

SINTONIA ROBUSTA DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA EM UM SISTEMA MULTIMÁQUINAS

BETANIA G. DA S. FILHA¹, ALEXANDRE C. DE CASTRO², FERNANDO A. MOREIRA³

1 - Grupo de Pesquisa no Desempenho dos Sistemas Elétricos de Potência, Departamento de Eletrotécnica,
Instituto Federal da Bahia
Campus Salvador, Salvador – BA.
SALVADOR, BRASIL

2 - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba
Campus universitário I, João Pessoa – PB.
JOÃO PESSOA, BRASIL

3- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia
R. Prof Aristides Nóvis, 2 – Federação, 40210-630, Salvador, BA.
SALVADOR, BRASIL

E-mails: betaniafilha@ifba.edu.br, castro@cear.ufpb.br, moreiraf@ufba.br,

Abstract—On this paper, a new technique of selection and parameterization of power system stabilizers is presented. Parameterized controllers are tested for their robustness, response time, damping percentage, and response to disturbances in the system. A comparison with existing controllers is plotted to verify the effectiveness of the technique. Modal analysis methods were used to select the pairs of inputs and outputs of the controller and genetic algorithms in the parameterization process

Keywords—Robust Control, Genetic Algorithm, Relative Gain Array, Singular Values, Dynamic Analysis, Stability.

Resumo—Neste trabalho, uma nova técnica de seleção e parametrização de estabilizadores de sistema de potência é apresentada. Os controladores parametrizados são testados quanto a sua robustez, tempo de resposta, percentual de amortecimento e resposta a distúrbios no sistema. Um comparativo com controladores existentes é traçado para verificar a eficácia da técnica. Foram usados métodos de análise modal para selecionar os pares de entradas e saídas do controlador e algoritmos genéticos no processo de parametrização.

Palavras-chave— Controle Robusto, Algoritmo Genético, Matriz de Ganhos Relativos, Valores Singulares, Análise Dinâmica, Estabilidade.

A estabilidade a pequenas perturbações é traduzida pela existência de amortecimento positivo para todos os modos naturais de oscilação do sistema, quando os mesmos são excitados por perturbações de menor amplitude, ou mesmo flutuações normais de carga (Ayres, 2005). Portanto, o amortecimento dessas oscilações tornou-se o pré-requisito para uma operação segura de um sistema elétrico e a preocupação de engenheiros e operadores (Castro, 2006). Controladores de excitação de geradores síncronos em sistemas de potência desempenham um papel importante para manter a estabilidade sob essas características transientes complicadas (Roy et al, 2017). Com o objetivo de melhorar a estabilidade de sistemas de potência, considerando a dinâmica do sistema, pode ser aplicado um sinal de controle suplementar às malhas de controle de regulação dos geradores. Esse sinal de controle suplementar é gerado por circuitos compensadores, conhecidos como estabilizadores de sistemas de potência (ESP).

Já é conhecido que o ESP, quando ajustado adequadamente, pode proporcionar controle robusto de um sistema de energia (Kundur et al, 1989; Gibbard, 1991). O controle por ESP tem sido utilizado por várias décadas e seu uso está consolidado no setor de energia em todo o mundo, então esse trabalho tem como objetivo propor um procedimento para sintoni-

zar ESP de baixa ordem, visando a obtenção de um controle robusto H_{∞} para amortecimento de pequenas oscilações em um sistema multimáquinas.

2 Materiais e métodos

A capacidade do sistema de manter-se em sincronismo após ser submetido a um distúrbio é conhecida como estabilidade angular ou eletromecânica (Dill, 2013). Para tanto, é preciso identificar as oscilações, conhecidas como oscilações eletromecânicas, que estão associadas ao sistema. Isso pode ser feito analisando os modos (autovalores) associados às equações dessas oscilações. Utilizando Valores Singulares e Matriz de Ganhos Relativos (MGR), é possível selecionar os pares de entrada e saída estratégicos, a partir de suas propriedades (Cruz, 1996; Skogestad e Postlethwaite, 2005). A metodologia desenvolvida neste trabalho está dividida em duas etapas: Seleção dos pares de entrada e saída, onde serão aplicados os controladores, e parametrização dos controladores aplicados. O procedimento pode ser resumido seguindo os seguintes passos:

- Inicialmente eliminam-se as saídas e entradas pouco efetivas ou que resultem em uma combinação de difícil controle, usando a

MGR em regime permanente (adaptado de Castro e Araújo, 2002).

- Assumindo um número de controladores suficiente para atender os pares de entrada e saída selecionados, traçam-se os gráficos de Valor Singular Máximo, $\bar{\sigma}(j\omega)$, para cada conjunto de entradas e saídas.
- O conjunto com boa descentralização e maior $\bar{\sigma}(j\omega)$ na faixa de frequência dos modos de oscilações eletromecânicas críticos é selecionado para aplicação de controladores.
- Definido os pares de entradas e saídas desses controladores, faz-se a parametrização dos seus parâmetros.
- A sintonia dos controladores deve ser feita com um método de busca heurística a ser selecionado de acordo com o seu desempenho. Os parâmetros dos controladores devem ser tais que o controlador seja robusto, usando como critério a norma $H\infty$.

2.1 Seleção de pares de entrada e saída

O procedimento de seleção de pares de entrada e saída para aplicação de controladores utilizará Matrizes de Ganhos Relativos e posteriormente a combinação com Valores Singulares para garantir a descentralização e seleção mais precisa, caso seja necessário.

Inicialmente gera-se a matriz MGR definida por:

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

em que $\lambda_{ij} = g_{ij}b_{ji}$ e b_{ji} é o elemento ji de G^* (matriz inversa generalizada de G), definida por $G^* = (GHG)^{-1}GH$ para $m \leq r$, $\text{Posto}(G) = m$ ou $G^* = GH(GGH)^{-1}$ para $r \leq m$, $\text{Posto}(G) = r$.

Sabe-se que λ_{ij} é uma medida de interação entre a entrada j e a saída i (Skogestad e Postlethwaite, 2005). Verifica-se, também, que λ_{ij} é uma medida do efeito que o controle do restante das variáveis tem no ganho entre u_j e y_i (Milanovic e Duque, 2001). A MGR gerada deve ser do sistema completo em estado estacionário, considerando todas as entradas e saídas de todas as unidades. A partir daí excluem-se os pares de entrada e saída que possuam as seguintes características:

- Pares com $\lambda_{ij} < 0$;
- $A(s)$ saída(s) com $\sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \ll 1$
- Os pares com valores grandes de $\lambda_{ij} > 10$;

Os zeros multivariáveis no semiplano complexo à direita do eixo imaginário podem ser um fator limitante para aplicação de controladores. Eles têm um grande efeito nos picos de resposta, ultrapassagens, largura de faixa, sensibilidade e robustez do sistema (Castro, 2006).

Para os sistemas multimáquinas utilizados nesse artigo, foi feita uma adaptação do método utilizado em Castro (2002) eliminando todos os pares de entrada e saída com $\lambda_{ij} > 10$, pois, segundo Skogestad e Postlethwaite (2005), valores grandes de λ_{ij} podem indicar números de condição grandes também, o que implica em conjuntos difíceis de controlar.

Em adição, testa-se o conjunto de pares de entrada e saída também com os valores singulares da matriz de transferência. $G(j\omega)$, que são definidos por:

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

em que λ_i é o i -ésimo autovalor da matriz, \mathbf{G}^H é a matriz conjugada e transposta de \mathbf{G} e $k = \min(m,r)$, sendo m e r o número de linhas e colunas da matriz \mathbf{G} , respectivamente. Definindo $\bar{\sigma}$ como o maior valor singular, $\underline{\sigma}$ como o menor e a relação, $\gamma = \bar{\sigma}/\underline{\sigma}$ como o número de condição (Cruz, 1996; Skogestad e Postlethwaite, 2005).

Como foi dito, o número de condição elevado ($\gamma > 10$) indica dificuldade de controle, principalmente se $\underline{\sigma} \ll 1$. Portanto, deve-se calcular o número de condição, utilizando os valores singulares, para verificar se o conjunto de pares de entrada e saída serão de fácil controle. Desta maneira, pode-se optar pela exclusão de pares de entrada e saída com estas características, contribuindo para o bom desempenho de controladores simplificados.

2.2 Amortecimento dos modos de Oscilação.

Após a seleção dos pares de entradas e saídas, o próximo passo é desenvolver um projeto de controladores descentralizados para amortecimento das oscilações.

Um dos principais controladores conhecidos, usados largamente no amortecimento dos modos de oscilação, são Estabilizadores de Sistema de Potência (ESP). Basicamente, a estrutura do controlador é composta por sensores para os sinais de entrada, um filtro passa-alta (washout), um amplificador, compensações de avanço e atraso de fase, lead-lags, correspondentes ao compensador dinâmico; filtros de alta frequência e um limitador. Abaixo temos o esquema geral de um controlador clássico, do tipo PSS1A de acordo com o IEEE:

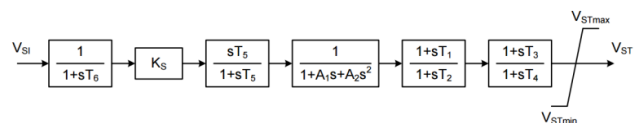


Figura 1: Modelo básico de um estabilizador clássico
Fonte: IEEE, 2016

Os parâmetros dos controladores deverão ser sintonizados de modo que consiga amortecer os modos de oscilações, tornando o sistema estável. A estabilidade do sistema pode ser testada, levando em

consideração três critérios: Robustez, tempo de resposta e o amortecimento mínimo para os modos.

O projeto de controle H_∞ consistem em minimizar os picos de respostas frequenciais de um sistema de malha fechada, diante das entradas exógenas, que, para um sistema MIMO corresponde ao valor singular máximo desse sistema (Skogestad e Postlethwaite, 2005).

A análise de estabilidade aplicada neste trabalho utiliza-se do modelo de sistema $M\Delta$ (Skogestad e Postlethwaite, 2005), ou seja, isolando o bloco de incertezas Δ , e arrumando os demais blocos de modo que resulte no diagrama da Figura 2 onde $M(s) = -W_0(s)T(s)H(s)$.

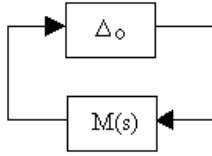


Figura 2: Estrutura $M\Delta$ do sistema

A matriz diagonal $W_0(s)$ representa os limites superiores das incertezas nos canais de controle que corresponde a W_2W_1 e T equivale ao produto da matriz de sensibilidade pelo sistema.

Assumindo que a matriz M e as perturbações Δ sejam estáveis, então o sistema $M\Delta$ será estável para todas as perturbações com $\bar{\sigma}(\Delta) \leq 1, \forall \omega$, se e somente se (Skogestad e Postlethwaite, 2005):

$$\mu(M(j\omega)) < 1, \forall \omega \quad (3)$$

em que $\mu(M)$ é o valor singular estruturado de M . Sabe-se que $\mu(M) \leq \bar{\sigma}(M)$ e que a igualdade ocorre quando a matriz de incertezas, Δ , é cheia, que deve ocorrer com erros de modelagem e exclusão de dinâmica dos geradores, rede de transmissão, etc. Sendo assim, considera-se como condição necessária e suficiente para estabilidade robusta do sistema, com $\bar{\sigma}(\Delta) \leq 1, \forall \omega$, a condição:

$$\bar{\sigma}(M(j\omega)) < 1 \quad \forall \omega \quad (4)$$

Assume-se que o controlador é de estrutura conhecida (descentralizado e de ordem reduzida). Para atingir a robustez, os parâmetros do controlador $H(s)$ são ajustados para solução do seguinte problema de otimização da norma H_∞ :

$$\min[\text{Sup}(\bar{\sigma}(M(j\omega)))] \quad (5)$$

Pois, como vimos anteriormente, $H(s)$ faz parte de M .

Considere $M = \omega_o TH$ (o sinal negativo não afeta o resultado). Então, a equação 4 reduz-se a

$$\bar{\sigma}(M) = \bar{\sigma}(\omega_o TH) \leq \bar{\sigma}(\omega_o H) \bar{\sigma}(T) < 1, \quad (6)$$

ou

$$\bar{\sigma}(T) < \frac{1}{\bar{\sigma}(\omega_o H)} \quad \forall \omega \quad (7)$$

Ou ainda, caso sejam utilizados controladores idênticos em todos os pares de entrada e saída selecionados, reescreve-se a equação 7 e obtêm-se:

$$\bar{\sigma}(T) < \bar{\sigma}\left(\frac{H^{-1}}{\omega_o}\right) \quad (8)$$

Então, o objetivo é otimizar a função M (função objetivo), encontrando os valores dos parâmetros do controlador, T 's e K , tal que seja satisfeita a condição de robustez, que corresponde a equação 7 ou a 8. Ao minimizar o valor singular máximo de M , estamos diminuindo os picos relacionados aos modos de oscilação, o que, por consequência, dá mais estabilidade ao sistema. Como a função M não é função explícita dos parâmetros do controlador, houve a necessidade de usar um método que não necessite calcular as derivadas da função. O método escolhido foi uma abordagem clássica de Algoritmos Genéticos (GA).

2.3 Parametrização dos controladores

O método de otimização por Algoritmos Genéticos foi escolhido por não necessitar de avaliações do gradiente da função objetivo, portanto, não há necessidade de se calcular a derivada das funções. Das vantagens de se utilizar GA é a possibilidade de buscar paralelamente o conjunto de parâmetros que formarão uma solução ótima. Além disso, apesar de determinar o conjunto de pontos a ser percorrido de maneira aleatória, não se trata de métodos de busca não direcionados, pois exploram informações históricas para encontrar pontos com melhor desempenho (Carvalho, 2003).

Foram utilizados apenas operadores clássicos do Algoritmo, com a finalidade de minimizar os picos que dos valores singulares máximos. Para a aplicação do GA foram feitas combinações de 20 indivíduos em até, no máximo, 200 gerações. O intervalo de busca por esses parâmetros também foi limitado por motivos práticos, como por exemplo, o T_w , cujo espaço de busca foi limitado ao intervalo de 10 e 20s. Constantes T_w acima de 10s são indicados para sistemas com modos interáreas dominantes, pois valores muito baixos resultam em um excesso de compensação em baixa frequência, o que reduzirá o componente de torque sincronizante das frequências interáreas, o que, segundo Kundur et al (2003), colabora para um decremento da estabilidade transitória deste sistema. Além disso, foram definidos limites máximos e mínimos para o sinal de saída do ESP, que correspondem a $-0,05V_{ss}$ e $0,2V_{ss}$, respectivamente, seguindo a orientação do IEEE (2016).

Por fim, ainda foi necessária mais uma adaptação, aplicando uma penalidade na função fitness, de

modo a assegurar que o conjunto de parâmetros obtidos consiga fazer com o que o sistema atinja o amortecimento mínimo.

2.4 Penalidades na Função Fitness.

Tradicionalmente utilizada em problemas aplicados em ciência da computação como, por exemplo, nos trabalhos de Zhang e Guo (2012) ou de Song et al (2016), a aplicação de penalidades nas funções fitness é a abordagem mais comum para lidar com restrições do problema (BÄCK et al, 2000). Basicamente, consiste em alterar a função fitness, que normalmente é baseada na função objetivo, restringindo-a aos espaços de buscas factíveis. Para este trabalho, a penalidade consistiu em atribuir um peso igual a 1000 ao número de autovalores presentes no semi-plano direito e somá-lo à função fitness (ou custo).

O objetivo deste peso é “forçar” os algoritmos a buscarem minimizar a norma utilizando um conjunto de parâmetros que corresponda a um sistema estável. A escolha do peso foi feita de maneira empírica, cuidando para que os valores atribuídos ao peso não se confundissem com os da própria função (isso foi observado no caso de pesos na ordem de 100) e nem fossem altos demais. Valores na ordem de 10 mil tiveram o desempenho semelhante aos de ordem de 1000. Assim, para quem observa a iterações, é possível distinguir quando o algoritmo ainda está buscando soluções cujo os autovalores indicam instabilidade, dando uma ideia do rumo que o algoritmo está tomando, mesmo com os resultados parciais. Além disso, o uso do peso fez aumentar consideravelmente o desempenho dos algoritmos.

3 Resultados e Discussões

O sistema New England/ New York foi escolhido para a aplicação e análise do método de forma mais detalhada, com a finalidade de identificar possíveis falhas. O modelo foi implementado utilizando os dados do benchmark IEEE (2015), com 162 estados. Este sistema possui 68 barramentos, 16 geradores e 5 áreas, representado pelo diagrama da Figura 3:

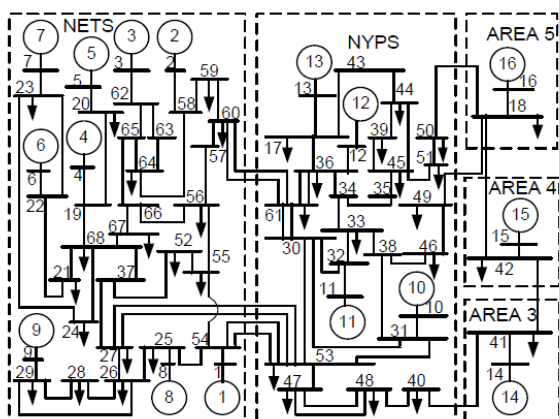


Figura 3: Sistema New York/New England
Fonte: IEEE, 2016

Esse diagrama é um equivalente de ordem reduzida do sistema de teste onde os geradores G1 a G9 correspondem ao sistema New England (NETS), conectado ao sistema de Nova York (NYPS), contendo G10 a G13, e as demais áreas vizinhas são representadas por modelos de geradores equivalentes (G14 a G16). G13 também representa uma subárea pequena dentro do NYPS. Há três linhas grandes entre as redes NETS e NYPS (entre os barramentos 60-61, 53-54 e 27-53) Todas as três são linhas com circuitos duplos. Geradores de G1 a G8 e G10 a G12 têm sistemas de excitação CC (DC4B); G9 tem excitação estática rápida (ST1A), enquanto o resto dos geradores (G13 a G16) tem excitação manual, pois eles são equivalentes, em vez de serem geradores físicos da área.

O desempenho desse sistema em malha aberta, ou seja, sem o ESP, apresenta modos pouco amortecidos como três pares de autovalores com partes reais positivas, e também diversos autovalores com amortecimento inferior a 5%, limite utilizando como padrão em boa parte da literatura, como mostra a Figura 4:

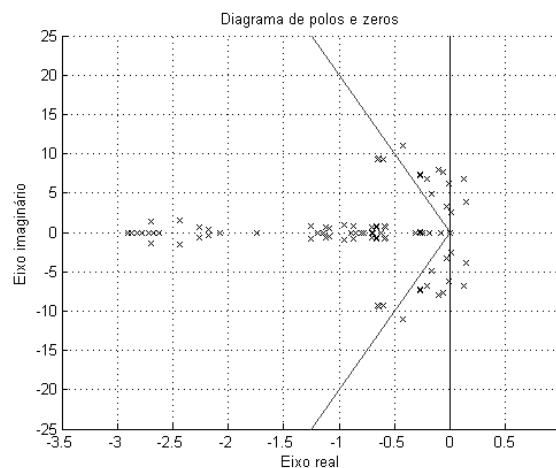


Figura 4: Autovalores do sistema sem controladores

Gerando o gráfico dos valores singulares para esse sistema, o resultado é o que está apresentado na Figura 5:

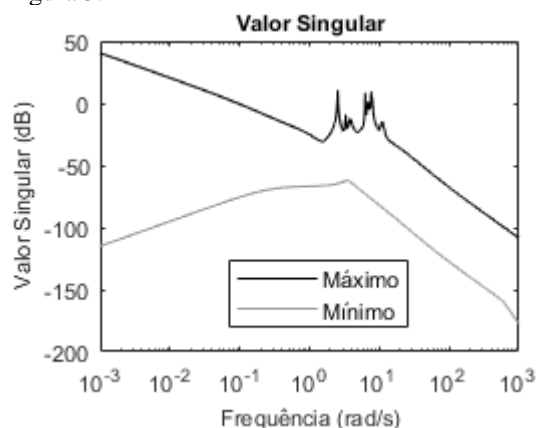


Figura 5: Valores singulares do sistema sem Controladores

Ao todo, o sistema apresenta 15 modos dominantes, sendo 4 do tipo interárea e 11 locais (IEEE,

2015).

3.1 Seleção dos geradores

Como apenas os geradores de 1 a 12 pertencem ao sistema (os demais são de sistemas vizinhos que sofrem influência do sistema principal), apenas eles serão considerados no processo de seleção.

Seguindo a metodologia proposta, usa-se a MGR para selecionar os pares de entrada e saída. Retira-se todos os pares com interação negativa ou muito próximas de zero e, fazendo uma adaptação ao método proposto por Castro (2002), retira-se também todos os pares com λ_{ij} maior que 10. O que restou foi uma matriz diagonal com pares de entrada e saída dos geradores 2 a 10, indicando um sistema favorável ao controle descentralizado. Após isso, calcula-se o número de condição para verificar se será possível aplicar o controlador no sistema com esse arranjo. O resultado foi $\gamma = 4,91$, ainda inferior a 10, o que indica que o conjunto de pares de entradas e saídas selecionados é favorável para a aplicação dos controladores.

3.2 Sintonia do controlador

Para esse sistema foram utilizados estabilizadores do tipo PSS1A (IEEE, 2015) de terceira ordem. O limite máximo de incerteza, W_o , obtido experimentalmente, foi definido por:

$$W_o = \frac{10s}{100s+3000} \quad (9)$$

A partir deste ponto, os Algoritmos Genéticos são aplicados na sintonização do controlador, dentro dos critérios de robustez pré-estabelecidos.

3.3 Desempenho dos Controladores Sintonizados utilizando GA

Para validar o desempenho dos controladores sintonizados nesse trabalho, faremos uma comparação com o sistema *benchmark*, contendo um sistema de controle ESP descentralizado aplicado em todos os geradores, de 1 ao 12, do modelo New York/New England, implementado por Pal e Singh para o IEEE (2015).

Os controladores implementados no sistema *benchmark* são de quarta ordem do tipo:

$$V_{ss} = K_{pss} \frac{sT_w}{(1+sT_w)} \cdot \frac{(1+sT_{11})(1+sT_{21})(1+sT_{31})}{(1+sT_{12})(1+sT_{22})(1+sT_{32})} S_m \quad (10)$$

e tem os seguintes parâmetros vistos na Tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros dos controladores do benchmark

	Ks	Tw	T11	T12	T21	T22	T31	T32
G9	12	10	0.09	0.02	0.09	0.02	1	1
Demais	20	15	0.15	0.04	0.15	0.04	0.15	0.04

Apesar de serem de ordem inferior e aplicados em menos geradores, os controladores sintonizados pelo método desenvolvido neste trabalho possuem um desempenho semelhante ao do *report* do IEEE com o sistema *Benchmark* em diversos aspectos. Ambos sistemas são robustos, segundo os critérios da norma H_∞ , apesar dos resultados do *benchmark* serem mais lineares nas frequências maiores, como pode ser observado na Figura 6:

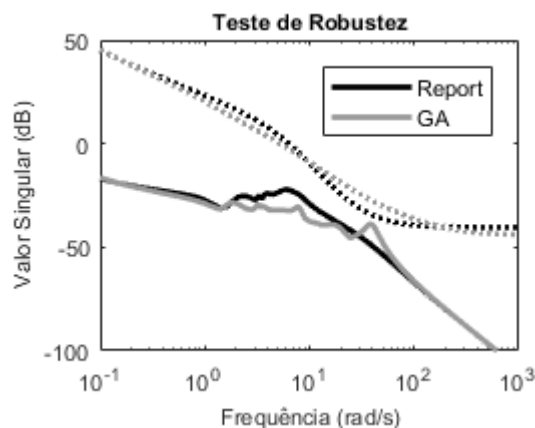


Figura 6: Robustez do benchmark x método com GA

Ainda observando o gráfico de robustez, dá pra perceber que nas frequências dos modos locais, o amortecimento foi maior com os controladores propostos. Outro aspecto a ser analisado é o tempo de resposta diante de um comportamento não linear do sistema. Para analisarmos os efeitos do ESP, foram simuladas duas situações:

- Situação 1: Simulação de 20 s onde é adicionado um degrau de 2% na tensão de referência da máquina de ensaio em $t = 1,0$ s e um degrau de -2% com $t = 11,0$ s;
- Situação 2: Simulação de 20s onde é conectado, em $t = 1,0$ s, um reator shunt de 50 MVar ao barramento conectado à máquina de teste e removendo este reator em $t = 11,0$ s.

Sendo o gerador 3 o escolhido como máquina teste apenas para exemplificar. Para esse caso espera-se que os efeitos dos distúrbios sejam mais evidentes na máquina 3, já que os eventos acontecem no próprio gerador ou no barramento conectado a ele, e vá atenuando, quanto mais longe estejam os geradores da máquina teste, onde acontecem distúrbios (IEEE, 2015). As Figuras 7 e 8 mostram o escorregamento relativo das máquinas 3, 9 e 15, em relação à máquina 16, pois é a máquina mais distante do Gerador 3, o que permite avaliar o desvio das máquinas em relação aos escorregamentos de referência e o amortecimento proporcionado pelo ESP. Os Geradores 9 e 15 foram selecionados pois o primeiro, G9, possui um sistema de excitação diferente dos demais e por isso recebeu um ESP com parâmetros diferentes, e o segundo, G15, é o gerador mais próximo da máquina 16, usada como referência, portanto espera-se que

tenha um escorregamento relativo mais brando em relação as outras máquinas testes, permitindo uma avaliação global do desempenho dos ESP's, seja nas máquinas próximas ou distantes da barra onde ocorreu a falta.

Como pode ser observado, a presença do ESP colaborou para o amortecimento dos modos em ambos os casos, principalmente sobre o G3. No caso do G15, o amortecimento foi menos eficiente devido à presença dos modos interáreas pouco amortecidos, principalmente no G15 que sequer tem ESP, como era esperado para o tipo de controle utilizado e será melhor comentado a seguir.

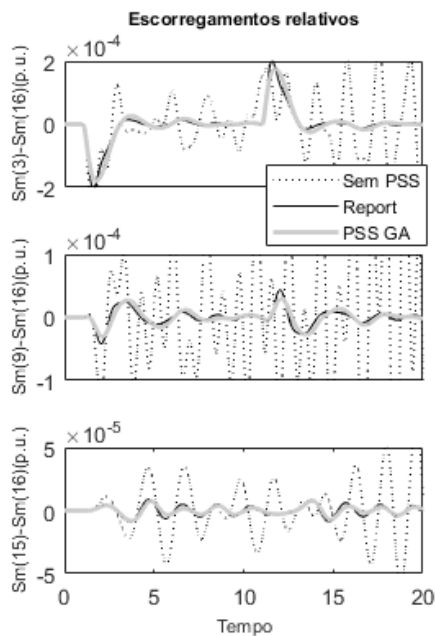


Figura 7: Escorregamento relativo para G3, G9 e G15, no primeiro caso

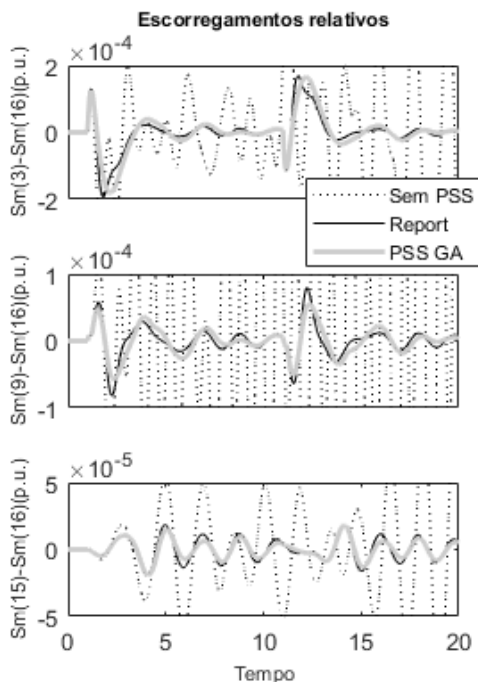


Figura 8: Escorregamento relativo para G3, G9 e G15, no segundo caso

Comparando os controladores obtidos pelo método exposto nesse trabalho, com os controladores do *benchmark*, para o G3 os últimos são ligeiramente melhores nos primeiros segundos, mas amortecem menos passados quase 10s depois do distúrbio. Para o G9, os controladores do *benchmark* são melhores em qualquer situação, mas no G15, apesar de nenhum dos dois métodos apresentarem bom desempenho, os controladores obtidos por GA conseguem ser um pouco melhor, indicando que conseguem proporcionar amortecimento mínimo para um número maior de modos interáreas.

Para observar melhor o efeito dos ESP nos modos, faz-se o Mode-Shape do sistema sem controladores e com controladores definidos pelos dois modelos, encontrando o mapa de desempenho mostrado na Tabela 2:

Tabela 2: Amortecimento dos modos de oscilação dominantes no sistema

Mo do	Sem ESP		ESP do Report		ESP com GA	
	Frequência	Amortecimento (%)	Frequência	Amortecimento (%)	Frequência	Amortecimento (%)
1	0.404	-0.438	0.314	33.54	0.3254	41.90
2	0.526	0.937	0.52	3.62	0.52	3.44
3	0.61	-3.855	0.591	9.63	0.5907	8.96
4	0.779	3.321	0.779	3.38	0.7787	3.38
5	0.998	0.256	0.972	27.14	0.9401	86.32
6	1.073	3.032	1.08	18.57	0.985	15.12
7	1.093	-1.803	0.939	23.61	1.1312	44.63
8	1.1580	3.716	1.078	30.11	1.1413	72.13
9	1.1850	3.588	1.136	28.31	1.2299	47.49
10	1.2170	0.762	1.278	13.43	1.2327	7.04
11	1.2600	1.347	1.188	18.83	1.2989	69.41
12	1.4710	6.487	1.292	32.06	1.3399	77.86
13	1.4870	7.033	1.288	39.54	1.3771	72.31
14	1.5030	6.799	1.367	33.12	1.9474	71.57
15	1.7530	3.904	5.075	23.87	2.1220	65.65

O maior desafio é amortecer os quatro primeiros modos da tabela, que correspondem aos modos interáreas, pois normalmente apenas o ESP não é suficiente para amortecer esses modos. Como pode ser observado, ambos os métodos conseguiram amortecer os modos que estavam instáveis. Por outro lado, nenhum dos controladores foi eficiente para amortecer os modos pouco amortecidos, obtendo um desempenho abaixo de 5%. Isso se deve à grande influência dos geradores equivalentes às áreas 3, 4 e 5, que não são áreas próprias do sistema, mas vizinhas ou subáreas, de onde se tem poucas informações (IEEE, 2015). Nesse caso, como não existe acesso à estrutura detalhada das áreas 3, 4 e 5, é necessário utilizar diferentes tipos de controladores de amortecimento, tais como controladores suplementares do tipo POD (Power Oscillation Damping) ou dispositivos FACTS, por exemplo.

4 Conclusão

O desenvolvimento de uma metodologia cuja preocupação básica consiste em explorar a estrutura de

controle já existentes na indústria de energia, evita a substituição prematura do ESP por controladores com novas estruturas, tornando mais eficientes os métodos existentes, sem a necessidade de grandes investimentos no setor elétrico.

O trabalho cumpre a proposta de desenvolver uma metodologia que possibilitasse a obtenção de controladores ESP de baixa ordem, descentralizados, de maneira objetiva. Utilizando Matrizes de Ganhos Relativos, em conjunto com os valores singulares e o número de condição, foi possível selecionar quais geradores eram mais influentes no sistema, otimizando a estrutura de controle, pois foi possível reduzir o número de ESP a serem instalados. Com a utilização de algoritmos genéticos, foi possível sintonizar controladores com ordem menor, até mesmo, do que os controladores utilizados no modelo *benchmark* do IEEE e ainda assim conseguir um desempenho semelhante. Isso mostra que com a metodologia desenvolvida, é possível obter uma malha de controle enxuta e mais simples, mesmo para sistemas complexos e de maneira automática, sem intervenção do operador.

Este trabalho ainda faz uma aplicação dos conceitos de funções de penalidades, associados à função fitness, no amortecimento de modos eletromecânicos, atribuindo ao número de autovalores presentes no semiplano direito um peso e somando à função objetivo a ser minimizada. Isso faz com que as próprias características dos métodos de buscas, que tendem a achar o menor valor possível da função fitness modificada, sejam usadas para “forçar” um conjunto estável.

Apesar de haver possibilidade de se controlar melhor os modos interáreas, se aplicarmos o ESP remotamente nas áreas 3, 4 e 5, optou-se por aproveitar a estrutura existente, se atendo a sintonizar os controladores pertencentes efetivamente ao sistema New York / New England, o que resultou na perda no desempenho dos controladores ao amortecer os modos interáreas. Entretanto, os controladores obtidos conseguem, de modo geral ter um desempenho, em relação aos modos interáreas, semelhante aos controladores do *benchmark*, mesmo sendo mais simples, o que mostra a eficiência da metodologia utilizada em otimizar o sistema como um todo.

Referências Bibliográficas

- Ayres H. M. 2005. Aplicação do Controlador UPFC para o Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. UNICAMP, Campinas, São Paulo.
- Bäck, T., Fogel, D. E Michalewicz, Z. 2000. Evolutionary Computation – Advanced Algorithms and Operators. vol. 2. Institute of Physics Publishing.
- Carvalho, A.; Braga, A; Ludermir, T., 2003.” Computação Evolutiva, In: Rezende, S. O. (Coord.), Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações”, 1ª Ed. Cap. 9, Ed. Manole, São Paulo, Brasil
- Castro, A. C., 2006. “Projeto de controladores robustos descentralizados de ordem reduzida para amortecimento de oscilações em sistemas elétricos de potência”. Tese apresentada à Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil.
- Castro, A.C., Araújo, C.S., 2002, “Análise de Sinais para Controle Descentralizado em Sistemas de Potência”. In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática , pp. 1188-1193, Natal.
- Cruz, J.J., 1996, “Controle Robusto Multivariável”, São Paulo, Editora Universidade de São Paulo.
- Dill, G. K.; 2013. “Projeto de controladores robustos para sistemas de potência baseado em otimização paramétrica”. Tese apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- Gibbard M. J. 1991. "Robust design of fixed-parameter power system stabilisers over a wide range of operating conditions," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 794-800.
- IEEE. 2016. “Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies,” in IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005) , vol., no., pp.1-207.
- IEEE. 2015. Report of the IEEE PES task Force on Benchmark Systems for Stability Controls.
- Kundur, P., Klein, M., Rogers, G.J., et al., 1989, “Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.4, pp. 614-626.
- Kundur, P.; Berubé E, G. R.; Hajagos, L. M.; Beaulieu, R. 2003. “Practical utility experience with and effective use of power system stabilizers”. In: *IEEE Power Engineering Society. General Meeting 2003*. v. 3, p. 1777 - 1785.
- Milanovic, J.V., Duque, A.C.S., 2001, “The Use of Relative Gain Array for Optimal Placement of PSS”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.16, pp. 992-996.
- Roy, T. K., Mahmud, M. A., Oo, A. M. T and Haque, M. E. 2017 "Robust adaptive excitation control of synchronous generators in multimachine power systems under parametric uncertainties and external disturbances," *IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, Melbourne, VIC, 2017, pp. 2655-2660.
- Skogestad S., Postlethwaite, I. 2005. “Multivariable Feedback Control Analysis and Design”. John Wiley & Sons.
- Song, P., He Y. E Ma, Q. 2016. "Fault diagnosis for missile autopilot based on GSA-SVM," *2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation*

Control Conference (IMCEC), Xi'an, pp. 1365-1369.

Zhang L. E Guo, Y. 2012. "Optimal Power Flow Using Particle Swarm Intelligence Algorithm and Non-stationary Multi-stage Assignment Penalty Function," 2012 Fourth International

Conference on Computational and Information Sciences, Chongqing, pp. 1357-1359.