tensão (Pal and Chaudhuri 2005). Entre tais dispositivos, encontra-se o Compensador Estático de Reativos (CER) ou *Static Var Compensator (SVC)*, que, em regime permanente, atua como uma susceptância variável para o ajuste da tensão nodal em um valor especificado. Em regime dinâmico, conforme (Hingorani and Gyugyi 2000; Martins et al. 1993; Peres 2019), também pode-se modular a susceptância do *SVC* através de um controlador *POD* para o amortecimento de modos de oscilação.

Considerando a existência de vários estabilizadores e controladores *POD* nos sistemas, um ajuste adequado de parâmetros deve ser realizado visando a melhoria da estabilidade da rede. Se tratando de sistemas com *SVC-POD*,

diversas técnicas foram investigadas na literatura para o projeto de estabilizadores e controladores *POD*, destacando-se os métodos de controle clássico (Martins et al. 1993), técnicas de controle robusto (*Linear Matrix Inequalities*) (Pal and Chaudhuri 2005), métodos de otimização baseados em derivadas (Simfukwe et al. 2012) e métodos de otimização metaheurísticos (Abido and Abdel-Magid 2003; Fallahi et al. 2009; Mondal, Chakrabarti, and Sengupta 2012; Peres 2019).

Em relação aos métodos metaheurísticos destaca-se a capacidade destes em tornarem o projeto de controladores automático e em fornecerem soluções de boa qualidade em um tempo de solução razoável. Entretanto, dois pontos negativos são constantes nesses métodos: (i) a não reprodutibilidade de resultados e (ii) a quantidade de parâmetros a serem ajustados para cada algoritmo (que são específicos para cada problema). Assim, a comunidade científica busca constantemente propor novos métodos que resolvam tais problemas.

Nesse contexto, o presente artigo visa a solução do problema de ajuste coordenado de ESP e *POD-SVC* para o amortecimento de oscilações usando três metaheurísticas recentemente propostas na literatura. Deseja-se maximizar o coeficiente de amortecimento do autovalor dominante em malha fechada considerando diferentes pontos de operação para a garantia de robustez. Para tanto, compara-se o desempenho de quatro métodos: *Whale Optimization Algorithm*, *Grey Wolf Optimization*, *Gravitational Search Algorithm* e Algoritmo Genético.

Resultados para um sistema de duas áreas e quatro geradores (Peres 2019; Sauer and Pai 1998) são discutidos.

2. MODELAGEM DO SISTEMA

Nessa seção apresenta-se a modelagem do sistema de potência, do *SVC* e dos controladores de amortecimento. Ressalta-se que neste artigo as siglas *SVC* e *CER* são equivalentes e serão utilizadas de forma indistinta.

2.1 Modelo do Sistema de Potência

O sistema de potência é representado por um conjunto de equações algébricas e diferenciais que é linearizado no ponto de operação no qual se deseja avaliar a estabilidade. Após a linearização e manipulações algébricas, é obtida a modelagem em espaço de estados (equação (1)) (Sauer and Pai 1998).

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u \end{aligned} \quad (1)$$

em que A , B , C e D denotam as matrizes de transição de estado, entrada, saída e de transmissão direta. Adicionalmente Δx representa as variáveis de estado (tensões internas, velocidade, ângulo interno, tensão de campo, susceptância do *SVC*, etc.), Δu contém as variáveis de entrada (tensões de referência do *SVC* e do regulador de tensão dos geradores) e Δy são as variáveis de saída do sistema (utilizadas na entrada dos estabilizadores e do *POD*). A modelagem detalhada utilizada nesse trabalho pode ser obtida em (Peres 2019). A estabilidade a pequenas perturbações do sistema é avaliada a partir dos autovalores da matriz A . O autovalor mais próximo ao eixo

imaginário é denominado autovalor dominante. O sistema é estável se o coeficiente de amortecimento ξ do autovalor dominante é positivo.

2.2 Modelo do Compensador Estático de Reativos

O *SVC* é uma associação paralela de um Reator Controlador a Tiristor e um banco de capacitores. A Fig. 1 apresenta o modelo em regime permanente do *SVC*, no qual a susceptância b_{SVC} ou potência reativa Q_{SVC} são ajustadas para que a tensão V_k seja mantida em seu valor de referência V_{REF2k} (Ambriz-Perez, Acha, and Fuerte-Esquivel 2000). Na Fig. 2 tem-se a representação dinâmica do equipamento através de um bloco de primeira ordem. Ressalta-se que, em regime dinâmico, tem-se a modulação da susceptância através do sinal V_{PODk} , fornecido pelo *Power Oscillation Damper*.

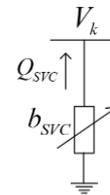


Fig. 1 Modelo em regime permanente do *SVC*.

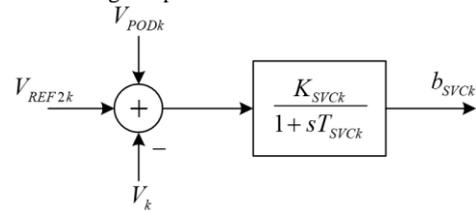


Fig. 2 Modelo em regime dinâmico do *SVC*.

2.3 Modelo dos Estabilizadores e do Controlador *POD*

Tanto o ESP instalado nos geradores quanto o *POD* instalado no compensadores estáticos possuem a estrutura da equação (2).

$$PSS_p(s) = K_p \cdot \frac{(s \cdot T_w)}{(1 + s \cdot T_w)} \cdot \frac{\left(1 + s \frac{\sqrt{\alpha_p}}{\omega_p}\right)^{nbl}}{\left(1 + s \frac{1}{\omega_p \cdot \sqrt{\alpha_p}}\right)^{nbl}} \quad (2)$$

em que $p = 1, \dots, (npss + npod)$. Os parâmetros de ajuste são: ganho (K_p) e compensação de fase (α_p e ω_p). O número de blocos nbl e a constante de fase do filtro *washout* T_w são conhecidos (Kundur 1994).

3. AJUSTE POR OTIMIZAÇÃO

3.1 Formulação do Problema de Otimização

O problema de otimização visa maximizar o coeficiente de amortecimento do autovalor dominante em malha fechada considerando vários pontos de operação. Esse índice é representado por ξ_{min} . O problema de otimização é formulado na equação (3).

$$\begin{cases} \text{Max} & \xi_{min} \\ & 0,01 \leq K_p \leq 20 \\ \text{s. a.} & 0,10 \leq \alpha_p \leq 10 \\ & 0,4\pi \leq \omega_p \leq 4\pi \end{cases} \quad (3)$$

3.2 Solução por Metaheurística

As metaheurísticas aqui utilizadas são baseadas no conceito de uma população de indivíduos que interagem entre si visando encontrar soluções de boa qualidade. Assim, cada indivíduo representa uma solução para o problema de ajuste.

A título de ilustração, considere que se deseja ajustar 1 ESP e 1 POD. Um indivíduo ind_i será representado conforme a equação (4), sendo os parâmetros de índice “1” associados ao estabilizador de gerador e os parâmetros de índice “2” associados ao *POD* do *SVC*.

$$ind_i = [K_1 \quad K_2 \quad \alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \omega_1 \quad \omega_2] \quad (4)$$

Um processo de realimentação é conduzido para cada ponto de operação, no qual os dois controladores são realimentados simultaneamente. Feito isso, tem-se um autovalor dominante com seu fator de amortecimento para cada cenário (ponto de operação). O menor deles será o ξ_{min} associado ao indivíduo ind_i .

3.3 Breve Descrição dos Métodos de Otimização

Deseja-se comparar o desempenho de quatro métodos: *Whale Optimization Algorithm (WOA)*, *Grey Wolf Optimization (GWO)*, *Gravitational Search Algorithm (GSA)* e Algoritmo Genético (AG). Os três primeiros métodos são relativamente novos e o AG é um método consolidado na comunidade científica. A comparação será feita partindo-se da mesma população inicial. Adicionalmente serão considerados 30 indivíduos e 50 gerações. Com isso, tem-se uma comparação mais justa entre os métodos.

Os métodos originais foram utilizados, tendo sido empregados os códigos computacionais disponibilizados juntamente com os artigos nos quais os métodos *WOA*, *GWO* e *GSA* foram propostos. Em relação ao AG, foi utilizada a *toolbox* do MATLAB, versão 2010a.

Recentemente proposto na literatura, o *WOA* é baseado no processo de busca por alimentos feito por baleias jubartes (Mirjalili and Lewis 2016). Mecanismos de caça, tais como circundamento, são modelados no algoritmo.

O *GWO* é inspirado nos conceitos de liderança, hierarquia e mecanismo de caça de lobos cinzentos (Mirjalili, Mirjalili, and Lewis 2014).

O *GSA* foi proposto por (Rashedi, Nezamabadi-pour, and Saryazdi 2009) e é baseado nas leis de atração de Newton, no qual as massas representam as soluções. Os indivíduos (agentes) se movem no espaço de busca de acordo com as leis da física.

Os Algoritmos Genéticos são baseados nos mecanismos de seleção natural (Teoria da Evolução de Darwin). Sua operação

é simples e utiliza conceitos de cruzamento e mutação (Holland 1975).

Ambos os métodos são populacionais. O AG possui vários parâmetros a serem ajustados, tais como probabilidade de cruzamento (0,70) e mutação (0,05), tipo de seleção (torneio), etc. Destaca-se que o ajuste de parâmetros é um fator importante que impacta na convergência e na qualidade da solução do algoritmo. O *GSA* possui um conjunto menor de parâmetros que o AG. Nesse quesito, o *GWO* e o *WOA* se destacam por não precisarem de ajuste de parâmetros, o que é um grande avanço.

Por fim, destaca-se que o tempo computacional está relacionado ao número de execuções da rotina de cálculo de autovalores. Considerando 30 gerações, 50 indivíduos e 3 cenários, 4500 execuções da rotina de cálculo de autovalores (método QR) foram feitas.

4. ESTUDO DE CASO

Essa seção apresenta o estudo de caso realizado para um sistema de duas áreas e quatro geradores.

4.1 Descrição do Sistema

O sistema utilizado nesse trabalho, ilustrado na Fig. 3, é adequado para o estudo de oscilações eletromecânicas por apresentar dois modos de oscilação local (na área 1 e na área 2) e um modo interárea entre as áreas 1 e 2. As tensões nos geradores 1 e 4 são 1,03pu; e nos geradores 2 e 3 são 1,01pu. Este é um sistema originalmente proposto em (Sauer and Pai 1998), que foi adaptado em (Peres 2019) para a alocação de um *SVC*. Os dados de linha e parâmetros dinâmicos são detalhados em (Peres 2019).

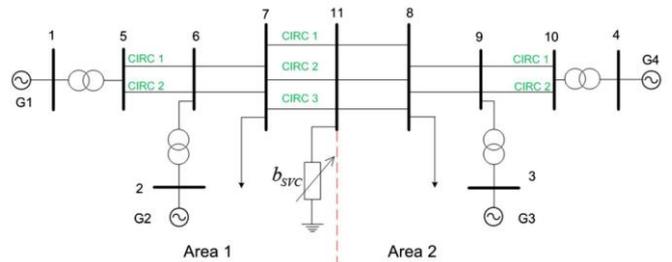


Fig. 3 Sistema teste.

Serão considerados três cenários operativos: (i) caso base, (ii) aumento de 30% na carga e (iii) redução de 30% na carga. Nos casos de variação de carga, o acréscimo ou redução de geração de potência ativa (ΔP_{G1} , ΔP_{G2} e ΔP_{G3}) é proporcional à inércia dos geradores ($H_{G1,G2} = 54s$, $H_{G3,G4} = 63s$). O gerador *G4* é a máquina de balanço. Os dados de carga, geração e do *SVC* em regime permanente são apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2. O *SVC* atua para controlar a tensão na barra 11 em 1,01 pu. Os limites do compensador (em pu) são: $-2,54 \leq b_{SVC} \leq 1,00$.

Tabela 1. Dados de Geração (pu)

Caso	P_{G1}	P_{G2}	P_{G3}	P_{G4}
Base	7,00	7,00	7,00	7,22
+30%	8,89	8,89	9,21	10,14
-30%	5,11	5,11	4,79	4,54

Tabela 2. Dados de Carga e do SVC (pu)

Caso	P_{D7}	P_{D8}	Q_{D7}	Q_{D8}	b_{SVC}
Base	11,59	15,75	-0,74	-0,90	1,00
+30%	15,07	20,48	-0,96	-1,17	1,00
-30%	8,11	11,03	-0,51	-0,63	0,14

4.2 Operação em Malha Aberta

A Tabela 3 apresenta os autovalores em malha aberta (isto é, sem os controladores ESP e SVC-*POD*). Observa-se que o amortecimento dos modos interárea são negativos, caracterizando a instabilidade do sistema. Nesse caso, o amortecimento mínimo é de -3,65% ($\xi_{min} = -3,65\%$).

Tabela 3. Autovalores em Malha Aberta

Caso	Autovalor	ξ (%)	f (Hz)
Base	$0,0601 \pm j4,5195$	-1,33	0,72
	$-0,4592 \pm j6,3670$	7,19	1,01
	$-0,3905 \pm j5,8722$	6,64	0,93
+30%	$0,1731 \pm j4,7350$	-3,65	0,75
	$-0,0845 \pm j6,4034$	1,32	1,02
	$-0,2163 \pm j6,8196$	3,17	1,08
-30%	$0,0541 \pm j4,5021$	-1,20	0,72
	$-0,2973 \pm j6,1306$	4,84	0,97
	$-0,5456 \pm j6,0318$	9,01	0,96

Com o objetivo de estabilizar o sistema, quatro ESP instalados nos geradores (derivados da velocidade terminal) e um *POD* instalado no SVC (derivado do sinal $V_{78} = V_7 - V_8$) serão ajustados. A estrutura de cada controlador possui 2 blocos e a constante de tempo do *washout* é de 3,0 segundos.

4.3 Comparação das Soluções

Todas as simulações foram conduzidas utilizando um computador Intel Core i7 1.80 GHz com 16 GB de RAM e um sistema operacional Windows 10, 64-bits. Foram realizadas, para cada método, dez execuções partindo-se da mesma população inicial. O tempo médio para cada execução foi de 1 minuto. A Fig. 4 apresenta o diagrama de caixas (*boxplot*) obtido a partir dos resultados das simulações: são apresentados os amortecimentos mínimos ξ_{min} considerando os três cenários operativos.

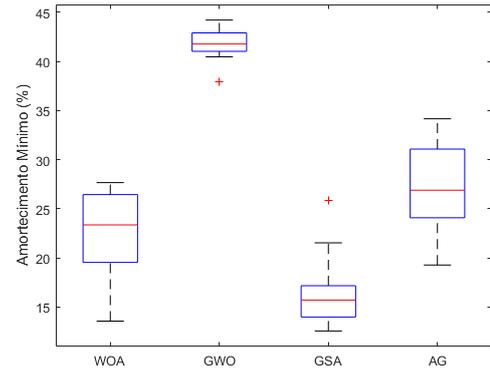


Fig. 4 Comparação das soluções.

Os seguintes pontos sintetizam as observações:

- Com base na mediana (linha vermelha central), é possível ranquear os métodos: *GWO*, *AG*, *WOA* e *GSA*;
- O *GWO* não só apresenta as melhores soluções como também apresenta a menor dispersão entre os métodos;
- Embora os resultados dos métodos *WOA*, *GSA* e *AG* não sejam competitivos com os do *GWO*, ressalta-se que amortecimentos ξ_{min} superiores à 10% são adequados na operação de sistemas elétricos;
- Do ponto de vista do esforço computacional, este está associado ao número de soluções avaliadas (diretamente relacionado ao número de vezes que a rotina de cálculo de autovalores é executada). Como ambos os métodos possuem o mesmo número de indivíduos e gerações, o tempo computacional é aproximadamente o mesmo;
- Ressalta-se que o *AG* e o *GSA* possuem mais parâmetros para ajustar (taxas de mutação e cruzamento para o *AG*, por exemplo) do que o *GWO* e *WOA*. Estes últimos, não possuem parâmetros de ajuste, o que os torna bastante competitivos;
- Ressalta-se que melhorias devem ser feitas nas metaheurísticas aqui tratadas. Em (Peres, Silva Júnior, and Passos Filho 2018), metaheurísticas são hibridizadas com métodos baseados em derivadas para melhoria da etapa de busca local, apresentando resultados promissores. Nesse sentido, tais hibridizações devem ser investigadas para os métodos aqui tratados. Adicionalmente, um estudo a respeito do número adequado de indivíduos e gerações para cada método deve ser conduzido.

4.4 Parâmetros dos Controladores

A Tabela 4 apresenta os resultados associados à melhor solução obtida por cada método (ganhos, parâmetros de compensação de fase, amortecimento dos autovalores dominantes por cenário e amortecimento mínimo). Observa-se que o amortecimento mínimo obtido por cada método está associado ao cenário em que um aumento de 30% na carga foi aplicado.

Tabela 4. Resultados associados à melhor solução de cada método

	WOA	GWO	GSA	AG
K_1 (G1)	20,00	19,34	15,91	18,59
K_2 (G2)	18,06	14,43	16,81	8,13
K_3 (G3)	20,00	19,66	2,60	18,74
K_4 (G4)	17,21	19,04	14,78	17,89
K_5 (SVC)	0,33	2,14	3,23	1,80
α_1 (G1)	10,00	2,14	2,07	4,22
α_2 (G2)	3,03	1,03	1,92	1,87
α_3 (G3)	3,32	2,09	9,56	1,26
α_4 (G4)	1,30	0,74	2,29	2,63
α_5 (SVC)	2,30	0,37	1,13	0,45
ω_1 (G1)	12,57	3,82	2,70	10,27
ω_2 (G2)	12,57	1,68	1,49	4,87
ω_3 (G3)	4,09	5,87	9,80	9,54
ω_4 (G4)	7,40	12,25	10,59	3,10
ω_5 (SVC)	12,57	1,80	5,86	8,57
ξ_{min}^{BASE} (%)	27,68	44,72	27,09	38,83
$\xi_{min}^{+30\%}$ (%)	27,67	44,23	25,83	34,17
$\xi_{min}^{-30\%}$ (%)	32,62	46,22	26,11	36,05
ξ_{min} (%)	27,67	44,23	25,83	34,17

4.5 Simulações no Domínio do Tempo

Considerando os resultados da Tabela 4, a Fig. 5 apresenta a simulação no domínio do tempo em malha fechada. O segundo cenário (com aumento de 30% na carga) foi considerado por apresentar o menor valor de amortecimento para o polo dominante. Foi aplicada uma perturbação positiva de 0,02 pu na tensão de referência do gerador 1 (que passou operar com uma tensão de 1,05pu). A curva ilustra o desvio de velocidade $\Delta\omega_{pu14}$, que confirma a estabilidade alcançada após o ajuste dos controladores.

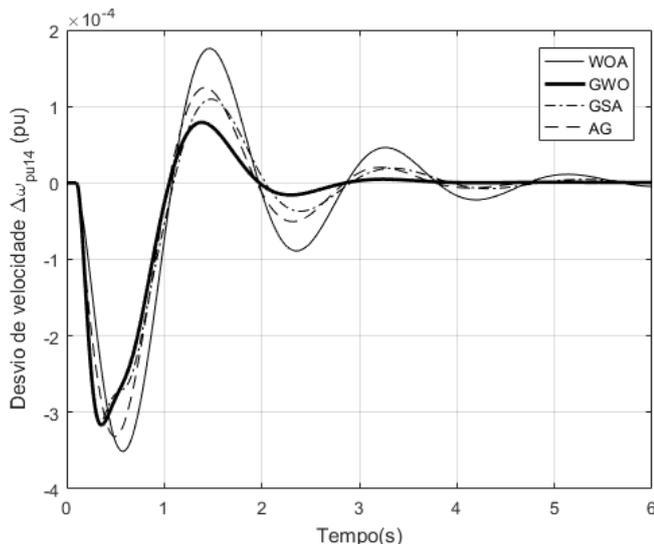


Fig. 5 Simulação no domínio do tempo.

Do ponto de vista prático, conforme (Martins et al. 2000), amortecimentos na faixa de 5 a 10% são adequados para a operação dos sistemas elétricos em malha fechada. Nesse

sentido, ambas as soluções apresentadas na Tabela 4 são adequadas. Para elucidar, uma simulação adicional é realizada. Considerando os parâmetros providos pelo método WOA, no terceiro cenário (carga leve), um degrau de -0,02 pu é aplicado na tensão de referência do gerador 1. A Fig. 6 apresenta a variação da susceptância do SVC.

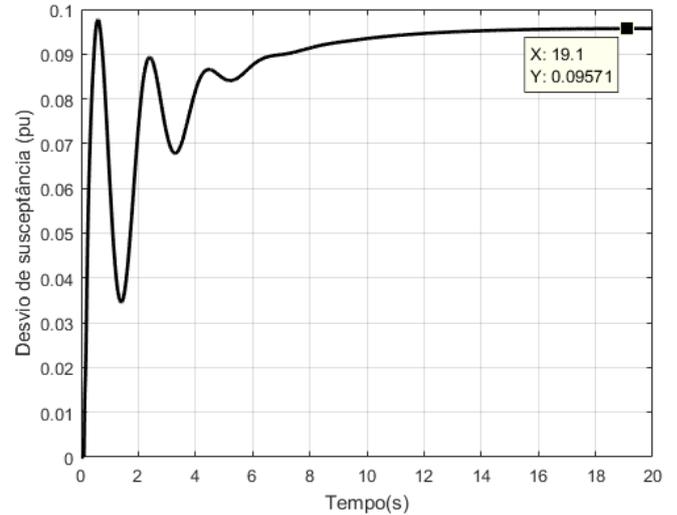


Fig. 6 Simulação no domínio do tempo – desvio de susceptância.

Conforme observado na Fig. 6, uma variação positiva de 0,095 pu é obtida. Isso é justificado, uma vez que a tensão do gerador 1 reduziu e o compensador de reativos deve injetar mais potência reativa para manter a tensão na barra 11 em 1,01 pu. Essa solução foi validada no programa de fluxo de potência com o SVC, considerando o gerador 1 com uma tensão de 1,01 pu (redução de 0,02pu em relação ao valor original de 1,03pu). Após a execução, o SVC passou a operar na faixa linear com uma susceptância de 0,238pu. Considerando o valor inicial dado na Tabela 2 (0,143pu), uma variação de 0,095pu é calculada, que coincide com o valor da Fig. 6 (simulação no domínio do tempo).

As simulações no domínio do tempo foram realizadas na plataforma MATLAB® considerando o modelo linearizado (espaço de estados), conforme realizado em (Martins et al. 1993). Simulações não lineares (incluindo limitadores e saturações), diante de grandes perturbações, também devem ser realizadas para analisar o comportamento do sistema. Ressalta-se que, de forma geral, o projeto utilizando multicenários é robusto para garantir a estabilidade do sistema diante de grandes perturbações.

5. CONCLUSÕES

Esse artigo comparou o desempenho de quatro metaheurísticas na solução do problema de ajuste coordenado, ótimo e robusto de estabilizadores (para geradores síncronos) e de controladores de amortecimento (instalados nos compensadores estáticos de reativos). O projeto visou a maximização do coeficiente de amortecimento do autovalor dominante considerando diversas condições operativas para garantia de robustez.

Do ponto de vista da estabilidade, os controladores projetados estabilizaram o sistema de duas áreas considerado no estudo.

Do ponto de vista dos métodos (*Whale Optimization Algorithm*, *Grey Wolf Optimization*, *Gravitational Search Algorithm* e Algoritmo Genético) foi verificada a superioridade do *GWO* tanto na qualidade dos resultados quanto na menor dispersão. Nesse sentido, deseja-se conduzir hibridizações entre tais métodos de forma a melhorar os seus resultados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES, CNPq e PPGEL/UFSJ pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Abido, M. A. and Y. L. Abdel-Magid. 2003. "Power System Stability Enhancement via Coordinated Design of a PSS and an SVC-Based Controller." *Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems* 2:850–53.
- Ambriz-Perez, H., E. Acha, and C. R. Fuerte-Esquivel. 2000. "Advanced SVC Models for Newton-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies." *IEEE Transactions on Power Systems* 15(1):129–36.
- Demello, Francisco and Charles Concordia. 1969. "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS-88(4):316–29.
- Fallahi, H., M. R. Aghamohammadi, A. Parizad, and A. Mohamadi. 2009. "Enhancing Power System Oscillation Damping Using Coordination between PSS and SVC." Pp. 1–7 in *2009 International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, (EPECS)* .
- Hingorani, NG and L. Gyugyi. 2000. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. 1st ed. Wiley,.
- Holland, J. H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press.
- Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill .
- Martins, N., N. J. P. Macedo, L. T. G. Lima, and H. J. C. P. Pinto. 1993. "Control Strategies for Multiple Static VAR Compensators in Long Distance Voltage Supported Transmission Systems." *IEEE Transactions on Power Systems* 8(3):1107–17.
- Martins, N., G. N. Taranto, J.F.Hauer, and M.J.Gibbard. 2000. *Impact of Interactions Among Power System Controls (Task Force No. 38.02.16)* .
- Mirjalili, Seyedali and Andrew Lewis. 2016. "The Whale Optimization Algorithm." *Advances in Engineering Software* 95:51–67.
- Mirjalili, Seyedali, Seyed Mohammad Mirjalili, and Andrew Lewis. 2014. "Grey Wolf Optimizer." *Advances in Engineering Software* 69:46–61.
- Mondal, D., A. Chakrabarti, and A. Sengupta. 2012. "Optimal Placement and Parameter Setting of SVC and TCSC Using PSO to Mitigate Small Signal Stability Problem." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 42(1):334–40.
- Pal, B. and B. Chaudhuri. 2005. *Robust Control in Power Systems*. Springer.
- Peres, Wesley. 2019. "Multi-Band Power Oscillation Damping Controller for Power System Supported by Static VAR Compensator." *Electrical Engineering* 101(3):943–67.
- Peres, Wesley, Ivo Chaves Silva Júnior, and João Alberto Passos Filho. 2018. "Gradient Based Hybrid Metaheuristics for Robust Tuning of Power System Stabilizers." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 95:47–72.
- Rashedi, Esmat, Hossein Nezamabadi-pour, and Saeid Saryazdi. 2009. "GSA: A Gravitational Search Algorithm." *Information Sciences* 179(13):2232–48.
- Sauer, P. and M. A. Pai. 1998. *Power System Dynamics and Stability*. 1st ed. Prentice Hall.
- Simfukwe, D. D., B. C. Pal, R. A. Jabr, and N. Martins. 2012. "Robust and Low-Order Design of Flexible Ac Transmission Systems and Power System Stabilisers for Oscillation Damping." *IET Generation, Transmission Distribution* 6(5):445–52.