

# Algoritmo Genético Aplicado a Controladores de Corrente para Inversores Conectados à Rede

Lucas C. Borin, Iury Cleveston, Caio R. D. Osório, Gustavo G. Koch, Fabricio M. Bottega, Vinícius F. Montagner  
Universidade Federal de Santa Maria  
Grupo de Eletrônica de Potência e Controle  
Santa Maria, RS 97105-900  
Emails: (lukasciello, iurycl, caio.osorio, gustavoguilhermekoch, bottegefabricio, vfmontagner)@gmail.com

**Resumo**—Este artigo trata do uso de um algoritmo genético (do inglês, *Genetic Algorithm* – GA) para a obtenção dos ganhos de realimentação de estados aplicados para o controle de corrente de um conversor conectado à rede por meio de um filtro LCL. O controle é projetado *off-line*, levando em conta incertezas na impedância de rede, atraso na implementação do sinal de controle e múltiplos controladores ressonantes. Um algoritmo genético é usado para buscar com eficiência os ganhos do controlador em um espaço cuja varredura exaustiva é inviável do ponto de vista computacional. A função objetivo é baseada na minimização dos autovalores do sistema em malha fechada. O ganho fornecido provê bons resultados em simulação, mostrando a conformidade das correntes de rede com a norma IEEE 1547, apontando para a viabilidade da técnica nesta aplicação.

**Keywords** – Algoritmo genético, Conversor conectado à rede, Filtro LCL

## I. INTRODUÇÃO

Conversores conectados à rede são importantes no cenário de geração baseada em energias renováveis, como, por exemplo, eólica e solar, permitindo controlar o fluxo de potência entre a fonte primária e a rede [1]–[3]. Muito frequentemente, estes conversores utilizam inversores com filtros LCL de saída para interface entre fonte e rede [4], [5]. Neste contexto, um problema importante é o controle das correntes injetadas na rede, que devem seguir padrões rigorosos de qualidade, como os prescritos em [6], [7].

Controladores por realimentação de estados têm sido úteis em aplicações práticas em conversores de potências, como por exemplo, as aplicações com conversores CC-CC em [8], em fontes ininterruptas de energia [9], [10] e também em conversores conectados à rede [11]. Por exemplo, no caso SISO, condições como as utilizadas nos trabalhos supracitados permitem computar ganhos de realimentação de estados no espaço  $\mathcal{R}^{1 \times n}$ , inclusive com  $n$  de dimensão elevada. Todavia, na prática, ganhos muito grandes (em valor absoluto) podem resultar em controladores inviáveis. Por este motivo, a busca dos ganhos de controle em um subespaço limitado se torna interessante. Além disso, pode haver, na vizinhança de um controlador dado, outros controladores que garantam desempenho de melhor qualidade, considerando métricas distintas. Neste sentido, algoritmos genéticos se tornam atrativos como ferramentas de busca ou otimização heurística para cobrir, com

tempo computacional razoável, um espaço de controladores que, mesmo com ganhos limitados em amplitudes, possuam um número de pontos internos que torna inviável sua investigação por discretização exaustiva [12].

É interessante mencionar que GAs podem ter sua função custo definida inclusive a partir de dados de simulação, sem necessidade de modelos analíticos complexos. Isto permite grande flexibilidade ao projetista de controle, que pode incluir na função custo métricas usuais, como as baseadas em erros (ISE, ITAE, ITSE, IAE – vide [13]), ou métricas de maior sentido prático, como máximo sobressinal na partida, tempo de acomodação em transitórios, distorção harmônica total, entre outras, relevantes no contexto de conversores de potência [14], [15]. Por exemplo, em [16], utiliza-se o GA para otimizar os parâmetros de controladores proporcional integral derivativo (PID) e controladores por realimentação de estados (alocação de polos) aplicados ao controle de sistemas de navegação e propulsão de um navio. De forma semelhante, em [17], um GA é utilizado para otimizar as constantes de um PI aplicado ao controle de corrente de um inversor trifásico conectado à rede por meio de um filtro LCL. A função custo, neste caso, contém as especificações de resposta transitória e erro em regime permanente. Em [18], o GA é utilizado para otimizar o desempenho de reguladores lineares quadráticos aplicados a conversores CC-CC, sendo a função custo definida pela sobressinal na resposta transitória e pelo ITSE.

Cabe observar que, na literatura, GAs também são utilizados como ferramenta no estágio de projeto dos parâmetros do filtro LCL, como em [19], para uma situação de amortecimento ativo, e em [20] para amortecimento passivo. Ambos os trabalhos mostram que é possível otimizar o projeto do filtro para diferentes objetivos, como por exemplo definir o amortecimento desejado e a largura de banda do controlador de corrente.

Tendo em vista o exposto, a principal contribuição do presente artigo é mostrar a viabilidade prática de um controlador por realimentação de estados obtido por meio de GA para aplicação em conversores conectados por meio de filtro LCL a uma rede com indutância incerta. Primeiramente, um modelo aumentado no espaço de estados é fornecido e o problema de controle é formulado. Após, o GA é utilizado para uma busca heurística dos ganhos de controle em um

espaço com um número elevado de pontos internos, baseado em uma função objetivo que mede o máximo módulo dos autovalores do sistema em malha fechada, considerando um intervalo de incerteza na indutância da rede. Os resultados de simulação mostram respostas satisfatórias em transitório e em regime permanente. As correntes de rede sintetizadas pelo conversor obedecem aos limites de harmônicas prescritos na norma [6], mostrando que os ganhos obtidos com o GA são uma alternativa viável para esta aplicação.

## II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Considere o inversor conectado à rede por meio do filtro LCL, dado na Fig. 1.

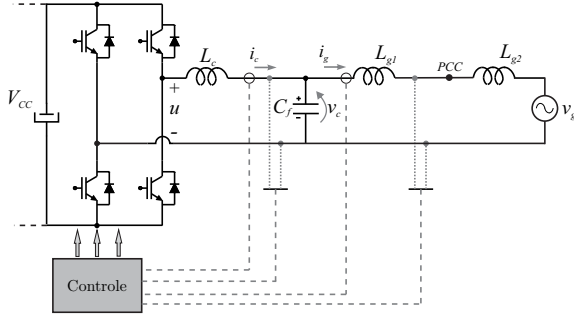


Figura 1. Inversor monofásico conectado à rede por meio de um filtro LCL.

Note que a rede neste caso é predominantemente indutiva. Adicionalmente, a indutância da rede,  $L_{g2}$ , é suposta incerta e pertencente a um intervalo cujos extremos são conhecidos, representando a operação desde a condição de rede forte até a de rede fraca. No domínio do tempo contínuo, a planta da Fig. 1 pode ser modelada no espaço de estados como

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \mathbf{B}_{uc} u + \mathbf{B}_{wc} v_g \\ y &= \mathbf{C} \mathbf{x} \end{aligned} \quad (1)$$

em que  $\mathbf{x}$  representa o vetor de estados,  $u$  representa o sinal de controle,  $v_g$  representa um distúrbio (rede),  $y$  é a saída a ser controlada e as demais matrizes são dadas por

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_c &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_c} & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & \frac{1}{L_{g1}+L_{g2}} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{uc} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C} &= [0 \ 0 \ 1], \quad \mathbf{B}_{wc} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{L_{g1}+L_{g2}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_c \\ v_c \\ i_g \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Objetivando a aplicação de uma técnica de controle digital, pode-se escrever um modelo discretizado da planta como

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_u u(k) + \mathbf{B}_w v_g(k) \\ y(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \end{aligned}$$

em que, para um período de discretização  $T_s$  suficientemente pequeno, as matrizes discretas podem ser representadas por

$$\mathbf{A} = \mathbf{I} + \mathbf{A}_c T_s, \quad \mathbf{B}_u = \mathbf{B}_{uc} T_s, \quad \mathbf{B}_w = \mathbf{B}_{wc} T_s \quad (2)$$

Adicionalmente, para a implementação do controle em um processador digital de sinais e para garantir rastreamento de referências senoidais e rejeição de distúrbios com harmônicas, utilizam-se, respectivamente, um atraso na ação de controle e controladores ressonantes [11], levando à descrição

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_u \phi(k) + \mathbf{B}_w v_g(k) \quad (3)$$

$$\phi(k+1) = u(k) \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\xi}(k+1) = \mathbf{R} \boldsymbol{\xi}(k) + \mathbf{T}(i_{ref}(k) - \mathbf{C} \mathbf{x}(k)) \quad (5)$$

em que  $\phi$  representa o sinal de controle atrasado,  $i_{ref}$  é a referência para a corrente de rede, e  $\boldsymbol{\xi}$ ,  $\mathbf{T}$  e  $\mathbf{R}$  representam, respectivamente, os estados internos e as matrizes dos controladores ressonantes. O sistema aumentado (3) - (5) pode ser escrito como

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \phi(k+1) \\ \boldsymbol{\xi}(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_u & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 & 0 \\ -\mathbf{T} \mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \phi(k) \\ \boldsymbol{\xi}(k) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} u(k) &+ \begin{bmatrix} \mathbf{B}_w \\ 0 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} v_g(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 0 \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} i_{ref}(k) \quad (6) \\ y(k) &= [\mathbf{C} \ 0 \ \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \phi(k) \\ \boldsymbol{\xi}(k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ou, de forma mais compacta, como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\rho}(k+1) &= \mathbf{A}_{aum} \boldsymbol{\rho}(k) + \mathbf{B}_{u_{aum}} u(k) + \\ &+ \mathbf{B}_{g_{aum}} v_g(k) + \mathbf{B}_{r_{aum}} i_{ref}(k) \quad (7) \\ y(k) &= \mathbf{C}_{aum} \boldsymbol{\rho}(k) \end{aligned}$$

A lei de controle por realimentação de estados a ser utilizada aqui é dada por

$$u(k) = \mathbf{K} \boldsymbol{\rho}(k) \quad (8)$$

Para um estudo de caso, considere o sistema com os parâmetros na Tabela I.

Tabela I  
PARÂMETROS DA PLANTA.

Parâmetros	Valores
$L_c$	1 mH
$C_f$	62 $\mu$ F
$L_{g1}$	0,3 mH
$L_{g2}$	[0, 1] mH
Tensão do barramento	400 V
Tensão da rede	180 V(pico); 60 Hz
Frequência de amostragem	20.040 Hz
Frequência de comutação	10.020 Hz
Frequências dos ressonantes	60, 180, 300, 420 Hz
Fator de amortecimento dos ressonantes	0,0001

Note que serão utilizados 4 controladores ressonantes, o que leva a um vetor  $\boldsymbol{\xi}$  com 8 estados que, agregados aos 3 estados do filtro,  $\mathbf{x}$ , e ao estado referente ao atraso,  $\phi$ , resulta em um ganho de controle com 12 elementos, dado por

$$\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_{12}] \quad (9)$$

Neste sentido, o problema a ser resolvido neste artigo é a busca, por meio de um GA, dos ganhos de controle no espaço dado pelo produto cartesiano dos intervalos  $k_{imin} \leq k_i \leq k_{imax}$ ,  $i = 1, \dots, 12$ .

### III. ALGORITMO GENÉTICO

Algoritmos genéticos são técnicas de busca e otimização baseadas no princípio da seleção natural, sendo uma técnica de computação evolutiva muito aplicada em diversos contextos [12]. Os GAs trabalham com variáveis de projeto codificadas, que são cadeias de comprimento finito. Essas cadeias representam cromossomos artificiais. Cada caractere na cadeia é um gene artificial, onde ficam contidas as informações. Os GAs processam sucessivas populações desses cromossomos artificiais em sucessivas gerações. Uma vez que não é necessário conhecer a derivada da função objetivo, como em outras técnicas de otimização, o GA tem a capacidade de evoluir mesmo com base em dados experimentais ou de simulação. Ainda, como nenhuma consideração é necessária sobre o espaço de busca, o GA é um método capaz de otimizar funções objetivo complexas em grandes espaços de busca.

O fluxo de execução do GA aqui utilizado segue os passos a seguir.

- 1) Inicializa aleatoriamente a população inicial de indivíduos (cromossomos) dentro dos limites do espaço de busca definido.
- 2) Calcula a função objetivo de cada indivíduo.
- 3) Sendo satisfeito o critério de parada, retorna-se a melhor solução e finaliza-se a execução. Se não, continua para o próximo passo.
- 4) Seleciona uma parcela da população para aplicação dos operadores genéticos.
- 5) Aplica os operadores genéticos cruzamento, mutação e elitismo, criando novos indivíduos para a população. Retorno ao passo 2 [12].

O método de seleção e os operadores genéticos podem ser definidos brevemente como

- Seleção: é o processo de escolha dos indivíduos que são utilizados para criar a nova população. A escolha é feita através da avaliação dos indivíduos, considerando que as boas características devem ser transmitidas à nova geração. Métodos conhecidos de seleção utilizados na literatura são seleção por classificação, hierárquica e por roleta.
- Cruzamento: consiste na troca de material genético entre os indivíduos selecionados, a fim de fazer com que um novo indivíduo obtenha um melhor valor da função objetivo (*fitness*) em relação aos seus pais. Basicamente, o novo indivíduo recebe parte dos genes de cada pai, sendo a escolha de como os genes serão repartidos a diferença entre os métodos de cruzamento. São métodos conhecidos de cruzamento o de ponto único, multipontos e uniforme.
- Mutação: é o operador responsável pela manutenção da diversidade genética da população, possibilitando uma maior varredura do espaço de busca, evitando que o algoritmo convirja prematuramente para mínimos locais. Trata-se da

alteração de um ou mais genes de um indivíduo da população, criando um novo indivíduo. Métodos de mutação conhecidos são mutação uniforme, guassiana ou adaptativa.

- Elitismo: tem a finalidade de preservar os melhores indivíduos da população atual ( $\mu$ ) e incorporá-los à população posterior ( $\lambda$ ), a fim de evitar que as soluções de bom desempenho percam-se no processo de evolução [12].

Uma vez que a população é gerada aleatoriamente, o GA é capaz de virtualmente percorrer todo o espaço de busca, provendo rastreios em diferentes pontos deste espaço. Entretanto, devido à quantidade de parâmetros e à natureza estocástica do processo, o algoritmo pode convergir para diferentes resultados em cada execução, ou pode ser confinado em um ponto de mínimo local. Para evitar estes problemas, deve-se fazer um ajuste fino do tamanho da população e das taxas de cruzamento e mutação de modo a garantir uma população com diversidade adequada.

#### A. Obtenção do ganho de controle

Suponha a lei de controle por realimentação de estados, dada por

$$u(n) = K\rho(n) = [K_x \quad K_\phi \quad K_\xi] \begin{bmatrix} x(n) \\ \phi(n) \\ \xi(n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

A Fig. 2 mostra uma representação do sistema em malha fechada com a lei de controle (10).

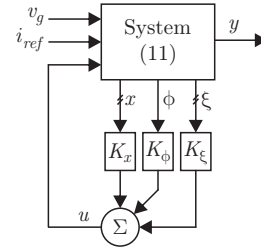


Figura 2. Diagrama de bloco evidenciando as entradas e saídas do sistema em malha fechada.

Aqui, tem-se como objetivo computar, *off-line*, o ganho fixo de controle,  $K = [K_x \quad K_\phi \quad K_\xi]$ , de forma a garantir estabilidade frente à incertezas em  $L_{g2} \in \mathcal{P}$ . A função objetivo aqui é definida por

$$\sigma(K) = \max_{L_{g2} \in \mathcal{P}} |\lambda(A_{aum}(L_{g2}) + B_{uum}K)| \quad (11)$$

que provê o máximo módulo dos autovalores do sistema em malha fechada. Caso sigma seja menor que 1, o sistema em malha fechada é estável e quanto menor seu valor, menor será o limitante das respostas transitórias.

A partir da função estabelecida em (11), o problema de projeto do controlador pode então ser resolvido por meio de um problema de otimização dado por

$$\min_{L_{g2} \in \mathcal{P}} (\sigma(K)) \quad s.a \quad K \in \mathcal{K} \quad (12)$$

em que  $\mathcal{K}$  é o espaço de busca restrito do controlador, por exemplo, definido a partir de um DLQR convencional, implementado por meio da função *dlqr* do MATLAB, projetado para o ponto médio de  $L_{g2}$ . O GA é inicializado com valores apropriados de número de indivíduos, número de gerações e taxas de cruzamento e mutação, a fim de garantir uma boa convergência da função objetivo. Os métodos utilizados para cada operação genética podem ser vistos na Tabela II.

Tabela II  
CONFIGURAÇÕES DO GA.

Método de seleção	Torneio
Método de cruzamento	Ponto único
Método de mutação	Uniforme
Elitismo	Sim ( $\mu + \lambda$ )

O algoritmo foi executado diversas vezes, retornando com eficácia razoável, ganhos de controle como o descrito abaixo.

$$K' = \begin{bmatrix} \sigma(K) = 0,9965 \\ -14,459941127950582 \\ -5,181224204722225 \\ -2,4180020726430698 \\ -1,05063668885386 \\ 62,39489608122762 \\ -62,31268095687296 \\ 30,055024723586744 \\ -30,766166520871117 \\ 41,513238051554154 \\ -43,33817510365364 \\ 16,36227478047351 \\ -19,704895211059544 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Para comprovar a viabilidade do ganho de controle  $K$ , simulações do sistema em malha fechada são apresentados na próxima seção.

#### IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Inicialmente, para comprovar a robustez do sistema contra incerteza no parâmetro de indutância de rede,  $L_{g2}$ , é feita a análise dos autovalores em malha fechada [21], resultando na Fig. 3.

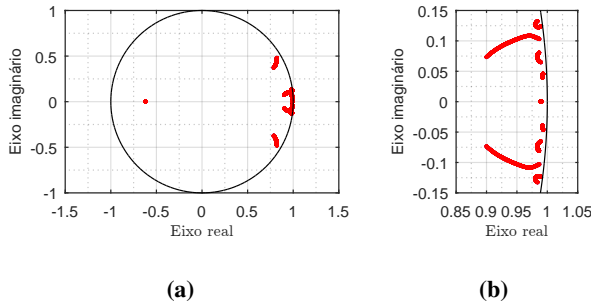


Figura 3. (a) Localização dos autovalores do sistema em malha fechada para  $L_{g2min} \leq L_{g2} \leq L_{g2max}$ . (b) Vista aproximada dos autovalores contidos próximo ao círculo de raio unitário.

Nota-se que todos os autovalores estão alocados no círculo de raio unitário, confirmando a estabilidade do sistema de malha fechada para toda a faixa de incerteza paramétrica. Além disso, os polos obedecem a restrição de raio menor que  $\sigma$  dado em (13) e estão localizados próximos à borda do círculo, necessário para que os ressonantes possam rastrear referências senoidais [1], [21].

Em seguida, utilizou-se o software PSIM para verificar o comportamento do sistema em malha fechada considerando o intervalo de incerteza paramétrica de indutância da rede. Com isto, observou-se a resposta do controlador em transitório e em regime permanente. O primeiro ensaio foi realizado para a indutância mínima  $L_{g2min}$ , conforme mostrado na Fig. 4.

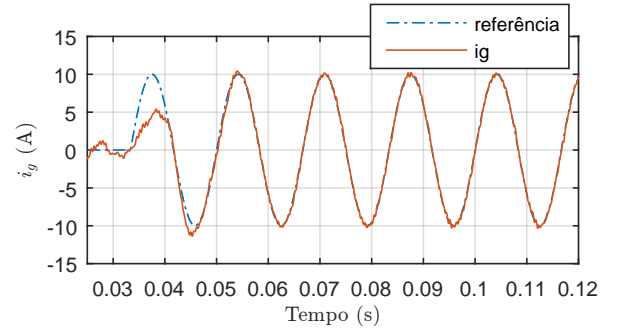


Figura 4. Simulação do sistema em malha fechada no PSIM do sinal de corrente  $i_g$  para  $L_{g2min}$  com referência senoidal.

Nota-se que o sistema em malha fechada com o controlador em (13) apresenta bom rastreamento de referência em um período de tempo suficiente para garantir desempenho satisfatório em transitórios. Ademais, observa-se o rápido rastreamento de referência quando há alteração da mesma, como pode ser observado na Fig. 4. Observa-se que o sinal  $i_g$  consegue rastrear a referência em menos de um período, sem overshoot ou presença de *ripple* significativos.

O ensaio para indutância máxima de rede  $L_{g2max}$  foi realizado conforme visto na Fig. 5.

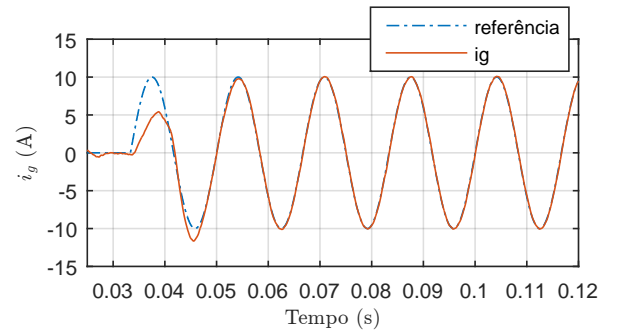


Figura 5. Simulação do sistema em malha fechada no PSIM do sinal de corrente  $i_g$  para  $L_{g2max}$  com referência senoidal.

De mesmo modo que o ensaio para  $L_{g2min}$ , para  $L_{g2max}$  são obtidas boas respostas no transitório e em regime permanente. Na ocorrência de mudança de referência, o controlador consegue se recuperar e acomoda-se em tempo suficiente para gerar um valor de  $i_g$  compatível como a mesma.

Outra análise verificada foi da atenuação das harmônicas da tensão de rede  $v_g$  para corrente de saída  $i_g$ . Esta análise para o sistema em malha fechada é dada na Fig. 6, para  $L_{g2min}$  e  $L_{g2max}$ . Verifica-se uma boa rejeição de distúrbios nas frequências utilizadas nos controladores ressonantes, dadas por 60, 180, 300, 420 Hz.

Por fim, a análise da qualidade da corrente foi feita através da taxa de distorção harmônica (THD). O valor nominal de THD medido em simulação para o pior caso, dado em  $L_{g2min}$ , foi de 1,686%, dentro dos limites prescritos pela norma IEEE 1547.

## V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou ganhos de controle por realimentação de estados projetados por meio de um algoritmo genético e aplicados a inversores monofásicos conectados à rede. Diferentemente de outros trabalhos correlatos, aqui os ganhos fornecidos pelo GA são validados para o caso monofásico e com incertezas na rede. A otimização do controlador é baseada na função custo que visa a minimização do máximo módulo dos autovalores do sistema em malha fechada, sujeito a incertezas paramétricas na indutância de rede, o que garante robustez contra estas incertezas e respostas transitórias rápidas, conforme é observado pelos resultados de simulação. A análise das correntes de rede obtidas confirma THD compatível com os limites da norma IEEE 1547, atestando a viabilidade do controlador para esta aplicação.

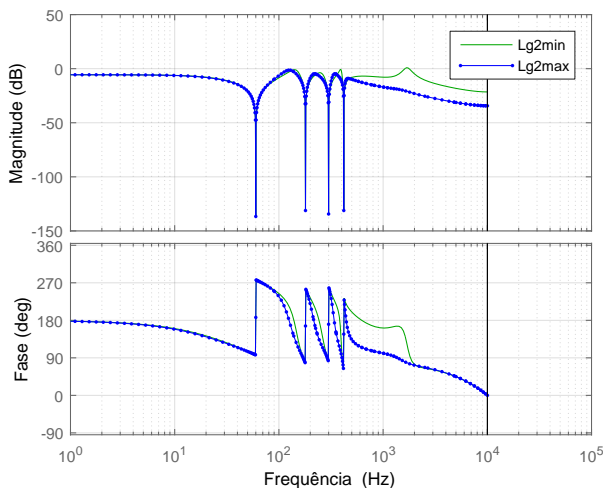


Figura 6. Diagrama de Bode do sistema em malha fechada da entrada  $v_g$  para a saída  $i_g$ , para  $L_{g2min}$  e  $L_{g2max}$ .

## REFERÊNCIAS

- [1] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, ser. Wiley - IEEE. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] F. Blaabjerg and K. Ma, "Future on power electronics for wind turbine systems," *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of*, vol. 1, no. 3, pp. 139–152, Sept 2013.
- [3] S. Kjaer, J. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 5, pp. 1292–1306, Sept 2005.
- [4] R. W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*. New York, NY: Chapman & Hall, 1997.
- [5] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, Sept 2004.
- [6] IEEE, "IEEE:1547 standard for interconnecting distributed resources with electric power systems," 2011.
- [7] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, oct. 2006.
- [8] C. Olalla, R. Leyva, A. El Aroudi, and I. Queinnee, "Robust LQR control for PWM converters: An LMI approach," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 7, pp. 2548–2558, July 2009.
- [9] G. Willmann, D. F. Coutinho, L. F. A. Pereira, and F. B. Libano, "Multiple-loop  $\mathcal{H}_\infty$  control design for uninterruptible power supplies," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 3, pp. 1591–1602, June 2007.
- [10] S. P. Ribas, L. A. Maccari Jr., H. Pinheiro, R. C. L. F. Oliveira, and V. F. Montagner, "Design and implementation of a discrete-time H-infinity controller for uninterruptible power supply systems," *IET – Power Electronics*, pp. pp. 1–9, 2014.
- [11] L. A. Maccari, Jr., J. R. Massing, L. Schuch, C. Rech, H. Pinheiro, R. C. L. F. Oliveira, and V. F. Montagner, "LMI-based control for grid-connected converters with LCL filters under uncertain parameters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 7, pp. 3776–3785, July 2014.
- [12] R. Haupt and S. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, ser. Wiley-Interscience publication. John Wiley, 2004.
- [13] K. Ogata, *Modern control engineering*, 4th ed. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2002.
- [14] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern control systems*, 11th ed. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2008.
- [15] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, and G. C. Verghese, *Principles of Power Electronics*. Boston, MA: Addison-Wesley, 1991.
- [16] E. Alfaro-Cid, E. W. McGooin, and D. J. Murray-Smith, "GA-optimised PID and pole placement real and simulated performance when controlling the dynamics of a supply ship," *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, vol. 153, no. 2, pp. 228–236, March 2006.
- [17] N. A. Windarko, O. A. Qudsi, A. Tjahjono, O. A. Dimas, and M. H. Purnomo, "Optimized PI constant for current controller of grid connected inverter with LCL filter using genetic algorithm," in *2014 Makassar International Conference on Electrical Engineering and Informatics (MICEEI)*, Nov 2014, pp. 9–13.
- [18] F. H. Dupont, V. F. Montagner, J. R. Pinheiro, H. Pinheiro, S. V. G. Oliveira, and A. Péres, "Multiple controllers for boost converters under large load range: A GA and fuzzy logic based approach," in *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, March 2010, pp. 105–110.
- [19] M. Liserre, A. Dell'Aquila, and F. Blaabjerg, "Genetic algorithm-based design of the active damping for an LCL-filter three-phase active rectifier," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 1, pp. 76–86, Jan. 2004.
- [20] Z. Wu, M. Aldeen, and S. Saha, "A novel optimisation method for the design of LCL filters for three-phase grid-tied inverters," in *2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*, Nov 2016, pp. 214–220.
- [21] K. Ogata, *Engenharia de controle moderno*, 2011.