

Sintonia de Controlador Múltiplo Ressonante por Algoritmo Genético Aplicado a Fontes Ininterruptas de Energia

Aline E. Rubenich* Osvaldo da S. Brandão Junior**
Natan E. Rubenich***

* Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, (e-mail: aline.erubenich@gmail.com).

** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS (e-mail: abrandao.osvaldo96@gmail.com)

*** Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Mato Grosso, MT (e-mail: natan.rubenich@unemat.br)

Abstract: The following paper present proposal a heuristic optimization for tuning a multiple-resonant controller applied to the Uninterruptible Power Supply-UPS, in order to determine the optimal mode. As the genetic algorithm is based on natural selection theory, the methodology of this work was based on this principle, seeking the best answer through the evolution resulting from selection. Through the principle of the internal model with the aid of a genetic algorithm, the controller's tuning mode for its ideal fundamental frequency is verified, acting in the asymptotic follow-up of the reference and rejection of the disturbance. After obtaining the best response, the result was simulated and compared with another tuning method, it can be seen that this work presents better response in steady state, but in transient state it presents greater oscillation amplitudes and longer stabilization time.

Resumo: O seguinte artigo apresenta uma proposta de otimização heurística para sintonia de controlador múltiplo ressonante ao sistema interrupto de energia (Uninterruptible Power Supply-UPS), com o intuito de determinar o modo ótimo. Como o algoritmo genético é baseado nas teoria de seleção natural, a metodologia deste trabalho foi pensando neste princípio, buscando a melhor resposta através das evolução resultante da seleção. Através do princípio do modelo interno com o auxílio de algoritmo genético, verifica-se o modo de sintonia do controlador para sua frequência fundamental ideal atuando no seguimento assintótico da referência e rejeição ao distúrbio. Após obter a melhor resposta o resultado foi simulado e comparado com outro método de sintonia, percebe-se que este trabalho apresenta resposta melhor em regime permanente, porém em regime transitório apresenta maiores amplitudes de oscilação e maior tempo de estabilização.

Keywords: Multiple-resonant control; Genetic Algorithm; Internal model principle; Uninterruptible Power Supply.

Palavras-chaves: Controle múltiplo-ressonante; Algoritmo genético; Princípio do modelo Interno; Uninterruptible Power Supply.

1. INTRODUÇÃO

FONTES ininterruptas de energia (Uninterruptible Power Supply-UPS) são dispositivos que fornecem tensão controlada através de conversores DC-AC ou inversores, retificadores, banco de bateria, carregador de bateria e bypass, proporcionando um maior rendimento e qualidade de fornecimento para cargas críticas. O desempenho de uma UPS é qualificada por normas técnicas internacionais (IEEE-944 e IEC-62040) e nacionais (ABNT), que definem o desempenho estabelecendo a taxa máxima de distorção harmônica total (do inglês, *Total Harmonic Distortion* - THD), distorção individual (do inglês, *Individual Harmonic Distortion* - IHD), regulação de saída e desempenho transitório que o equipamento deve ter.

Para garantir esses requisitos e melhor desempenho, existem diversas técnicas de controle que seguem o princípio do modelo interno (PMI) estabelecendo condições para o seguimento e/ou rejeição de sinais periódicos com erro nulo no sistema aplicadas à UPS, como: controle repetitivo (Flores et al. (2016)) onde insere um elemento de atraso correspondente ao período fundamental do sinal de interesse realimentado, controlador múltiplo-ressonante (Bertoldi (2019)) que apresenta um ganho infinito (ressonância) na frequência do sinal a ser seguido/rejeitado, controlador ressonante-repetitivo (Lorenzini (2015)), junção das técnicas, e entre outras.

A desvantagem do uso do controle múltiplo-ressonante é a possibilidade de apresentar elevada ordem e sintonia complexa, pois para cada componente frequencial presente nos

sinais que se deseja seguir e/ou rejeitar deve-se incluir no controlador um modo ressonante de segunda ordem, com até três parâmetros de sintonia. Pensando nessa complexidade, este trabalho propõem método sistema inteligente deste controlador por algoritmo genético. A proposta é baseada nos trabalhos de otimização do controlador repetitivo para UPS (Liu et al. (2005)), sintonia do controlador PID (Adhikari et al. (2012)) e controle preditivo (Chaves (2020)) a partir uma função objetiva.

A utilização de algoritmo genético como alternativa de sintonização mostra ser interessante por ajustar todos os parâmetros do controlador ao mesmo tempo e testado através da emulação um processo de sobrevivência e evolução das soluções tendem a ser mais aptas. A vantagem deste método comparado com os tradicionais é a resistência a máximos e mínimos locais devido a sua variação de informações durante o processo de seletividade da melhor solução.

O artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 é feita uma breve descrição do sistema UPS, na seção 3 a dinâmica do algoritmo genético, seção 4 apresenta a modelagem do problema para solucionar por algoritmo genérico, na seção 5 os resultados obtidos, bem com a análise dos mesmos, e finalmente, na seção 6 serão apresentadas as conclusões.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

As subseções seguintes descrevem o problema, a modelagem matemática de uma UPS, controlador múltiplo-ressonante e o sistema em malha fechada com controlador.

2.1 Modelo matemático da UPS

O problema a ser estudado é baseado no circuito representado pela figura 1, sua dinâmica é dada por inversores com topologia de meia ponte e filtro passa-baixa LC de segunda ordem encontrado no estágio de rápida (C_f e L_f), além da carga, modelada através de uma corrente de distúrbio i_d e admitância Y_0 .

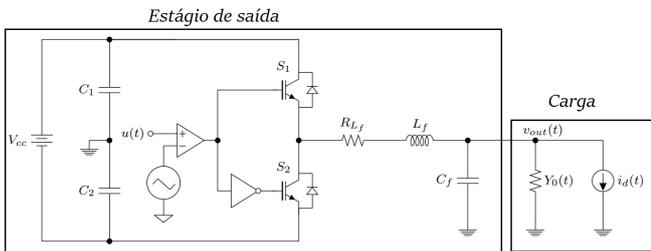


Figura 1. Representação simplificada de uma UPS com carga (Lorenzini (2015)-Adaptado).

A modelagem da dinâmica vista em Pereira et al. (2013), por espaço de estados, são as equações cujos estados são a tensão no capacitor e corrente do indutor. Assim, o sistema é dado por 1, onde $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$ é o vetor de estados, $x_1(t)$ é a corrente no indutor (L_f) e $x_2(t)$ tensão no capacitor (C_f), a entrada é a tensão gerada pela meia ponte $u(t)$ e a saída é a tensão no capacitor (C_f). As matrizes A, B, B_d e C são dadas por 2.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_d i_d \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L_f}}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{Y_0}{C_f} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ 1], \quad (2)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix}$$

Para a aplicação em questão, será usado o modelo do sistema em formato de função de transferência. Utilizando as matrizes do espaço de estados, calcula-se as funções de transferência $G(s)$, entre saída e sinal de controle, e $G_d(s)$, entre saída e distúrbio, dadas por (3). E os valores das variáveis da UPS dada pela Tabela 1.

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B \quad (3)$$

$$G_d(s) = C(sI - A)^{-1}B_d$$

Tabela 1. Parâmetro para algoritmo genético.

Símbolo	Variável	Valor
R_{L_f}	Resistência do indutor do filtro de saída	15mΩ
L_f	Indutância do filtro de saída	1mH
C_f	Capacitância do filtro de saída	300μF
Y_0	Admitância	1mS

2.2 Controlador Múltiplo-Ressonante

Em sistemas do tipo UPS, espera-se que o sinal de saída siga uma referência senoidal com erro nulo em regime permanente e rejeite distúrbios de origem periódica causados por uma carga não linear. Uma solução, é a utilização do controlador múltiplo-ressonante.

Segundo Chen and Shafai (1999), o Princípio do Modelo Interno (PMI) diz que os modos que compõe as referencias e distúrbios devem estar presentes na planta do processo ou no modelo do controlador. A presença destes modos garante que em malha fechada, o ganho e fase entre saída e entrada sejam unitário e nula, respectivamente.

Para entradas/distúrbios senoidais, a função de transferência do modelo interno é dada por (4), onde ω_r é a frequência da senoide em questão, $E(s)$ é o erro da malha de controle e $Y_r(s)$ é a saída do controlador.

$$C(s) = \frac{Y_r(s)}{E(s)} = \frac{1}{s^2 + \omega_r^2} \quad (4)$$

Como $C(s)$ possui dois polos marginalmente estáveis sobre o eixo imaginário, em $(s = \pm j\omega_r)$, dois zeros são inseridos para evitar problemas na estabilização do sistema em malha fechada (Pereira et al. (2013)). Desta forma, o controlador passa a ter função de transferência dada por (5), onde z_1 e z_2 são os zeros estabilizantes.

$$C(s) = \frac{(s + z_1)(s + z_2)}{s^2 + \omega_r^2} \quad (5)$$

Neste trabalho, deseja-se sintonizar estes zeros para o caso onde seguirá referência senoidal de $60Hz$ e se rejeite um distúrbio senoidal da terceira harmônica, cuja frequência é de $180Hz$, gerada por uma carga não linear na saída da UPS. Assim, pelo PMI, deve-se incluir dois modos no controlador. Desta forma, a função de transferência do controlador utilizada é dada por (6), onde z_i são os zeros estabilizantes, K um ganho direto e w_i as frequências das senoides de referência e distúrbio.

$$C(s) = K \frac{(s + z_1)(s + z_2)(s + z_3)(s + z_4)}{(s^2 + w_1^2)(s^2 + w_2^2)} \quad (6)$$

2.3 Sistema em Malha fechada

O sistema estudado possui a estrutura representada em diagrama de blocos na Figura 2, sendo as funções de transferência $C(s)$, $G(s)$ e $G_d(s)$ já definidas anteriormente. $R(s)$, $E(s)$, $D(s)$ e $Y(s)$ são o sinal de referência, erro, sinal de distúrbio e saída do sistema, respectivamente.

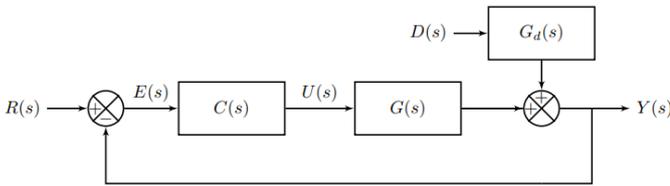


Figura 2. Representação diagrama de blocos do sistema em malha fechada.

As funções de transferências do sistema em malha fechada, que relacionam entrada com a saída $T_r(s)$ e distúrbio com a saída $T_d(s)$ são dadas por (7) e (8). Por fim, a saída $Y(s)$ do sistema é a soma da contribuição de $T_r(s)$ e $T_d(s)$, dada por (9)

$$T_r(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (7)$$

$$T_d(s) = \frac{G_d(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (8)$$

$$Y(s) = T_r(s)R(s) + T_d(s)D(s) \quad (9)$$

3. ALGORITMO GENÉTICO

O algoritmo genético é uma heurística que segue a ideologia do processo natural de evolução de Charles Darwin, onde os mais aptos tendem a sobreviverem.

Dréo et al. (2006) diz que no mundo do algoritmo evolutivo, os indivíduos submetidos à evolução são soluções, mais ou menos eficientes, para um determinado problema. Essas soluções pertencem ao subespaço de pesquisa do problema de otimização. O conjunto de indivíduos tratados simultaneamente pelo algoritmo evolutivo constituem uma população. A evolução durante uma sucessão de iterações é executada até um critério de término, que leva em consideração a priori de qualidade das soluções obtidas.

A base do Algoritmo Genético consiste da seleção de 5 componentes aplicadas ao problema, sendo elas: Codificação, População Inicial, Função de Adaptação, Operadores Genéticos e Parâmetros Diversos.

- (1) **Codificação:** Consiste na transformação das variáveis do problema em representações genéticas das mesmas, ou seja, em vetores cujos componentes são tratados como genes. Isso é necessário para gerar novas soluções (indivíduos) a partir dos operadores genéticos.
- (2) **População Inicial:** Estabelece como será formada a primeira geração de indivíduos que gerarão as primeiras soluções. As novas soluções geradas são a partir dos mesmos, o que garante que se obtenha a busca pelos melhores indivíduos.
- (3) **Função de Adaptação:** A capacidade de cada indivíduo é determinada pela função de adaptação, que mede quanto uma solução é melhor que outra. É a partir desta métrica que se seleciona os indivíduos que passarão pelos operadores genéticos.
- (4) **Operadores Genéticos:** Esta etapa é responsável por gerar novos indivíduos para a nova população, são definidos pela recombinação, mutação e elitismo.
 - **Recombinação:** Gera um novo indivíduo a partir do gene de dois ou mais pais.
 - **Mutação:** Gera um novo indivíduo a partir de apenas um pai. Esse operador gera um equivalente à uma busca local.
 - **Elitismo:** Garante que a melhor solução da geração se propague para a seguinte.

4. MODELAGEM DO PROBLEMA POR ALGORITMO GENÉTICO

Como apresentado anteriormente, as variáveis que descrevem o problema são o posicionamento de 4 zeros e um ganho da função de transferência do controlador.

Para a codificação, essas variáveis são tratadas como dependentes de variáveis binárias de 10 bits. A partir destas, se calcula o valor que será utilizado para obtenção de uma solução do controlador.

As variáveis são:

- $z_{1,2} = \sigma_1 \pm j\gamma_1$
- $z_{3,4} = \sigma_2 \pm j\gamma_2$
- K

Onde z_i é o i -ésimo estabilizante e K é o ganho direto. Os valores de σ_i , γ_i e K podem variar entre:

$$-50 \leq \sigma_{1,2} \leq 0$$

$$w_{1,2} - 200 \leq \gamma_{1,2} \leq w_{1,2} + 200 \quad (10)$$

$$0 \leq K \leq 5$$

Os indivíduos da população serão matrizes de tamanho 5×10 , sendo cada linha uma das variáveis e as colunas são os bits que compõe cada variável. Assim gerando os primeiros valores das variáveis para realizar a simulação do controlador no sistema em malha fechada.

A função de adaptação que mede quanto um indivíduo é mais apto que outro, é determinada pela norma 2 do erro entre a saída da planta e a referência desejada. Esta é representada pela equação (11), onde y_r é a saída devida à referência e y_d é a saída devida ao distúrbio.

$$P_a = \|e(t)\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (r[i] - (y_r[i] + y_d[i]))^2} \quad (11)$$

Cada indivíduo é um conjunto de valores que gera uma função de transferência para o controlador. Realiza-se uma simulação em malha fechada da forma dada pela Figura 2, onde $R(s)$ é uma senoide de amplitude de 127V e frequência 60Hz, e $D(s)$ é também uma senoide de mesma amplitude e frequência de 180Hz.

Ao final da simulação, calcula-se a norma do erro obtido em malha fechada, gerando a aptidão deste indivíduo. Repete-se o mesmo para os demais, para fins de comparação de aplicação dos operadores genéticos.

Tendo-se definido a função de aptidão empregada e a população inicial, inicia-se o algoritmo genético para obtenções de soluções que sejam cada vez mais adaptadas a sobreviver conforme se passem as gerações. Para se entrar em detalhes na lógica dos operadores genéticos, descreve-se a seguir, Tabela 2, os parâmetros levados em consideração que auxiliam a tomada de decisão do algoritmo.

Tabela 2. Parâmetros para algoritmo genético

Parâmetro	Valor
Número de variáveis (nvar)	5
Número de indivíduos na população (npop)	40
Número de genes (ngen)	10
Número de gerações/iterações (nger)	20
Número de recombinações (nrec)	10
Número de indivíduos no duelo (ndue)	5
Número de mutações (nmut)	10
Número de elite (nelite)	3
Probabilidade de mutação do melhor (pmut)	0.4

Cada geração segue um padrão para dar origem à novos indivíduos. Primeiramente se realizam recombinações, as quais se iniciam pela escolha de 2 indivíduos. Cada um destes é escolhido através de um torneio em um grupo de tamanho ndue.

Para gerar os novos filhos a partir da recombinação, aumenta a variabilidade dos indivíduos da geração seguinte. Cada caso conta com a determinação de 1 ou 2 posições de corte dos genes. As posições de cortes são selecionadas de forma aleatória entre os intervalos determinados e a recombinação é feita a partir dos genes dos pais com a dimensão de cada um determinada pelo corte, formando, no fim, uma matriz 5x10.

Para o operador de mutação, há uma probabilidade de se escolher o melhor indivíduo ao menos uma vez por geração, sendo esta dada por pmut. Caso contrário, escolhe-se indivíduos aleatoriamente para sofrerem mutação.

Assim, através de um processo de iterativo, a população é melhorada após passarem por uma avaliação de aptidão. A obtenção de um novo indivíduo, estes valores binários são transformados em valores absolutos que serão utilizados para cálculo de uma solução do controlador.

5. RESULTADOS

Tendo-se definido todos os parâmetros base para implementação do Algoritmo Genético, é possível iniciar a coleta

de resultados. Como primeira etapa desta fase, inicia-se com a observação de como o algoritmo posiciona os zeros do controlador a fim de minimizar o critério evolutivo.

Dessa forma, torna-se viável estudar critérios de desempenho, além de possíveis melhorias na escolha dos parâmetros que regem o algoritmo, como por exemplo o numero de recombinações e mutações por geração.

5.1 Resultados Iniciais

Para estudo do posicionamento dos zeros com os parâmetros definidos na Tabela 2, serão feitas 50 simulações do algoritmo genético, guardando sempre os valores das variáveis do melhor controlador obtido. Plota-se então nas Figuras 3 e 4 o valor da parte real e imaginárias dos zeros do melhor controlador de cada simulação.

Nota-se que o par de zeros complexos conjugados de frequência 180 Hz possuem maior variabilidade nas soluções, enquanto que para o de 60Hz há apenas variabilidade na parte imaginária. Há pequena variação também para o ganho direto inserido na malha. Houve apenas 3 casos em que o valor desta variável assumiu o valor de aproximadamente 3.5, casos onde se obteve alguns dos menores valores das partes complexas dos zeros.

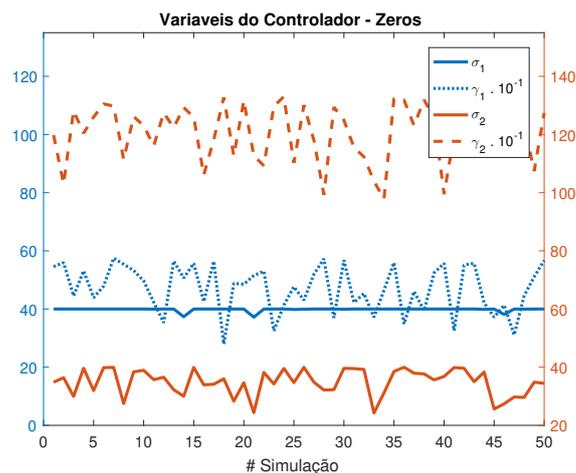


Figura 3. Posicionamento dos zeros do controlador por simulação

A partir da Figura 5, é possível inferir que a estabilização da melhor resposta obtida acontece por volta da décima geração, não havendo melhoras posteriores.

Porém, ainda que haja uma rápida estabilização da resposta do algoritmo, este apresenta grande variabilidade quanto à adaptação final do melhor indivíduo. Desta forma, é possível que haja espaço para melhoria quanto a escolha dos parâmetros do algoritmo.

5.2 Melhorias no Algoritmo

Tendo em vista a grande variabilidade nos resultados obtidos na seção anterior, estudou-se uma mudança nos parâmetros de base para o algoritmo genético afim de garantir uma melhor convergência.

Nota-se que para 5 variáveis, há uma infinidade de possibilidades e combinações que geram controladores diferentes.

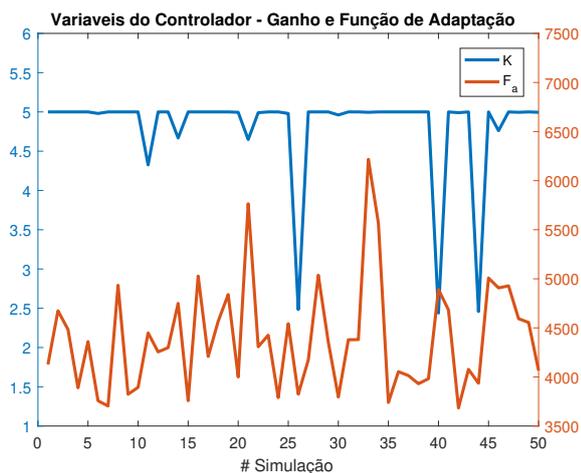


Figura 4. Ganho direto K e função de adaptação por simulação

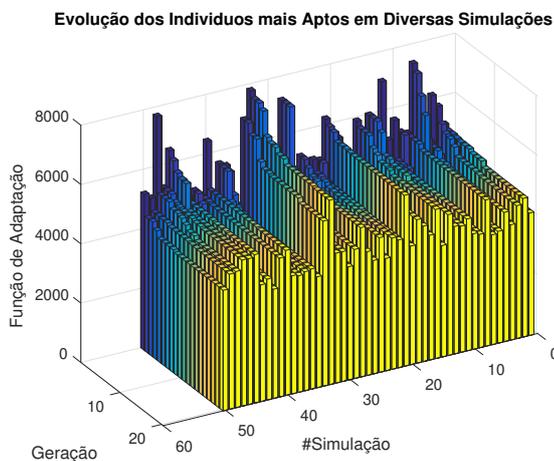


Figura 5. Evolução da função de adaptação dos melhores indivíduos em cada simulação

Desta forma, optou-se por aumentar o número de indivíduos na população e o número de gerações, possibilitando uma maior variabilidade dos indivíduos, permitindo uma maior probabilidade de se gerar a solução mais apta ao final de cada simulação. Os novos valores escolhidos estão descrito na Tabela 3, aumentando-se substancialmente o número de indivíduos em cada simulação.

Tabela 3. Parâmetros para algoritmo genético

Parâmetro	Valor
Número de variáveis (nvar)	5
Número de indivíduos na população (npop)	100
Número de genes (ngen)	10
Número de gerações/iterações (nger)	100
Número de recombinações (nrec)	35
Número de indivíduos no duelo (ndue)	3
Número de mutações (nmut)	40
Número de elite (nelite)	1
Probabilidade de mutação do melhor (pmut)	0.4

Realizando as simulações com os novos parâmetros, nota-se que há uma grande diferença em relação à variância dos resultados obtidos. Observa-se que o aumento no número

de indivíduos melhora a resposta do método, como visto nas Figuras 6 e 7, onde verifica-se uma oscilação menor das variáveis quando comparado as Figuras 3 à 5. Durante o processamento do algoritmo, para estas condições, gerou um maior esforço computacional comparado com o anterior onde apresentava valores menores para seus parâmetros.

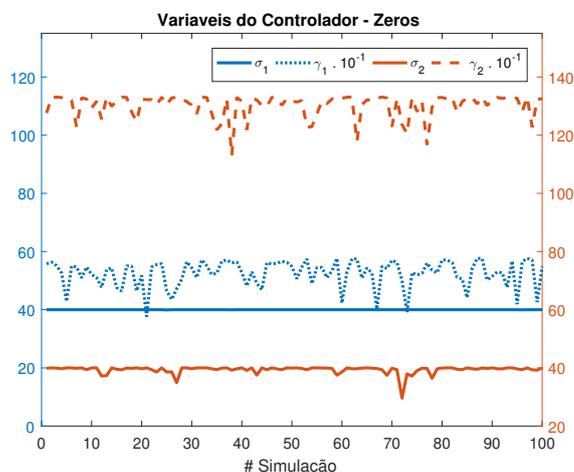


Figura 6. Posicionamento dos zeros do controlador por simulação após melhorias

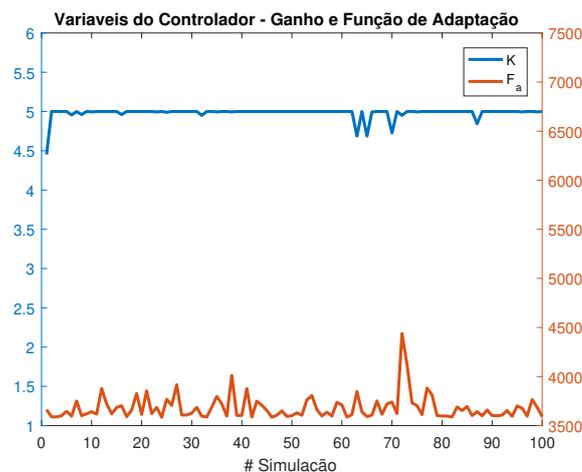


Figura 7. Ganho direto K e função de adaptação por simulação após melhorias

Finalmente, realizando uma simulação com o melhor controlador obtido de todas as gerações das 100 simulações feitas, obtém-se a evolução do erro entre referência e saída da UPS na figura 9. Observa-se que em torno de 0.25 segundos de simulação o distúrbio é completamente rejeitado, garantindo uma boa performance do controlador encontrado.

5.3 Comparação dos Resultados

A fim de se analisar a eficiência do método proposto com outros propostos na bibliografia, reproduziu-se um controlador proposto por Bertoldi (2019), onde o mesmo propõe uma metodologia de sintonia de controlador múltiplo-ressonante através da solução de uma equação diofantina.

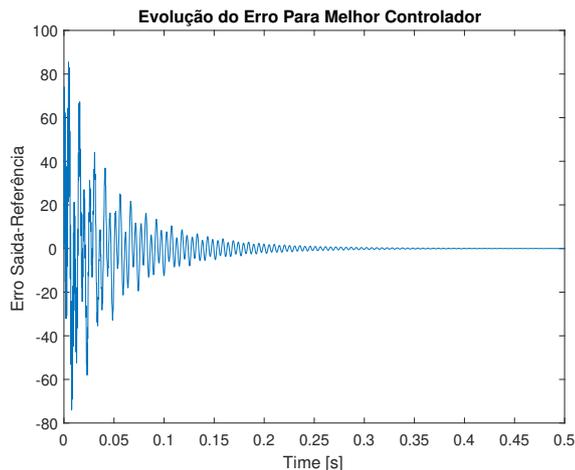


Figura 8. Erro em malha fechada simulando-se o melhor controlador a partir do Algoritmo Genético.

Assim, na Figura 10 tem-se o erro entre a saída e a referência desejada em malha fechada para o controlador obtido por algoritmo genético e projetado por Bertoldi (2019).

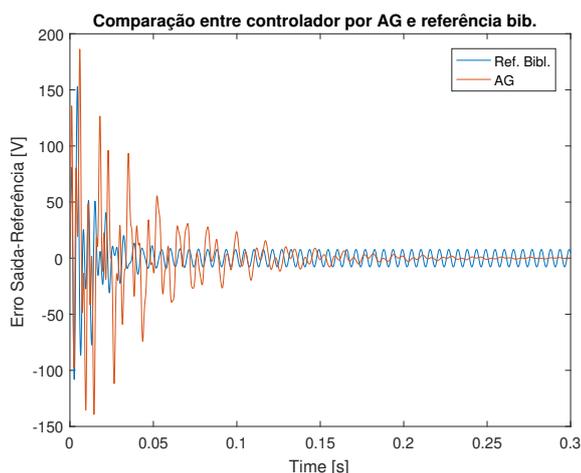


Figura 9. Comparação do erro em malha fechada dos controladores por AG e referência.

Nota-se que o controlador deste trabalho se comporta melhor em regime permanente, atingindo valores de erro próximos de zero, enquanto que o da referência bibliográfica não rejeita totalmente o distúrbio. Já em regime transitório, o controlador obtido pela solução da equação diofantina apresenta melhor performance, atingindo menores amplitudes de oscilações.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a metodologia empregada para projeto de um controlador múltiplo-ressonante a partir da otimização de um critério de custo. Este critério é empregado a minimização da norma do erro entre a saída da planta e a referência desejada, aplicou-se o algoritmo genético para atender esse critério aplicado a um sistema de UPS, manipulando os parâmetros que regem este algoritmo, constatando melhorias na implementação e busca de resultado ótimo.

Assim, encontrou-se um controlador estabilizante, que atende as demandas de rejeição de distúrbio e seguimento de referência do tipo senoidal, confirmando a eficiência do método abordado.

Por fim, comparou-se os resultados obtidos deste trabalho ao se reproduzir o trabalho realizado por Bertoldi (2019) e plotar no mesmo gráfico o erro em ambos os casos. Observou-se resultados similares aos atingidos pela referência, concluindo que o controlador projetado neste trabalho é performante.

REFERÊNCIAS

- Adhikari, N.P., Choubey, M., and Singh, R. (2012). Dc motor control using ziegler nichols and genetic algorithm technique. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*, 1(1), 33–36.
- Bertoldi, R. (2019). Controlador múltiplo-ressonante de ganho finito aplicado a fontes ininterruptas de energia. *performance de controladores preditivos multivariáveis MMPC, estruturados com modelo de perturbação de entrada ajustados às perturbações através da utilização do modelo matemático identificado de um forno industrial petroquímico*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Chen, C.T. and Shafai, B. (1999). *Linear system theory and design*, volume 3. Oxford university press New York.
- Dréo, J., Pétrowski, A., Siarry, P., and Taillard, E. (2006). *Metaheuristics for hard optimization: methods and case studies*. Springer Science & Business Media.
- Flores, J.V., Pereira, L.F.A., Bonan, G., Coutinho, D.F., and da Silva Jr, J.M.G. (2016). A systematic approach for robust repetitive controller design. *Control Engineering Practice*, 54, 214–222.
- Liu, B., Duan, S., Kang, Y., and Chen, J. (2005). Genetic algorithm optimized fuzzy repetitive controller for low cost ups inverter application. In *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.*, 840–845. IEEE.
- Lorenzini, C. (2015). Desenvolvimento de um controlador ressonante-repetitivo aplicado a fontes de energia.
- Pereira, L.F.A., Flores, J.V., Bonan, G., Coutinho, D.F., and da Silva, J.M.G. (2013). Multiple resonant controllers for uninterruptible power supplies—a systematic robust control design approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(3), 1528–1538.