

**GESEP – Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência**



***Título:***

Controle Adaptativo Com Saturação Dinâmica Para Inversores Fotovoltaicos Monofásicos.

***Autores:***

MATA, G. L. E.; XAVIER, LUCAS S.; PEREIRA, H. A.; STOPA, M. M.; CUPERTINO, ALLAN F.

***Publicado em:***

VI Congresso Brasileiro de Energia Solar

***Data da publicação:***

2016

***Citação para a versão publicada:***

MATA, G. L. E.; XAVIER, LUCAS S.; PEREIRA, H. A. ; STOPA, M. M.; CUPERTINO, ALLAN F. Controle Adaptativo Com Saturação Dinâmica Para Inversores Fotovoltaicos Monofásicos. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. CBENS, 2016.

# CONTROLE ADAPTATIVO COM SATURAÇÃO DINÂMICA PARA INVERSORES FOTOVOLTAICOS MONOFÁSICOS

**Guilherme Luis Evangelista da Mata** – glevangelista48@gmail.com

**Lucas Santana Xavier** – lsantx@gmail.com

**Heverton Augusto Pereira** – heverton.pereira@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Elétrica

**Marcelo Martins Stopa** – marcelo@des.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

**Allan Fagner Cupertino** – allan.cupertino@yahoo.com.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais

**Resumo.** *Inversores fotovoltaicos são elementos essenciais para a extração de potência em sistemas fotovoltaicos e injeção na rede elétrica. Variações na irradiância solar durante o dia geram uma margem de corrente disponível no inversor que muitas vezes não é explorada. Assim, os inversores fotovoltaicos podem ser utilizados para realizar a compensação da corrente harmônica de cargas não lineares conectadas à rede elétrica. Os métodos de detecção de corrente harmônica geralmente utilizados extraem todo o conteúdo harmônico presente na corrente da carga. Esse fato torna o algoritmo de controle mais complexo. Devido à limitação de banda dos controladores PI, muitos trabalhos utilizam controladores PR no controle da corrente do inversor. Contudo, um controlador PR é necessário para cada frequência a ser compensada, aumentando a complexidade do algoritmo de controle. Também deve ser observado que inversores fotovoltaicos possuem uma corrente nominal de trabalho que não pode ser excedida para conservar a vida útil desse dispositivo. Nesse contexto, este trabalho propõe a utilização de um método de detecção de corrente harmônica capaz de extrair somente a componente harmônica de maior amplitude da carga, associado a um controle adaptativo e a um esquema de saturação dinâmica para o sistema. O controlador PR é alimentado com a frequência obtida pelo método de detecção, tornando necessária a utilização de apenas dois desses controladores. O esquema de saturação consiste no monitoramento do pico da corrente controlada para determinar a margem disponível para compensação de corrente harmônica. Resultados de simulação mostram que a saturação mantém o inversor trabalhando limitado pela sua corrente nominal, enquanto a compensação de harmônicos melhora significativamente a corrente da rede.*

**Palavras-chave:** *Inversores fotovoltaicos, Compensação de harmônicos, Saturação dinâmica.*

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de fontes de energia renováveis tem apresentado um grande crescimento nos últimos anos. Em 2013, 19,1% do consumo de energia mundial foram de fontes renováveis e em 2014 houve grande aumento na capacidade de geração de tais fontes em todo o planeta, com destaque para as matrizes eólica, solar e hidráulica (REN21, 2015). Aliado a esse cenário, a geração distribuída (GD) utilizando fontes renováveis é um conceito cada vez mais praticado, devido a possibilidade de gerar energia em proximidade das unidades consumidoras, permitindo a redução dos impactos das longas linhas de transmissão (Simões, Kyriakides, Blunier, & Ribeiro, 2012).

O sistemas fotovoltaicos utilizam conversores eletrônicos de potência para realizar a integração entre a fonte elétrica e a rede. A utilização desses equipamentos eletrônicos gera preocupações relacionadas à eficiência e qualidade da energia injetada na rede (Blaabjerg, Chen, & Kjaer, 2004), (Teodorescu, Liserre, & Rodríguez, 2011). Contudo, devido à variação na irradiância solar durante o dia, conversores fotovoltaicos apresentam uma margem, em termos de corrente, que pode ser utilizada para melhorar a qualidade da energia em uma instalação elétrica através da compensação de corrente harmônica de cargas não lineares conectadas ao ponto de acoplamento comum (PAC) (Bonald & Pomilio, 2013). Dessa forma, se um sistema fotovoltaico já está instalado, uma modificação na estratégia de controle para a compensação de harmônicos é uma interessante solução se comparada à instalação de filtros ativos e passivos (He, Li, Blaabjerg, & Wang, 2014), (Kumar & Zare, 2014).

Para realizar a compensação de corrente harmônica, deve-se atentar ao método de detecção de corrente utilizado. Na literatura existem vários métodos para extrair a informação do conteúdo harmônico da corrente da carga, por exemplo, o método baseado na teoria da potência conservativa (Brandão, Marafão, Paredes, & Costabeber, 2013), (Bonald, Paredes, & Pomilio), (Xavier, Cupertino, & Pereira, 2014), (Paredes, Brandao, Terrazas, & Marafao, 2011), o método baseado na teoria da potência instantânea (Akagi, Kanazawa, & Nabae, 1984), (Herrera & Salmeron, 2009), (Watanabe, Akagi, & Aredes, 2008), e o método baseado na transformada de Fourier (Macgarth, Holmes, & Galloway, 2005). Porém a maioria dessas estratégias realizam a detecção de todo o conteúdo harmônico da carga, sem distinguir cada harmônico que a compõe, aumentando a complexidade da sintonização do controlador de corrente do inversor. Assim, a adição de

um processo computacional para identificar componentes harmônicas específicas é uma interessante solução para reduzir tal complexidade.

Controladores proporcionais-ressonantes (PR) são comumente utilizados em aplicações monofásicas com altos índices de distorção harmônica. Os controladores proporcionais-integrais (PI) apresentam erros de regime permanente sob tais condições, em função de sua banda limitada, o que resulta numa baixa capacidade de rastreamento (Cupertino, et al., 2013). Uma possível desvantagem da utilização de controladores PR seria a necessidade de um controlador sintonizado em cada frequência a ser compensada (He, Li, Blaabjerg, & Wang, 2014).

Em Pereira, Xavier, & Cupertino (2015), é proposto um algoritmo detector de harmônico que extrai a informação (amplitude e frequência) somente da componente harmônica de maior amplitude presente na corrente da carga. Essa informação é usada no processo de compensação harmônica. Este método consiste na conexão, em cascata, de dois circuitos de sincronismo PLL (*synchronous reference frame phase-locked loop*), cada um apresentando um gerador de sinais em quadratura SOGI (*second order generalized integrator*) (Ciobotaru, Teodorescu, & Blaabjerg, 2006). Porém, o tipo de controlador utilizado em Pereira, Xavier, & Cupertino (2015) é o proporcional integral, o qual apresenta uma limitada banda de atuação. Além disso, durante a compensação da corrente harmônica de maior amplitude de cargas não lineares, não é levado em conta a limitação de corrente do inversor fotovoltaico.

Um fato importante e pouco abordado na literatura é a limitação de corrente do conversor eletrônico. Como se sabe, o inversor fotovoltaico possui uma limitação de corrente que não pode ser excedida. Por isso, é importante a aplicação de estratégias de saturação da corrente de referência durante a operação multifuncional (Pereira H. A., Xavier, Cupertino, & Mendes, 2015), (Bonaldi, Paredes, & Pomilio, 2013). Na compensação de harmônicos, a corrente de referência do sistema é composta por uma componente ativa e uma componente harmônica. A forma de onda resultante deve, então, ter seu máximo em um valor menor que o limite do conversor, caso contrário deve-se saturar tal corrente de referência (Pereira H. A., Xavier, Cupertino, & Mendes, 2015), (Qian, Lehman, Escobar, Ginn, & Molen, 2005).

Nesse contexto, a principal contribuição deste trabalho é a implementação de um controle adaptativo em frequência baseado no controlador proporcional multi-ressonante (PMR) com saturação dinâmica da corrente do inversor. O método de detecção, baseado na conexão em cascata de dois SOGI-PLL, é utilizado para detectar a componente harmônica de maior amplitude da corrente da carga e sintonizar um dos controladores ressonantes para realizar a compensação dessa predominante componente harmônica. Para assegurar que o inversor trabalhe abaixo da corrente nominal, é implementado, na estratégia de controle proposta, o método de saturação dinâmica da corrente do inversor proposto em Pereira H. A., Xavier, Cupertino, & Mendes (2015). O método proposto é aplicado em um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica, como mostrado na Fig. 1.

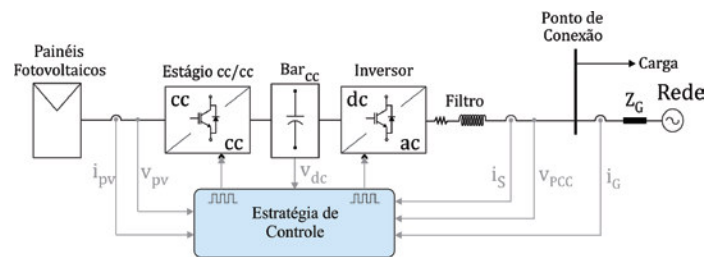


Figura 1 - Sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede.

## 2. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A Fig. 2 apresenta a estratégia de controle completa. O modelo do painel solar utilizado é o proposto por Villalva, Gazoli, & Filho (2009) e os parâmetros deste se encontram na Tab. 1. O estágio cc/cc baseado no conversor boost é utilizado para garantir a estabilidade na extração da máxima potência da planta solar e no controle de tensão no barramento do inversor (Villalva M. G., 2010). Na Fig. 2(a) está representada a malha de controle do conversor boost, composta por uma malha externa, sintonizada para o controle da tensão no barramento cc dos módulos solares,  $v_{pv}$ , e por uma malha externa, sintonizada para o controle de corrente  $i_{ind}$  do indutor do boost. O primeiro estágio é responsável pelo rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) dos módulos solares, utilizando o algoritmo de perturbação e observação (P&O) (Sera, Mathe, Kerekes, Spataru, & Teodorescu, 2013).

A Fig. 2(b) mostra o controle do inversor. Para o controle da tensão no barramento é utilizado um controlador PI para calcular a corrente ativa a ser injetada no sistema,  $I^*$ . Tal corrente é sincronizada com a tensão da rede, medida no PAC, através da estrutura SOGI-PLL (Teodorescu, Liserre, & Rodríguez, 2011), (Ciobotaru, Teodorescu, & Blaabjerg, 2006), gerando o sinal senoidal  $i^*(t)$ . Esse sinal, por sua vez, é somado à corrente harmônica  $i_{hf}(t)$ , extraída pelo método de detecção proposto em Pereira H. A., Xavier, Cupertino, & Mendes (2015). Essa soma resulta na corrente de referência do inversor,  $i_s^*(t)$ , que é comparada à corrente do inversor medida  $i_s(t)$ , para então o controlador PMR calcular o índice de modulação  $v^*$  do inversor.

Tabela 1 - Parâmetros do painel solar.

PARÂMETRO (POR PAINEL)	SÍMBOLO	VALOR
Potência máxima (W)	$P_{max}$	48
Tensão de máxima potência (V)	$V_{mp}$	18,6
Corrente de máxima potência (A)	$I_{mp}$	2,59
Tensão de circuito aberto (V)	$V_{ocn}$	22,1
Corrente de curto circuito (A)	$I_{scn}$	2,89
Coefficiente de temperatura de $V_{ocn}$ (V/K)	$K_v$	-0,07
Coefficiente de temperatura de $I_{scn}$ (A/K)	$K_i$	0,00166

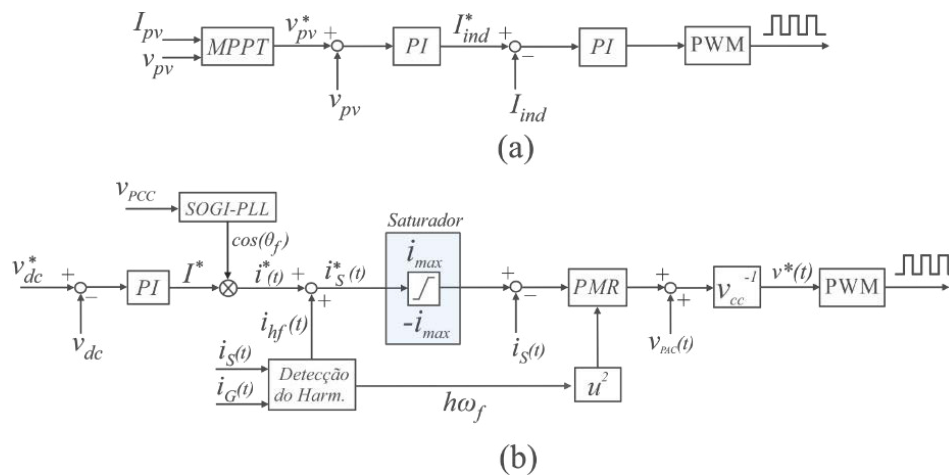


Figura 2 - Estratégia de controle. (a) Controle do conversor boost. (b) Controle do inversor.

### 3. CONTROLADOR PROPORCIONAL MULTI-RESSONANTE (PMR)

Para fins de controle da corrente, utiliza-se um controlador proporcional multi-ressonante (PMR) adaptativo à frequência. Dessa forma, somente dois ressonantes são necessários, um para controlar a componente fundamental e outro, sintonizado dinamicamente, para controlar a componente harmônica de maior amplitude detectada. Dessa forma, a função de transferência deste controlador é dada por:

$$G_c(s) = K_P + K_{I_f} \frac{R_f}{s^2 + \omega_f^2} + K_{I_h} \frac{R_h}{s^2 + h\omega_f^2}, \quad (1)$$

onde  $K_P$  é ganho proporcional,  $K_{I_f}$  e  $K_{I_h}$  são os ganhos integrais para as frequências fundamental e do harmônico de ordem  $h$ , respectivamente, e  $\omega_f$  é a frequência fundamental.

O termo  $R_f$  é sintonizado para controlar o sinal da frequência fundamental, enquanto o termo  $R_h$  é sintonizado para controlar o sinal da frequência harmônica  $h\omega_f$ , de forma adaptativa. O controlador ressonante apresenta ganho alto nas frequências  $\omega_f^2$  e  $h\omega_f^2$  (Yepes, Freijedo, Lopez, & Doval-Gandoy, 2011). O método de detecção da corrente da carga é responsável por sintonizar o PMR na frequência harmônica  $h\omega_f^2$  a ser compensada.

O método de discretização utilizado é o Tustin com *prewarping*, uma vez que tal método evita deslocamentos dos polos da função de transferência ressonante (Yepes A. G., 2011). A função de transferência discretizada dos termos  $R_f(s)$  e  $R_h(s)$  do controlador PMR é:

$$R_x(z) = \frac{\sin(\omega_x T_s)}{2\omega_x} \frac{1 - z^{-2}}{1 - 2z^{-1} \cos(\omega_x T_s) + z^{-2}}, \quad (2)$$

sendo  $\omega_x$  a frequência  $\omega_f$  ou  $\omega_h$  e  $T_s$  o período de amostragem. Os parâmetros do controlador são definidos baseados na análise de diagramas de Nyquist (Yepes A. G., 2011). A frequência  $\omega_f$  é fixada em  $2\pi 60$  rad/s (frequência fundamental) e  $\omega_h$  é obtido através do método de detecção de corrente harmônica.

#### 4. MÉTODO DE DETECÇÃO DE CORRENTE

A estrutura de detecção utilizada é mostrada na Fig. 3. Essa estrutura é composta de dois estágios com uma estrutura SOGI-PLL em cada. O primeiro estágio é sintonizado para detectar a componente fundamental da corrente da carga e o segundo é ajustado para extrair a informação (amplitude e frequência) da componente harmônica de maior amplitude.

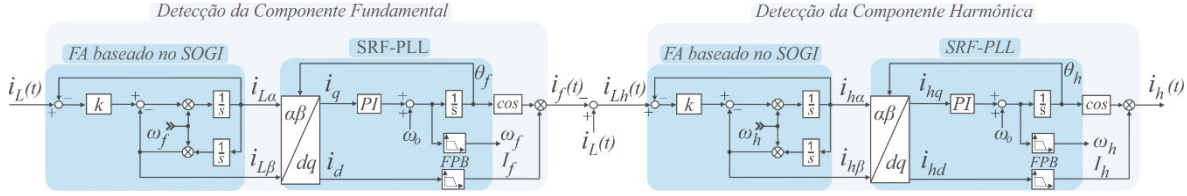


Figura 3 – Estrutura de detecção baseada em duas estruturas SOGI-PLL conectados em cascata.

Este método de detecção utiliza a característica do filtro adaptativo baseado no SOGI, cujas funções de transferência são dadas pelas Eq. 3 e Eq. 4. Essas duas relações mostram que a estrutura é um filtro passa banda, centrada na frequência de ressonância  $\omega$ , cuja largura de banda depende somente do ganho  $k$ . Nota-se que esse filtro gera dois sinais em quadratura  $i_{L\alpha}$  e  $i_{L\beta}$ , filtrados na frequência  $\omega$  (Teodorescu, Liserre, & Rodríguez, 2011), (Ciobotaru, Teodorescu, & Blaabjerg, 2006). O SOGI é sintonizado na frequência detectada pela PLL através do cancelamento da componente  $i_q$  do sistema de coordenadas síncrono  $dq$  (Golestan & Guerrero, 2015).

$$H_{\alpha}(s) = \frac{i_{L\alpha}(s)}{i_L(s)} = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (3)$$

$$H_{\beta}(s) = \frac{i_{L\beta}(s)}{i_L(s)} = \frac{k\omega^2}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (4)$$

Para ambos os estágios utilizou-se  $k = \sqrt{2}$ , resultando num tempo de assentamento razoável, em torno de 100 ms (Teodorescu, Liserre, & Rodríguez, 2011). Para valores de  $k$  menores que o definido, a largura de banda do SOGI se torna muito estreita, não conseguindo detectar o harmônico de maior amplitude. Para valores de  $k$  maiores, tem-se uma banda mais larga, podendo causar um offset na da amplitude do harmônico de maior amplitude.

Devido à componente fundamental ter a maior amplitude no sistema, o primeiro estágio da estrutura apresentada na Fig. 3 realiza a detecção da frequência fundamental  $\omega_f$  e da amplitude da corrente relativa a essa frequência  $I_f$ . Uma vez que  $i_q$  é forçado a zero pela PLL, tem-se que  $I_f$  é igual a  $i_d$  filtrado por um filtro passa-baixas (LPF). Assim, a componente da corrente fundamental  $i_f(t)$  é dada pela Eq. 5, na qual  $\theta_f$  é o ângulo da componente fundamental detectado pela estrutura SOGI-PLL. A corrente harmônica total  $i_{Lh}(t)$  é então determinada pela diferença entre  $i_L(t)$  e  $i_f(t)$ .

No segundo estágio, tem-se a detecção da frequência da componente harmônica de maior amplitude em  $i_{Lh}(t)$ . Uma vez que a frequência  $\omega_h$  e a amplitude  $I_h$  forem detectadas, realiza-se a mesma análise do estágio anterior, obtendo a corrente harmônica  $i_h(t)$ , dada pela Eq. 6, sendo  $\theta_h$  o ângulo da componente harmônica detectado pelo SOGI-PLL.

$$i_f(t) = I_f \cos(\theta_f) \quad (5)$$

$$i_h(t) = I_h \cos(\theta_h) \quad (6)$$

#### 5. SATURAÇÃO DINÂMICA

Neste trabalho, a prioridade é a injeção de potência ativa, seguida pela compensação de harmônicos. Assim, necessita-se de um esquema de saturação que permita a compensação de harmônicos somente quando houver uma margem de corrente disponível entre a corrente ativa máxima sendo injetada e a corrente nominal do inversor. Essa margem se deve à variação da radiação solar durante o dia, sendo que por volta do meio dia ela apresenta um valor baixo e durante a noite o conversor pode utilizar toda sua margem de corrente para a compensação da carga presente no sistema. A Fig. 4 apresenta a estrutura utilizada na saturação.

A presença de múltiplas frequências no sinal de corrente torna complexa a obtenção de uma expressão analítica para encontrar os limites de saturação. Assim, utiliza-se o método que leva em consideração o pico de corrente para realizar esta.

A corrente harmônica de referência  $i_h^*$  é somada à corrente de referência da malha de controle de corrente  $i^*$ , gerando a corrente  $i_p^*$ . Esta corrente passa por um detector de pico e o sinal detectado neste é comparado com o valor de corrente nominal do inversor  $i_{max}$ . O resultado dessa comparação é então enviado para um PI anti-windup, gerando o fator  $K$ , que varia entre 0 e 1, e indica a porcentagem de corrente harmônica que pode ser compensada de acordo com a margem permitida pelo inversor. O fator  $K$  multiplicado pela corrente harmônica detectada  $i_h$  gera a corrente harmônica de referência  $i_h^*$ , que é enviada para a malha de controle do inversor.

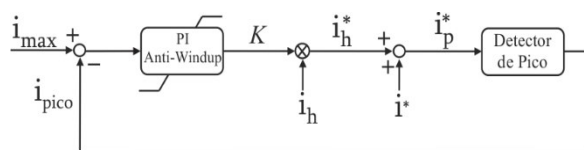


Figura 4 – Estrutura da saturação dinâmica de corrente.

## 6. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

O sistema descrito neste trabalho foi simulado no ambiente MATLAB/Simulink. O arranjo fotovoltaico consiste de 5 fileiras conectadas em paralelo com 13 painéis de 48 W conectados em série em cada uma delas. Os parâmetros da simulação se encontram na Tab. 2.

Tabela 2 – Parâmetros da simulação.

PARÂMETROS DO SISTEMA	VALOR
Frequência de chaveamento	10 kHz
Frequência de amostragem	20 kHz
Indutância do filtro	8 mH / 80 mΩ
Tensão no PAC	220 V
Tensão no barramento cc	390 V
PARÂMETROS DO CONTROLE DE CORRENTE	VALOR
Ganhos do controlador ressonante	$K_p = 48,752$ , $K_{I_n} = 1000$ e $K_{I_h} = 5000$
Ganho da SRF-PLL fundamental	$K_{p,pll,f} = 26,657$ e $K_{i,pll,f} = 355,306$
Ganho da SRF-PLL harmônica	$K_{p,pll,h} = 444,288$ e $K_{i,pll,h} = 98696$

A Fig. 5(a) mostra a dinâmica da irradiância solar. A tensão do sistema fotovoltaico, apresentada na Fig. 5(b), segue o ponto de máxima potência detectado pelo algoritmo do MPPT e é utilizada na malha de controle do boost. A tensão do barramento cc do inversor está detalhada na Fig. 5(c). Esta é controlada em 390 V e algumas oscilações ocorrem durante a variação da irradiância solar.

As cargas não lineares utilizadas na simulação são variadas, de forma a comprovar a eficácia do método de detecção dinâmico. Nos primeiros 4 segundos de simulação as cargas são representadas por fontes de corrente senoidais. A detecção começa em  $t = 0,5$  segundos de simulação. Inicialmente, tem-se uma carga composta por harmônicos de 5ª e 7ª ordem, com amplitudes 2 A e 7 A, respectivamente. Em  $t = 2$  segundos a carga varia, passando a ser composta por harmônicos de 3ª e 5ª ordem, com amplitudes de 1 A e 4 A, respectivamente. Após  $t = 4$  segundos, a carga utilizada passa a ser um diodo retificador, que gera harmônicos diversos.

As detecções da componente de maior amplitude da corrente fundamental e harmônica da carga, realizadas pelo método proposto neste trabalho, são mostradas na Fig. 6. O controle continua estável mesmo durante as variações de frequência.

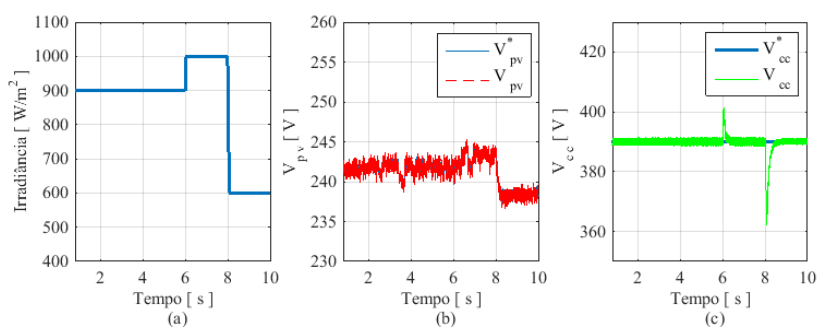


Figura 5 – (a) Variação de irradiância solar durante a simulação. (b) Tensão do sistema fotovoltaico detectada pelo MPPT. (c) Controle de tensão no barramento cc.

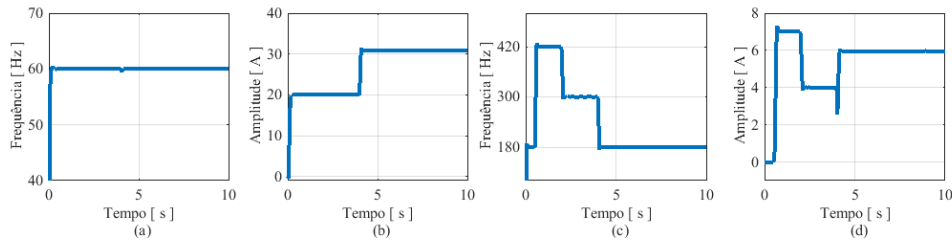


Figura 6 – Detecção da componente fundamental e harmônica de maior amplitude da carga. (a) Frequência da corrente fundamental. (b) Amplitude da corrente fundamental. (c) Frequência da componente da corrente harmônica. (d) Amplitude da componente corrente harmônica.

A Fig. 7 apresenta o espectro harmônico da corrente da carga, da rede e do inversor durante a compensação harmônica. É possível notar o harmônico de maior amplitude da carga sendo compensado parcialmente pelo inversor e parcialmente pela rede. Essa parcialidade se deve à margem de corrente do conversor disponível para a compensação, calculada pelo método de saturação dinâmica, o fator  $K$ . A Fig. 8 (a) mostra a variação do fator  $K$  para cada mudança de composição da carga e para as mudanças na irradiância solar. Note que em  $6 < t < 8s$  o valor de  $K$  cai para aproximadamente 0,1 devido a um aumento na irradiância, portanto a margem para o conversor realizar a compensação se torna muito pequena e a rede recebe boa parte da corrente harmônica. Já em  $8 < t < 10s$  há uma queda na irradiância solar, gerando uma margem maior para compensação e o valor de  $K$  aumenta para 1, assim, toda a componente harmônica é compensada pelo inversor.

A Fig. 8(b) apresenta a saturação da corrente de controle. Note que a corrente se satura no valor de  $i_{max}$  durante o transitório, porém o fator  $K$  se estabiliza e reajusta a corrente de modo que não ocorra saturação.

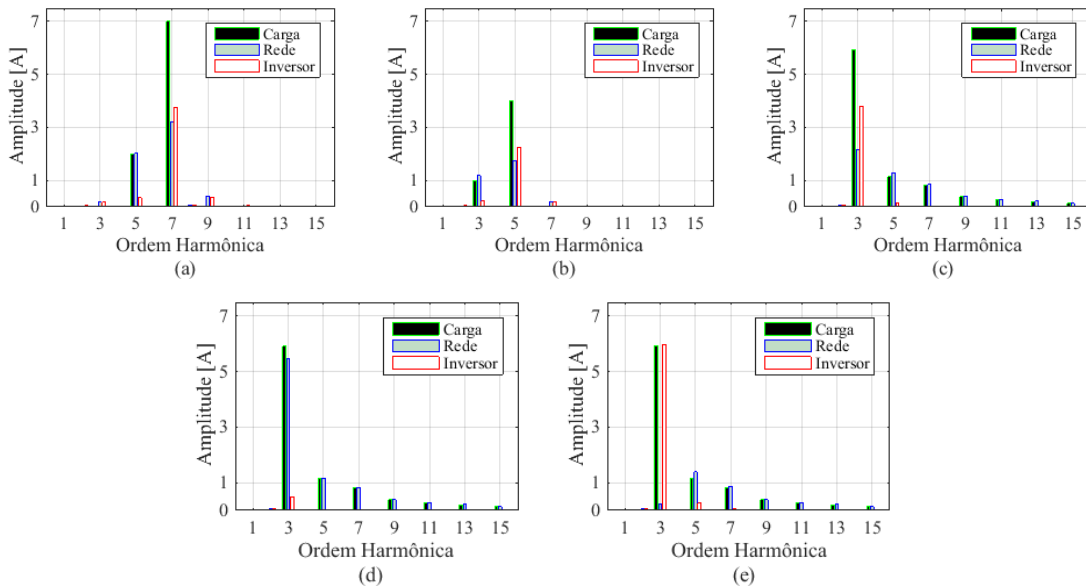


Figura 7 – Espectro de corrente durante a compensação. (a)  $0,5 < t < 2s$ . (b)  $2 < t < 4s$ . (c)  $4 < t < 6s$ . (d)  $6 < t < 8s$ . (e)  $8 < t < 10s$ .

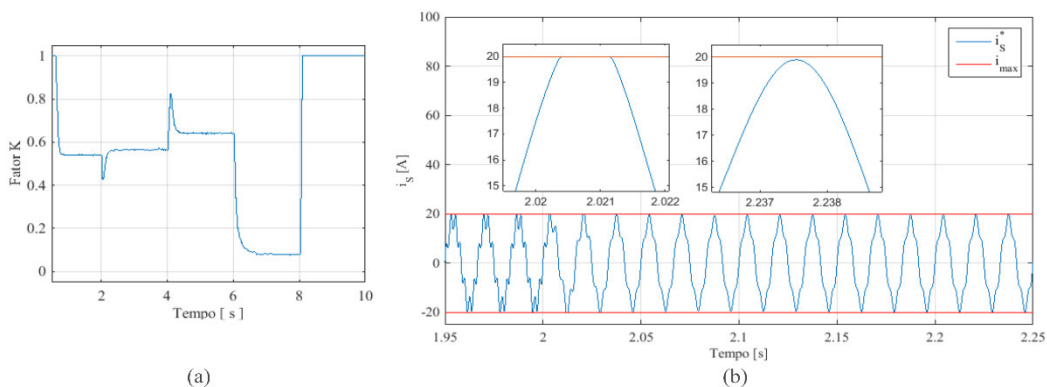


Figura 8 – (a) Fator  $K$ . (b) Saturação de corrente.

## 7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um método de controle adaptativo, compensando a componente harmônica de maior amplitude da carga. Além disso, realizou-se saturação, de forma a manter o inversor funcionando abaixo da sua corrente nominal. A estratégia de detecção dessa componente harmônica foi baseada na associação de duas estruturas SOGI-PLL em cascata. Esse é um método adaptativo que permite a utilização de somente dois controladores ressonantes, um deles sintonizado na frequência fundamental e o outro na frequência detectada.

A saturação dinâmica foi feita com base no monitoramento do pico da corrente do controle, detectando a margem de corrente disponível no conversor para a compensação de harmônicos. Assim, tem-se a compensação parcial da corrente harmônica de maior amplitude detectada.

Resultados de simulação mostraram que mesmo ao se compensar somente a componente de maior amplitude da carga harmônica, a corrente do sistema apresenta uma melhoria significativa, enquanto a saturação dinâmica mantém o conversor dentro de seu limite de trabalho, preservando sua vida útil.

## REFERÊNCIAS

- Akagi, H., Kanazawa, Y., & Nabae, A. (1984). Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, n. 3, pp. 625-630.
- Blaabjerg, F., Chen, Z., & Kjaer, S. (2004). Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 9, n. 5, pp. 1184-1194.
- Bonaldo, J. P., & Pomilio, J. (2013). Multi - Functional Use of Single-Phase Power. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technology Conference*.
- Bonaldo, J. P., Paredes, H. K., & Pomilio, J. A. (n.d.). Control of Single-Phase Power Converters Connected to Low Voltage Distorted Power Systems with Variable Compensation Objectives. To be published on *IEEE Trans. Power Electronics*.
- Bonaldo, J., Paredes, H. K., & Pomilio, J. A. (2013). Flexible operation of grid-tied single-phase power converter. *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 987-992.
- Brandão, D. I., Marafão, F. P., Paredes, H. K., & Costabeber, A. (2013). Inverter Control Strategy for DG systems based on the Conservative Power Theory. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 3283-3290.
- Ciobotaru, M., Teodorescu, R., & Blaabjerg, F. (2006). A New Single-Phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator. *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '06)*, pp. 1-6.
- Cupertino, A., Carlette, L., Perez, F., Resende, J., Selemene, S., & Pereira, H. A. (2013). Use of control based on passivity to mitigate the harmonic distortion level of inverters. *IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA)*, pp. 1-7.
- Golestan, S., & Guerrero, J. (2015). Conventional Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop is an Adaptive Complex Filter. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 62, n. 3, pp. 1679-1682.
- He, J., Li, Y. W., Blaabjerg, F., & Wang, X. (2014). Active Harmonic Filtering Using Current-Controlled, Grid-Connected DG Units With Closed-Loop Power Control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, n. 2, pp. 642-653.
- Herrera, R., & Salmeron, P. (2009). Present point of view about the instantaneous reactive power theory. *IET Power Electronics*, vol. 5, n. 2, pp. 484-495.
- Kumar, D., & Zare, F. (2014). Analysis of harmonic mitigations using hybrid passive filters. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*, pp. 945-951.
- Macgarth, B. P., Holmes, D. G., & Galloway, J. J. (2005). Power converter line synchronization using a discrete Fourier transform (DFT) based on a variable sample rate. *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 877-884.
- Paredes, H., Brandao, D., Terrazas, T., & Marafao, F. (2011). Shunt active compensation based on the Conservative Power Theory current's decomposition. *Brazilian Power Electronics Conf. (COBEP), Praia Mar, Brazil*, pp. 788-794.
- Pereira, H. A., Xavier, L. S., Cupertino, A. F., & Mendes, V. F. (2015). Single-phase multifunctional inverter with dynamic saturation scheme for partial compensation of reactive power and harmonics. *17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, pp. 1-10.
- Pereira, H., Xavier, L., & Cupertino, A. (2015). A Novel Adaptive Current Harmonic Detection Method Applied in Multifunctional Single-Phase Solar Inverters. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*.
- Qian, T., Lehman, B., Escobar, G., Ginn, H., & Molen, M. (2005). Adaptive saturation scheme to limit the capacity of a shunt active power filter. *IEEE Conference on Control Application*, pp. 1674-1679.
- REN21. (2015). *Renewables 2015 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat.
- Rodríguez, P., Luna, A., Candela, I. M., Teodorescu, R., & Blaabjerg, F. (Jan de 2011). Multiresonant Frequency-Locked Loop for Grid Synchronization of Power Converters Under Distorted Grid Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n. 1, pp. 127-138.
- Sera, D., Mathe, L., Kerekes, T., Spataru, S., & Teodorescu, R. (2013). On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, n. 3, pp. 1070-1078.



- Simões, M. G., Kyriakides, E., Blunier, B., & Ribeiro, P. F. (2012). A Comparison of Smart Grid Technologies and Progresses in Europe and the U.S. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, pp. 1154-1162.
- Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodríguez, P. (2011). *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Wiley-IEEE Press.
- Villalva, M. G. (2010). Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. UNICAMP.
- Villalva, M., Gazoli, J., & Filho, E. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, n. 5, pp. 1198-1208.
- Watanabe, E., Akagi, H., & Aredes, M. (2008). Instantaneous p-q power theory for compensating nonsinusoidal systems. *Int. School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Lagow, Poland, pp. 1-10.
- Xavier, L., Cupertino, A., & Pereira, H. (2014). Adaptive saturation scheme for a multifunctional single-phase photovoltaic inverter. *11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Juíz de Fora, Brazil, pp. 1-8.
- Yepes, A. G. (2011). Digital resonant current controllers for voltage source. Dissertação de Ph.D., Department of Electronics Technology. University of Vigo.
- Yepes, A., Freijedo, F., Lopez, O., & Doval-Gandoy, J. (2011). Analysis and Design of Resonant Current Controllers for Voltage-Source Converters by Means of Nyquist Diagrams and Sensitivity Function. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n. 11, pp. 5231-5250.

### ADAPTIVE CONTROL WITH DYNAMIC SATURATION FOR SINGLE-PHASE PHOTOVOLTAIC INVERTERS

**Abstract.** *Photovoltaic inverters are essential to extract power in photovoltaic arrays and inject it into the grid. Variations in solar irradiance during the day generates a current margin in the inverter that often is not exploited. Therefore, solar inverters may be used to compensate harmonic current from nonlinear loads connected in the grid. Harmonic detection methods usually extract all harmonic content from the load, increasing control complexity. Due to certain limitations with PI controllers, many works utilize PR controllers on the inverter current control. However, one PR controller would be needed for each frequency being compensated. In addition, inverters have a rated current under which they should work. In this context, this work proposes the use of a harmonic detection method able to extract only the higher amplitude harmonic component of the load, associated with an adaptive control and a dynamic saturation scheme. The PR controller is fed by the frequency obtained with the detection method, therefore needing only two of these controllers. Saturation scheme consists on control current peak analysis to determinate the available current margin to compensate harmonic current. Simulation results show that the saturation keeps the inverter working under its current rate, while harmonic compensation improves significantly the grid current.*

**Key words:** *Photovoltaic inverters, Harmonic compensation, Dynamic saturation*