

Algoritmo dos Morcegos Direcionados aplicado na parametrização de controladores robustos em um sistema carga-frequência

Lucas Galindo Sousa*, Betânia Gomes da Silva Filha*

*IFBA – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – Campus Salvador R. Emídio dos Santos, s/n - Barbalho, Salvador - BA, 40301-015. E-mails: lucasgalindosousa@gmail.com; betaniafilha@gmail.com

Abstract: This article uses analysis and design techniques of multivariable systems controllers in the frequency domain to obtain decentralized reduced-order controllers, aiming at robust stability in a three-area load-frequency system. The selection of the most effective input and output signals for the application of the controllers was done using frequency analysis, Relative Gain Array (RGA) and analysis of singular values. Using H_∞ norm the controller was parameterized using Directional Bat Algorithm and compared with the Genetic Algorithm Method used in Silva Filha (2017). In the end, was possible to find an effective controller in oscillatory modes damp with a more effective optimization method.

Resumo: Neste artigo são utilizadas técnicas de análise e projeto de controladores de sistemas multivariáveis no domínio da frequência para obtenção de controladores de ordem reduzida descentralizados, visando a estabilidade robusta em um sistema carga-frequência de três áreas. A seleção dos sinais de entrada e saída mais eficazes para aplicação dos controladores foi realizada através de análises frequenciais, Matriz de Ganhos Relativos (MGR) e análise dos valores singulares. Utilizando a norma H_∞ , o controlador foi parametrizado através do Algoritmo dos Morcegos Direcionados e comparado com o método de Algoritmos Genéticos utilizado em Silva Filha (2017). Ao final, foi possível encontrar um controlador eficaz no amortecimento dos modos oscilatórios com um método de otimização mais eficiente.

Keywords: Robust Control, Norm H_∞ , Bat Algorithm, Singular values, multivariable systems

Palavras-chaves: Controle Robusto; Norma H_∞ ; Algoritmo dos Morcegos; valores singulares; sistemas multivariáveis;

1. INTRODUÇÃO

A estabilidade dos sistemas elétricos tem sido uma preocupação desde a sua origem. Para grandes sistemas de potência, os quais são constituídos normalmente por áreas de controle interligadas, o controle carga-frequência é importante para manter a frequência do sistema e a potência de intercâmbio entre áreas nos valores programados. A construção de grandes sistemas elétricos interligados, favoreceu o aparecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência, decorrentes especialmente da excitação oriunda de pequenas perturbações e variações na demanda.

O conhecimento da natureza, tipos, frequências de oscilações mais críticas são fundamentais para um bom projeto. As oscilações do tipo interárea tendem a ocorrer quando as áreas são interligadas por linhas de transmissão fracas, ou seja, com capacidades muito inferiores às capacidades dos sistemas que elas interligam (Klein, Rogers e Kundur, 1991) Tais oscilações limitam a potência transmitida e diminuem a confiabilidade do sistema, influenciando fatores de mercado, como o preço da eletricidade (Jesus, 2018). Sistemas de potência interligados

não podem operar sem controle, sendo necessário a presença de controladores que amortecem os Modos dessas Oscilações (Rogers, 2000). Por esta razão, uma proposta usual de projetistas de controle em sistemas de potência é a inclusão de compensadores descentralizados de avanço-atraso, chamados de estabilizadores de sistemas de potência (ESP), que forneçam sinais estabilizantes suplementares nos sistemas de controle de excitação dos geradores (Silva Filha, 2017) Os métodos de domínio da frequência são constantemente utilizados nas análises e projetos desses estabilizadores.

Nesse artigo, projeta-se um controlador avanço-atraso descentralizado em um sistema carga-frequência de três áreas, a fim amortecer as oscilações eletromecânicas de baixa frequência. O projeto de controle é robusto segundo a norma H_∞ , que consiste em minimizar os picos de respostas frequenciais de um sistema de malha fechada, diante de entradas exógenas, o que corresponde ao valor singular máximo de um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) (Skogestad e Postlethwaite, 2005). Tal projeto envolve a resolução do problema de minimização da norma H_∞ na definição dos parâmetros do controlador, sendo necessário a utilização de métodos computacionais e numéricos para a

melhor solução.

Neste artigo, utilizando-se o Algoritmo dos Morcegos Direcionados (em inglês, *dba – Directional Bat Algorithm*) como método heurístico de sintonia dos controladores, e comparar o a eficiência deste algoritmo com o Algoritmo Genético utilizado em (Silva Filha, 2017).

2. METODOLOGIA UTILIZADA

O projeto de controladores proposto nesse trabalho é dividido em duas etapas: primeiro faz-se a seleção de pares de entradas e saídas do sistema onde os controladores irão atuar e depois é feito a parametrização desses controladores.

a. Seleção de Entradas e Saídas

O método descrito em Castro (2006) usa de matrizes de ganhos relativos (MGR) combinadas a verificação da controlabilidade e observabilidade pelos valores singulares para garantir a descentralização e a seleção mais precisa das entradas e saídas que serão mais eficazes para a colocação dos controladores.

A MGR é importante para análise de sistemas multivariáveis e será usada para uma prévia seleção de entrada e saídas para controle descentralizado. A MGR é definida por:

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

$\mathbf{G}(j\omega)$ é a matriz de funções de transferência de respostas frequenciais (MFTfr), m o número de entradas de controle e r o número de sinais de saídas. $\lambda_{ij} = g_{ij}b_{ji}$, onde b_{ji} é o elemento ji da matriz inversa generalizada \mathbf{G}^+ e g_{ij} é o elemento ij da matriz \mathbf{G} , sendo esta uma medida de interação entre entradas e saídas. Define-se λ_{ij} como uma medida de interação entre a entrada j e a saída i (Castro, 2006).

Primeiramente gera-se a matriz MGR do sistema completo, em estado estacionário ($\omega = 0$) com todas as entradas e saídas. Com a MGR encontrada excluem-se os pares de entrada e saída pouco efetivos ou que prejudiquem o projeto do controlador. As premissas básicas para a retirada dos pares são:

- Pares com $\lambda_{ij} < 0$, para se evitar instabilidade por iterações em baixa frequência;
- Saídas com $\sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \ll 1$;
- Os pares com valores grandes de $\lambda_{ij} > 10$, nesse quesito, tais valores são sempre mal condicionados e de difícil controle.

Em seguida, os conjuntos restantes são testados para verificação de descentralização na frequência de corte, sendo descartados aqueles com fraca descentralização. Um sistema possuir controladores descentralizados significa que os controladores das unidades não interferem uns nos outros. Um conjunto de entradas e saídas é descentralizado se $\Lambda(\mathbf{G}) \approx \mathbf{I}$.

Finalmente, os conjuntos restantes são comparados, usando valores singulares, para selecionar o conjunto com boa descentralização e com a maior controlabilidade na faixa dos Modos de oscilações eletromecânicas (MOE). Valores singulares podem ser calculados em (2), onde λ_i é o i -ésimo autovalor da matriz $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ ou $\mathbf{G} \mathbf{G}^T$, \mathbf{G}^T é sua matriz transposta e k é o menor valor entre o número de entradas e o número de saídas.

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

O maior valor singular $\bar{\sigma}$ na frequência de um modo de oscilação eletromecânica representa o grau de observabilidade do modo, enquanto o menor valor singular $\underline{\sigma}$ representa a controlabilidade do MOE. Define-se γ como o número de condição, sendo este a relação entre o maior e menor valor singular.

Grandes picos no gráfico do valor singular máximo representam modos pouco amortecidos e fortemente observáveis. Zeros influentes podem ser observados em vales no gráfico do valor singular mínimo, sendo importante observar que os zeros de um sistema podem provocar significativos efeitos na controlabilidade e observabilidade dos modos e no projeto dos controladores. Um número de condição elevado ($\gamma > 10$) indica dificuldade de controle para o sistema (Skogestad e Postlethwaite, 2005).

b. Parametrização de Controlador Robusto Descentralizado H_∞

No sistema adotado neste trabalho são desprezadas as equações dinâmicas na modelagem, como as equações subtransitórias dos amortecedores e equações do regulador de velocidade, constituindo incertezas não estruturadas, conhecidas como $\Delta(s)$. O modelo de sistema de malha fechada $M\Delta$ (Skogestad e Postlethwaite, 2005), cujo bloco de incertezas Δ está isolado, e arrumando os demais blocos do modelo com o controlador resulte no diagrama da Figura 1.

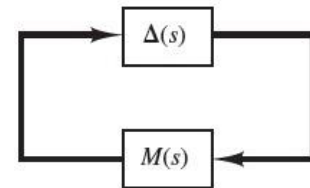


Fig. 1- Estrutura $M\Delta$ do Sistema (Castro, 2006)

Sendo que $\mathbf{M}(s) = -\mathbf{W}_o(s)\mathbf{T}(s)\mathbf{H}(s)$. $\mathbf{T}(s)$ é equivalente ao produto da Matriz de sensibilidade pelo sistema. $\mathbf{H}(s)$ é a matriz diagonal com os modelos dos controladores.

A matriz $\mathbf{W}_o(s)$ é representada por $\omega_o(s)\mathbf{I}$, onde $\omega_o(s)$ é um peso, considerando um único limite superior, representando o pior caso, associado a todos os canais de controle (Skogestad e Postlethwaite, 2005)..

Considera-se como condição necessária e suficiente para estabilidade robusta do sistema, com $\bar{\sigma}(\Delta) \leq 1, \forall \omega$, que $\bar{\sigma}(\mathbf{M}) \leq 1, \forall \omega$. Assumindo que os controladores de $\mathbf{H}(s)$ são idênticos, a condição de robustez pode ser reescrita como:

$$\bar{\sigma}(\mathbf{T}) \leq \frac{\bar{\sigma}(\mathbf{H}^{-1})}{\omega_o} \quad (3)$$

Para atingir a robustez é necessário então parametrizar o controlador de forma que satisfaça a condição de estabilidade robusta do sistema, ou seja, projetar de tal forma que o pico máximo do maior valor singular da matriz \mathbf{M} seja o mínimo possível.

c. O Algoritmo dos Morcegos Direcionados

O Algoritmo dos Morcegos Direcionados (Em inglês, *Directional Bat Algorithm ou dBA*) (Chakri et al, 2017) é um aprimoramento do Algoritmo dos Morcegos, criado por Xin-She Yang (2010), inspirado no sistema de ecolocalização dos morcegos usado durante o processo de caça de seus alimentos.

Basicamente, quatro modificações foram adicionadas ao algoritmo tradicional para melhorar suas capacidades de investigação e exploração forçada da função objetivo.

A primeira modificação trata dos cálculos das novas posições dos morcegos. O morcego virtual passa a emitir dois pulsos em duas direções distintas, uma na direção do morcego com a melhor posição (melhor solução) e outra na direção de um morcego selecionado aleatoriamente, conforme (4) e (5), onde f_i é a frequência do i -ésimo morcego para a iteração t , f_{min} e f_{max} são os valores mínimos e máximos das frequências e $rand_1$ e $rand_2$ são valores gerados randomicamente entre 0 e 1.

$$f_1 = f_{min} + (f_{max} - f_{min})rand_1 \quad (4)$$

$$f_2 = f_{min} + (f_{max} - f_{min})rand_2 \quad (5)$$

Se a função objetivo do morcego selecionado aleatoriamente obtém resultado melhor do que o morcego atual, então a nova posição \mathbf{x}_i^t a ser investigada é calculada usando (6), sob a suposição de que a informação do morcego randômico foi importante. Caso contrário, calcula-se a posição nova através de (7).

$$\mathbf{x}_i' = \mathbf{x}_i + (\mathbf{x}_{best} - \mathbf{x}_i)f_1 + (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i)f_2 \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_i' = \mathbf{x}_i + (\mathbf{x}_{best} - \mathbf{x}_i)f_1 \quad (7)$$

Sendo \mathbf{x}_{best} a melhor solução encontrada da população de morcegos. Tais movimentos tem o objetivo de diversificar a direção dos movimentos dos morcegos ampliando a capacidade de investigação do algoritmo.

A segunda modificação consiste no acréscimo de um parâmetro de estabilização w_i^t no processo de busca local. Este parâmetro inicia com um grande valor percentual da faixa entre os limites superiores e inferiores e decresce com o aumento das iterações até 1% de um quarto do seu comprimento. Equações (8) a (11) descrevem o novo processo de busca local, onde UB e LB são os vetores dos limites superiores e inferiores respectivamente, t_{max} é o número máximo de iterações definido na simulação, $\varepsilon \in [-1,1]$ e $\langle A^t \rangle$ é a média dos

volumes dos morcegos na iteração t .

$$\mathbf{x}_i' = \mathbf{x}_i + \varepsilon \langle A^t \rangle w_i^t \quad (8)$$

$$w_i^t = \frac{w_{i0} - w_{i\infty}}{1 - t_{max}}(t - t_{max}) + w_{i\infty} \quad (9)$$

$$w_{i0} = \frac{UB_i - LB_i}{4} \quad (10)$$

$$w_{i\infty} = \frac{w_{i0}}{100} \quad (11)$$

A terceira modificação altera o cálculo das taxas de emissão e volume dos pulsos. No algoritmo tradicional, as taxas de emissão e o volume dos pulsos atingiam o valor final muito rapidamente no decorrer das iterações, reduzindo a alternância entre a busca global e local. No começo das iterações, dBA promove a busca global mais do que as locais para investigar a função objetivo com mais eficiência. Isto ocorre atribuindo-se um valor pequeno a taxa inicial. Quando as iterações tendem ao valor final, a taxa de emissão aumenta para forçar a exploração dos morcegos mais bem posicionados. A última modificação consiste em alterar a condição para a atualização das taxas de emissão, volumes e soluções, permitindo-a caso o movimento dos morcegos produza uma melhor solução com relação à anterior e não com relação a melhor solução global. O pseudocódigo do dBA pode ser visto na figura 2.

Algoritmo dos Morcegos Direcionado (dBA)	
1.	Definição da função objetivo $F(\mathbf{x})$
2.	Inicialização dos morcegos $LB \leq \mathbf{x}_i \leq UB$ ($i = 1, 2, \dots, N$)
3.	Cálculo das soluções $F_i(\mathbf{x}_i)$ e seleção da melhor posição \mathbf{x}_{best}
4.	Inicialização dos parâmetros: f_{min} , f_{max} , w_i , r_i e A_i
5.	While $t \leq t_{max}$ do
6.	For $i = 1$ to N do
7.	Selecionar um morcego aleatoriamente $k \neq i$
8.	Gerar pulsos (4) e (5)
9.	If $F(\mathbf{x}_k) \leq F(\mathbf{x}_i)$
10.	Explorar Função objetivo (6)
11.	Else
12.	Explorar Função objetivo (7)
13.	End If
14.	If $rand > r_i$
15.	Proceder com busca local (8) e (9)
16.	End If
17.	Verificar se $LB \leq \mathbf{x}_i' \leq UB$, ajustando se necessário
18.	If $F(\mathbf{x}_i') \leq F(\mathbf{x}_i)$ & $rand \leq A_i$
19.	Atualizar posição do morcego $\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i'$
20.	Atualizar r_i e A_i
21.	End If
22.	If $F(\mathbf{x}_i') \leq F(\mathbf{x}_{best})$
23.	$\mathbf{x}_{best} = \mathbf{x}_i'$
24.	End If
25.	End For
26.	End While

Fig. 2 - Pseudocódigo do dBA

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema de potência de controle de carga-frequência de três áreas equivalentes interligadas descritas em Castro (2006). O modelo do sistema é representado por (12) e (13):

$$\dot{x} = \mathbf{A}X + \mathbf{B}u \quad (12)$$

$$y = \mathbf{C}X \quad (13)$$

onde :

$$x^T = |\Delta f_1 \Delta x_{E1} \Delta P_{G1} \Delta P_{tie1} \Delta f_3 \Delta x_{E3} \Delta P_{G3} \Delta P_{tie2} \Delta f_2 \Delta x_{E2} \Delta P_{G2}|$$

$$u^T = |\Delta P_{C1} \Delta P_{C3} \Delta P_{C2}|$$

$$y^T = |\Delta f_1 \Delta P_{tie1} \Delta f_3 \Delta P_{tie2} \Delta f_2|$$

em que f_i , x_{Ei} , P_{Gi} e P_{tiei} são respectivamente, frequência, sinal de saída do regulador de velocidade, potência mecânica da turbina e potência de intercâmbio do turbogerador da área i , em valores incrementais. P_{Ci} é a entrada de controle do regulador de velocidade da área i . Os autovalores associados às oscilações desses sistema são: $\lambda_1 = -0,1893 \pm i4,6410$, $\lambda_2 = 0,1199 \pm i4,0102$ e $\lambda_3 = -0,1759 \pm i3,0010$.

A partir da MGR, tem-se uma indicação de forte descentralização do sistema, portanto serão colocados controladores descentralizados idênticos (por uma questão de simplificação) nos pares de entrada e saídas selecionados.

a. Parametrização de Controladores

Os controladores escolhidos são do tipo avanço-atraso, modelados matematicamente por (14).

$$h = K(1 + sT_1/1 + sT_2) \quad (14)$$

A função objetivo é a função M que deve ser minimizada para que por consequência também seja minimizado o maior valor singular de T . Para esse problema, foram utilizados 20 morcegos virtuais em 50 iterações. Também foram escolhidos os seguintes valores para os parâmetros do dBA: $f_{min} = 0$, $f_{max} = 0,9$, $r_{i\infty} = 0,7$, $r_{i0} = 0,4$, $A_{i\infty} = 0,4$, $A_{i0} = 0,8$.

Os resultados encontrados para os parâmetros do controlador foram: $K = 0,4$, $T_1 = 0,001s$ e $T_2 = 0,1s$. O valor de K foi limitado entre 0,4 e 1 para garantir a estabilidade do sistema (Silva Filha, 2017). A máquina utilizada nas simulações foi um computador Intel Core i5, 2,4 GHz, 8Mb de memória RAM. O dBA teve um tempo médio de 23,85s para encontrar o ponto ótimo da função dentro dos limites pré-definidos, apresentando uma redução de 41% do tempo da simulação comparado ao método de algoritmo genético utilizado em Jesus (2018) e Silva Filha (2017).

b. Análise da Robustez

Os gráficos de $\bar{\sigma}(T)$ com o controlador obtido e de $\bar{\sigma}(H^{-1})/w_o$ para $w_o=(0,25s+0,15)/(0,5s+1)$ são apresentados na Figura 3.

Visualiza-se na Figura 3 que o maior valor singular de T se encontra abaixo do gráfico de $\bar{\sigma}(H^{-1})/w_o$, demonstrando que o controlador projetado atende a condição de robustez da norma H_∞ .

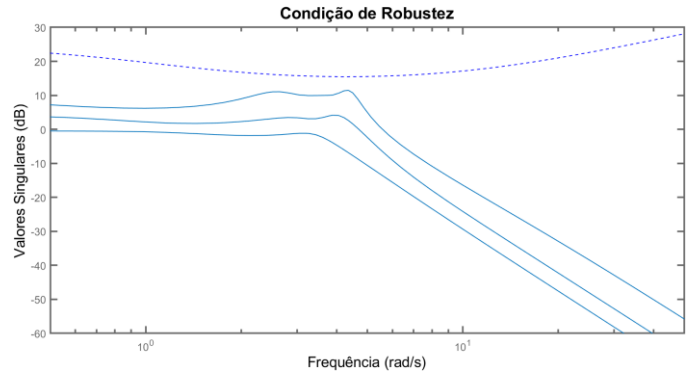


Fig. 3 – Valores singulares de T em comparação com $\bar{\sigma}(H^{-1})/w_o$ para sistema com controladores aplicados

c. Resposta Transitória

Na Figura 4, pode-se visualizar a resposta do sistema com e sem controlador para entradas de impulso para o par entrada/saída $(\Delta P_{C1}, \Delta P_{tie1} + B\Delta f_1)$, com $B= 0,417$ MW/Hz (Castro, 2006).

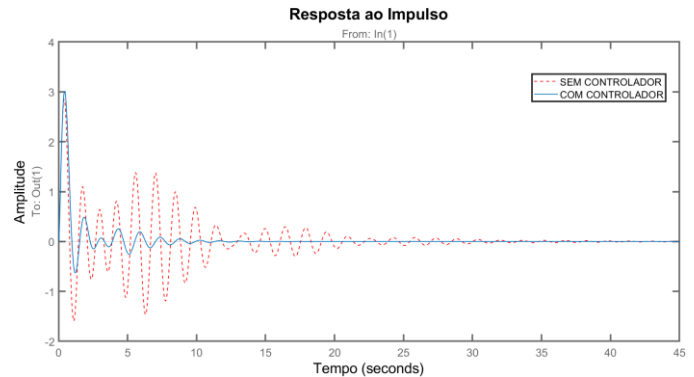


Fig. 4 - Resposta ao impulso com e sem controlador

Observa-se que o controlador amorteceu as oscilações produzidas com um excelente ganho no tempo de acomodação. Para a entrada em degrau, o tempo de acomodação foi reduzido de 25,5s para 6,4s, uma redução de 74,9%. Para o caso do impulso, o mesmo parâmetro foi reduzido em aproximadamente 71%. Todavia, houve um aumento de 8% no valor de pico para a resposta ao impulso e um erro estacionário na resposta ao degrau, algo que deve ser suportado pelo sistema.

d. Amortecimento dos MOE

Os autovalores do sistema sem controlador podem ser visualizados no diagrama da Fig. 5, com os autovalores representados pelas cruzes vermelhas. Para o amortecimento mínimo de 5%, adotado amplamente na literatura, percebe-se que alguns autovalores equivalentes aos MOE estão fora da região de amortecimento mínimo (região dentro do cone delimitado pelas retas). O objetivo é que todos os autovalores estejam situados no plano esquerdo e dentro da região de amortecimento mínimo com acréscimo dos controladores.

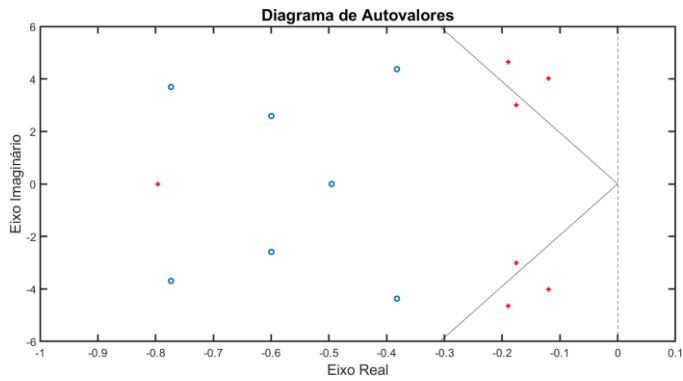


Fig. 5 – Diagrama de Autovalores do Sistema com e sem controlador

Na mesma figura, os autovalores do sistema com controlador são representados pelos círculos azuis. Nesse caso os MOE foram amortecidos dentro percentagem mínima desejada.

e. Sistema Submetido a Falhas

Uma característica de um sistema robusto é a sua capacidade de manter a estabilidade diante de falhas na rede. Uma falha comum em sistemas de potência é a perda de um dos controladores, resultando em variações na potência de intercâmbio entre as áreas.

Nas Figuras 6 e 7 são mostrados que mesmo diante dessas situações o sistema com os controladores projetados neste artigo atingiu a condição de robustez.

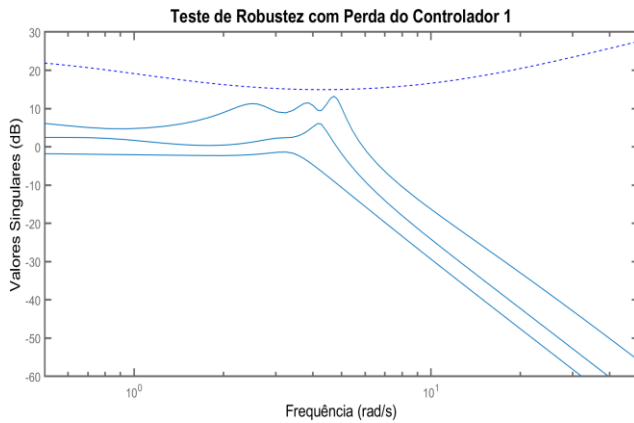


Fig. 6 – Valores singulares de T em comparação com $\bar{\sigma}(H^{-1})/w_o$ para sistema submetido a perda do controlador 1.

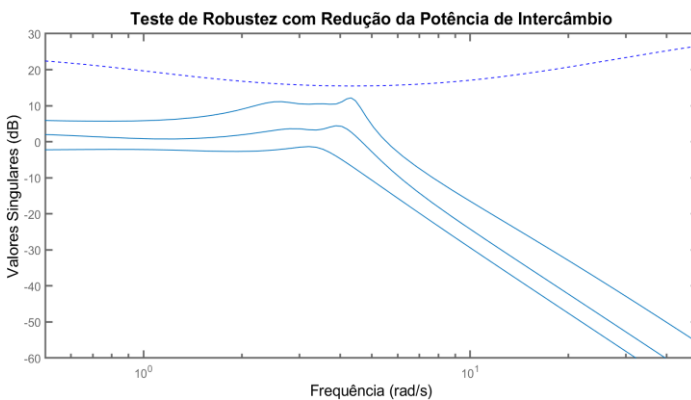


Fig. 7 – Valores Singulares de T em comparação com $\bar{\sigma}(H^{-1})/w_o$ para sistema submetido a redução das potências de intercâmbio.

f. Comparação com Algoritmos Genéticos

Para comparação do tempo de convergência entre o dBA e o algoritmo genético utilizado em Silva Filha (2017) foram realizadas simulações no Matlab com parâmetros análogos entre os algoritmos. O tempo médio, em 10 simulações, gasto pelos Algoritmos Genéticos (GA) para determinação do ponto ótimo foi 36,2s, enquanto o tempo médio gasto pelo dBA foi 18,44s. Isto ocorre devido a quantidade de iterações necessárias em cada algoritmo para determinação do ponto ótimo. O dBA convergiu com 50 iterações, enquanto o GA precisou de 100.

Comparando o controlador obtido com o dBA e o controlador obtido através do GA ($K = 0,4028$, $T_1 = 0,001s$ e $T_2 = 0,01s$, observa-se na Figura 8 que os autovalores do controlador obtido pelo dBA estão mais distantes do eixo imaginário e melhor localizados dentro da região do amortecimento requerido, apontando para um melhor amortecimento dos MOE com este controlador. Na Fig 9 é possível observar como os picos da curva do valor singular máximo são ligeiramente menores para o controlador projetado com dBA.

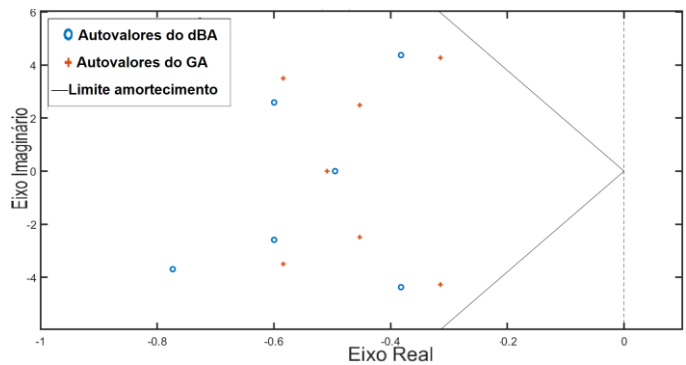


Fig. 8 - Diagrama de Autovalores para Os Sistemas com Controladores Obtidos pelo GA e dBA

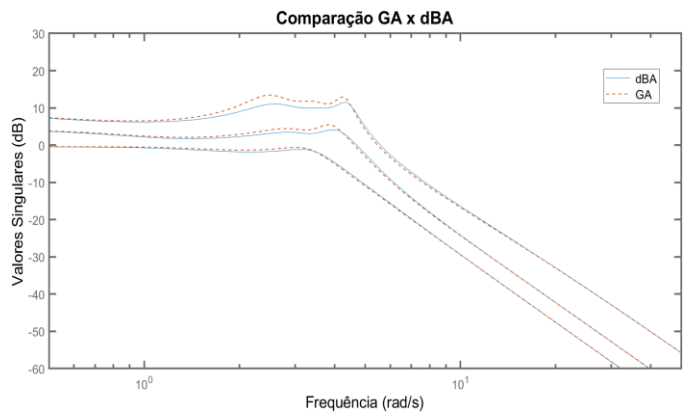


Fig. 9 – Valores singulares dos sistemas com controladores projetados por GA e dBA

Nas Figuras 10 e 11 são mostradas as respostas ao Impulso e ao degrau, respectivamente, com relação aos dois casos em análise.

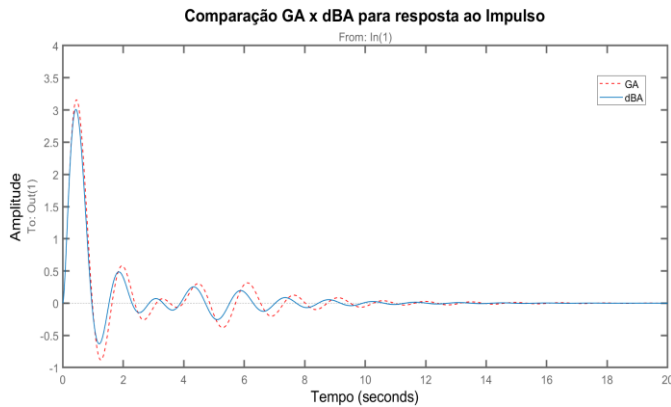


Fig. 10 – Comparação da resposta ao impulso entre os controladores obtidos com dBA e GA

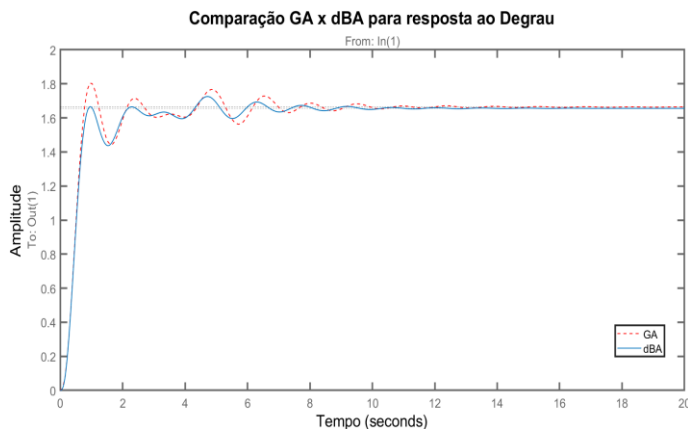


Fig. 11 – Comparação da resposta ao pulso entre os controladores obtidos com dBA e GA

O tempo de acomodação para o caso dos controladores projetados com dBA foram ligeiramente menores, demonstrando que tais controladores tem uma resposta mais rápida. Para a entrada degrau, o dBA teve um tempo de acomodação de 6,41s, enquanto o GA teve 6,82s. Para o impulso, o dBA teve 8,19s e o GA 9,29s.

4. CONCLUSÃO

Neste artigo foi desenvolvido um projeto de controladores robustos descentralizados para um sistema carga-frequencia de três áreas para amortecimento dos modos de oscilações eletromecânicas.

O uso de autovalores possibilitou a visualização dos MOE associados ao sistema. As frequências dos modos oscilatórios indicaram que os três eram modos interárea, sendo necessário o amortecimento.

No processo de sintonia foi utilizado o Algoritmo dos Morcegos Direcionados. Os parâmetros obtidos resultaram em um controlador que atendeu aos critérios de robustez. A estabilidade do sistema com controladores diante de pequenas perturbações é verificada nas respostas ao pulso e ao impulso. Os controladores favoreceram o amortecimento das oscilações, levando o sistema ao regime estacionário mais rapidamente, com uma redução de aproximadamente 75% e 71% dos tempos de acomodação para o caso de excitações do degrau e impulso respectivamente. Além disto, foram realizados testes para o sistema sendo submetido a falhas. Mesmo retirando o

controlador 1 ou reduzindo as potências de intercambio em 20%, o sistema apresentou robustez.

Quanto à meta-heurística utilizada, o dBA revelou-se como um método de otimização mais eficiente que o GA, uma vez que retornou o ponto do ótimo da função objetivo com menos iterações e conseqüentemente, menor tempo de simulação, algo muito importante em projetos de controladores de ordem mais elevada e mais variáveis.

Os controladores obtidos com dBA também se mostraram mais eficientes do que aqueles obtidos com Algoritmos Genéticos em Silva Filha (2017), pois não somente atenderam as especificações requeridas como apresentaram um tempo de resposta mais rápido e melhor amortecimento dos MOE.

Para trabalhos futuros sugere-se a aplicação do dBA para parametrização de modelos mais complexos de ESP. É interessante também aplicar tais controladores em sistemas multimáquinas reais. Novos algoritmos baseados no tradicional Algoritmo dos Morcegos também podem ser utilizados para tentativa de otimização do tempo de convergência.

REFERÊNCIAS

- Castro, A. (2006). “Projeto de controladores robustos descentralizados de ordem reduzida para amortecimento de oscilações em sistemas elétricos de potência,” João Pessoa, Paraíba, Brasil.
- Chakri, A. Khelif, R. Benouaret, M. e Yang, X.-S. (2017) “New directional bat algorithm for continuous optimization problems,” *Expert Systems with Applications*, vol. 69, pp. 159-175.
- Jesus, E. S. (2018) “Projeto de Controladores Robustos Aplicados Em um Sistema de Potência,” Projeto de Final de Graduação apresentada ao Instituto Federal da Bahia. Salvador, Bahia, Brasil
- Klein, M., Rogers, G. J., & Kundur, P., (1991) “A Fundamental Study of Inter-areas Oscillations in Power Systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, nº 3, p. 914–921
- Rogers, G. (2000) *Power System Oscillation*, 1 ed., Boston: Kluwer Academic Publishers,
- Silva Filha B. G. (2017), “Sintonia robusta de estabilizadores de sistema de potência para controle de pequenas perturbações”, Tese de Doutorado apresentado à Universidade Federal da Bahia, Salvador. Bahia. Brasil
- Skogestad S., Postlethwaite, I., (2005) *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*, John Wiley & Sons.
- Yang, X.-S. (2010) “A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm,” *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2010)*, vol. 284, pp. 65-74.