

UM PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO DE CONTROLADORES CENTRALIZADOS DE AMORTECIMENTO

MURILO EDUARDO CASTEROBA BENTO*, RODRIGO ANDRADE RAMOS*

**Avenida Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
Universidade de São Paulo - USP
São Carlos, SP, Brasil*

Emails: murilocasteroba@gmail.com, rodrigo.ramos@ieee.org

Abstract— Damping centralized controllers of eletromechanical oscillations based on synchronized phasor measurements can have many input-output channels for its operation. However, cyber attacks such as denial-of-service may damage the information package sent to the control center and compromise the performance of the centralized controller. This paper presents a procedure based on Genetic Algorithms for the centralized control design minimizing the number of input-output signals and maximizing the closed-loop power system damping. With a reduced number of communication channels, the control center can focus its security system on a few channels. Time delays are considered in the design using the Pade approximation. Modal analysis and time-domain nonlinear simulations were carried out in the IEEE 39 bus system considering multiple operating conditions.

Keywords— Small-Signal Stability, Optimization, Damping Controllers, Genetic Algorithms, Phasor Measurement Units.

Resumo— Controladores centralizados de amortecimento de oscilações eletromecânicas baseados em medições fasoriais sincronizadas podem ter muitos canais de entrada-saída para sua operação. No entanto, ataques cibernéticos como ataques do tipo *Denial-of-Service* por exemplo podem prejudicar o pacote de informações enviado ao centro de controle e comprometer o desempenho do controlador centralizado. Este artigo apresenta um procedimento baseado em Algoritmos Genéticos para o projeto de um controlador centralizado minimizando o número de sinais entrada-saída e maximizando o amortecimento do sistema de malha fechada. A partir de um número reduzido de canais de comunicação, o centro de controle pode focar seu sistema de segurança em poucos canais. Atrasos de tempo são considerados utilizando a aproximação modificada de Padé. Análise modal e simulações não lineares no domínio do tempo foram executadas no sistema IEEE 39 barras considerando múltiplas condições de operação.

Palavras-chave— Estabilidade a Pequenos Sinais, Otimização, Controladores de Amortecimento, Algoritmos Genéticos, Unidades de Medição Fasorial.

1 Introdução

Os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFSs) possuem Unidades de Medição Fasorial, ou do inglês *Phasor Measurement Units* (PMUs), capazes de fazer leituras em tempo real de grandezas elétricas das barras onde estão conectadas e armazenar os dados em Concentradores de Dados com sincronia no tempo adquirida pelo uso de GPS (do inglês, *Global Positioning System*) (Terzija et al., 2011).

A expansão dos SMFSs promoveu diversas aplicações em sistemas de potência como melhoria de estimadores de estados (Zhao et al., 2016), localização de faltas (Jiang et al., 2000), estimação de linhas de transmissão (Du and Liao, 2012), projeto de controladores de amortecimento (Chaudhuri et al., 2004; Yao et al., 2014), dentre outras aplicações a fim de auxiliar o operador do sistema na análise em tempo real.

Os controladores de amortecimentos propostos na literatura geralmente são uma estrutura de controle em dois níveis, como mostrado na Fig. 1, onde o primeiro nível compreende os Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs), ou do

inglês *Power System Stabilizers* (PSSs), nos geradores com os Reguladores Automáticos de Tensão (RAT), ou do inglês *Automatic Voltage Regulators* (AVRs), e o segundo nível é um controlador central onde os sinais de entrada são adquiridos por medição fasorial e os sinais de controle são transmitidos por canais de comunicação até a entrada do comparador do RAT (Kamwa et al., 2001).

Atualmente, uma preocupação em sistema baseados em SMFS são os ataques cibernéticos do tipo DoS (do inglês, *Denial-of-Service*), ataques nos GPSs e ataques de falsificação do tempos de sincronia dos dados (Almas et al., 2017). Recentemente, um conjunto de trabalhos vem sendo realizados a fim de prevenir ou solucionar estes ataques garantir a segurança de operação do sistema de potência (Zhang and Vittal, 2014; Farraj et al., 2017; Hammad et al., 2016; Shen et al., 2018).

Na operação do sistema de potência com um controlador central utilizando dados de SMFS, se um destes tipos de ataques ocorreu, um dos canais de comunicação dos controlador pode não funcionar e a estabilidade do sistema de potência pode estar comprometida. Esta preocupação aumenta

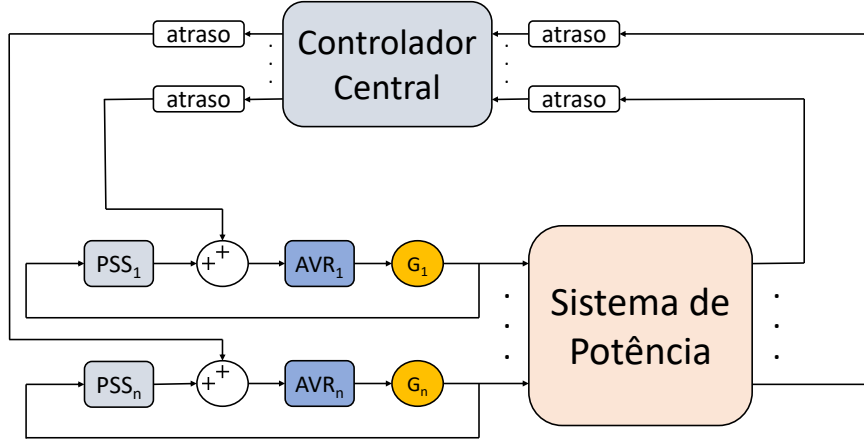


Figura 1: Estrutura de controle em dois níveis.

à medida que o número de canais de comunicação de operação do controlador centralizado aumenta. Em função disso, uma medida preventiva para garantir a estabilidade do sistema seria projetar controladores centrais com o menor número possível de sinais de entrada-saída que realmente contribuem com a melhoria de amortecimento do sistema.

Algumas técnicas como medida de resíduo e fatores de participação tem sido usualmente utilizadas para definir onde será colocado um ESP a fim de amortecer as oscilações de baixa frequência (Kundur, 1994). No entanto, com o crescimento de múltiplas condições de operação do sistema, é um procedimento comum projetar ESP para todos os RATs disponíveis no sistema de potência. Este procedimento comum é estendido para o projeto de controladores centrais devido à dificuldade em identificar os sinais do controlador que efetivamente irão melhorar o amortecimento do sistema de potência.

Este artigo apresenta um procedimento baseado em Algoritmos Genéticos para o projeto de um controlador centralizado minimizando o número de sinais entrada-saída (NSES) e maximizando o amortecimento do sistema de malha fechada. Este procedimento considera a princípio os sinais de todos os geradores e fornece um controlador com número reduzido de canais. O procedimento proposto foi aplicado no sistema IEEE 39 barras considerando múltiplas condições de operação.

Este artigo é organizado como se segue: Seção 2 apresenta o modelo do sistema de potência e do controlador a se projetar, Seção 3 apresenta o procedimento proposto nesta pesquisa, Seção 4 apresenta o resultados numéricos alcançados com a aplicação do método proposto no sistema IEEE 39 barras e a Seção 5 apresenta as conclusões.

2 Modelo do Sistema de Potência

O sistema de potência pode ser linearizado em torno de um ponto de equilíbrio de interesse resultando no sistema linear (Kundur, 1994)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} \quad (2)$$

onde $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$ e $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$ são os vetores de estado, entradas de controle e saídas medidas e $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times p}$ e $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{p \times n}$.

Nesta pesquisa, os Estabilizadores de Sistemas de Potência serão fixos e incluídos no modelo (1)-(2) e objetivo será o projeto do controlador centralizado.

A função de transferência que representa o atraso de tempo na entrada e na saída do controlador é dada pela aproximação de Padé

$$\mathbf{G}_a = \frac{6 - 2Ts}{6 + 4Ts + (sT)^2} \quad (3)$$

onde T é o atraso de tempo. Nesta pesquisa decidiu-se utilizar o mesmo atraso de tempo de 200 ms presente em (Dotta et al., 2009). Esta função de transferência pode ser representada por um modelo em espaço de estados dado por

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{A}_d \cdot \mathbf{x}_d + \mathbf{B}_d \cdot \mathbf{u}_d \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_d = \mathbf{C}_d \cdot \mathbf{x}_d + \mathbf{D}_d \cdot \mathbf{u}_d \quad (5)$$

O modelo de atraso de tempo deve ser incluído na entrada e na saída do controlador central a se projetar. Assim definindo $\bar{\mathbf{x}} = [\mathbf{x} \quad \mathbf{x}_{di} \quad \mathbf{x}_{do}]$, onde os índices i e o correspondem a entrada e saída do controlador, o modelo em espaço de estados do sistema de potência com o modelo de atraso de tempo pode ser representado por

$$\dot{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{A}} \cdot \bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{u} \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_{do} = \bar{\mathbf{C}} \cdot \bar{\mathbf{x}} \quad (7)$$

onde

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \cdot \mathbf{C}_{di} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{di} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_{do} \cdot \mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{do} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\bar{\mathbf{B}} = [\mathbf{B} \cdot \mathbf{D}_{di} \quad \mathbf{B}_{di} \quad \mathbf{0}]^T \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{C}} = [\mathbf{D}_{do} \cdot \mathbf{C} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{C}_{do}] \quad (10)$$

O objetivo da pesquisa é projetar um controlador centralizado que pode ser representado por

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \cdot \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \cdot \mathbf{y} \quad (11)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{C}_c \cdot \mathbf{x}_c + \mathbf{D}_c \cdot \mathbf{y} \quad (12)$$

onde $\mathbf{A}_c \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $\mathbf{B}_c \in \mathbb{R}^{m \times p}$, $\mathbf{C}_c \in \mathbb{R}^{p \times m}$ e $\mathbf{D}_c \in \mathbb{R}^{p \times p}$, ou por matriz de funções de transferência $\mathbf{CC}(s) = \mathbf{C}_c \cdot (s \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}_c)^{-1} \cdot \mathbf{B}_c + \mathbf{D}_c$

$$\mathbf{CC}(s) = \begin{bmatrix} c_{11}(s) & \cdots & cc_{1p}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{p1}(s) & \cdots & cc_{pp}(s) \end{bmatrix} \quad (13)$$

onde

$$c_{ij}(s) = \frac{n_2 s^2 + n_1 s + n_0}{s^2 + d_1 s + d_0} \quad (14)$$

É possível verificar de (13) que à medida que o número de entradas-saídas do controlador aumenta, o número de funções de transferência c_{ij} também aumenta e uma possível perda de um canal pode comprometer a operação do controlador.

Definindo $\hat{\mathbf{x}} = [\bar{\mathbf{x}} \quad \mathbf{x}_c]^T$ como o vetor do sistema de malha fechada. Então,

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\mathbf{A}} \cdot \hat{\mathbf{x}} \quad (15)$$

onde

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{D}_c \cdot \bar{\mathbf{C}} & \bar{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{C}_c \\ \bar{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{C}_c & \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

O objetivo é encontrar as matrizes que definem o controlador centralizado ($\mathbf{A}_c, \mathbf{B}_c, \mathbf{C}_c, \mathbf{D}_c$) e que forneçam um amortecimento mínimo ζ_0 para todos os autovalores do sistema de malha fechada $\hat{\mathbf{A}}$. Em Gomes et al. (2003) definiu-se que um amortecimento mínimo de 5% é satisfatório para a estabilidade a pequenos sinais, e assim esta pesquisa utilizou este critério.

3 Procedimento de Projeto

O procedimento de projeto de controladores centralizados é baseado em algoritmo genéticos, uma classe de algoritmos evolutivos (Soliman and Mantawy, 2012). A função multiobjetivo empregada nesta pesquisa consiste em maximizar o amortecimento do sistema de malha fechada $\zeta(\hat{\mathbf{A}}_j)$, $j = 1, \dots, N$ onde N é o número de pontos de operação, e minimizar o número de sinais de entrada-saída do controlador central. Assim, pode-se formular o problema de otimização como

$$\begin{array}{ll} \text{Maximizar} & \zeta(\hat{\mathbf{A}}_j) \\ \text{Minimizar} & \text{NSES} \\ \text{sujeito a} & a_{cmin} \leq \mathbf{a}_c \leq a_{cmax} \\ & b_{cmin} \leq \mathbf{b}_c \leq b_{cmax} \\ & c_{cmin} \leq \mathbf{c}_c \leq c_{cmax} \\ & d_{cmin} \leq \mathbf{d}_c \leq d_{cmax} \end{array} \quad (17)$$

onde $j = 1, \dots, N$ e $\mathbf{a}_c \in \mathbb{R}$, $\mathbf{b}_c \in \mathbb{R}$, $\mathbf{c}_c \in \mathbb{R}$ e $\mathbf{d}_c \in \mathbb{R}$ são os elementos das matrizes $\mathbf{A}_c$, $\mathbf{B}_c$, $\mathbf{C}_c$ e $\mathbf{D}_c$ respectivamente na forma canônica observável e serão os indivíduos deste procedimento. Uma descrição dos processo de recombinação e mutação é feita a seguir.

O processo de recombinação consistiu em cada geração, trocar as linhas das matrizes $\mathbf{B}_{ck}$ e $\mathbf{B}_{ck+1}$ e $\mathbf{D}_{ck}$ e $\mathbf{D}_{ck+1}$ de indivíduos dois a dois.

O processo de mutação é a chave do algoritmo e depende de um valor obtido numa distribuição uniforme $\mu \in [0, 1]$:

- if $\mu \leq 0,5$, o operador consiste em atribuir novos valores para as matrizes $\mathbf{A}_{ck}$, $\mathbf{B}_{ck}$ e $\mathbf{D}_{ck}$;
- if $\mu > 0,5$, o operador consiste em zerar determinada posição das matrizes $\mathbf{B}_{ck}$ e $\mathbf{D}_{ck}$ relacionadas a determinado sinal entrada-saída.

Assim, o operador de mutação será responsável em minimizar os sinais de entrada-saída do controlador centralizado. A cada geração os P indivíduos com o menor NSES irão para a próxima geração. Se há indivíduos com o mesmo NSES, os indivíduos que fornecem o maior amortecimento de malha fechada terão prioridade.

Nesta pesquisa, o critério de parada do procedimento proposto será o número de gerações. A fim de avaliar a capacidade de convergência do algoritmo para um determinado número de entradas-saídas, várias simulações do procedimento proposto foram realizadas.

A implementação e as simulações do procedimento proposto baseado em Algoritmos Genéticos foram realizadas no *software* MatLab versão 2017 (Mathworks, 2017).

4 Resultados Numéricos

O procedimento de projeto apresentado na seção anterior foi aplicado no sistema IEEE 39 barras, Fig. 2, (Canizares et al., 2017). Este sistema de potência é um benchmark (BK) para análise de estabilidade a pequenos sinais e é composto por um Estabilizador de Sistema de Potência em cada um dos seus 10 geradores síncronos. Tais controladores foram projetados utilizando um método de sintonia clássica presente em (Larsen and Swann, 1981).

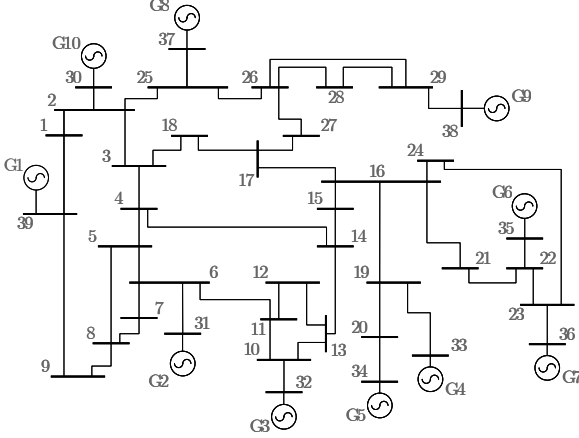


Figura 2: Sistema IEEE 39 barras (New England).

A Tabela 1, linha 1 mostra os modos de oscilação dominantes (BK) do sistema para o caso de operação nominal determinados pelo *software* PacDyn (CEPEL, 2015). No entanto, se for considerado as 35 possíveis desligamentos (um por vez) combinado com os níveis de variação de carga de -10%, -5%, 0%, 5% e 10%, há um total de 180 pontos de operação do sistema de potência e os modos de oscilação dominantes (C1) estão presentes na Tabela 1, linha 2 e corresponde ao sistema estar com uma variação do nível de carga de -10% e sem a linha de transmissão de energia elétrica 6-11. A Figura 3 apresenta todos os modos dominantes de cada um dos 180 pontos de operação no plano cartesiano, onde é possível verificar que um conjunto de condições de operação não atende o critério de amortecimento mínimo de 5% para os autovalores do modelo linear de malha fechada.

Tabela 1: Modos de oscilação dominantes do sistema sem CC(s).

Caso	Autovalor	Freq. (Hz)	Amort. (%)
BK	$-0,4984 \pm 3,6823i$	0,5861	13,413
C1	$0,0118 \pm 5,9464i$	0,9464	-0,198

Assim, para melhorar o amortecimento das 180 condições de operação foi projetado um con-

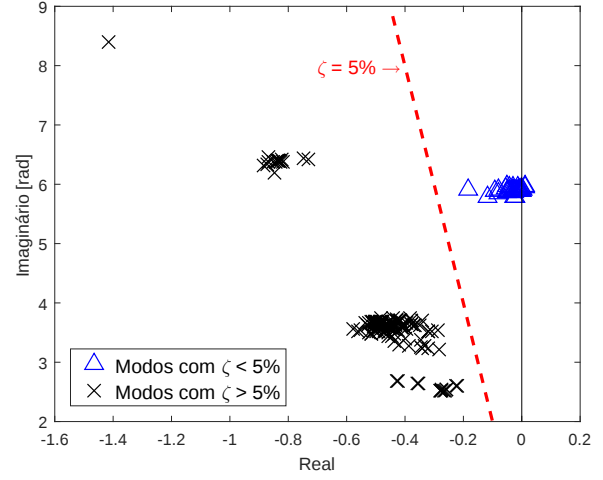


Figura 3: Modos de oscilação dominantes das 180 condições de operação do sistema de potência.

trolador central com o menor número de sinais possíveis. A fim de avaliar a eficácia do algoritmo proposto, 1000 simulações foram executadas para dois critérios de amortecimento $\zeta_I = 0,05$ (5%) e $\zeta_{II} = 0,08$ (8%) considerando 2000 gerações e 20 indivíduos, e então 1000 CC(s) foram obtidos. Atrasos de tempo de 200 ms foram introduzidos no modelo ($T = 0,200$). Os limites das matrizes foram definidos em $(b_{min}, b_{max}) = (-1000, 1000)$, $(c_{min}, c_{max}) = (-1, 1)$, $(d_{min}, d_{max}) = (-10, 10)$ e os autovalores da matriz $\mathbf{A}_c$ serão escolhidos no intervalo $(-1, -20)$ de acordo com uma distribuição uniforme. Além disso, as funções de transferência que definem cada par entrada-saída será de segunda ordem. Deve-se mencionar que estes limites e medidas foram tomadas com base em valores práticos encontrados na área de projeto de controladores (Canizares et al., 2017).

Os sinais dos 10 geradores síncronos foram utilizados no projeto de controle e o objetivo era reduzir o número de sinais e melhorar o amortecimento das 180 condições de operação. A Figura 4 fornece um histograma de amortecimento mínimo do sistema de malha fechada com cada um dos 1000 controladores projetados quando o critério de parada foi o amortecimento mínimo de 5% ($\zeta_I = 0,05$). É possível verificar que o critério de amortecimento de 5% foi atendido por todos os controladores.

A Figura 5 fornece um histograma de amortecimento mínimo do sistema de malha fechada com cada um dos 1000 controladores projetados quando o critério de parada foi o amortecimento mínimo de 8% ($\zeta_{II} = 0,08$). É possível verificar que o critério de amortecimento de 8% foi atendido por todos os controladores projetados.

Figura 6 apresenta o número de sinais entrada/saída exigidos para cada um dos 1000 controladores projetados para o critério $\zeta_I = 0,05$. É possível verificar que 66,1% dos CC(s) projetados

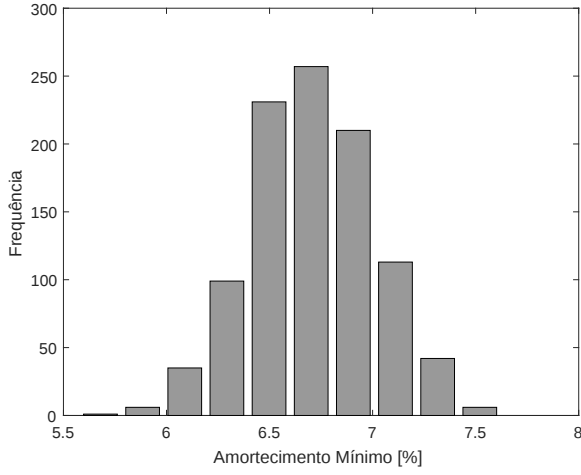


Figura 4: Histograma de amortecimento mínimo do sistema de malha fechada do 1000 controladores projetados para o critério $\zeta_I = 0,05$.

(661 de 1000) usam 3 sinais entrada/saída para melhorar o amortecimento das 180 condições de operação do sistema.

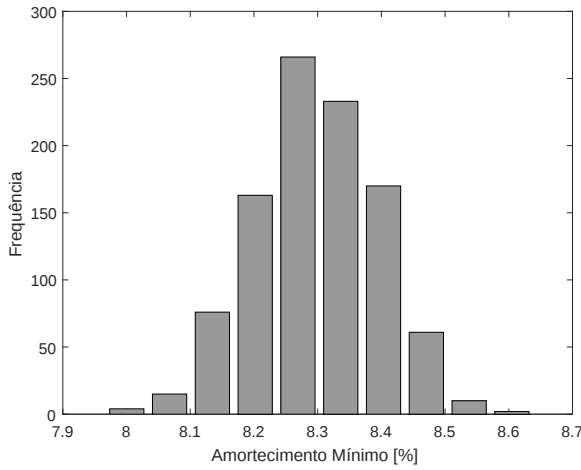


Figura 5: Histograma de amortecimento mínimo do sistema de malha fechada do 1000 controladores projetados para o critério $\zeta_{II} = 0,08$.

Figura 7 apresenta o número de sinais entrada/saída exigidos para cada um dos 1000 controladores projetados para o critério $\zeta_{II} = 0,08$. É possível verificar que 48,6% dos CC(s) (486 de 1000) usam 4 sinais entrada/saída para melhorar o amortecimento das 180 condições de operação do sistema.

Com base nos resultados, foi escolhido o CC(s) que forneceu 3 sinais de entrada/saída e fornece o melhor amortecimento mínimo quando o critério foi $\zeta_I = 0,05$. Este controlador será chamado de I-CC(s). Os parâmetros deste controlador com o melhor amortecimento mínimo estão presentes na Tabela 2 e utiliza os sinais dos geradores 2, 4 e 7. Convém mencionar que no conjunto de controladores que utilizam 3 sinais entrada-saída, há controladores que utilizam si-

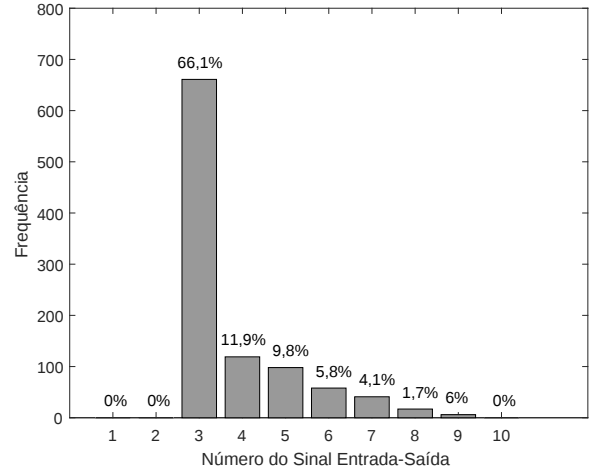


Figura 6: Número de sinais entrada-saída dos 1000 controladores centralizados projetados para o critério de $\zeta_I = 0,05$.

nalmente diferentes do trio (2,4,7). Figura 8 apresenta os modos de oscilação dominantes dos 180 pontos de operação no plano cartesiano onde é possível verificar que o critério de 5% foi atingido. A Tabela 3, linha 1 fornece o modo de oscilação dominante entre as 180 condições de operação (D-180) e a linha 2 fornece para o caso C1.

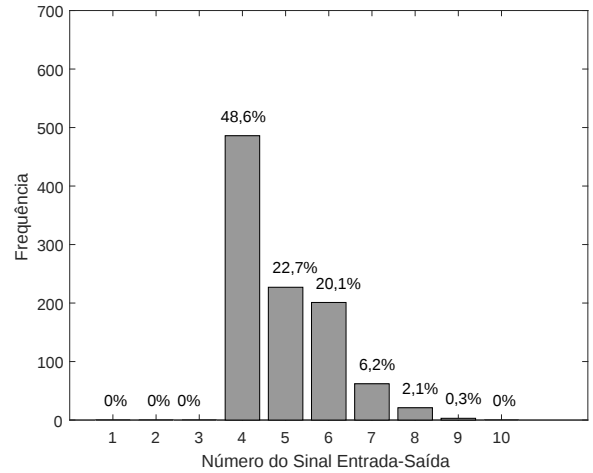


Figura 7: Número de sinais entrada-saída dos 1000 controladores centralizados projetados para o critério de $\zeta_{II} = 0,08$.

Além disso, foi escolhido o CC(s) que forneceu 4 sinais de entrada/saída e fornece o melhor amortecimento mínimo quando o critério foi $\zeta_{II} = 0,08$. Este controlador será chamado de II-CC(s). Os parâmetros deste controlador com o melhor amortecimento mínimo estão presentes na Tabela 4 e utiliza os sinais dos geradores 2, 3, 5 e 9. Novamente, é importante mencionar que no conjunto de controladores de 4 sinais entrada-saída, há controladores que utilizam sinais diferentes de (2,3,5,9). Figura 9 apresenta os modos de oscilação dominantes dos 180 pontos de operação no plano cartesiano onde é possível verificar que o

Tabela 2: Parâmetros do I-CC(s)

c_{ij}	n_2	n_1	n_0	d_1	d_0
c_{22}	0	0	0	31,92	184,79
c_{24}	2,926	-43,69	623,1	31,92	184,79
c_{27}	-2,147	1671	1587	31,92	184,79
c_{42}	4,066	1688	-1093	31,92	184,79
c_{44}	-3,032	-786,7	-819,4	31,92	184,79
c_{47}	7,288	431,5	1408	31,92	184,79
c_{72}	8,87	1438	2688	31,92	184,79
c_{74}	1,499	132	-1704	31,92	184,79
c_{77}	0	0	0	31,92	184,79

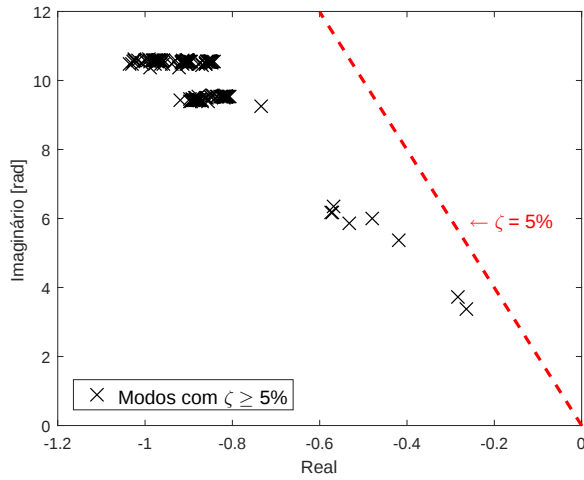


Figura 8: Modos de oscilação dominantes das 180 condições de operação com I-CC(s).

Tabela 3: Modos de oscilação dominantes do sistema com I-CC(s).

Caso	Autovalor	Freq. (Hz)	Amort. (%)
D-180	$-0,2821 \pm 3,7124i$	0,5908	7,576
C1	$-0,8323 \pm 10,5580i$	1,6804	7,859

critério de 8% foi atingido. A Tabela 5, linha 1 fornece o modo de oscilação dominante entre as 180 condições de operação (D-180) e a linha 2 fornece para o caso C1.

Tabela 4: Parâmetros do II-CC(s)

c_{ij}	n_2	n_1	n_0	d_1	d_0
c_{22}	8,538	248,9	2091	25,62	160,10
c_{23}	-9,795	-176,2	-1091	25,62	160,10
c_{25}	2,074	120,8	386,1	25,62	160,10
c_{29}	2,522	267,7	526,5	25,62	160,10
c_{32}	1,374	-1070	319,8	25,62	160,10
c_{33}	-7,077	-179,8	-403,9	25,62	160,10
c_{35}	-8,444	128,3	-981,5	25,62	160,10
c_{39}	-0,1875	483,4	84,75	25,62	160,10
c_{52}	4,088	194,8	706,3	25,62	160,10
c_{53}	7,916	-835,1	-583,6	25,62	160,10
c_{55}	-6,715	205	-145,9	25,62	160,10
c_{59}	2,316	90,93	1054	25,62	160,10
c_{92}	9,263	1146	2164	25,62	160,10
c_{93}	2,309	387	1254	25,62	160,10
c_{95}	-7,369	77,23	-1822	25,62	160,10
c_{99}	-6,942	-29,34	454,4	25,62	160,10

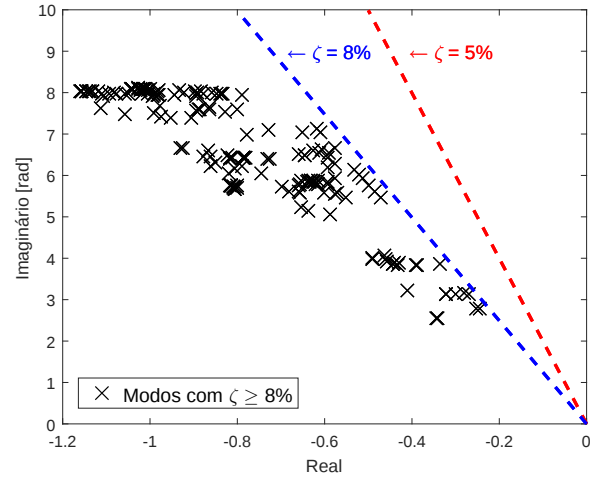


Figura 9: Modos de oscilação dominantes das 180 condições de operação com II-CC(s).

Tabela 5: Modos de oscilação dominantes do sistema com II-CC(s).

Caso	Autovalor	Freq. (Hz)	Amort. (%)
D-180	$-0,5756 \pm 6,6622i$	1,0603	8,610
C1	$-0,5323 \pm 6,1382i$	0,9769	8,640

4.1 Análise Não Linear

Simulações não lineares no domínio do tempo foram realizadas no *software* ANATEM a fim de avaliar o controlador projetado com modelos lineares (CEPEL, 2014). Limites foram considerados nos AVR, PSS e nos I-CC(s) e II-CC(s). Uma falta trifásica temporária de 10 ms foi aplicada na barra 31. O ângulo e a tensão de campo (esforço de controle) do gerador 2 na barra 31 para a condição de operação C1 estão presentes nas Figuras 10 e 11 respectivamente. É possível observar uma resposta dinâmica mais amortecida para o sistema de potência operando conjuntamente com os controladores ESPs (Benchmark) e os centralizados projetados.

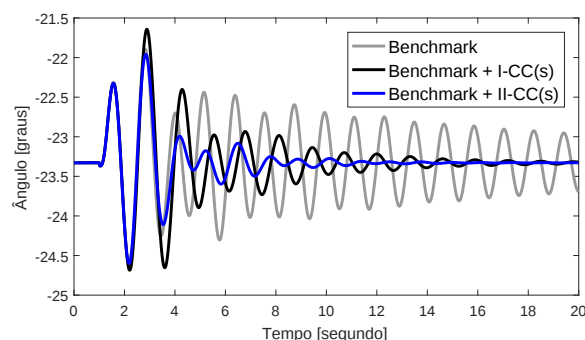


Figura 10: Ângulo do gerador 2, barra 31 para o caso C1.

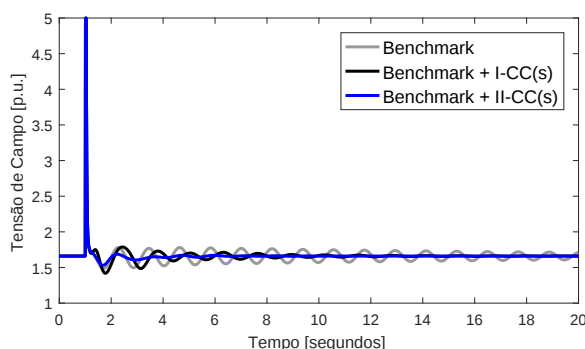


Figura 11: Tensão de campo (esforço de controle) do gerador 2, barra 31 para o caso C1.

Além disso, a mesma falta trifásica temporária foi aplicada considerando agora a perda do sinal de controle (saída do controlador central) referente ao gerador 2. As Figuras 12 e 13 apresentam o ângulo e a tensão de campo (esforço de controle) do gerador 2 na barra 31. Novamente, é possível observar uma resposta dinâmica mais amortecida para o sistema de potência operando conjuntamente com os controladores ESPs (Benchmark) e os centralizados projetados mesmo quando ocorreu a perda do sinal de controle.

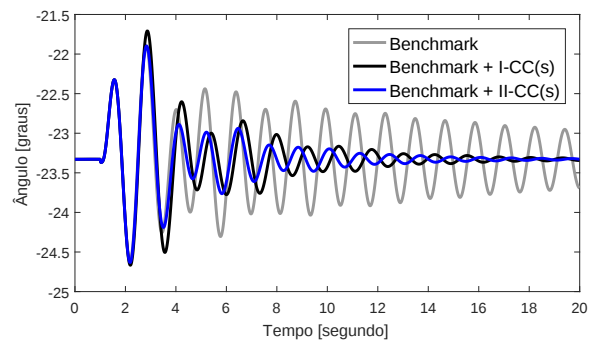


Figura 12: Ângulo do gerador 2, barra 31 para o caso C1 e quando há perda do sinal de controle para o gerador 2.

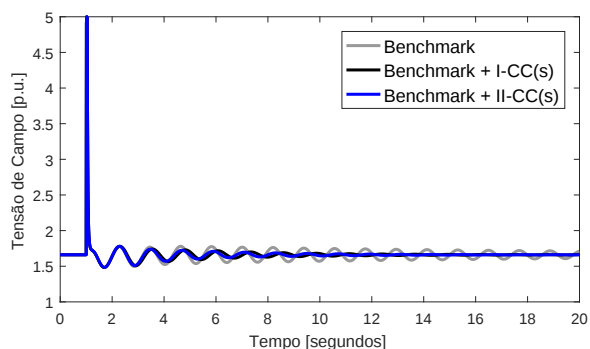


Figura 13: Tensão de campo (esforço de controle) do gerador 2, barra 31 para o caso C1 e quando há perda do sinal de controle para o gerador 2.

5 Conclusões

Este artigo apresentou um procedimento baseado em algoritmos genéticos para projetar controladores centrais de amortecimento considerando uma minimização no número de sinais necessários para tal propósito. Os resultados numéricos mostraram que considerando todos os sinais disponíveis, o procedimento proposto minimizou com sucesso o número de sinais para a operação do controlador central, e assim o centro de controle pode focar seu sistema de segurança em um número menor de canais de comunicação. Simulações não lineares provaram a eficácia do projeto de controle por modelos lineares e o desempenho satisfatório do sistema de malha fechada com controlador centralizado.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2015/24245-8 e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) através do Programa de Excelência Acadêmica (Proex).

Referências

- Almas, M. S., Vanfretti, L., Singh, R. S. and Jonsdottir, G. M. (2017). Vulnerability of Synchrophasor-based WAMPAC Applications' to Time Synchronization Spoofing, *IEEE Transactions on Smart Grid*. in press.
- Canizares, C., Fernandes, T., Geraldi, E., Gerin-Lajoie, L., Gibbard, M., Hiskens TF Past Chair, I., Kersulis, J., Kuiava, R., Lima, L., DeMarco, F., Martins, N., Pal, B. C., Piaridi, A., Ramos TF Chair, R., dos Santos, J., Silva, D., Singh, A. K., Tamimi, B. and Vowles, D. (2017). Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **32**(1): 715–722.
- CEPEL (2014). ANATEM User's Manual version 10.5.2. Available: <http://www.dre.cepel.br/>.
- CEPEL (2015). PacDyn User's Manual version 9.7.2. Available: <http://www.dre.cepel.br/>.
- Chaudhuri, B., Majumder, R. and Pal, B. C. (2004). Wide-Area Measurement-Based Stabilizing Control of Power System Considering Signal Transmission Delay, *IEEE Transactions on Power Systems* **19**(4): 1971–1979.
- Dotta, D., e Silva, A. S. and Decker, I. C. (2009). Wide-Area Measurements-Based Two-Level Control Design Considering Signal Transmission Delay, *IEEE Transactions on Power Systems* **24**(1): 208–216.
- Du, Y. and Liao, Y. (2012). On-line estimation of transmission line parameters, temperature and sag using PMU measurements, *Electric Power Systems Research* **93**: 39–45.
- Farraj, A., Hammad, E. and Kundur, D. (2017). On the Impact of Cyber Attacks on Data Integrity in Storage-Based Transient Stability Control, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **13**(6): 3322–3333.
- Gomes, S., Martins, N. and Portela, C. (2003). Computing small-signal stability boundaries for large-scale power systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **18**(2): 747–752.
- Hammad, E., Zhao, J., Farraj, A. and Kundur, D. (2016). Mitigating link insecurities in smart grids via QoS multi-constraint routing, *2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, IEEE, pp. 380–386.
- Jiang, J.-A., Yang, J.-Z., Lin, Y.-H. and et al. (2000). An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. I. Theory and algorithms, *IEEE Transactions on Power Delivery* **15**(2): 486–493.
- Kamwa, I., Grondin, R. and Hebert, Y. (2001). Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems-a decentralized/hierarchical approach, *IEEE Transactions on Power Systems* **16**(1): 136–153.
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*, Vol. 7, McGraw-hill New York.
- Larsen, E. V. and Swann, D. A. (1981). Applying Power System Stabilizers Part III: Practical Considerations, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-100**(6): 3034–3046.
- Mathworks (2017). Guide, MATLAB User's, Inc., Natick, MA .
- Shen, Y., Yao, W., Wen, J., He, H. and Jiang, L. (2018). Resilient Wide-Area Damping Control Using GrHDP to Tolerate Communication Failures, *IEEE Transactions on Smart Grid* pp. 1–1.
- Soliman, S. A.-H. and Mantawy, A.-A. H. (2012). *Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems*, Energy Systems, Springer New York, New York, NY.
- Terzija, V., Valverde, G., Deyu, C. and et al. (2011). Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks, *Proceedings of the IEEE* **99**(1): 80–93.
- Yao, W., Jiang, L., Wen, J., Wu, Q. H. and Cheng, S. (2014). Wide-Area Damping Controller of FACTS Devices for Inter-Area Oscillations Considering Communication Time Delays, *IEEE Transactions on Power Systems* **29**(1): 318–329.
- Zhang, S. and Vittal, V. (2014). Wide-Area Control Resiliency Using Redundant Communication Paths, *IEEE Transactions on Power Systems* **29**(5): 2189–2199.
- Zhao, J., Zhang, G., Das, K., Korres, G. N., Manousakis, N. M., Sinha, A. K. and He, Z. (2016). Power System Real-Time Monitoring by Using PMU-Based Robust State Estimation Method, *IEEE Transactions on Smart Grid* **7**(1): 300–309.