

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



**Título:**

MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO APLICADOS NO DETECTOR DE CORRENTE HAMÔNICA BASEADO NA ESTRUTURA DA SOGI-PLL: UM ESTUDO COMPARATIVO.

**Autores:**

Rodrigo Cassio de Barros, Heverton Augusto Pereira, Allan Cupertino, Wesley Venancio Ribeiro

**Publicado em:**

VII Congresso Brasileiro de Energia Solar

**Data da Publicação:**

2018

**Citação para a versão publicada:**

R. C. de Barros, W. V. Ribeiro, H. A. Pereira, S. P. Freitas, A. Cupertino, " Métodos de discretização aplicados no detector de corrente hamônica baseado na estrutura da SOGI-PLL: um estudo comparativo," VII Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS), Gramado, 2018, pp. 1-10.

# MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO APLICADOS NO DETECTOR DE CORRENTE HARMÔNICA BASEADO NA ESTRUTURA DA SOGI-PLL: UM ESTUDO COMPARATIVO

**Rodrigo Cassio de Barros** – rodrigocdebarros@gmail.com

**Wesley Venancio Ribeiro** – ww.ribeiro92@gmail.com

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

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Elétrica

**Allan Fagner Cupertino** – afcupertino@ieee.org

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

**Resumo.** A operação multifuncional de inversores fotovoltaicos (FV) consiste em fornecer serviços auxiliares à rede elétrica, tais como: injeção de potência reativa, compensação de corrente harmônica e regulação de frequência. Tais serviços são realizados quando os inversores estão trabalhando abaixo da condição nominal. Assim, a operação multifuncional pode melhorar a qualidade de energia da rede. Quando o inversor fotovoltaico é usado para compensação de corrente harmônica, ele funciona como filtro ativo. Existem vários métodos de detecção de corrente harmônica, sendo que a estrutura de detecção deve ser simples, precisa e rápida. Neste trabalho é proposta uma melhoria no método de detecção de harmônicos baseado no Generalized Integrator coupled with a Phase Locked Loop (SOGI-PLL). Para garantir o bom funcionamento desta estrutura quando a mesma é adotada, estratégias de discretização devem ser aplicadas. Entretanto, quando o processo de discretização é aplicado a SOGI-PLL, alguns erros podem afetar a velocidade e a precisão da mesma, prejudicando o processo de detecção. A melhoria do método de detecção é realizada inserindo uma retroalimentação negativa na estrutura SOGI. Neste trabalho, os modelos matemáticos e as simulações são realizados usando quatro combinações de três métodos de discretização. Os métodos propostos são: Forward Euler, Backward Euler e Tustin. São realizadas análises considerando a variação na frequência de amostragem e na ordem harmônica. Finalmente, o detector harmônico é aplicado a um inversor FV monofásico e o desempenho da compensação harmônica é discutido.

**Palavras-chave:** Detecção de Harmônicos, SOGI-PLL, Discretização, Inversores Multifuncionais, Compensação de Harmônico.

## 1. INTRODUÇÃO

Na última década, os sistemas de energia fotovoltaicos (PV) experimentaram rápido crescimento em todo o mundo (REN, 2016). As previsões mostram que a energia solar crescerá 20% ao ano até 2020 e os preços dessa energia cairão rapidamente até o ponto em que a energia solar se torne mais barata que a energia eólica on-shore (Schmela, 2016). De acordo com o (Global Market, 2017), o mercado de energia fotovoltaica continuará crescendo. Além disso, os sistemas de energia fotovoltaica já contribuem para uma boa parcela de energia elétrica em muitos países, como Itália, Alemanha e Grécia. No entanto, o crescimento de energia renovável faz a rede elétrica mais descentralizada e suscetível a distúrbios (de Andrade *et al.*, 2016). Este fato traz algumas preocupações aos profissionais dessas áreas e um dos pontos mais discutidos é a qualidade da energia da rede elétrica devido ao uso de conversores baseados em eletrônica de potência.

A expansão da utilização de equipamentos eletrônicos com características não lineares na relação entre corrente e tensão (cargas não lineares) causa diversos impactos na qualidade de energia elétrica (Abbas e Saqib, 2007). Dispositivos como os usados para acionamento de motores industriais, lâmpadas, computadores, tiristores e outros mais, causam altos níveis de correntes harmônicas no sistema elétrico. Estas distorções podem prejudicar o funcionamento de alguns componentes, danificar banco de capacitores, aquecimento em transformadores, entre outros (Abbas e Saqib, 2007). Portanto, mitigar as distorções harmônicas da rede é uma questão constantemente discutida por profissionais da área.

Tradicionalmente, filtros passivos são usados como solução para redução da distorção harmônica, causada pela presença de cargas não lineares, uma vez que são fáceis de projetar, apresentam simples estruturas, baixo custo e alta eficiência (Peterson, Singh e Rastgoufard, 2008). No entanto, podem inserir ressonância série e paralelo no sistema, muitas vezes indesejadas. Já o uso de filtros ativos não apresentam tal desvantagem, mas são relativamente caros e ocupam um espaço físico considerável no sistema em que está inserido.

Uma alternativa bem aceita na literatura para minimizar as distorções harmônicas é a utilização de inversores fotovoltaicos multifuncionais. Como a irradiância solar varia durante o dia, os inversores fotovoltaicos geralmente funcionam abaixo do seu ponto de operação nominal (de Andrade *et al.*, 2016), conforme ilustrado na Figura 1. Assim, sempre que a potência do inversor não exceda o valor nominal, este pode ser utilizado para melhorar a qualidade da energia da rede. Serviços auxiliares como compensação de potência reativa (Akagi, Kanazawa e Nabae, 1984), injeção reativa durante falhas, regulação de tensão, regulação de frequência e compensação de corrente harmônica (Pereira *et al.*, 2015) são algumas das contribuições que os tais inversores podem realizar.

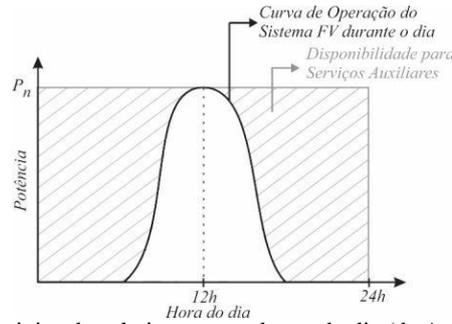


Figura 1: Potência injetada pelo inversor ao longo do dia (de Andrade *et.al.*, 2016).

Para utilizar o inversor PV na compensação harmônica, é necessária uma estrutura de detecção harmônica rápida e precisa. A estrutura da SOGI-PLL possui grande desempenho, sendo que a detecção é baseada na extração da informação da frequência e da amplitude do sinal, sendo possível a reconstrução do mesmo. Entretanto, para garantir que o desempenho da SOGI-PLL se mantenha quando este sistema é implementado na prática, é necessário traçar estratégias de discretização para o mesmo (Pereira *et. al.*, 2015).

Os métodos de discretização possuem características particulares baseadas na estabilidade, nível de implementação e desempenho de controle dinâmico (Sangwongwanich, Yang, and Blaabjerg, 2016). O método Forward Euler é de fácil implementação, mas pode levar uma planta estável em domínio contínuo para uma planta instável no domínio discreto (Song, Xu, e Lu, 2014). O método Backward Euler não possui esse problema de instabilidade, mas tem limitação sobre o desempenho dinâmico do sistema de controle (Ciobotaru, Teodorescu e Blaabjerg, 2006). Os métodos de Tustin têm grande desempenho pensando em dinâmica e na questão da estabilidade. Entretanto, Tustin podem apresentar erros no mapeamento para o domínio discreto quando o sistema de controle possui frequências de ressonância.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Estruturas de Detecção

A estrutura *Dual Second Generalized Integrator* (SOGI-PLL) é o detector harmônico usado neste trabalho (Rodriguez *et. al.*, 2011). O SOGI é um filtro adaptativo com características de um filtro passa faixa combinado com um filtro passa baixa, cuja função de transferências se encontram na Equação 1 e 2. O diagrama de blocos é apresentado na Figura 2. A detecção harmônica é uma associação em cascata de um SOGI e o *Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop* SRF-PLL, que garante a atualização constante do valor da frequência da ordem harmônica detectada.

A saída do bloco da SOGI é composta pelas componentes  $\alpha$  e  $\beta$  da corrente. As funções de transferências correspondentes foram calculadas através do diagrama de blocos e são dadas por (1) e (2) respectivamente.

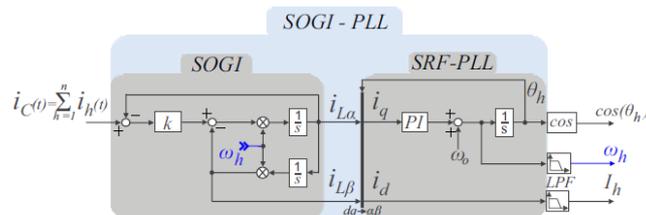


Figura 2: Estrutura Completa da SOGI-PLL.

$$\frac{i_{C\alpha}(s)}{i_C(s)} = \frac{k\omega_h s}{s^2 + k\omega_h s + \omega_h^2} \quad (1)$$

$$\frac{i_{C\beta}(s)}{i_C(s)} = \frac{k\omega_h^2}{s^2 + k\omega_h s + \omega_h^2} \quad (2)$$

onde  $\omega_h$  é a frequência de realimentação detectada pela PLL que determina a frequência de filtragem do SOGI e  $k$  é uma constante que determina a largura de banda do filtro. Logo, pode-se concluir que o SOGI fornece para a SFR-PLL dois sinais em quadratura na frequência  $\omega_h$  (Rodriguez *et. al.*, 2011). Como já é bem conhecida, a SFR-PLL é uma malha fechada que estima a amplitude, a fase e a frequência do sinal. Geralmente a SOGI-PLL é utilizada para a sincronização de inversores, porém essa capacidade de reconstrução do sinal detectado permite uma boa expansão do SOGI – PLL.

A estrutura de detecção é dividida em  $n$  estágios. O primeiro estágio detecta a componente fundamental. Por sua vez, o segundo estágio detecta a componente harmônica de maior amplitude; o terceiro detecta a componente com a segunda maior amplitude a assim sucessivamente. Neste trabalho, usaremos apenas dois estágios para garantir um melhor entendimento do processo.

A retroalimentação negativa é a técnica aplicada para ter um melhor desempenho durante o processo de detecção de harmônicos. Considerando apenas duas etapas e desconsiderando a dinâmica da SRF-PLL, o diagrama de blocos é

simplificado como mostrado na Figura 3. Onde,  $G_f$  é a função de transferência da SOGI para a componente fundamental e  $G_h$  é a função de transferência SOGI para a componente harmônica.

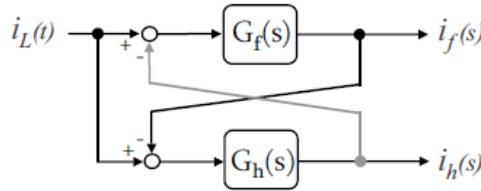


Figura 3: Detector de Harmônico com dois estágios.

Tem-se que a função de transferência da corrente da fundamental ( $I_f(s)$ ) e da componente harmônica ( $I_h(s)$ ) é dada pelas equações (3) e (4), respectivamente. Como o foco deste trabalho se encontra no processo de detecção da componente harmônica, o foco será na função de transferência  $\frac{I_h(s)}{I_L(s)}$ .

$$\frac{I_f(s)}{I_L(s)} = \frac{G_f(s) - G_f(s) \cdot G_h(s)}{1 - G_f(s) \cdot G_h(s)} \quad (3)$$

$$\frac{I_h(s)}{I_L(s)} = \frac{G_h(s) - G_f(s) \cdot G_h(s)}{1 - G_f(s) \cdot G_h(s)} \quad (4)$$

O diagrama de Bode para  $\frac{I_h(s)}{I_L(s)}$  encontra-se na Figura 4. Pode-se perceber duas importantes características: o pico de ressonância e a ganho unitário. O pico de ressonância atenua a componente fundamental de 60 Hz e o ganho unitário garante a máxima detecção da amplitude da componente harmônica. Devido ao processo de discretização, esta característica do diagrama de bode pode sofrer algumas modificações e afetar o processo de detecção.

A frequência de ressonância possui menor espalhamento para baixas ordens harmônicas. Como para esta aplicação frequência de ressonância encontra-se na componente fundamental, temos que esta característica não sofre considerável efeito quando a estrutura da SOGI-PLL se encontra no domínio discreto. Portanto, o foco deste trabalho se encontra nas análises dos efeitos que os métodos de discretização causam no ganho unitário. Para compreender tal característica no domínio contínuo, basta aplicar o limite sobre a função de transferência, como demonstrado na Equação (5).

$$\lim_{s \rightarrow j\omega_h} \left( \frac{I_h(s)}{I_L(s)} \right) = \lim_{s \rightarrow j\omega_h} \left( \frac{G_h(s) - G_f(s) \cdot G_h(s)}{1 - G_f(s) \cdot G_h(s)} \right) \quad (5)$$

Pensando no limite separadamente em cada função de transferência  $G_f(s)$  e  $G_h(s)$  tem-se que para a fundamental este valor é igual a 1 e para a harmônica este valor é valor definido genericamente pela variável A, como mostram as equações (6) e (7) respectivamente:

$$\lim_{s \rightarrow j\omega_h} (G_h(s)) = \lim_{s \rightarrow j\omega_h} \left( \frac{k\omega_h s}{s^2 + k\omega_h s + \omega_h^2} \right) = \frac{jk\omega_h^2}{-\omega_h^2 + jk\omega_h^2 + \omega_h^2} = 1 \quad (6)$$

$$\lim_{s \rightarrow j\omega_h} (G_h(s)) = \lim_{s \rightarrow j\omega_h} \left( \frac{k\omega_f s}{s^2 + k\omega_f s + \omega_f^2} \right) = \frac{k\omega_h\omega_f}{-\omega_f^2 + k\omega_h\omega_f + \omega_h^2} = A \quad (7)$$

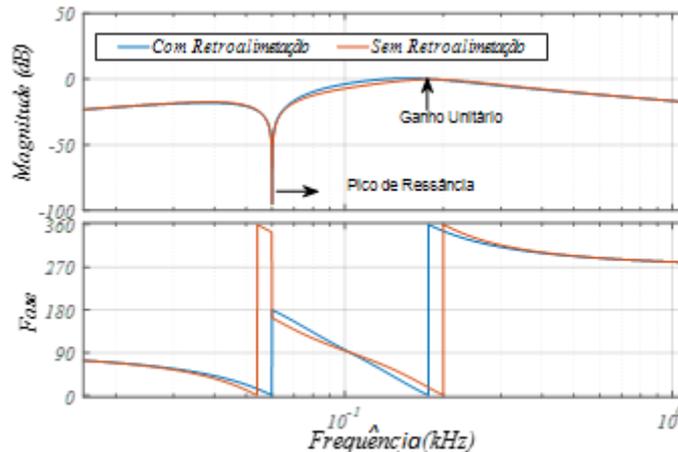


Figura 4: Diagrama de Bode da Função de Transferência da Detecção de Harmônicos.

Assim, para o domínio contínuo, o valor que garante a detecção perfeita do harmônico seria igual a 1 p.u., como pode ser visto na Equação 8. Neste trabalho foi analisado o quanto os métodos de discretização afetam este valor.

$$\lim_{s \rightarrow j\omega_h} \left( \frac{G_h(s) - G_f(s) \cdot G_h(s)}{1 - G_f(s) \cdot G_h(s)} \right) = \frac{A - A}{1 - A} = 0 = 1 \text{ pu} \quad (8)$$

### 2.2 Métodos de Discretização Utilizados

Como pode se perceber, a estrutura da SOGI é composta por dois integradores. Assim, é possível realizar combinações dos métodos de discretização para o detector de harmônico. Para este trabalho, foram feitas quatro combinações dos métodos, como pode ser visto na Tabela 1. Além do mais, a transformação direta de  $s$  para  $z$  se encontram na Tabela 2.

Tabela 1 – Combinações dos Métodos de Discretização

<i>Foward Euler &amp; Foward Euler</i>	<i>FF</i>
<i>Backward Euler &amp; Backward Euler</i>	<i>BB</i>
<i>Foward Euler &amp; Backward Euler</i>	<i>FB</i>
<i>Tusin &amp; Tustin</i>	<i>TT</i>

Tabela 2 – Transformação de  $s$  para  $z$  dos Métodos de Discretização

Foward Euler	$s = \frac{1 - z^{-1}}{z^{-1}T_s}$
Bacward Euler	$s = \frac{1 - z^{-1}}{T_s}$
Tustin	$s = \frac{2}{T_s} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$

### 2.3 Inversores Fotovoltaicos Multifuncionais

O sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede é mostrado na Figura 3. Similarmente ao sistema trifásico, o sistema monofásico é composto pelos painéis fotovoltaicos e, para a simulação, o modelo matemático utilizado do painel é descrito em (Villalva, Gazoli e Filho, 2009).

Diferentemente do sistema trifásico, o monofásico apresenta um estágio c.c./c.c., que geralmente é composto por um conversor *boost* (Pereira *et. al.*, 2015). Este estágio garante estabilidade no controle do barramento c.c. do inversor.

A estratégia de controle proposta para o inversor monofásico é mostrado na Figura 6. Nota-se que, o algoritmo MPPT está na malha de controle do estágio c.c./c.c. e isolado do estágio do inversor, garantindo estabilidade para o algoritmo MPPT. Nesta mesma estrutura de controle se encontra a estrutura de detecção baseada na SOGI-PLL, que está contida na malha de controle do inversor.

O método de detecção da corrente harmônica do inversor monofásico é baseado na estrutura SOGI-PLL (*second order generalized integrator- phase-locked loop*) (Pereira *et. al.*, 2015). Ao contrário do método da teoria da potência instantânea, este método detecta somente uma componente harmônica da corrente da carga e sua correspondente frequência. Assim, dois controladores ressonantes são necessários, um para rastrear a componente fundamental e outro para rastrear a componente harmônica de maior amplitude da corrente da carga. Com essa estratégia, o controle se torna adaptativo e o esforço computacional é reduzido.

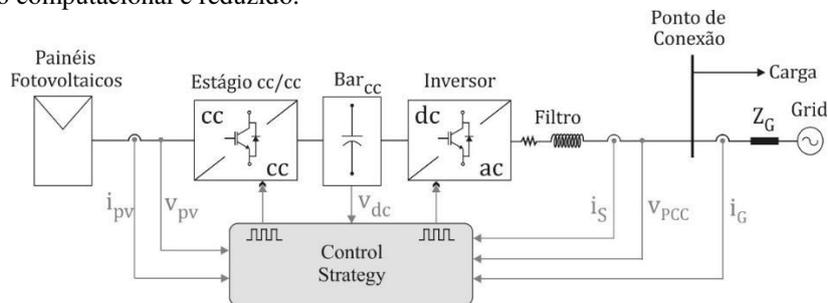


Figura 5: Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica monofásica.

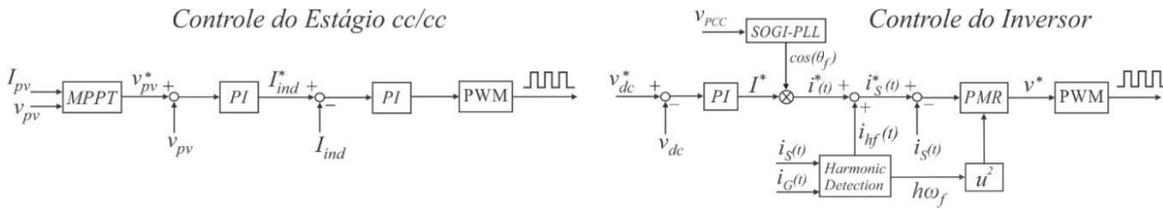


Figura 6: Estratégia de controle.

Para este trabalho em específico, foi utilizado um inversor com potência nominal de 5 kW. Assim, foram utilizados 20 módulos FV com 250 Wp, sendo o gerador fotovoltaico constituído por 10 módulos associados em série e dois em paralelo. As especificações do módulo FV e as especificações do inversor se encontram nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Especificações do Painel Fotovoltaico (Canadian, 2009).

Potência nominal	270 W
Tensão de Máxima Potência ( $V_{mp}$ )	31,29 V
Corrente de Máxima Potência ( $I_{mp}$ )	7,99 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	35,5 V
Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )	8,5 A

Tabela 4 - Especificações dos Módulos Fotovoltaicos.

Indutores do Filtro LCL	10 mH / 19 mH
Capacitor do Filtro LCL	3,8 $\mu$ F
Damping Resistor	4 $\Omega$
$V_{PCC}$	220 V
$V_{dc}$	390 V
Capacitor do Bar <sub>cc</sub>	500 $\mu$ F

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

A seção de resultados é dividida em duas partes: Análise dos efeitos que os métodos de discretização causam no diagrama de Bode da função de transferência mostrada na Figura 4 e a aplicação do detector de harmônico no inversor fotovoltaico multifuncional. A primeira parte foi simulado no *software* MATLAB. Para a segunda parte, foi simulado o inversor FV conectado à rede elétrica da Figura 6. Todas as simulações com os parâmetros e estratégias de controle citados acima foram realizadas no *software* PLECS.

#### 3.1 Análise do Diagrama de Bode

Para verificar os efeitos causados pelos métodos de discretização na função de transferência, o valor da magnitude detectada é discutida. Como se trata de domínio discreto, a frequência de amostragem foi variada de 5 kHz a 15 kHz. Além do mais, como não se sabe previamente qual conteúdo harmônico será detectado, a ordem harmônica foi variada de 2ª a 19ª ordem. Os resultados encontrados estão mostrados na Figura 7.

O primeiro ponto importante são os resultados discrepantes encontrados para *FF* e *BB*, se comparado aos outros métodos. Como pode ser notado, para baixo valor de frequência de amostragem e altas ordens harmônicas, o valor da magnitude está em torno de 4 p.u. para *FF* e 0,6 p.u. para o *BB*. Estes resultados, conforme mostra a equação (8), deveriam ser iguais a 1 p.u.. Assim, o erro em magnitude é quase 3 p.u. para *FF* e 0,4 p.u. para *BB*. Além do mais, esses valores de alto erro em magnitude se encontram tanto aplicando a estrutura de realimentação quanto sem ela.

Os métodos *FB* e *TT* apresentam resultados semelhantes quando a retroalimentação negativa é aplicada. Como pode ser notado na Figura 7 (f) - (h), esses métodos têm considerável melhorias nos resultados para ordens harmônicas baixas, mais próximas de 60 Hz. Quando a retroalimentação não é aplicada, Figura 7 (e) - (g), há um aumento do erro de magnitude para baixas ordens harmônicas (próximo ao componente fundamental) em ambos os métodos de discretização. Além disso, para altas ordens harmônicas, a retroalimentação negativa não possui resultados relevantes comparado ao caso sem retroalimentação.

Além disso, quando a ordem harmônica é aumentada, o erro também aumenta (considerando constante a frequência de amostragem). Outro fator importante que afeta diretamente a detecção de amplitude é a frequência de amostragem. Quando essa variável é reduzida, o erro de magnitude aumenta. Esse comportamento é observado tanto para os métodos *TT* e *FB*. Além disso, como pode ser notado na Figura 7 (e) - (g) e Figura 7 (f) - (h), existe uma região crítica para esses dois métodos para alta ordem harmônica e baixa frequência de amostragem (mesmo com e sem a estratégia de retroalimentação negativa).

Além disso, *TT* apresenta menor erro em amplitude que *FB* sobre a região crítica. No entanto, para baixas frequências de amostragem e ordem harmônica baixa é possível verificar um melhor desempenho do *FB* sobre o *TT*. Mesmo com alguns pontos diferentes, esses dois métodos têm excelentes resultados para baixas ordens harmônicas e altas frequências de amostragem, quando a retroalimentação negativa é usada.

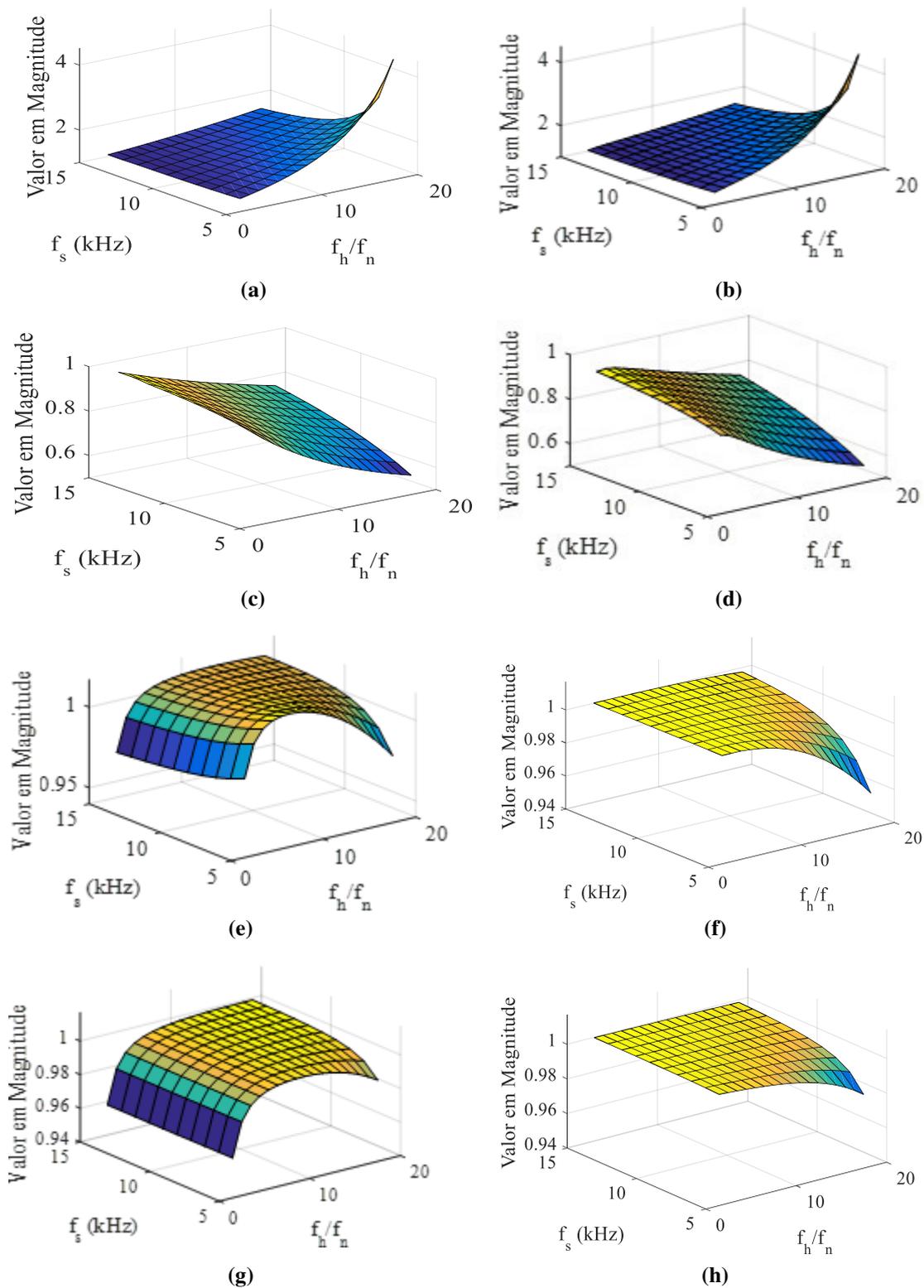


Figura 7: *FF* sem retroalimentação (a), *FF* com retroalimentação (b), *BB* sem retroalimentação (c), *BB* com retroalimentação (d), *FB* sem retroalimentação (e), *FB* com retroalimentação (f), *TT* sem retroalimentação (g), *TT* com retroalimentação (h).

### 3.2 Detector de Harmônico Aplicado em Inversor fotovoltaico multifuncional

Por fim, o detector de correntes harmônicas é aplicado a um inversor fotovoltaico monofásico. Uma carga não linear é simulada com o propósito de validar os resultados encontrados na seção anterior. Neste exemplo, a frequência de amostragem usada foi a mesma que a frequência de chaveamento do sistema.

Os resultados são separados em dois casos. No caso I, componente harmônica de 3º ordem com 5A é injetada pela carga não linear e a frequência de amostragem do detector é fixada em 12 kHz. No caso II, foi injetado componente harmônico de 9º ordem com 5 A e uma frequência de amostragem igual a 12 kHz. Tabela 5 resume as condições dos testes. A simulação de tempo para cada caso foi de 2,2 segundos. Além disso, a detecção harmônica começa no tempo de 0,8 segundos e a compensação harmônica em 0,9 segundos.

Tabela 5 – Condições de Teste.

Casos	Ordem Harmônica	Frequência de Amostragem	Amplitude
Caso I	3º	12 kHz	5 A
Caso II	9º	12 kHz	5 A

Os resultados da detecção de amplitude e frequência do caso I são mostrados na Figura 8. Como podem ser notados, os resultados são melhorados quando a retroalimentação negativa é aplicada aos métodos *FB* e *TT*. Além disso, *FB* é o método com o melhor desempenho para esta combinação de frequência de amostragem e ordem harmônica. Além disso, a detecção da frequência harmônica é apresentada. Todos os dois métodos têm um desempenho similar, bem próximo de 120 Hz.

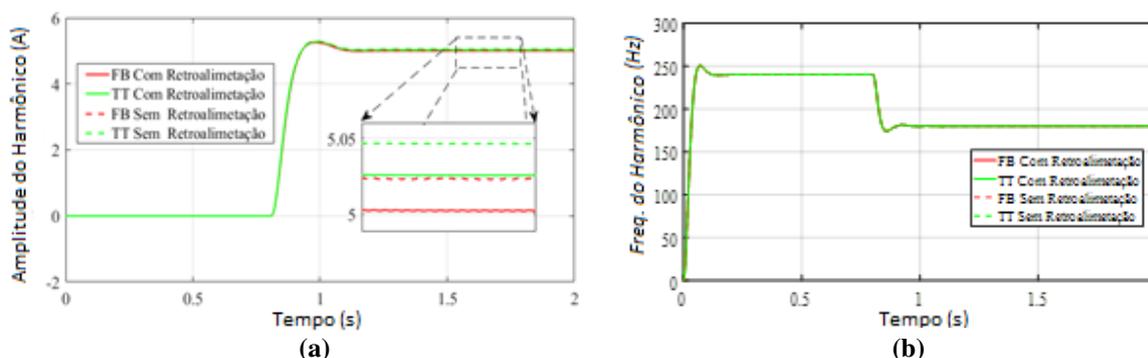


Figura 8: Detecção do caso I. (a) Amplitude do harmônico e (b) a frequência do harmônico.

Os resultados da detecção de amplitude e frequência do caso II são mostrados na Figura 9. Para esta condição, a frequência de amostragem foi mantida a mesma que o caso I e a ordem harmônica foi aumentada. O primeiro ponto a se analisar é o desempenho da retroalimentação, que não apresentou uma melhora satisfatória no resultado. Este fato ocorre devido à ordem harmônica estar mais afastada da componente fundamental. Além disso, *TT* é o método com o melhor desempenho para esta combinação de frequência de amostragem e ordem harmônica. Além disso, a detecção da frequência harmônica é apresentada. Todos os três métodos têm um desempenho similar, bem próximo de 540 Hz.

Com o objetivo de mostrar a melhora da qualidade de energia com processo de compensação harmônica nos inversores fotovoltaicos multifuncionais, o espectro da corrente do inversor e da rede do caso I são mostrados na Figura 10. O método utilizado para discretização foi o *FB*. Antes da compensação harmônica, a rede apresentava um 3º harmônico com amplitude de 5 A e o inversor PV não estava detectando qualquer componente harmônico, injetando somente a componente fundamental da corrente na rede. No entanto, após o início da compensação harmônica, o inversor FV apresenta o 3º harmônico no espectro da corrente injetada. Com esta informação, o inversor adiciona a mesma amplitude de harmônica detectada, com sinal oposto. Assim, a distorção harmônica da corrente da rede é reduzida. Portanto, a corrente de rede apresenta melhorias em relação à qualidade com o processo de compensação harmônica.

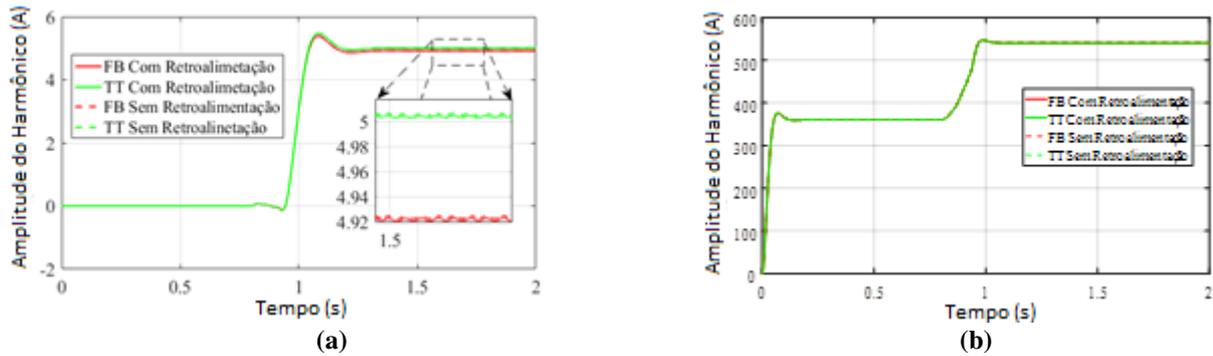


Figure 9: Detecção do caso II. (a) Amplitude do harmônico e (b) a frequência do harmônico.

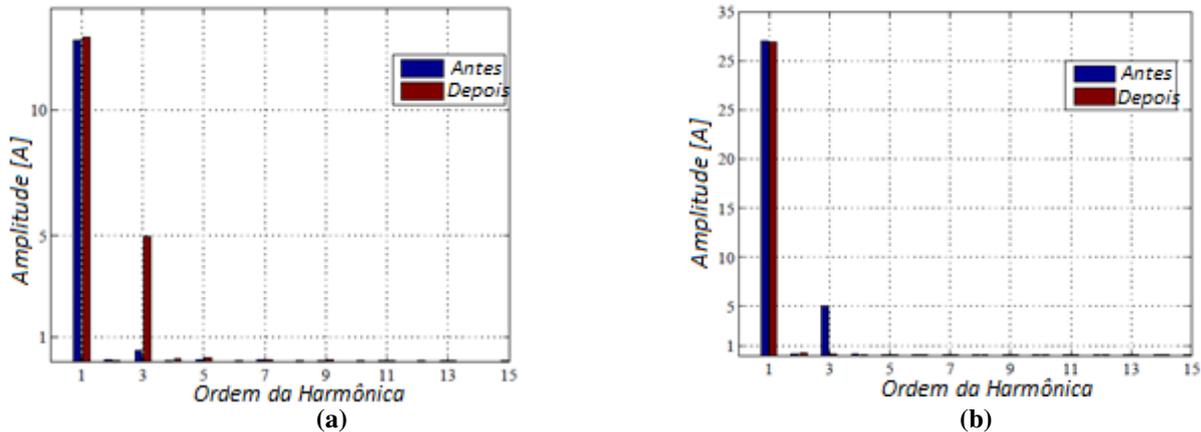


Figura 10: Espectro da corrente do inversor (a) e da rede (b) no processo de compensação de harmônicos.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho é feito um estudo comparativo de diferentes métodos de discretização durante a detecção de corrente harmônica. O detector de harmônicos estudado é baseado no SOGI-PLL composto por dois estágios. Estudo de como os métodos de discretização afetam o desempenho da estrutura de detecção é analisado, bem como o efeito da retroalimentação negativa.

Pode-se concluir a ineficiência de *FF* e *BB* em comparação com os outros métodos. Eles apresentaram alto erro para detectar a magnitude da componente harmônica. Além disso, para esses dois métodos, a retroalimentação negativa não apresenta melhoras consideráveis nos resultados. Portanto, esses dois métodos não são satisfatórios para discretizar a estrutura de detecção de harmônico adotada neste trabalho.

Além disso, pode ser concluído dois fatores importantes relacionados ao erro da amplitude detectada: a frequência de amostragem e a ordem harmônica. Para todos os métodos, com e sem retroalimentação negativa, o erro aumenta quando a frequência de amostragem diminui. Além disso, considerando a ordem harmônica, é possível ver o aumento do erro para ordens harmônicas próximos da componente fundamental (60 Hz) quando a retroalimentação negativa não é aplicada. Este fato acontece para todos os métodos discutidos. No entanto, quando a retroalimentação negativa é aplicada, este problema é minimizado. Portanto, a retroalimentação melhora para todos os casos a detecção para uma ordem harmônica baixa. No entanto, quando a ordem do harmônico não está próxima do componente fundamental, esta estratégia não representa consideráveis melhoras nos resultados.

*FB* e *TT* têm resultados mais estáveis e algumas características peculiares. O primeiro apresenta um melhor desempenho para baixas ordens harmônicas e o segundo tem melhores resultados para valores de maiores ordens harmônicas. Além disso, ambos os métodos, mesmo usando retroalimentação, apresentaram erro maior na região crítica. Esta região crítica corresponde à combinação de componentes harmônicas de altas ordens, juntamente com baixas frequência de amostragem. Portanto, suas aplicações apresentam limitações nessa região. Assim, o resumo para os métodos com retroalimentação, estão representados na Tabela 6.

Tabela 6 – Tabela Resumo

Métodos de Discretização	Baixas ordem harmônicas e alta frequência de amostragem	Altas ordem harmônicas e alta frequência de amostragem	Baixas ordem harmônicas e baixa frequência de amostragem	Altas ordem harmônicas e abaixa frequência de amostragem
<i>FF</i>	-	-	--	--
<i>BB</i>	-	-	--	--
<i>FB</i>	++	+	++	-
<i>TT</i>	++	++	++	+

### Agradecimentos

Este trabalho está sendo desenvolvido com auxílio financeiro das agências de fomento FAPEMIG, CAPES e CNPQ.

### REFERÊNCIAS

- Abbas, W., Saqib, M. A., 2007. Effect of nonlinear load distributions on total harmonics distortion in a power system, International Conference on Electrical Engineering.
- Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., 1984. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components, IEEE Transactions on Industry Applications. – 1984, vol. IA-20, n. 3, pp. 625-630.
- Canadian Solar, 2009, Cs6p-260, 265, 270p datasheet.
- Ciobotaru M., Teodorescu R., Blaabjerg F., 2006, New single-phase pll structure based on second order generalized integrator, IEEE Power Electronics Specialists Conference.
- de Andrade, E. G., de Oliveira, H. A., Ribeiro, W. V., de Barros, R.C., Pereira, H. A., 2016, Power losses in photovoltaic inverter components due to reactive power injection, IEEE International Conference on Industry Applications.
- 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.
- Peterson, M., Singh B.N., Rastgoufard, P., 2008. Active and passive filtering for harmonic compensation. 40th Southeastern Symposium on System Theory (SSST).
- Power Global Market Outlook for Solar Global Market Outlook for Solar Power, SOLAR QUARTER. - Novembro de 2017.
- REN, Renewables 2017 Global Status Report.
- Rodriguez, P., Luna A., Candela, I., Mujal, R., Teodorescu, R., 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.
- Sangwongwanich, A., Yang, Y., Blaabjerg, F. A., 2016. A cost-effective power ramp-rate control strategy for single-phase two-stage grid-connected photovoltaic systems. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.
- Schmela, M., 2016. Global market outlook for solar power.
- Song, B., Xu, L., Lu, X., 2014. A comparative study on Tustin rule based discretization methods for fractional order differentiator. 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology.
- Villalva, M., Gazoli, J., Filho, E. R., 2009. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Transactions on power electronics, v.24, n. 5, pp 1198-1208.

## **DISCRETIZATION METHODS APPLIED TO A SOGI-BASED HARMONIC DETECTOR: A COMPARATIVE STUDY**

**Abstract.** *The multifunctional operation of photovoltaic (PV) inverters consists in provide ancillary services to the power grid, such as: reactive power injection, harmonic current compensation and frequency regulation. Thus, the multifunctional operation can improve the ac-grid power quality. When the PV inverter excess capacity is used to harmonic current compensation, it works as active filter. There are several harmonic current detection methods, and the detection structure should be simple, accurate and fast. In this work is proposed an improvement in the harmonic detection method based on the Second Order Generalized Integrator coupled with a Phase Locked Loop (SOGI-PLL). This structure detects the most predominant harmonic current components. In order to apply this structure in Embedded Systems, the discretization process needs to be performed in order to keep the performance of the detector. When the discretization process is applied to the SOGI-PLL, some errors can degrade the speed and accuracy. The improvement of the detection method is realized inserting a negative feedback path in the SOGI structure. In the first part, the mathematical model and simulations are performed using four combinations of discretization methods. The methods discussed in this work are: Forward Euler, Backward Euler and Tustin. Same analyses considering variation in the switching frequency and in the harmonic order are performed. Also, specific cases of these variations are studied separately. Finally, the harmonic detector is applied to a single phase PV inverter and the harmonic compensation performance is discussed.*

**Keywords.** *Harmonic Detection, SOGI-PLL, Multifunctional PV inverter, Harmonic Compensation.*