

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO DE ESTADOS BASEADO EM ALGORITMO GENÉTICO PARA CONVERSORES CONECTADOS À REDE

CAIO R. D. OSÓRIO*, GUSTAVO G. KOCH*, LUCAS C. BORIN*, IURY CLEVESTON*,
FABRÍCIO H. DUPONT†, VINÍCIUS F. MONTAGNER*

* *Universidade Federal de Santa Maria*
Grupo de Eletrônica de Potência e Controle
Santa Maria, RS

† *Universidade Comunitária da Região de Chapecó*
Chapecó, SC

Emails: caio.osorio@gmail.com, gustavoguilhermekoch@gmail.com, lukasciello@gmail.com,
iurycl@gmail.com, fhdupont@gmail.com, vfmontagner@gmail.com

Abstract— This paper addresses the use of a genetic algorithm to obtain state feedback gains for the current control of a grid-connected converter through LCL filter. The converter is modeled in state space, taking into account the digital implementation delay and resonant controllers. A genetic algorithm is used to efficiently obtain controller gains in a solution space where exhaustive search is impracticable from a computational point of view. The cost function is based on the maximum module of the closed-loop eigenvalues considering the extreme values of grid inductance, which is assumed uncertain. To validate the results, simulations and practical implementation in prototype connected to the grid are executed, proving the feasibility of the technique for this application.

Keywords— Grid-connected converter, LCL filter, State feedback control, Genetic algorithm.

Resumo— Este artigo trata do uso de um algoritmo genético para a obtenção dos ganhos de realimentação de estados para o controle de corrente de um conversor conectado à rede por meio de um filtro LCL. O conversor é modelado no espaço de estados, levando em conta o atraso na implementação digital e controladores ressonantes. Um algoritmo genético é utilizado para buscar com eficiência os ganhos do controlador em um espaço de solução no qual uma varredura exaustiva é inviável do ponto de vista computacional. A função custo é baseada no máximo módulo dos autovalores do sistema em malha fechada, considerando a indutância da rede incerta. Para validar a proposta, simulações e implementação prática em protótipo conectado à rede são executadas, apontando para a viabilidade da técnica nesta aplicação.

Palavras-chave— Conversores conectados à rede, Filtro LCL, Controle por realimentação de estados, Algoritmo Genético.

1 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 (Teodorescu et al., 2011; Blaabjerg and Ma, 2013; Kjaer et al., 2005). Muito frequentemente, estes conversores utilizam inversores com filtros LCL de saída para interface entre fonte e rede (Erickson, 1997; Blaabjerg et al., 2004). Neste contexto, um problema importante é o controle das correntes injetadas na rede, que devem seguir padrões rigorosos de qualidade, como os prescritos em (IEEE, 2011; Blaabjerg et al., 2006).

Controladores por realimentação de estados têm sido úteis em conversores de potência, como por exemplo, as aplicações com conversores CC-CC em (Olalla et al., 2009), em fontes ininterruptas de energia (Willmann et al., 2007; Ribas et al., 2014) e também em conversores conectados à rede (Maccari et al., 2014). Por exemplo, no caso de sistemas SISO (do inglês, *Single Input Single Output*), 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, se avaliados considerando métricas distintas. Neste sentido, algoritmos genéticos (do inglês, *Genetic Algorithms* – GAs) se tornam atrativos como ferramentas de busca ou otimização heurística. Estes algoritmos podem cobrir, com tempo computacional razoável, um espaço de controladores que, mesmo com ganhos limitados em amplitude, possuam um número de pontos internos que tornaria inviável sua investigação por discretização exaustiva (Haupt and Haupt, 2004).

É interessante mencionar que GAs podem ser executados com funções custo definidas 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 métri-

cas usuais, como as baseadas em erro de rastreamento de referência (ISE, ITAE, ITSE, IAE – vide (Ogata, 2002)), ou outras métricas relevantes no contexto de conversores de potência, como máximo sobressinal na partida, tempo de acomodação em transitórios e distorção harmônica total (Dorf and Bishop, 2008; Kassakian et al., 1991). Por exemplo, em (Alfaro-Cid et al., 2006), utiliza-se o GA para otimizar os parâmetros de controladores 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 (Windarko et al., 2014), 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 (Dupont et al., 2010), o GA é utilizado para otimizar o desempenho de reguladores lineares quadráticos aplicados a conversores CC-CC, sendo a função custo definida pelo 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 (Lisserre et al., 2004), para uma situação de amortecimento ativo, e em (Wu et al., 2016) 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 custo que mede o máximo módulo dos autovalores do sistema em malha fechada, considerando um intervalo de incerteza na indutância da rede. Resultados de simulação e experimentais são apresentados, comprovando que os ganhos obtidos a partir do GA são uma alternativa viável para esta aplicação.

2 Descrição do problema

Considere o inversor conectado à rede por meio do filtro LCL, dado na Figura 1 (Teodorescu et al., 2011).

Note que a rede neste caso é predominantemente indutiva. Adicionalmente, a indutância da rede, L_{g2} , é suposta incerta, pertencente a um in-

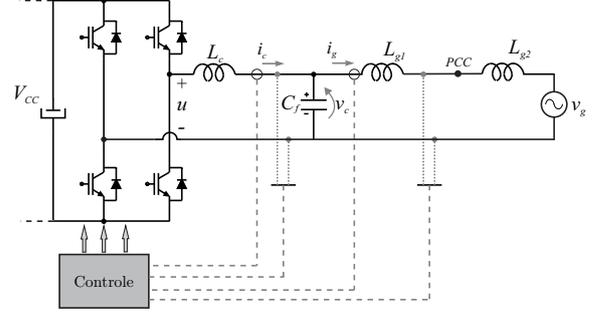


Figura 1: Inversor monofásico conectado à rede por meio de um filtro LCL.

tervalo cujos extremos são conhecidos, representando a operação desde a condição de rede forte até a condição de rede fraca.

No domínio do tempo contínuo, a planta da Figura 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 (Aström and Wittenmark, 1997)

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

em que, para um período de discretização T_s suficientemente pequeno, as matrizes discretas, computadas pelo método de Euler, podem ser representadas por

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

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, levando à descrição (Maccari et al., 2014; Francis and Wonham, 1976)

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

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

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

em que ϕ representa o sinal de controle atrasado, i_{ref} é a referência para a corrente de rede, e ξ , \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

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \phi(k+1) \\ \xi(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_u & \mathbf{0}_{3 \times 2r} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 & \mathbf{0}_{1 \times 2r} \\ -\mathbf{T}\mathbf{C} & \mathbf{0}_{2r \times 1} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \phi(k) \\ \xi(k) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{0}_{2r \times 1} \end{bmatrix} u(k) &+ \begin{bmatrix} \mathbf{B}_w \\ 0 \\ \mathbf{0}_{2r \times 1} \end{bmatrix} v_g(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ 0 \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} i_{ref}(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 & \mathbf{0}_{1 \times 2r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \phi(k) \\ \xi(k) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

onde r é o número de ressonantes. De forma mais compacta, pode-se escrever

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

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

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

Para um estudo de caso, considere o sistema com os parâmetros na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da planta.

Parâmetros	Valores
L_c	1 mH
C_f	62 μF
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	20040 Hz
Frequência de comutação	10020 Hz
Frequências dos ressonantes	60, 180, 300, 420 Hz
Fator de amortecimento dos ressonantes	0.0001

Note que serão utilizados 4 controladores ressonantes, configurados para rastrear referências senoidais com frequência de 60 Hz e rejeitar distúrbios de saída com frequências de 60, 180, 300 e 420 Hz. Desta maneira, tem-se um vetor ξ com 8 estados que, agregados aos 3 estados do filtro, \mathbf{x} , e ao estado referente ao atraso, ϕ , 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, de ganhos fixos de controle no espaço dado pelo produto cartesiano dos intervalos $k_{imin} \leq k_i \leq k_{imax}$, $i = 1, \dots, 12$.

3 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 (Haupt and Haupt, 2004). Uma vez que não é necessário conhecer a derivada da função custo, 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, diferentemente de outros métodos de otimização, o GA é um método capaz de otimizar funções custo complexas em grandes espaços de busca.

Um fluxograma geral acerca de algoritmos genéticos é dado na Figura 2 (Haupt and Haupt, 2004).

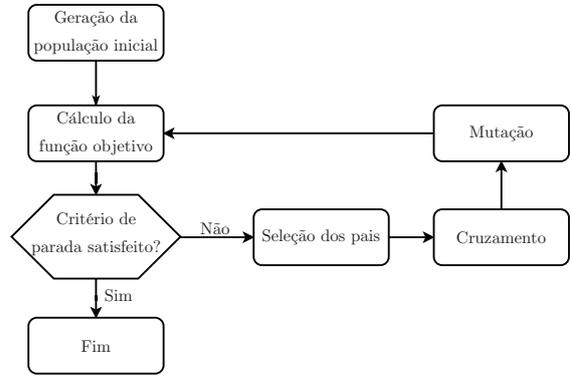


Figura 2: Fluxograma de um GA.

O algoritmo parte gerando aleatoriamente a população inicial de indivíduos. A seguir, é computado o valor da função custo (*fitness*) para cada indivíduo e é verificado se o critério de parada é satisfeito. Se não, selecionam-se os pais e, a partir de cruzamentos (*crossover*) e mutações, forma-se a próxima geração. Computa-se novamente a função custo para cada indivíduo e repete-se o procedimento até atingir o critério de parada.

Uma vez que a população é gerada aleatoriamente, o GA é capaz de virtualmente buscar todo o espaço de soluções, provendo buscas em diferentes pontos deste espaço. Entretanto, devido a quantidade de parâmetros e a 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 ajustar o tamanho da população e as taxas de mutação e cruzamento de modo a garantir uma população com diversidade adequada. Ainda, caso necessário, pode-se utilizar o elitismo para garantir a sobrevivência dos melhores indivíduos para a próxima geração.

3.1 Obtenção dos ganhos de controle

A função custo do GA a ser utilizada aqui é descrita como

$$F = \max |\lambda(\alpha)|, \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$\lambda(\alpha) = \text{eig} \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot \left(\begin{array}{l} \mathbf{A}_{aum}(L_{g2min})+ \\ \mathbf{B}_{aum}(L_{g2min})\mathbf{K} \end{array} \right) + \\ (1 - \alpha) \cdot \left(\begin{array}{l} \mathbf{A}_{aum}(L_{g2max})+ \\ \mathbf{B}_{aum}(L_{g2max})\mathbf{K} \end{array} \right) \end{array} \right\}. \quad (10)$$

Para cada indivíduo (ganho \mathbf{K}), esta função calcula o máximo módulo dos autovalores do sistema em malha fechada, considerando a combinação convexa das matrizes \mathbf{A}_{aum} e \mathbf{B}_{aum} avaliadas nos extremos da indutância incerta de rede, L_{g2min} e L_{g2max} .

Note que, dada a complexidade matemática de expressar esta função custo de forma analítica, algoritmos de otimização não-linear usuais não se aplicam com eficiência a este caso. Também, o uso de *grid* exaustivo se torna proibitivo devido à dimensão do problema, tornando o GA uma boa alternativa para a obtenção dos ganhos de controle.

Neste trabalho, é utilizada a função *ga*, do MATLAB. O algoritmo é inicializado com uma população de 100 indivíduos. Para gerar as novas populações, foi utilizado o método de seleção por torneio (*tournament selection*), no qual os indivíduos são escolhidos randomicamente. Ao fim dos torneios, os indivíduos que possuem o melhor *fitness* são escolhidos para fazer os cruzamentos, utilizando neste caso a técnica padrão para problemas sem restrições lineares (*crossover scattered*). Nesta técnica, cria-se um vetor binário aleatório que seleciona genes dos pais que, combinados, dão origem a um novo indivíduo. Por último, é feita uma mutação dos genes levando em consideração as restrições de projeto (*mutation adapt feasible*), que gera aleatoriamente direções que são adaptativas em relação à última geração, sendo ela bem ou mal sucedida, satisfazendo os limites e restrições lineares.

Utilizando uma porcentagem de cruzamento de 30% da população, verificou-se que 30 gerações foram suficientes para alcançar resultados viáveis. Na Tabela 2 apresenta-se um resumo com as configurações do GA.

Tabela 2: Configurações do GA.

Tamanho da população	100
Número de gerações	30
Porcentagem de cruzamento	30 %
Método de seleção	Torneio
Elitismo	0
Método de cruzamento	<i>Scattered</i>
Método de mutação	Adaptabilidade

Na Figura 3 apresenta-se a curva de evolução da função custo no decorrer das gerações.

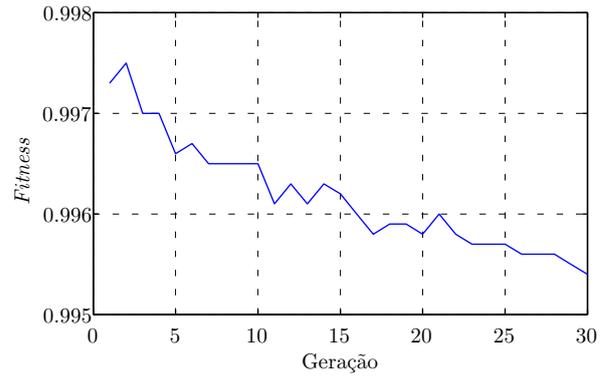


Figura 3: Evolução do *fitness*.

O tempo de simulação utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 2 é de aproximadamente 255 segundos, utilizando um computador com processador Intel core i7, 8 GB de memória RAM e um sistema operacional de 64 bits. Para uma comparação, testes foram feitos utilizando uma população inicial de 200 indivíduos. Neste caso, o tempo de simulação aumentou para 550 segundos, e os resultados do *fitness* não tiveram melhoras significativas em relação ao mostrado na Figura 3.

Os ganhos do melhor indivíduo providos pelo GA baseado nos parâmetros da Tabela 2 são dados por

$$\mathbf{K}' = \begin{bmatrix} -14.394459996794923 \\ -2.698401155641701 \\ -7.579767522829852 \\ -0.131893554171742 \\ 46.361880681577468 \\ -44.790482134546096 \\ 23.576988291422946 \\ -22.898204997984482 \\ 20.291106967351912 \\ -19.609221528428524 \\ 17.370497411724550 \\ -17.488997093349266 \end{bmatrix} \quad (11)$$

e serão testados em simulação e experimentalmente na seção a seguir.

4 Resultados de simulação e experimentais

Inicialmente, para comprovar a robustez contra incerteza no parâmetro indutância de rede, L_{g2} , é feita a análise dos autovalores do sistema em malha fechada, resultando na Figura 4. 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.

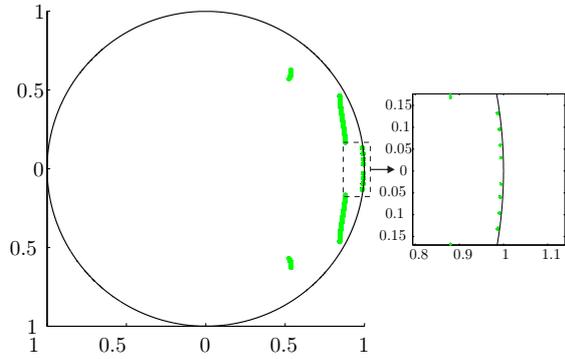


Figura 4: Varredura dos autovalores do sistema em malha fechada considerando um *grid* fino para $L_{g2min} \leq L_{g2} \leq L_{g2max}$.

Na Figura 5 é apresentada a resposta em frequência do sistema em malha fechada da referência para a saída, considerando L_{g2min} e L_{g2max} . Em ambos os casos, pode-se notar o ganho de 0 dB e a fase equivalente a 0 graus para a frequência 60 Hz, o que garante um bom rastreamento em regime permanente da referência senoidal nesta frequência.

Outra análise em frequência relevante é da entrada de distúrbio para a saída. Esta análise para o sistema em malha fechada é dada na Figura 6, para L_{g2min} e L_{g2max} . Pode-se verificar uma boa rejeição de distúrbios nas frequências utilizadas nos controladores ressonantes, dadas por 60, 180, 300, 420 Hz.

Para avaliar as respostas transitórias e a capacidade de rastreamento de referência em regime permanente, foram realizadas simulações do sistema em malha fechada com uma referência senoidal de 60 Hz, incluindo variações de fase e amplitude. O objetivo de realizar tais variações é simular a injeção de potência ativa e reativa (ca-

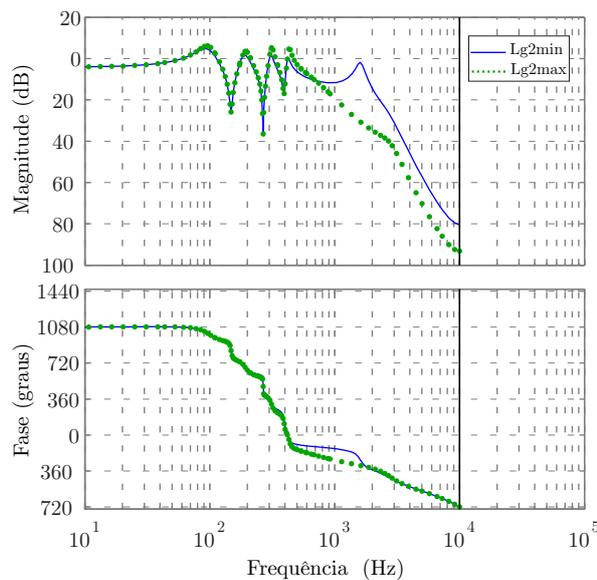


Figura 5: Diagrama de Bode do sistema em malha fechada da entrada i_{ref} para a saída i_g , para L_{g2min} e L_{g2max} .

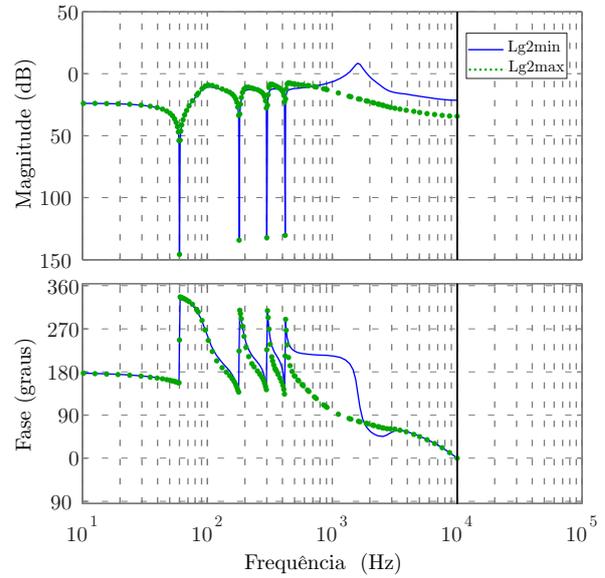


Figura 6: Diagrama de Bode do sistema em malha fechada da entrada v_g para a saída i_g , para L_{g2min} e L_{g2max} .

pacitiva e indutiva) na rede. A Figura 7 mostra o resultado para a situação de rede com L_{g2min} , em que verifica-se claramente um comportamento adequado em regime permanente e rápidas recuperações nos transitórios.

Visando demonstrar o bom funcionamento para os dois extremos do intervalo de incerteza no parâmetro indutância da rede, a Figura 8 indica, da mesma forma, bom desempenho para o caso L_{g2max} .

Tendo em vista o bom desempenho das simulações, implementou-se na prática o mesmo ensaio de variação de referência e incerteza paramétrica na indutância de rede. Para tanto, utilizou-se o protótipo da Figura 9, com parâmetros expressos na Tabela 1, incluindo sensores de tensão e corrente de efeito Hall, e, para o controle, um processador digital de sinais de ponto flutuante DSP Texas TMS32F28335. O protótipo foi configurado para o caso monofásico mostrado na Figura 1. Os resultados são mostrados nas figuras 10 e 11.

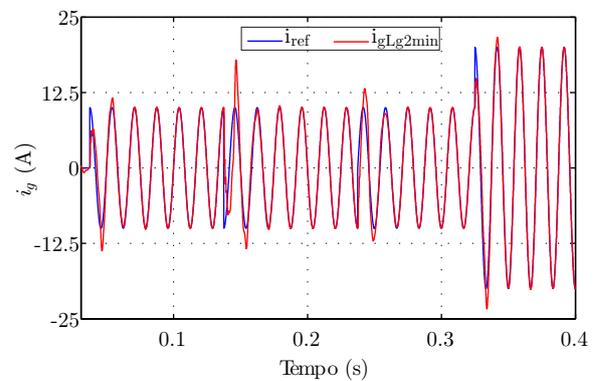


Figura 7: Simulação do sistema em malha fechada para L_{g2min} , com referência senoidal incluindo variações de fase e de amplitude.

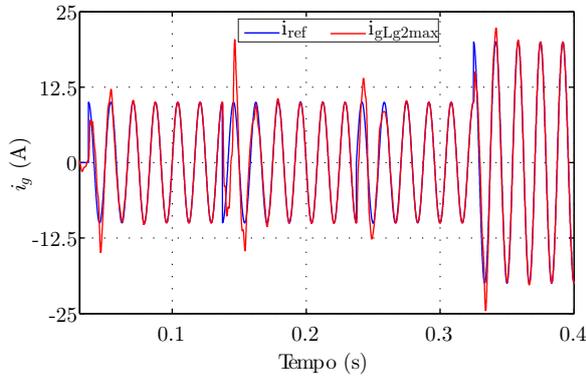


Figura 8: Simulação do sistema em malha fechada para L_{g2max} , com referência senoidal incluindo variações de fase e de amplitude.



Figura 9: Prototipo

A Figura 10 mostra o resultado experimental com o conversor conectado à rede com indutância L_{g2} incerta. Nota-se a boa correspondência com os resultados de simulação, confirmando na prática o bom desempenho do controlador.

Para uma análise de conteúdo harmônico da forma de onda de corrente injetada na rede pelo conversor, mostra-se na Figura 11 o resultado de ensaio experimental para L_{g2min} em regime permanente. A corrente injetada na rede apresenta THD de 2.2%, neste caso. Nota-se visualmente a

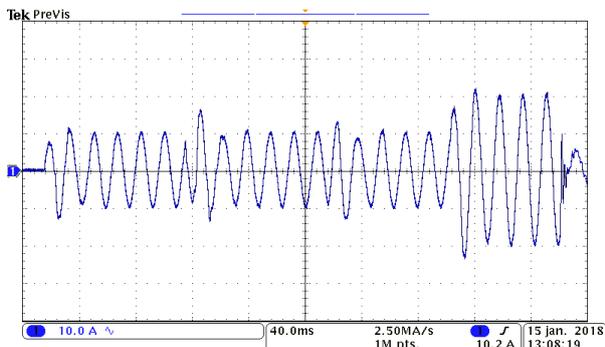


Figura 10: Resultado experimental do sistema em malha fechada com conversor operando conectado à rede.

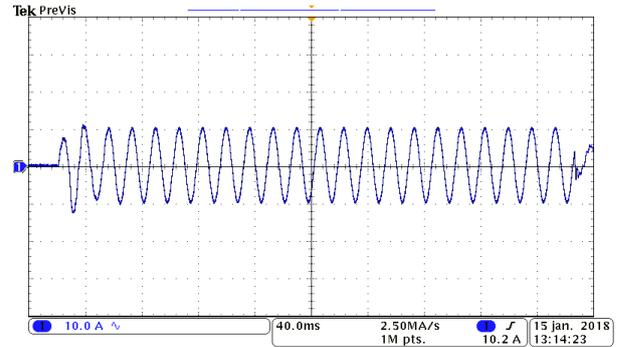


Figura 11: Resultado experimental em regime permanente do sistema em malha fechada para L_{g2min} , em um ensaio de referência com amplitude de 10 A.

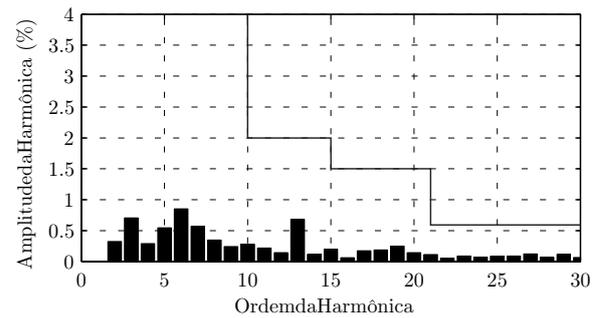


Figura 12: Análise harmônica da corrente injetada na rede na Figura 11 e comparação com os limites da norma IEEE 1547.

boa qualidade da forma de onda, o que é confirmado pelo espectro harmônico apresentado na Figura 12. Em comparação aos limites da norma IEEE 1547, pode-se observar que esta forma de onda obedece aos limites de harmônicas prescritos.

5 Conclusões

Este trabalho demonstrou o uso de um GA para a obtenção de ganhos de realimentação de estados viáveis na prática para conversores conectados à rede. O GA utilizado é baseado em uma função custo que indica estabilidade robusta e garante boas respostas transitórias por meio da minimização do máximo módulo dos autovalores da malha fechada. A técnica apresentada é extensível para controladores por realimentação de estados de dimensões arbitrárias ou, com as devidas adaptações, para outras estruturas de controladores. Foi observado um bom compromisso entre o tempo computacional para obter os ganhos de controle e a qualidade dos resultados, que exibem bons transitórios e boa qualidade em regime permanente, atendendo à norma pertinente para conversores conectados à rede.

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências brasileiras CAPES e ao CNPq (Projeto 306197/2015-4) pelo suporte financeiro.

Referências

- Alfaro-Cid, E., McGookin, E. W. and Murray-Smith, D. J. (2006). Ga-optimised pid and pole placement real and simulated performance when controlling the dynamics of a supply ship, *IEE Proceedings - Control Theory and Applications* **153**(2): 228–236.
- Åström, K. and Wittenmark, B. (1997). *Computer-controlled systems: theory and design*, Prentice Hall.
- Blaabjerg, F., Chen, Z. and Kjaer, S. (2004). Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems, *Power Electronics, IEEE Transactions on* **19**(5): 1184–1194.
- Blaabjerg, F. and Ma, K. (2013). Future on power electronics for wind turbine systems, *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of* **1**(3): 139–152.
- Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M. and Timbus, A. (2006). Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **53**(5): 1398–1409.
- Dorf, R. C. and Bishop, R. H. (2008). *Modern control systems*, 11 edn, Prentice Hall, Upper Saddle River, USA.
- Dupont, F. H., Montagner, V. F., Pinheiro, J. R., Pinheiro, H., Oliveira, S. V. G. and Peres, A. (2010). Multiple controllers for boost converters under large load range: A ga and fuzzy logic based approach, *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 105–110.
- Erickson, R. W. (1997). *Fundamentals of Power Electronics*, Chapman & Hall, New York, NY.
- Francis, B. A. and Wonham, W. M. (1976). The internal model principle of control theory, *Automatica* **12**(5): 457–465.
- Haupt, R. and Haupt, S. (2004). *Practical Genetic Algorithms*, Wiley-Interscience publication, John Wiley.
- IEEE (2011). IEEE:1547 standard for interconnecting distributed resources with electric power systems.
- Kassakian, J. G., Schlecht, M. F. and Verghese, G. C. (1991). *Principles of Power Electronics*, Addison-Wesley, Boston, MA.
- Kjaer, S., Pedersen, J. and Blaabjerg, F. (2005). A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules, *Industry Applications, IEEE Transactions on* **41**(5): 1292–1306.
- Liserre, M., Dell’Aquila, A. and Blaabjerg, F. (2004). Genetic algorithm-based design of the active damping for an lcl-filter three-phase active rectifier, *Power Electronics, IEEE Transactions on* **19**(1): 76–86.
- Maccari, Jr., L. A., Massing, J. R., Schuch, L., Rech, C., Pinheiro, H., Oliveira, R. C. L. F. and Montagner, V. F. (2014). LMI-based control for grid-connected converters with LCL filters under uncertain parameters, *IEEE Transactions on Power Electronics* **29**(7): 3776–3785.
- Ogata, K. (2002). *Modern control engineering*, 4th edn, Prentice Hall, Upper Saddle River, USA.
- Olalla, C., Leyva, R., El Aroudi, A. and Queinnec, I. (2009). Robust LQR control for PWM converters: An LMI approach, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **56**(7): 2548–2558.
- Ribas, S. P., Maccari Jr., L. A., Pinheiro, H., Oliveira, R. C. L. F. and Montagner, V. F. (2014). Design and implementation of a discrete-time H-infinity controller for uninterruptible power supply systems, *IET – Power Electronics* pp. pp. 1–9.
- Teodorescu, R., Liserre, M. and Rodríguez, P. (2011). *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, Wiley - IEEE, John Wiley & Sons.
- Willmann, G., Coutinho, D. F., Pereira, L. F. A. and Libano, F. B. (2007). Multiple-loop \mathcal{H}_∞ control design for uninterruptible power supplies, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* **54**(3): 1591–1602.
- Windarko, N. A., Qudsi, O. A., Tjahjono, A., Dimas, O. A. and Purnomo, M. H. (2014). Optimized pi constant for current controller of grid connected inverter with lcl filter using genetic algorithm, *2014 Makassar International Conference on Electrical Engineering and Informatics (MICEEI)*, pp. 9–13.
- Wu, Z., Aldeen, M. and Saha, S. (2016). A novel optimisation method for the design of lcl filters for three-phase grid-tied inverters, *2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*, pp. 214–220.