

Universidade Federal de Viçosa - UFV

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - CCE

Departamento de Engenharia Elétrica - DEL

**MÉTODOS DE DETECÇÃO DE CORRENTES HARMÔNICAS
APLICADOS À INVERSORES MULTIFUNCIONAIS
PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**

Lara Ana Rodarte Rios

Orientador : Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira

Viçosa, 03 de Maio de 2018.

Universidade Federal de Viçosa - UFV

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - CCE

Departamento de Engenharia Elétrica - DEL

**MÉTODOS DE DETECÇÃO DE HARMÔNICOS
APLICADOS À INVERSORES MULTIFUNCIONAIS
PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**

Lara Ana Rodarte Rios

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa para a obtenção dos créditos referentes à disciplina Monografia e Seminário do curso de Engenharia Elétrica.

Orientador : Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira

Viçosa, 03 de Maio de 2018.

*À minha família e
aos meus amigos.*

“Sorte é o que acontece quando capacidade encontra-se com oportunidade.”

Sêneca

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por guiar meus passos e me conceder sabedoria e discernimento para enfrentar os desafios. Aos meus pais, Gilmara e Nilton, por não medirem esforços para que eu realize meus projetos, e por me educarem da melhor maneira que lhes foi possível. Ao meu padastro Márcio, pelo apoio, e por agir como um pai nas horas que eu mais precisei. À minha irmã Mylla pela amizade, pelos conselhos e por ser meu porto seguro. Ao meu amor João Victor, pelo suporte, companheirismo e por sua calma no meio da minha ansiedade. À toda a minha família, que sempre esteve presente nos meus anos fora de casa, me ajudando nas muitas mudanças, indas e vindas, e me dando suporte emocional para lidar com a saudade imensa. Ao meu afilhado Conrado, que é luz na minha vida. Aos meus amigos de engenharia, em especial Ana Clara, Castor, Leandro e Silas, de república, e aos demais que também fazem parte desta conquista. Aos professores pela dedicação e conhecimento transmitido. E por fim, obrigada Viçosa e UFV por ter me acolhido tão bem.

Sumário

Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Abreviações	xix
1 Introdução	1
1.1 Panorama da energia solar no Brasil	1
1.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Organização do Texto	5
2 Revisão da Literatura	7
2.1 Modelagem do sistema	7
2.2 Detecção e compensação de corrente harmônica	8
2.2.1 SOGI-PLL	9
2.2.2 Transformada Discreta de Fourier (DFT)	10
2.2.3 Transformada Discreta de Fourier Iterativa (IDFT)	11

2.2.4	Instantaneous Power ‘ <i>pq theory</i> ’	14
2.2.5	Detector em Synchronous Fundamental ‘ <i>dq frame</i> ’ . . .	15
3	Estudo de Caso	17
4	Resultados	23
4.1	SOGI-PLL: Métodos de Discretização	23
4.2	Detecção da componente harmônica de maior amplitude . . .	26
4.3	Detecção do Conteúdo Harmônico Total	28
4.4	Considerações Finais	33
5	Conclusões e Propostas de Continuidade	35
	Referências Bibliográficas	37

Resumo

O crescimento dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica brasileira é notável. Além disso, paralelamente, há um aumento de cargas não lineares conectadas à rede que causam diversos impactos na qualidade da energia elétrica, como por exemplo, o alto índice de distorção da corrente. Observando-se as vantagens de se melhorar a qualidade da energia nas instalações atendidas pelos sistemas fotovoltaicos, aliado ao fato do inversor não trabalhar todo o tempo injetando potência nominal, devido à variação da irradiação solar durante o dia, cresce o interesse na utilização de inversores fotovoltaicos multifuncionais. Esse conceito consiste em agregar ao algoritmo de controle do inversor novas funções, como, por exemplo, compensação de harmônicos da carga e injeção de potência reativa. Um dos fatores que mais influencia a complexidade do algoritmo de controle de um inversor multifuncional é o método de detecção de harmônicos utilizado. Visto isso, esse trabalho deseja apresentar uma análise comparativa entre cinco métodos de detecção apresentados na literatura, sendo eles os métodos baseados no SOGI-PLL, na teoria da potência instantânea e na transformada de Park, no domínio do tempo e na transformada de Fourier e transformada iterativa de Fourier, no domínio da frequência. Simulações em ambiente PLECS são realizadas a fim de analisar a performance de cada método de detecção. Os resultados mostram uma boa precisão na detecção dos harmônicos desejados dos métodos, e suas vantagens e desvantagens, sendo possível a escolha de qual método melhor se aplica ao propósito determinado.

Abstract

The growth of photovoltaic systems connected to the Brazilian grid is remarkable. In parallel with this fact, there is an increase in non-linear loads connected to the grid that cause several impacts on the quality of the electric energy, such as, the high distortion index of the current. Observing the advantages of improving the quality of the energy in the installations served by photovoltaic systems and the fact that the inverter does not work all the time injecting nominal power, due to the variation of the solar irradiation during the day, the interest in the use of multifunctional photovoltaic inverters grows. This concept consists of adding new functions to the inverter control algorithm, such as load harmonic compensation and reactive power injection. One of the factors that most influences the complexity of the control algorithm of a multifunctional inverter is the harmonic detection method used. In this work, it's presented a comparative analysis of five detection methods presented in the literature. These methods are based on SOGI-PLL, instantaneous power theory and Park transformation, in time domain and Fourier transform and Iterative Fourier transform, in the frequency domain. Simulations in the software PLECS are performed in order to analyze the performance of each detection method. The results show a great precision in the detection of the desired harmonics of the methods, and their advantages and disadvantages, being possible to choose which method works better for a specific purpose.

Lista de Tabelas

2.1	Transformação s para z	10
2.2	Combinação dos Métodos de Discretização	10
3.1	Parâmetros da Simulação	17
3.2	Parâmetros do detector SOGI-PLL	17
4.1	Avaliação dos Métodos de Detecção de Corrente Harmônica . .	34

Lista de Figuras

1.1	Porcentagem de Renováveis na Matriz Energética Brasileira	1
1.2	Curva de operação do inversor fotovoltaico	3
2.1	Sistema fotovoltaico trifásico conectado à rede elétrica	8
2.2	Estrutura de detecção baseado no SOGI-PLL	9
2.3	Janelamento do método IDFT	12
2.4	Estrutura do método IDFT	13
2.5	Esquema de extração da harmônica desejada pelo método IDFT	14
2.6	Estrutura de detecção do método <i>pq theory</i>	15
2.7	Estrutura de detecção do método <i>dq frame</i>	16
3.1	Corrente - Carga 1	18
3.2	Corrente - Carga 2	19
3.3	Corrente - Carga 3	20
3.4	Espectro da Corrente da Carga 1	21
3.5	Espectro da Corrente das Cargas 2 e 3	22
4.1	Detecção pelo método SOGI - PLL FB.	24
4.2	Detecção pelo método SOGI - PLL FB com retroalimentação.	25

4.3	Detecção pelo método SOGI - PLL TT	25
4.4	Detecção pelo método SOGI - PLL TP	26
4.5	Detecção pelo método DFT	27
4.6	Detecção pelo método IDFT	28
4.7	Detecção do conteúdo harmônico da Carga 1: (a) Visão geral (b) Resposta transitória (c) Regime Permanente.	29
4.8	Detecção do conteúdo harmônico da Carga 2: (a) Visão geral (b) Regime Permanente.	30
4.9	Detecção do conteúdo harmônico da Carga 3: (a) Visão geral (b) Regime Permanente.	31
4.10	Erro de detecção do método <i>pq frame</i>	32
4.11	Erro de detecção do método <i>dq frame</i>	32
4.12	Erro de detecção do método SOGI - PLL.	33

Lista de Abreviações

BEN	Balanco Energético Nacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
MME	Ministério de Minas e Energia
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
FAP	Filtro Ativo de Potência
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
LCL	Indutivo - Capacitivo - Indutivo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SOGI	<i>Second Order Generalized Integrator</i>
SRF-PLL	<i>Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop</i>
SOGI-PLL	<i>Second Order Generalized Integrator - Phase-Locked Loop</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
IDFT	<i>Iterative Discrete Fourier Transform</i>
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
DSOGI-PLL	<i>Dual Second Order Generalized Integrator Phase-Locked Loop</i>
PLECS	<i>Plexim: Electrical Engineering Software</i>

Introdução

1.1 Panorama da energia solar no Brasil

O uso de fontes de energia renovável vem expressado um crescimento notável nos últimos anos. O Balanço Energético Nacional 2017 (BEN 2017), levantado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), mostra que, em 2016, a participação de renováveis na matriz energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo (de Pesquisa Energética, 2017).

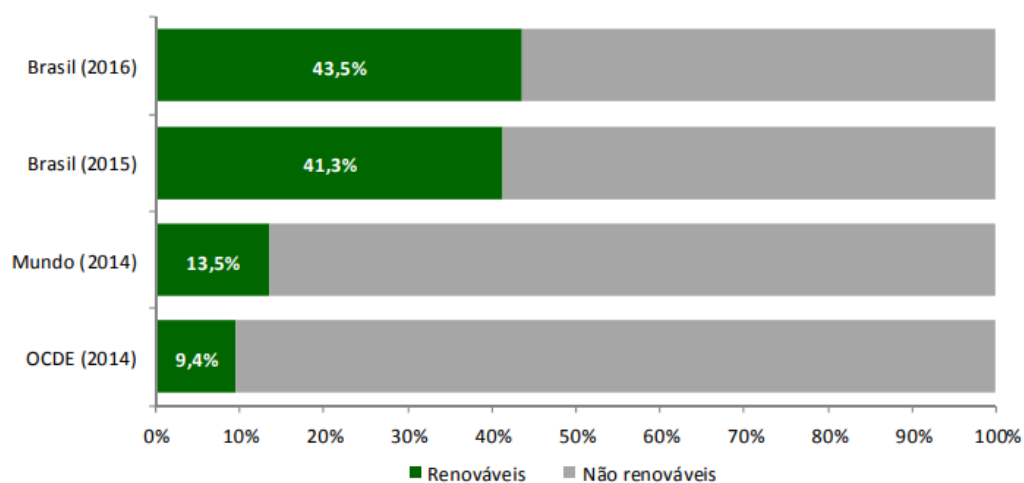


Figura 1.1: Porcentagem de Renováveis na Matriz Energética Brasileira

Fonte: (de Pesquisa Energética, 2017)

Aliado a este fato, as ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores - conhecida por micro e minigeração distribuída - resultaram em um registro, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), de 26863 conexões de geração distribuída até janeiro de 2018, totalizando potência instalada de 247,3 MW. Minas Gerais permanece como o estado com mais conexões (4484), seguido de São Paulo (4038) e Rio Grande do Sul (2497). Entre as energias renováveis mais utilizadas, a fonte solar fotovoltaica é a que mais se destaca, com 20666 conexões (Nascimento, 2017) (ANEEL, 2018).

A implementação da geração distribuída traz algumas vantagens para o sistema adotado pelo Brasil, caracterizado pelo uso majoritário de usinas hidrelétricas conectadas aos centros consumidores por meio de longas linhas de transmissão. Entre as vantagens destacam-se o aumento da confiabilidade do suprimento de energia aos consumidores próximos à geração local; atendimento mais rápido ao crescimento da demanda (ou à demanda reprimida); redução das perdas na transmissão e dos respectivos custos; contribuição para a abertura do mercado energético; entre outras (Filho and de Azevedo, 2013).

O Brasil, conforme Ministério de Minas e Energia (MME), possuía, ao final de 2017, 1112,7 MW de potência instalada de fonte solar fotovoltaica, o que representa um crescimento de, aproximadamente, 1164,4% em relação à 2016. Do total de 1112,7 MW existentes em 2017, 935,3 MW correspondiam à geração centralizada e 117,4 MW à geração distribuída (de Pesquisa Energética, 2017) (de Energia Solar Fotovoltaica, 2018).

Apesar do expressivo potencial para geração de energia elétrica a partir da fonte solar, devido aos altos níveis de irradiância solar no território brasileiro, o uso da mesma não apresenta a mesma relevância que possui em outros países, nem o mesmo desenvolvimento de outras fontes renováveis, como eólica e biomassa, que já representam, respectivamente, 6,7% e 9,4% da capacidade de geração instalada no Brasil. Ainda assim, apesar da geração de energia solar fotovoltaica ainda ser incipiente no Brasil, existem diversos incentivos governamentais para o aproveitamento da fonte, sendo que alguns dos incentivos são aplicados também para outras fontes renováveis de geração de energia elétrica (Nascimento, 2017).

1.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) é composto pelos módulos fotovoltaicos, sistema de condicionamento de potência, rede elétrica, medidores e carga elétrica. Considerando-se o sistema de condicionamento de potência, o inversor fotovoltaico (conversor cc/ca) é o elemento básico, no qual há a conversão da corrente (cc) gerada pelos painéis para um sinal de corrente (ca), utilizada na rede, adequando-se assim, as características da energia gerada pelos módulos às características da rede elétrica convencional (Rampinelli, 2010) (Macêdo, 2006) .

Dentro das funções do inversor, pode-se citar o rastreamento do ponto de máximo de potência (MPPT *Maximum Power Point Tracking*), a conversão cc/ca, a proteção de anti-ilhamento, além do relatório de status. Contudo, devido à variação da irradiância solar durante o dia, em poucas situações os inversores trabalham injetando potência nominal. Assim sendo, os inversores apresentam uma margem de atuação, em termos de corrente, que não é explorada ao longo do ciclo diário de operação (Pereira and Gonçalves, 2018).

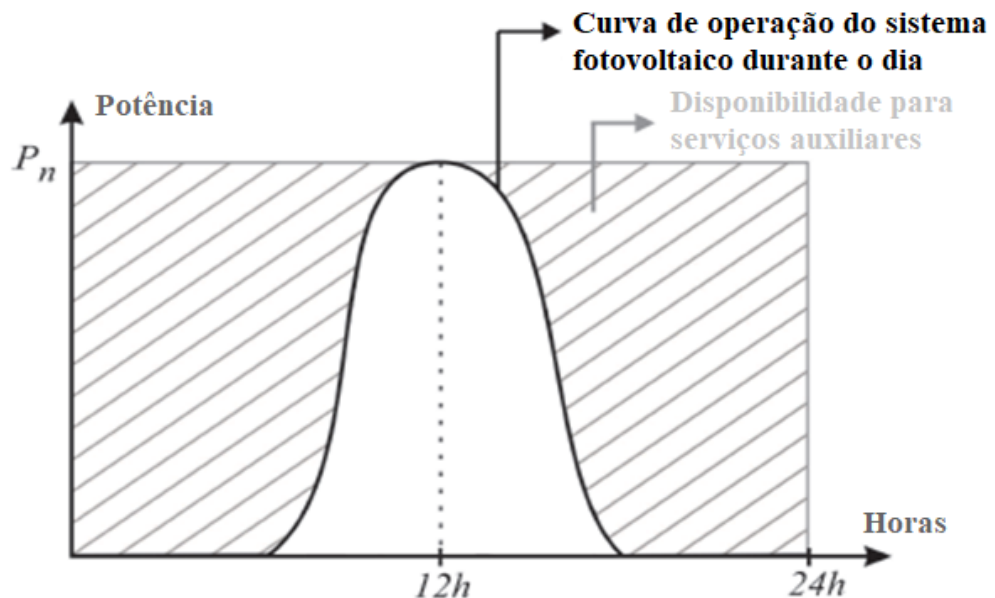


Figura 1.2: Curva de operação do inversor fotovoltaico

Neste cenário, cresce o interesse na utilização de inversores multifuncionais, nos quais, associado às funções já existentes, é agregado ao algoritmo de controle do inversor a capacidade de compensar reativos e trabalhar como filtro ativo de potência (FAP), compensando componentes de corrente harmônica gerados por cargas não lineares. Essa filosofia permite que um sistema fotovoltaico melhore os índices de qualidade de energia de uma determinada instalação. Assim, se o sistema fotovoltaico já está instalado, uma modificação no algoritmo de controle pode ser uma solução interessante se comparada com a instalação de filtros passivos (para reduzir os impactos dos harmônicos na rede) e bancos de capacitores (para correção de fator de potência) (Xavier, 2015) (Domingos et al., 2014) (Cupertino et al., 2014) (Brandão et al., 2013).

Um dos pontos a ser levado em consideração para que o inversor trabalhe em modo multifuncional com segurança e eficiência é a estratégia utilizada para a detecção da corrente harmônica de cargas conectadas no ponto de acoplamento comum (PAC). O aumento da complexidade do algoritmo pode afetar, diretamente, outros aspectos como o *lifetime* do dispositivo, já que há um aumento da carga operacional do mesmo.

1.3 Objetivos

Devido ao crescimento do número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica brasileira, além do aumento das cargas não lineares conectadas à rede, associado à possibilidade do funcionamento do inversor de forma multifuncional, o estudo das alterações no algoritmo de controle do inversor se faz necessário.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é comparar técnicas de detecção de corrente harmônica, de modo a levantar pontos positivos e negativos relacionados à sua implementação no inversor fotovoltaico multifuncional. A motivação desta análise se deve ao fato da complexidade do algoritmo de controle dos inversores multifuncionais ser diretamente afetada pelo método de detecção utilizado, além da influência na vida útil do dispositivo, devido ao aumento de sua carga operacional, afetando o desempenho de seus componentes.

1.4 Organização do Texto

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo foi apresentado uma contextualização do sistema fotovoltaico e as justificativas que motivam este trabalho, assim como seus objetivos.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a modelagem do sistema fotovoltaico trifásico, assim como das técnicas de detecção de corrente harmônica comumente utilizadas na literatura. No terceiro capítulo são mostrado os parâmetros utilizados para a comparação dos métodos estudados.

O capítulo 4 apresenta os resultados de simulação obtidos, analisando-se comparativamente as características de cada método. Finalmente, no capítulo 5 são feitas as conclusões e as propostas de continuidade desse trabalho.

Revisão da Literatura

2.1 Modelagem do sistema

Neste trabalho é estudado o sistema fotovoltaico trifásico exibido na Figura 2.1. Os dois estágios do sistema possibilitam um desacoplamento entre os módulos fotovoltaicos e a rede elétrica, além de ter a vantagem de garantir estabilidade na extração de máxima potência da planta solar (de Jesus et al., 2017) (Villalva et al., 2009).

O primeiro estágio consiste no conversor *boost*, responsável por alimentar o capacitor do barramento de tensão contínua, mantendo-a constante. Já o estágio cc/ca é responsável por conectar o sistema à rede elétrica. Um filtro LCL é conectado depois do inversor de modo a atenuar os harmônicos de chaveamento gerados pelo inversor (de Barros, 2017).

A estratégia de controle do inversor é responsável por controlar a tensão do *link-cc* e a corrente injetada na rede. O acréscimo do detector de corrente harmônica permite que o inversor opere também como um compensador de corrente harmônica, quando o mesmo estiver trabalhando abaixo da operação nominal (Domingos et al., 2014).

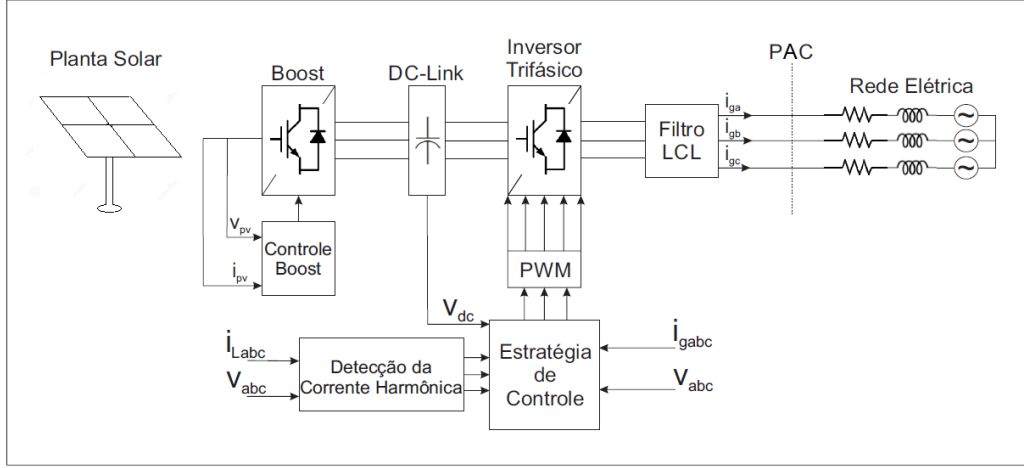


Figura 2.1: Sistema fotovoltaico trifásico conectado à rede elétrica

2.2 Detecção e compensação de corrente harmônica

O método de detecção de harmônicos é a parte do controle do inversor multifuncional responsável por determinar características específicas dos harmônicos (frequência, amplitude, fase, energia) de um sinal de entrada (que pode ser de tensão ou de corrente) utilizando um algoritmo matemático específico.

Diferentes estratégias foram propostas na literatura, dentre as quais: detecção utilizando a teoria da potência instantânea (Akagi et al., 1984), detecção baseada na transformada de Fourier (McGrath et al., 2005), utilização de integradores generalizados de segunda ordem (SOGI) (Rodriguez et al., 2011) e a utilização de um método baseado no cancelamento de sinais atrasados no tempo (Wang and Li, 2013).

Neste trabalho, para fins de comparação, serão analisados cinco métodos, sendo dois deles no domínio da frequência e os demais no domínio do tempo, listados a seguir.

2.2.1 SOGI-PLL

Esse método é baseado na característica de filtro adaptativo SOGI (*Second Order Generalized Integrator*). Sua estrutura completa é mostrada na Figura 2.2. Esse filtro gera dois sinais em quadratura filtrados na frequência ω de retorno da SRF-PLL (*Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop*). Por isso, geralmente, essa estrutura é utilizada para aplicações onde a tensão da rede apresenta distorções (Rodriguez et al., 2011) (de Barros et al., 2017) (Xavier et al., 2017). As funções de transferência do primeiro e segundo estágios do SOGI são dadas, respectivamente, por

$$H_1(s) = G_f(s) = \frac{k\omega_f s_1}{s_1^2 + k\omega_f s_1 + \omega_f^2} \quad (2.1)$$

$$H_2(s) = G_h(s) = \frac{k\omega_h s_2}{s_2^2 + k\omega_h s_2 + \omega_h^2} \quad (2.2)$$

onde k é o ganho do SOGI. As relações em (2.1) e (2.2) sugerem que o SOGI é um filtro adaptativo, com características de filtro passa baixa combinado com filtro passa faixa. A associação de n estruturas em série é capaz de detectar n componentes harmônicas, sendo que o primeiro estágio é responsável por detectar a componente fundamental, e os estágios seguintes detectam os harmônicos, de acordo com suas amplitudes (Ciobotaru et al., 2006).

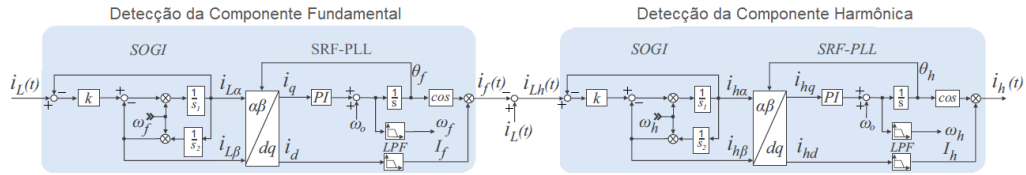


Figura 2.2: Estrutura de detecção baseado no SOGI-PLL

Para uma melhor performance da detecção através do SOGI, uma retroalimentação negativa pode ser adicionado à estrutura. A retroalimentação negativa constitui-se no retorno de parte do sinal de saída para a entrada (Xavier et al., 2015).

Novos estudos mostram que diferentes métodos de discretização podem

influenciar na precisão do detector de corrente harmônica. Discretização é o processo de transformar valores contínuos ou numéricos em dados categóricos ou nominais (Yepes et al., 2012). Cada método de discretização possui sua performance específica e devem ser bem escolhidos dependendo da aplicação (de Barros, 2017). A Tabela 2.1 mostra alguns métodos de discretização.

Tabela 2.1: Transformação s para z

Método de Discretização	Equivalência
Forward Euler	$s = \frac{1-z^{-1}}{T_s z^{-1}}$
Backward Euler	$s = \frac{1-z^{-1}}{T_s}$
Tustin	$s = \frac{2(1-z^{-1})}{T_s(1+z^{-1})}$
Tustin com Prewarping	$s = \frac{\omega(1-z^{-1})}{tg(\frac{\omega T_s}{2})(1+z^{-1})}$

Como visto em (2.1) e (2.2) a estrutura do SOGI possui dois integradores, possibilitando dois estágios de discretização. A Tabela 2.2 mostra as combinações utilizadas neste trabalho. Para primeira combinação da tabela, foram analisados também os efeitos do *feedback* negativo.

Tabela 2.2: Combinação dos Métodos de Discretização

Símbolo	Método 1	Método 2
FB	Forward Euler	Backward Euler
TT	Tustin	Tustin
TP	Tustin com Prewarping	Tustin com Prewarping

2.2.2 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

A transformada discreta de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*) é uma transformação matemática de sinais discretos que fornece informações de amplitude e fase do harmônico desejado. Para uma janela discreta de tamanho N , a DFT é definida como (Yu et al., 2011),

$$X[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] e^{-j2\pi nk/N}, n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2.3)$$

Esse método pode ser aplicado em sistemas monofásicos ou trifásicos. Se a corrente for amostrada continuamente, os componentes harmônicos podem ser obtidos usando uma janela deslizante de dados. O tamanho da janela é N e deve compreender números inteiros do período da fundamental (McGrath et al., 2005). A DFT requer uma amostragem coerente, que se refere a uma certa relação entre a frequência da rede (f_{rede}), a frequência de amostragem (F_s), o número de ciclos do sinal amostrado (M_{ciclo}) e o número de amostras (N), dado por (Antunes et al., 2017):

$$\frac{f_{rede}}{F_s} = \frac{M_{ciclo}}{N} \quad (2.4)$$

Considerando um sinal discreto de corrente $i[n]$, a DFT é aplicada em uma janela de tamanho N , definida como:

$$I_h[n] = \sum_{k=1}^N x[k + n - N] e^{-j2\pi nk/N} = I_h e^{j\phi} \quad (2.5)$$

onde, $0 \leq h \leq N/2$ é a ordem da harmônica, $I_h[n]$ é o h -ésimo componente espectral da corrente harmônica complexa, I_h e ϕ são, respectivamente, a magnitude e o ângulo da h -ésima corrente harmônica. Uma vez que os harmônicos são detectados, e o harmônico de maior ordem é identificado, é uma questão de reconstrução do sinal no domínio do tempo para a compensação do sinal pelo controlador.

2.2.3 Transformada Discreta de Fourier Iterativa (IDFT)

A principal ideia do método da transformada discreta de Fourier iterativa é usar a última amostra de tempo real para determinar a corrente harmônica, removendo a primeira amostra, ou seja, a cada nova amostra que é adicionada à janela, a primeira amostra da antiga janela é retirada, mantendo-se assim um valor N fixo de amostras, como exibido na Figura 2.3. Esse algoritmo tem sido amplamente aplicado em problemas reais, devido à sua implementação simples e bom desempenho em tempo real (Yu et al., 2011) (Asiminoael et al., 2007).

Janela Antiga	$i[n - N]$	$i[n - N + 1]$	...		$i[n - 2]$	$i[n - 1]$	
	Janela Nova	$i[n - N + 1]$	$i[n - N + 2]$	...		$i[n - 1]$	$i[n]$

Figura 2.3: Janelamento do método IDFT

Fonte: (Antunes et al., 2017)

A transformada discreta de Fourier para a antiga e nova janelas é expressa por (Antunes et al., 2017):

$$I_h[n - 1] = i[n - N]e^{-j2\pi h_1/N} + i[n - N + 1]e^{-j2\pi h_2/N} + i[n - 1]e^{-j2\pi h/N} \quad (2.6)$$

$$I_h[n] = i[n - N + 1]e^{-j2\pi h_1/N} + \dots + i[n - 1 + 1]e^{-j2\pi h(N-1)/N} + i[n]e^{-j2\pi hN/N} \quad (2.7)$$

Logo,

$$I_h[n] = i[n - 1]e^{-j2\pi h/N} + i[n] - i[n - N] \quad (2.8)$$

De acordo com a fórmula de Euler, a expressão acima pode ser expandida como:

$$I_h[n] = (\cos(\frac{2\pi h}{N}) - j\sin(\frac{2\pi h}{N}))(\text{Re}(I_h[n-1]) + j\text{Im}(I_h[n-1]) + i[n] - i[n-N]) \quad (2.9)$$

Assim, as partes real e imaginária do espectro podem ser derivadas de (2.9) como:

$$\text{Re}(I_h[n]) = \text{Re}(I_h[n-1])\cos(\frac{2\pi h}{N}) + \text{Im}(I_h[n-1])\sin(\frac{2\pi h}{N}) + i[n] - i[n-N] \quad (2.10)$$

$$Im(I_h[n]) = Im(I_h[n-1])\cos(\frac{2\pi h}{N}) + Re(I_h[n-1])\sin(\frac{2\pi h}{N}) \quad (2.11)$$

As equações (2.10) e (2.11) podem ser representadas pela estrutura da Figura 2.4. Obtém-se então a estrutura de detecção apresentada na Figura 2.5. É necessária uma estrutura da Figura 2.4 para cada harmônico, que fornece a componente harmônica para o bloco de máximo.

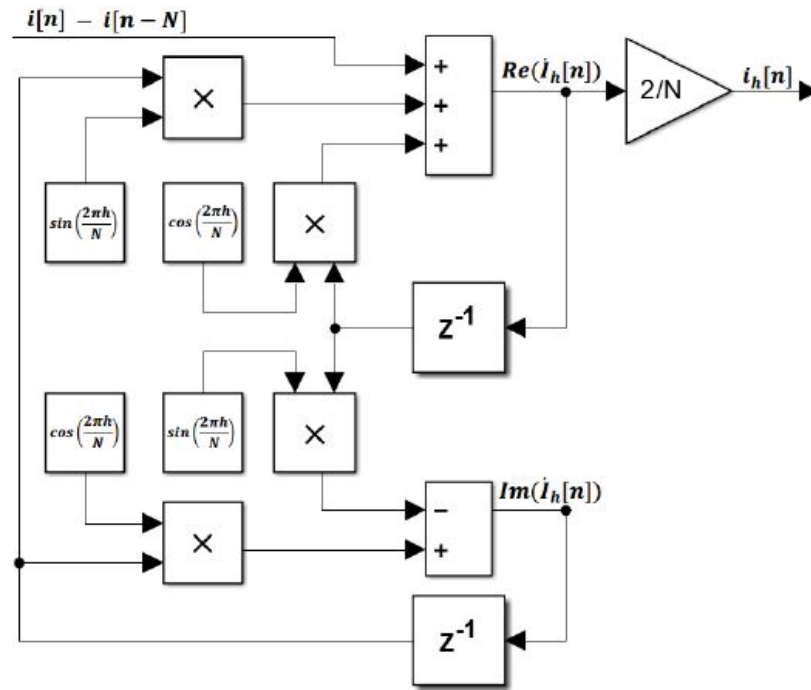


Figura 2.4: Estrutura do método IDFT

Fonte: (Antunes et al., 2017)

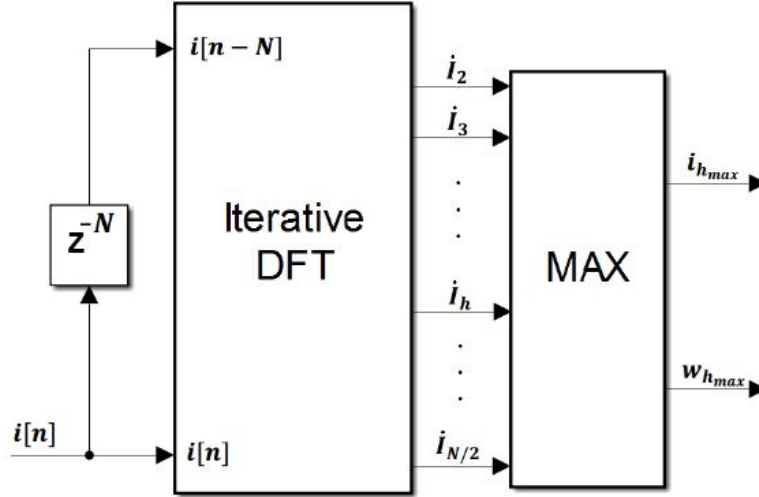


Figura 2.5: Esquema de extração da harmônica desejada pelo método IDFT

Fonte: (Antunes et al., 2017)

Esse método não requer reconstrução, já que a corrente harmônica é obtida diretamente.

2.2.4 Instantaneous Power ‘*pq theory*’

Para a determinação da distorção harmônica, esse método, publicado por (Akagi et al., 1984), utiliza o cálculo da potência instantânea, que consiste na multiplicação dos valores de tensão e corrente instantâneas. O diagrama completo da detecção é exposto na Figura 2.6. Esse cálculo é feito nas coordenadas $\alpha\beta$, como mostrado em (2.12) (da Silva et al., 2008) (Massoud et al., 2004) (Rodriguez et al., 2006).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = -\left(\frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2}\right) \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Os valores de p e q contém uma componente contínua, equivalente às potências ativa e reativa presentes no sistema, e uma componente oscilante, constituída pela potência do conteúdo harmônico. As componentes contínuas de p e q podem ser retiradas através de um filtro passa alta, restando assim somente a componente alternada, que ao retornar às coordenadas abc , através dos cálculos em (2.13), correspondem à distorção harmônica da corrente (Nakata et al., 1998) (Kim et al., 2002).

É importante ressaltar que esse método é afetado por desbalanceamentos de fase (Asiminoael et al., 2007).

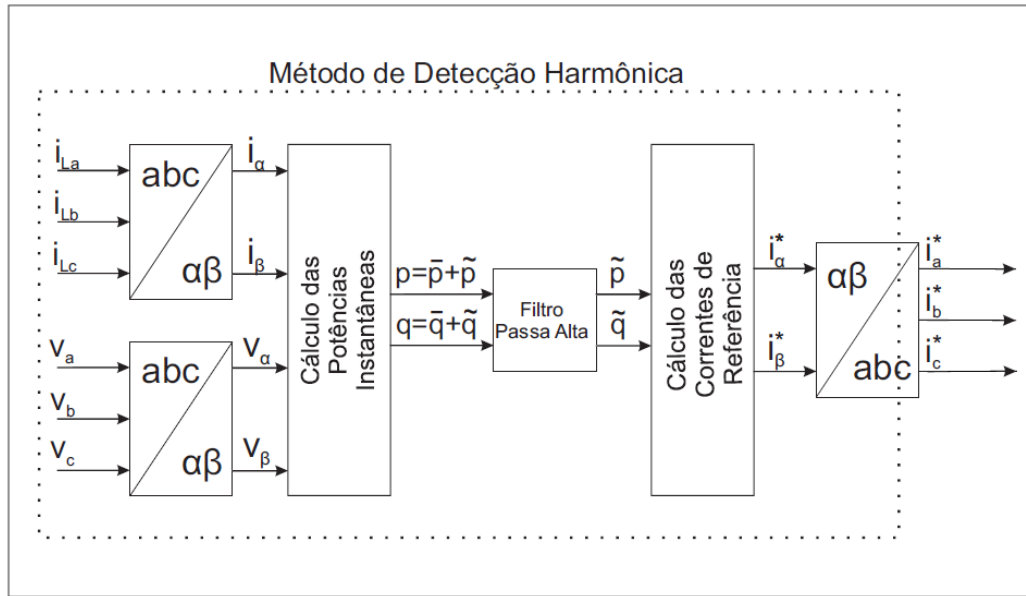


Figura 2.6: Estrutura de detecção do método *pq theory*

2.2.5 Detector em Synchronous Fundamental ‘*dq frame*’

A transformação de Park visa referenciar a corrente instantânea, dada nas coordenadas abc , a um referencial girante cujos eixos se denominam d e q . Ao efetuar essa transformação, com a velocidade angular da frequência fundamental, a corrente fundamental apresenta-se como componente contínua, enquanto a corrente harmônica, como componente alternada. Sendo assim, para a detecção do conteúdo harmônico, é utilizado filtros passa-alta,

conforme exposto na Figura 2.7 (Asiminoael et al., 2005) (Suru et al., 2014) (Massoud et al., 2004).

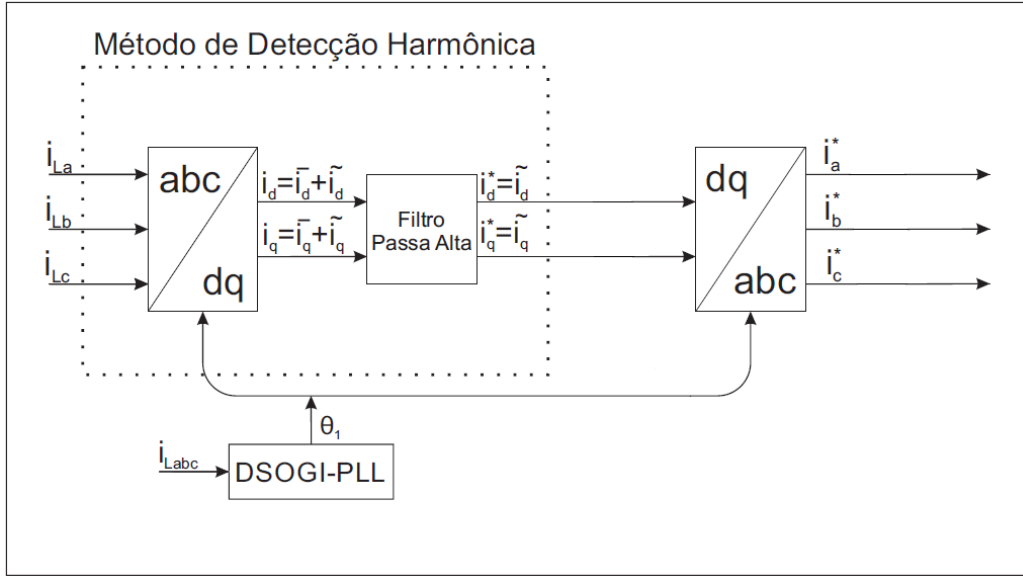


Figura 2.7: Estrutura de detecção do método dq frame

O ângulo de rotação para a transformação de Park é determinado através de uma estrutura de PLL (*Phase Locked Loop*) denominada DSOGI-PLL (*Dual Second Order Generalized Integrator Phase-Locked Loop*), a qual destaca-se por possuir um bom desempenho numa rede em situação mais adversa, seja por distorção harmônica ou desbalanceamento de fase. Essa é uma técnica de detecção de sequência positiva por frequência adaptativa, em que há uma translação da tensão trifásica abc para $\alpha\beta$ por meio da transformação de Clark. Um gerador duplo de sinal em quadratura é usado para filtrar e obter versões deslocadas de 90° das tensões $\alpha\beta$. Por fim, as tensões de sequência positiva $\alpha\beta$ são transladadas para a referência síncrona dq e o SRF-PLL (*Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop*) é utilizado para fazer o sistema de frequência adaptativa (Rodriguez et al., 2007).

Estudo de Caso

A análise comparativa dos métodos de detecção de corrente harmônica foi feita em ambiente PLECS e Matlab, através de simulação com os parâmetros apresentados na Tabela 3.1. Foi considerado um sistema fotovoltaico trifásico ligado à rede. Desta forma, se a geração de energia do sistema fotovoltaico estiver abaixo de sua nominal, este sistema pode ser usado para compensação de corrente harmônica de cargas não lineares conectadas no ponto de acoplamento comum. A potência nominal do sistema é de 5kW.

Tabela 3.1: Parâmetros da Simulação

Parâmetro	Unidade	Símbolo	Valor
Tempo da Simulação	s	t	3
Frequência de Chaveamento	kHz	f_s	12
Incremento da Simulação	μ/s	$passo$	0,651

Para o método baseado no SOGI-PLL, os parâmetros utilizados encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros do detector SOGI-PLL

Parâmetro	Valor
ksi_{srf}	2
wn_{srf}	188,496
kp_{pll}	753,982
ki_{pll}	35530,576
k	0,8

O método *dq frame* necessita de uma estrutura de DSOGI-PLL para a determinação do ângulo de referência para a transformação de Park, que, para este estudo, tratou-se do ângulo da componente fundamental da corrente. Nesta estrutura utilizou-se o ganho proporcional (Kp_{dsogi}) de 3,437 e o ganho integral (Ki_{dsogi}) de 458,062.

Para a análise da performance dos métodos de detecção de corrente harmônica e sua posterior comparação, duas perturbações foram aplicadas ao sistema. A primeira é uma mudança no conteúdo harmônico da carga, alterando o harmônico de maior amplitude, que é habilitada em 1 segundo. A segunda é uma flutuação de 1Hz na frequência fundamental, habilitada em 2 segundos. As três correntes aplicadas podem ser observadas nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente, assim como seus espectros, na Figura 3.4. A Carga 1 possui 10A de quinto harmônico, 6A de sétimo harmônico e 4A de décimo primeiro harmônico, além de 50A de fundamental. A Carga 2, possui 4A de quinto e décimo primeiro harmônicos, 10A de sétimo harmônico e 50A de fundamental. Já a Carga 3 possui o mesmo conteúdo harmônico da Carga 2, porém os harmônicos são múltiplos de 61Hz.

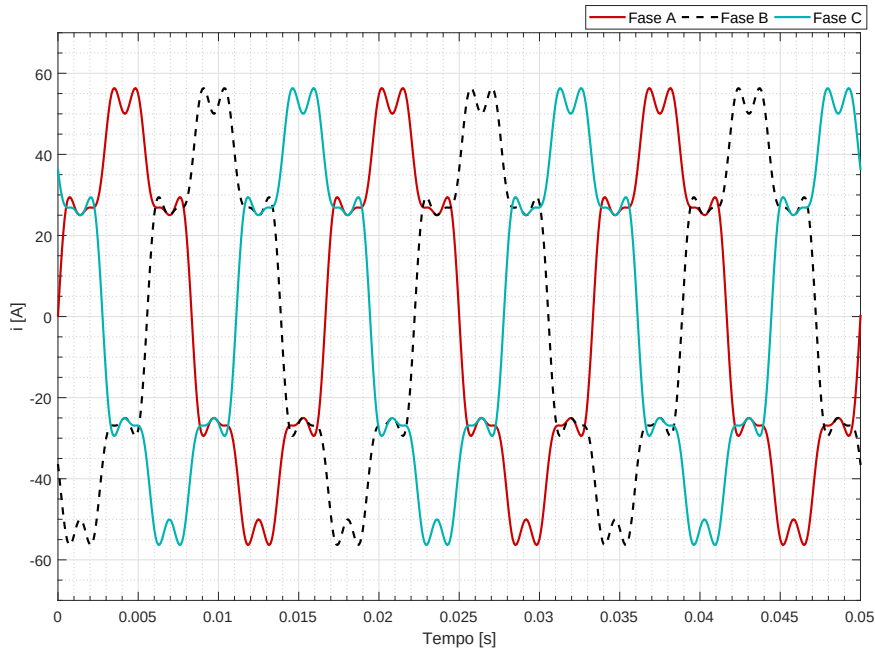


Figura 3.1: Corrente - Carga 1

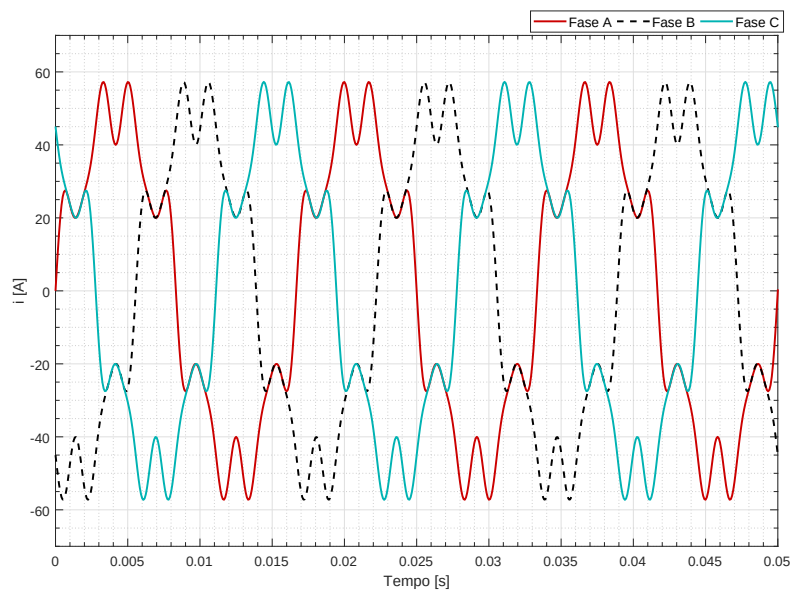


Figura 3.2: Corrente - Carga 2

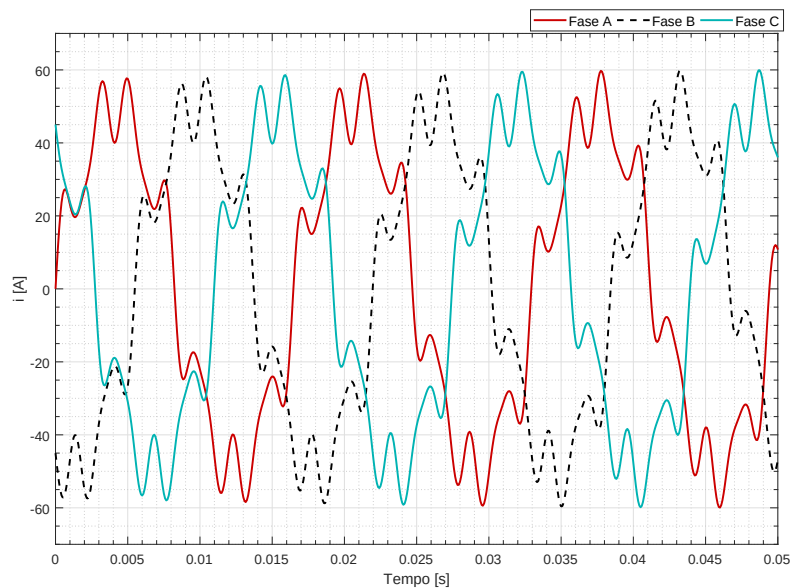


Figura 3.3: Corrente - Carga 3

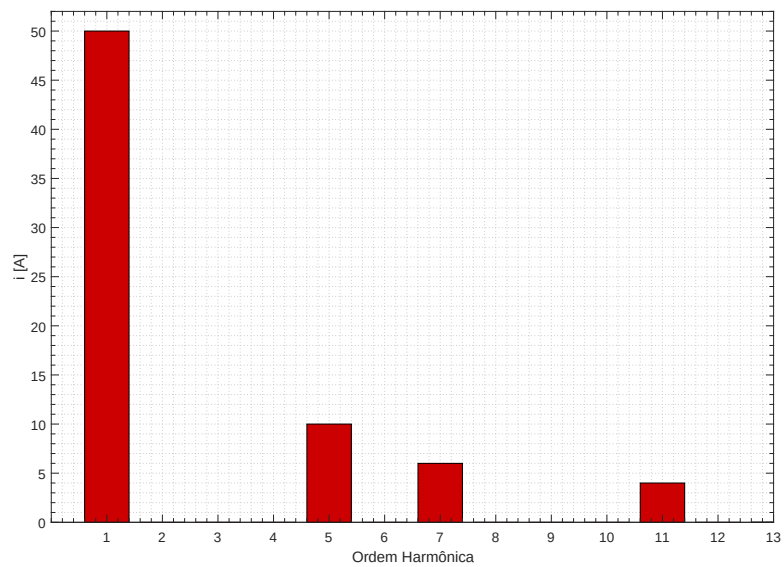


Figura 3.4: Espectro da Corrente da Carga 1

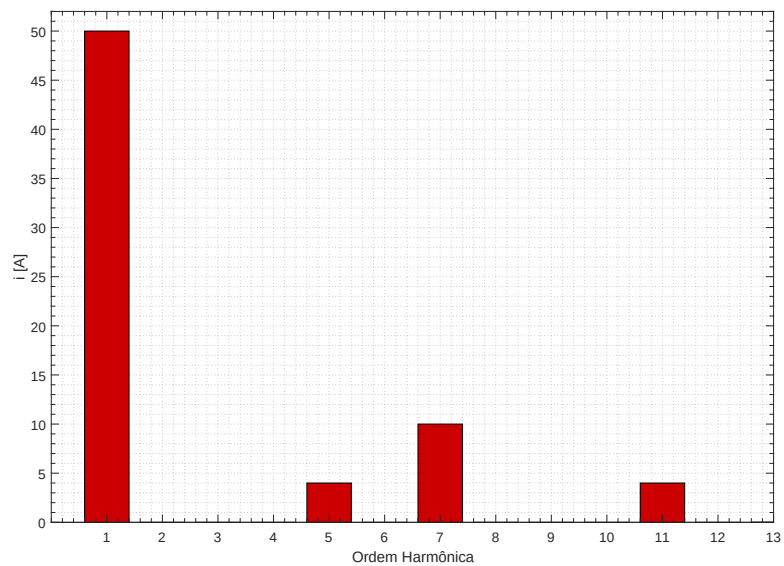


Figura 3.5: Espectro da Corrente das Cargas 2 e 3

Resultados

4.1 SOGI-PLL: Métodos de Discretização

Como mostrado no Capítulo 2, os métodos de discretização utilizados na estrutura do detector de corrente harmônica baseado no SOGI-PLL influenciam na performance e precisão da detecção. Sendo assim, a escolha correta do método de discretização se faz necessária para se obter os melhores resultados na detecção da componente harmônica desejada, levando em consideração os parâmetros da aplicação. Para determinar qual método de discretização tem a melhor resposta na detecção de corrente harmônica, as correntes das Cargas 1, 2 e 3 foram aplicadas à estrutura de detecção, com as combinações de métodos de discretização já apresentada.

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 mostram a detecção da componente harmônica de maior amplitude. Observe que todas as estruturas foram capazes de detectar o harmônico de maior amplitude das cargas com uma precisão satisfatória. Porém, nota-se que a estrutura com TT e TP possuem um erro menor quando comparadas às demais.

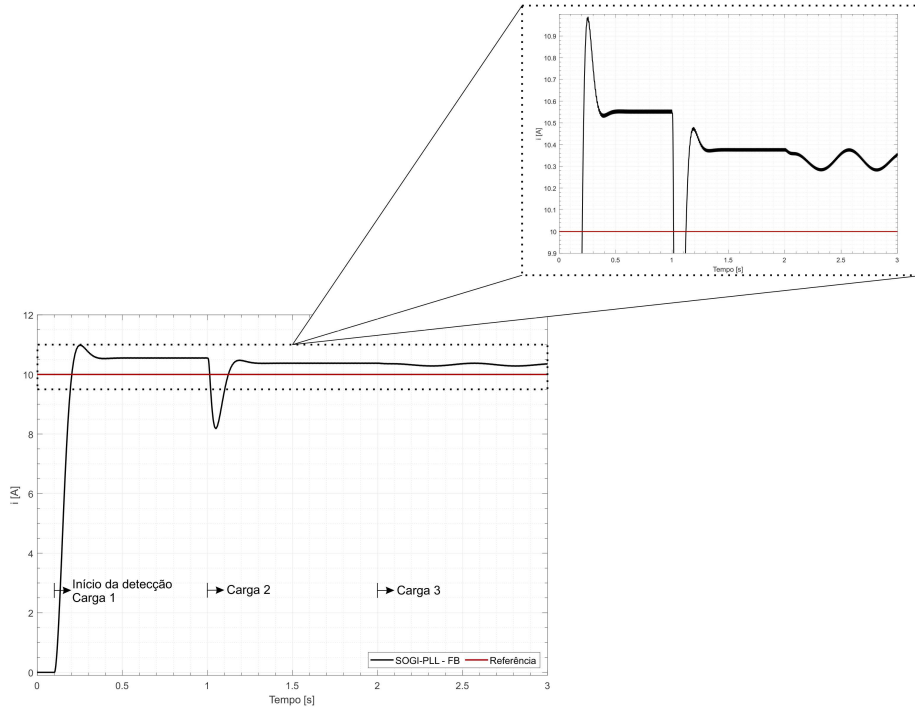


Figura 4.1: Detecção pelo método SOGI - PLL FB.

Além disso, percebe-se que a retroalimentação negativa não melhora a performance da estrutura com a combinação FB, no entanto a mesma foi aplicada às estruturas de TT e TP para evitar erro devido às ordens harmônicas detectadas neste trabalho serem próximas à componente fundamental (60Hz). Vale ressaltar que foram utilizados apenas dois estágios, o primeiro para a detecção da componente fundamental e o segundo, para a detecção da maior componente harmônica.

Apesar de, neste trabalho, devido aos parâmetros escolhidos para a realização das simulações, os métodos de discretização *Tustin* e *Tustin com Prewarping* não mostrarem diferenças significativas, o método TP será utilizado posteriormente, para a comparação com os demais métodos de detecção pelas suas demais vantagens, conforme apresentado em (de Barros, 2017).

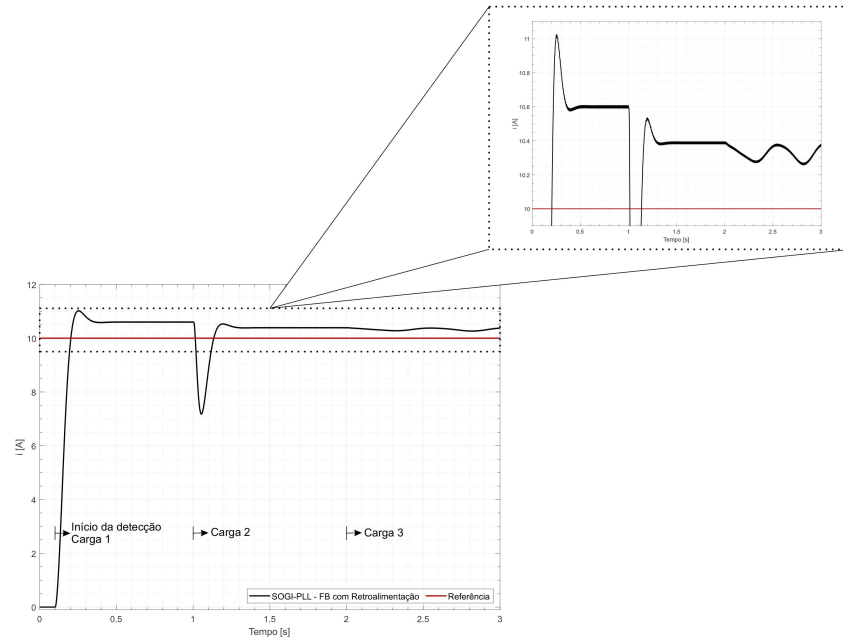


Figura 4.2: Detecção pelo método SOGI - PLL FB com retroalimentação.

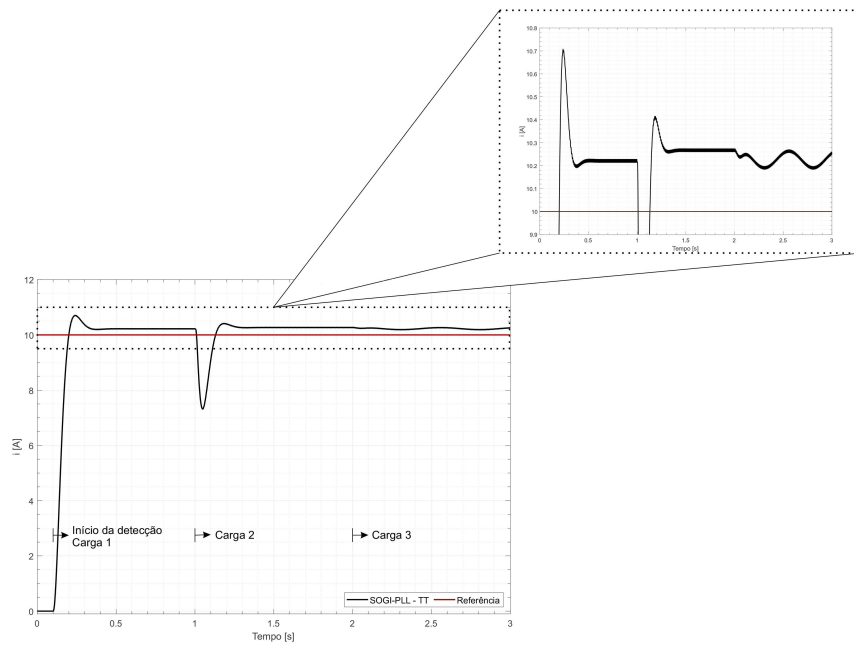


Figura 4.3: Detecção pelo método SOGI - PLL TT

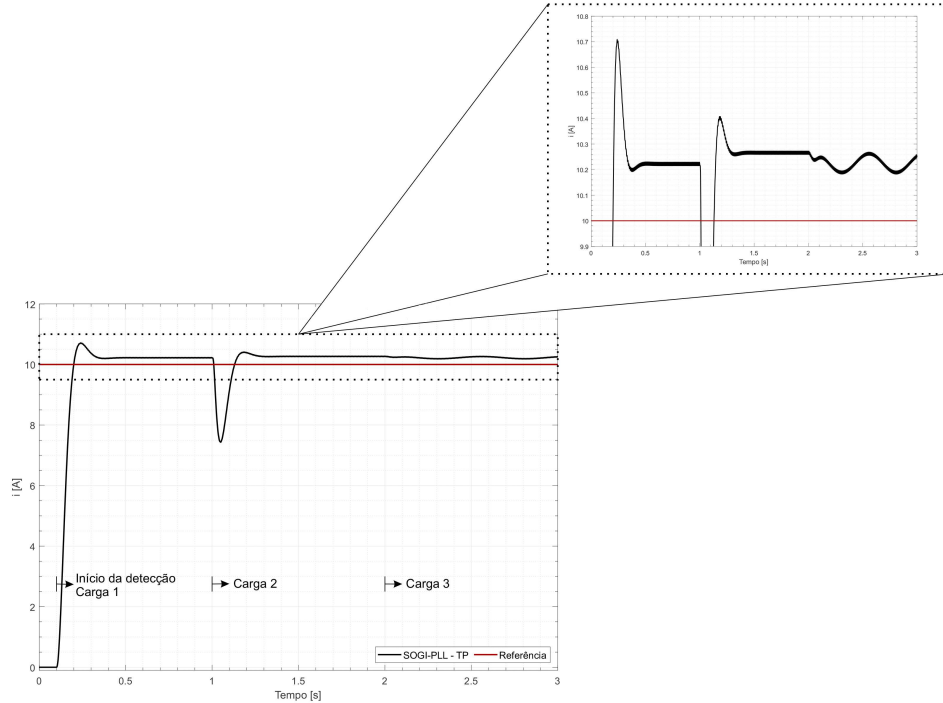


Figura 4.4: Detecção pelo método SOGI - PLL TP

4.2 Detecção da componente harmônica de maior amplitude

Os métodos SOGI-PLL, DFT e IDFT são capazes de detectar o harmônico de maior amplitude. As Figuras 4.5 e 4.6 expõe a detecção da componente harmônica de maior amplitude para as três cargas aplicadas ao sistema dos métodos DFT e IDFT, respectivamente. Os métodos DFT e IDFT são bem parecidos, e possuem uma resposta mais rápida que o SOGI-PLL TP (Figura 4.4), além de serem mais precisos.

A resposta mais lenta do método SOGI-PLL pode ser explicada pelo fato de serem necessários dois estágios para a detecção, e estes estarem em cascata. Cada um desses estágios possui uma dinâmica própria.

Os métodos DFT e IDFT apresentam um atraso na detecção da compo-

nente harmônica de maior amplitude da Carga 3, já que a mesma é múltipla de $61Hz$, e estes métodos, por serem baseados na transformada de Fourier, estão definidos para componentes de $60Hz$ e seus múltiplos. O método SOGI-PLL se adapta dinamicamente e consegue detectar precisamente o novo sinal.

O método baseado no SOGI-PLL possui uma zona de não-detecção devido à sua largura de banda. Aliado a isso, caso o sinal de entrada do SRF-PLL possuir duas componentes harmônicas com amplitudes similares, o mesmo pode estimar a frequência incorretamente, logo, o SRF-PLL também possui uma zona de não-detecção. Quanto mais próximo à essas zonas, maiores são os erros na detecção do harmônico desejado. Apesar de próximas, as cargas estudadas não se encontram dentro da faixa de não-detecção tanto do SOGI-PLL quanto do SRF-PLL.

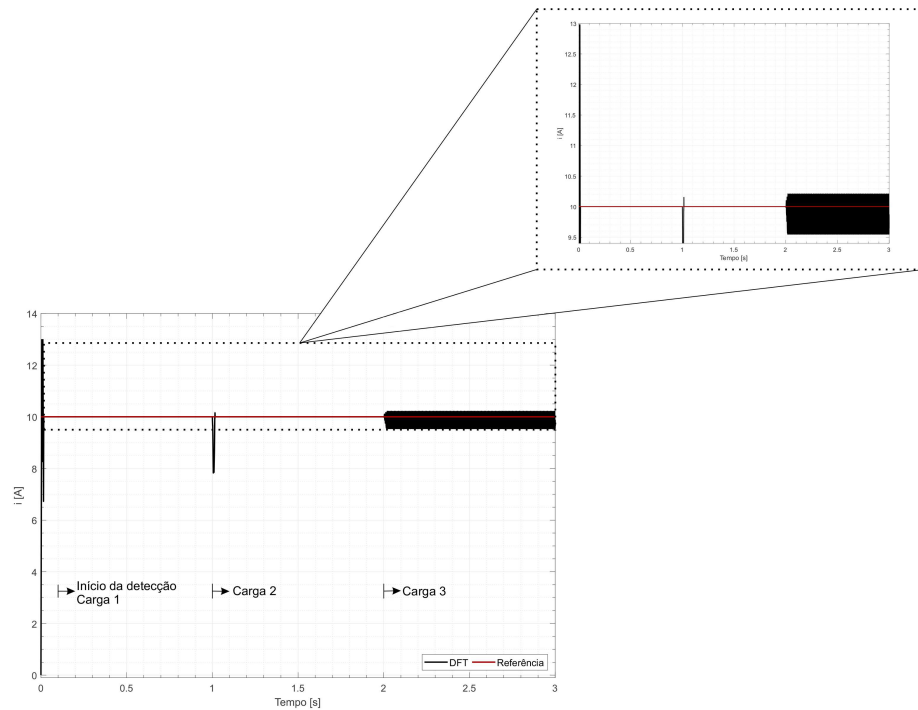


Figura 4.5: Detecção pelo método DFT

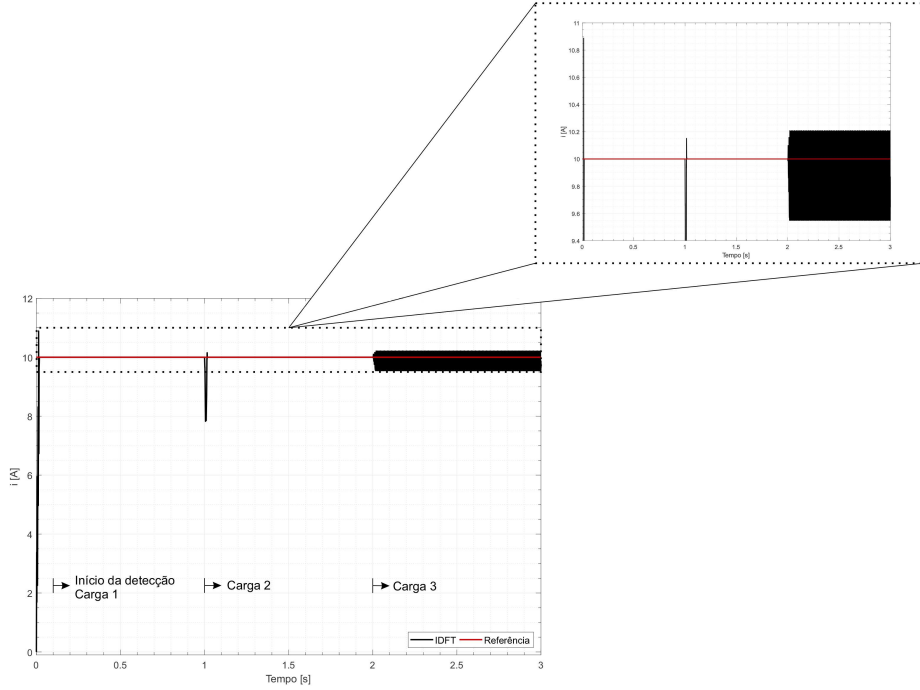


Figura 4.6: Detecção pelo método IDFT

4.3 Detecção do Conteúdo Harmônico Total

O método *pq theory* não é capaz de detectar a componente harmônica da carga seletivamente. O primeiro estágio do método baseado no SOGI-PLL é responsável por retirar a componente fundamental do sinal, resultando assim na detecção do conteúdo harmônico total. Os métodos *pq theory* e *dq frame* e o primeiro estágio do SOGI-PLL TP possuem um tempo de resposta bem próximo aos demais métodos apresentados na seção anterior. É importante ressaltar que ambos os métodos são no domínio do tempo.

A Figura 4.7 mostra o início da detecção. Pode-se notar que os métodos foram capazes de detectar o conteúdo harmônico da Carga 1, porém *pq theory* obteve a resposta mais rápida, enquanto *dq frame* a resposta mais lenta. Os métodos analisados demonstram precisão na detecção no regime estacionário, conforme Figura 4.7 (c).

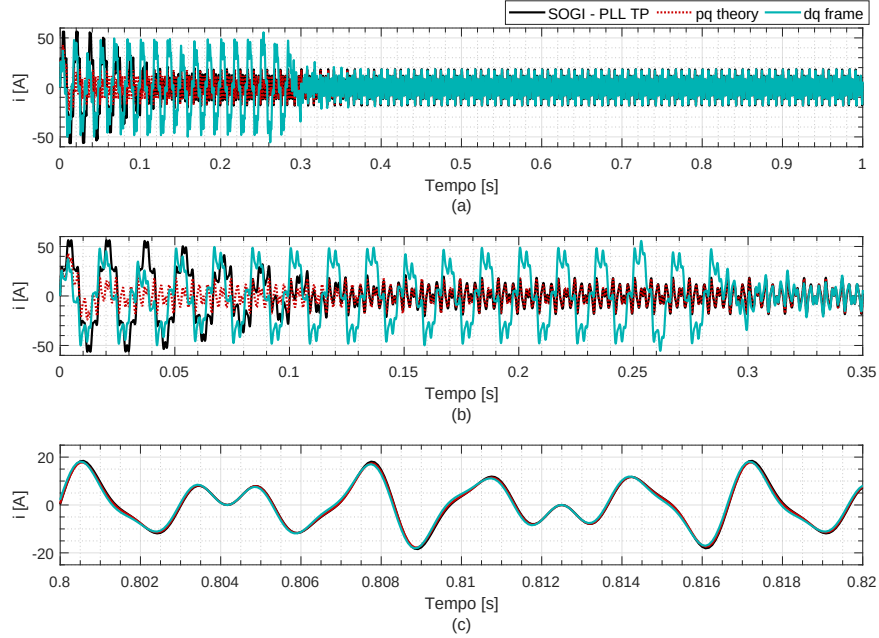


Figura 4.7: Detecção do conteúdo harmônico da Carga 1: (a) Visão geral (b) Resposta transitória (c) Regime Permanente.

Outro ponto a ser avaliado é a necessidade de um ângulo de referência, no método *dq frame*. Esse ângulo pode ser o da componente fundamental, adquirindo-se assim o conteúdo harmônico total, ou pode ser o ângulo de uma ordem harmônica específica, obtendo-se apenas o harmônico desejado. Uma complicação para a obtenção de um harmônico individual é que na própria transformação de Park, o sinal transformado gira na frequência angular da referência, que não é mais o ângulo da componente fundamental, dificultando a filtragem dos harmônicos não desejados. Para correntes de carga desequilibradas, o sistema deve incluir os componentes de sequência positiva, negativa e zero, amplificando consideravelmente o número de cálculos e dificultando o ajuste de cada controlador.

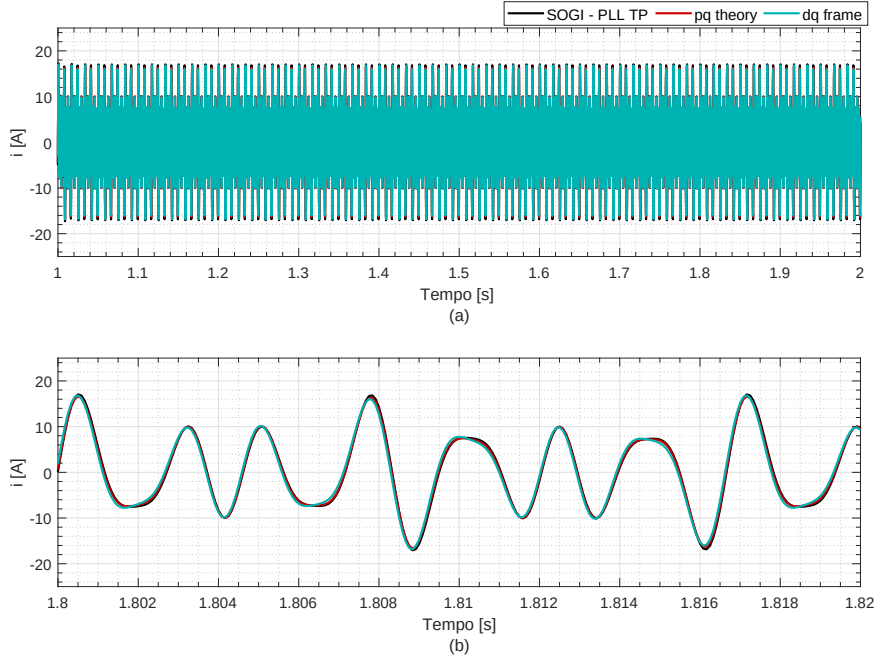


Figura 4.8: Detecção do conteúdo harmônico da Carga 2: (a) Visão geral (b) Regime Permanente.

Se a tensão de linha apresentar distorções, o que não acontece nas perturbações propostas neste trabalho, o cálculo da potência instantânea e das correntes de referência no método *pq theory* é influenciado e a mitigação dos harmônicos pode não ocorrer adequadamente. Seria preciso uma filtragem da tensão de linha para que a mitigação se dê corretamente ou a adição de um componente p_0 de sequência zero, fornecendo-se assim, uma análise completa.

Ambos os métodos obtiveram uma boa resposta na transição da Carga 1 para Carga 2, e também na detecção dos harmônicos múltiplos de 61Hz (Carga 3), conforme pode ser observado nas Figuras 4.8 e 4.9. Não foi observado nenhum transitório significativo no instante da mudança das cargas.

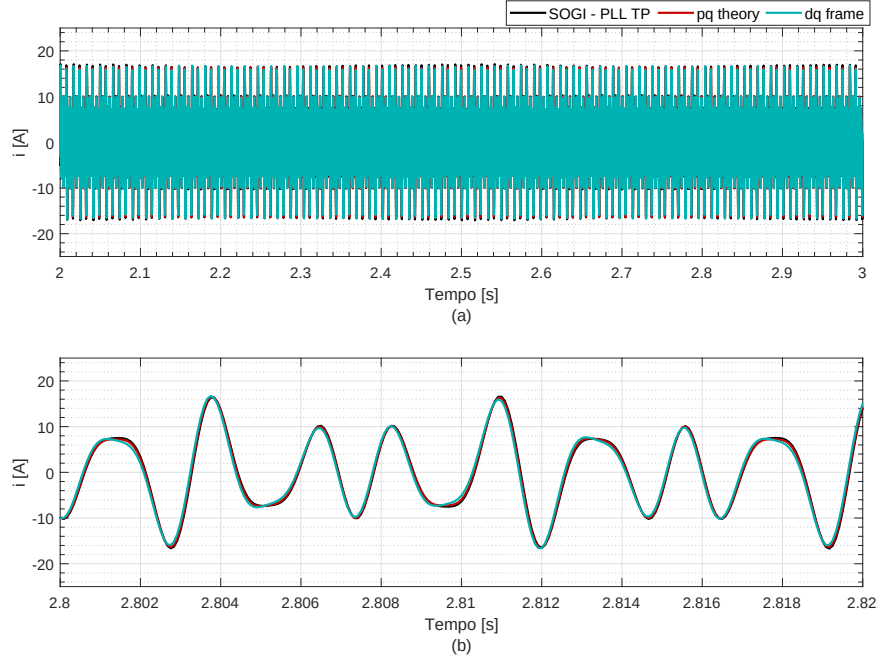


Figura 4.9: Detecção do conteúdo harmônico da Carga 3: (a) Visão geral (b) Regime Permanente.

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam o erro da detecção dos métodos *pq theory*, *dq frame* e SOGI-PLL TP, para as Cargas 1, 2 e 3, respectivamente. Nota-se que o método que apresentou menos erros na detecção foi o primeiro estágio do SOGI-PLL TP, seguido do *pq theory* e, por fim, o *dq frame*.

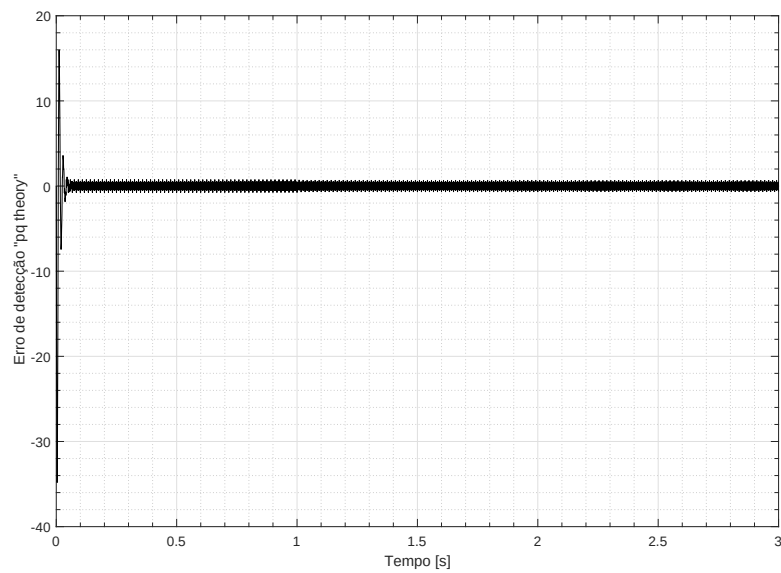


Figura 4.10: Erro de detecção do método pq frame.

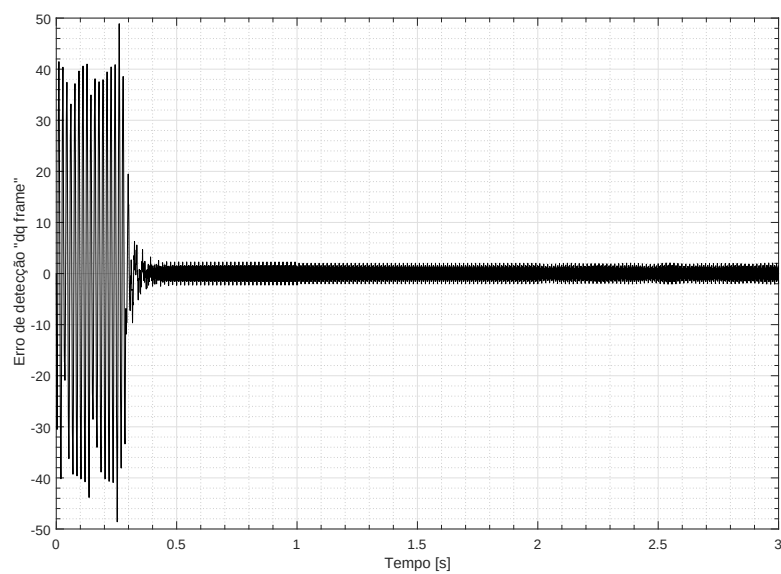


Figura 4.11: Erro de detecção do método dq frame.

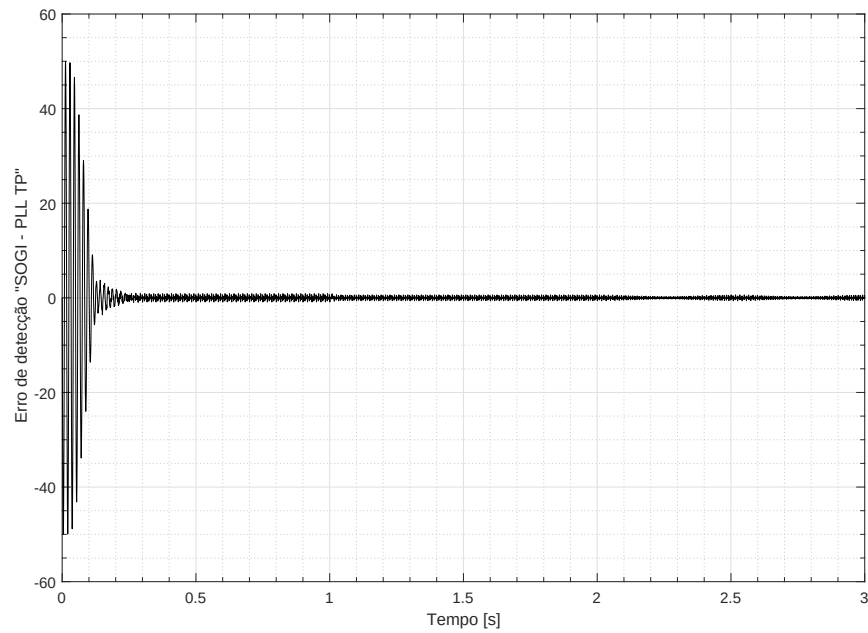


Figura 4.12: Erro de detecção do método SOGI - PLL.

4.4 Considerações Finais

A Tabela 4.1 apresenta um resumo geral das características dos métodos de detecção de corrente harmônica avaliados nesse trabalho.

Tabela 4.1: Avaliação dos Métodos de Detecção de Corrente Harmônica

	SOGI-PLL TP	DFT	IDFT	PQ THEORY	DQ FRAME
Detecção da componente harmônica de maior amplitude	+	+	+	-	+
Zona de não-detecção	+	-	-	-	+
Tarefas adicionais necessárias pelo algoritmo de detecção	-	Janelamento, sincronização	Janelamento, sincronização	Filtragem	Ângulo de referência
Utilização das informações de tensão no algoritmo	-	-	-	+	-
Carga de cálculo	-	--	--	+	+
Aplicação em sistemas monofásicos ou trifásicos	Ambos	Ambos	Ambos	Trifásico	Trifásico
Performance em sistemas com tensão desbalanceada e distorcida	++	++	++	-	+
Performance em sistemas com corrente desbalanceada	+	++	++	++	+

Conclusões e Propostas de Continuidade

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo comparativo de diferentes técnicas de detecção de corrente harmônica para um inversor multifuncional fotovoltaico, já que a complexidade do algoritmo se dá, principalmente, devido ao método escolhido. São eles o SOGI-PLL, DFT, IDFT, *pq theory* e *dq frame*.

Pôde-se concluir que todos os métodos apresentaram uma performance satisfatória e conseguiram determinar eficientemente os harmônicos desejados. Os métodos SOGI-PLL, DFT e IDFT foram capazes de detectar o harmônico de maior amplitude, enquanto os métodos *pq theory* e *dq frame* detectam o conteúdo harmônico total.

Através da Tabela 4.1, juntamente com as características do sistema ao qual o método de detecção será aplicado é possível determinar qual o mais vantajoso à aplicação. Além disso, foi analisado a influência dos métodos de discretização aplicados à estrutura SOGI-PLL, e constatou-se que a discretização *Tustin Prewarping* obteve os melhores resultados.

Proposta de Continuidade

Para a continuidade deste trabalho propõe-se a aplicação dos métodos que se mostrarem mais vantajosos à utilização no controle do inversor multifuncional e a análise da compensação do conteúdo harmônico da rede a ser analisada. Além disso, validar a técnica de compensação de harmônicos, as-

sim como a escolha do método de detecção em uma bancada experimental, além dos resultados de simulação.

Produção Científica Resultante desta Pesquisa

Júnior, P. R. M.; Rios, L. A. R.; Ribeiro, W. V.; Cupertino, A. F. and Pereira, H. A. (2017). Performance comparison of IGBTs and SiC-MOSFET applied in photovoltaic inverters during reactive power injection. In *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 2017, pages 1-6.

Referências Bibliográficas

- Akagi, H., Kanazawa, Y., and Nabae, A. (1984). Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(3):625–630.
- ANEEL (2018). Geração distribuída ultrapassa 20 mil conexões. <http://www.aneel.gov.br>.
- Antunes, F., Xavier, L. S., Cupertino, A. F., Felix, L. B., and Pereira, H. A. (2017). Comparison of harmonic detection methods applied in a photovoltaic inverter during harmonic current compensation. In *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pages 1–6.
- Asiminoael, L., Blaabjerg, F., and Hansen, S. (2005). Evaluation of harmonic detection methods for active power filter applications. In *Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005.*, volume 1, pages 635–641.
- Asiminoael, L., Blaabjerg, F., and Hansen, S. (2007). Detection is key - harmonic detection methods for active power filter applications. *IEEE Industry Applications Magazine*, 13(4):22–33.
- Brandão, D. I., Marafão, F. P., Gonçalves, F. A. S., and Villalva, M. G. (2013). Estratégia de controle multifuncional para sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica. *Brazilian Journal of Power Electronics - Revista Eletronica de Potência*, 18(4):1206–1214.
- Ciobotaru, M., Teodorescu, R., and Blaabjerg, F. (2006). A new single-phase pll structure based on second order generalized integrator. In *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pages 1–6.

- Cupertino, A. F., Domingos, R. M., Pereira, H. A., da Costa, W. U., and Silva, S. R. (2014). Inversores multifuncionais para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. In *V Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Recife, Brasil.
- da Silva, S. A. O., Novochadlo, R., and Modesto, R. A. (2008). Single-phase pll structure using modified p-q theory for utility connected systems. In *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pages 4706–4711.
- de Barros, R. C. (2017). *Discretization Methods Applied to Harmonic Current Detections Based on SOGI-PLL Structures: A Comparative Study*. Trabalho de monografia, Universidade Federal de Viçosa.
- de Barros, R. C., Ribeiro, W. V., Mata, G. L. E., Xavier, L. S., and Pereira, H. A. (2017). Design of a current harmonic detector method applied in photovoltaic inverters with ancillary service capability. In *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pages 1–7.
- de Energia Solar Fotovoltaica, A. B. (2018). Geração centralizada solar fotovoltaica no brasil. In *Seminário Implantação e Integralização de Novos Empreendimentos de Transmissão e Geração de Energia*, Brasília, Brasil.
- de Jesus, V. M. R., Xavier, L. S., Cupertino, A. F., Mendes, V. F., and Pereira, H. A. (2017). Operating limits of three-phase multifunctional photovoltaic converters applied for harmonic current compensation. In *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pages 1–8.
- de Pesquisa Energética, E. (2017). Balanço energético nacional 2017: Ano base 2016. In *Ministério de Minas e Energia*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Domingos, R. M., Cupertino, A. F., and Pereira, H. A. (2014). Aplicação de inversores multifuncionais trifásicos em sistemas fotovoltaicos. In *V Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Recife, Brasil.
- Filho, W. P. B. and de Azevedo, A. C. S. (2013). Geração distribuída: Vantagens e desvantagens. In *II Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia*, Pará, Brasil.

- Kim, H., Blaabjerg, F., Bak-Jensen, B., and Choi, J. (2002). Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(5):701–710.
- Macêdo, W. N. (2006). *Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*. Dissertação de doutorado, Universidade de São Paulo.
- Massoud, A. M., Finney, S. J., and Williams, B. W. (2004). Review of harmonic current extraction techniques for an active power filter. In *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No.04EX951)*, pages 154–159.
- McGrath, B. P., Holmes, D. G., and Galloway, J. J. H. (2005). Power converter line synchronization using a discrete fourier transform (dft) based on a variable sample rate. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4):877–884.
- Nakata, A., Ueda, A., and Torii, A. (1998). A method of current detection for an active power filter applying moving average to pq-theory. In *PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (Cat. No.98CH36196)*, volume 1, pages 242–247.
- Nascimento, R. L. (2017). Energia solar no brasil: Situação e perspectivas. In *Estudo Técnico*. Consultoria Legislativa - Câmara dos Deputados.
- Pereira, O. L. S. and Gonçalves, F. F. (2018). Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de tubarão - sc. *Revista Brasileira de Energia*, 14(1):25–45.
- Rampinelli, G. A. (2010). *Estudo de Características Elétricas e Térmicas de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*. Dissertação de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Rodriguez, P., Luna, A., Candela, I., Mual, R., Teodorescu, R., and Blaabjerg, F. (2011). Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 58(1):127–138.
- Rodriguez, P., Pou, J., Bergas, J., Candela, J. I., Burgos, R. P., and Boroyevich, D. (2007). Decoupled double synchronous reference frame pll

- for power converters control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(2):584–592.
- Rodriguez, P., Teodorescu, R., Candela, I., Timbus, A. V., Liserre, M., and Blaabjerg, F. (2006). New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. In *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pages 1–7.
- Suru, C. V., Patrascu, C. A., and Linca, M. (2014). The synchronous fundamental dq frame theory implementation and adaptation for the active filtering. In *2014 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, pages 1–6.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., and Filho, E. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5):1198–1208.
- Wang, Y. F. and Li, Y. W. (2013). Three-phase cascaded delayed signal cancellation pll for fast selective harmonic detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4):1452–1463.
- Xavier, L. S. (2015). *Inversores Monofasicos Multifuncionais Aplicados a Usinas Solares*. Trabalho de monografia, Universidade Federal de Viçosa.
- Xavier, L. S., Cupertino, A. F., de Resende, J. T., Mendes, V. F., and Pereira, H. A. (2017). Adaptive current control strategy for harmonic compensation in single-phase solar inverters. *Electric Power Systems Research*, 22(4):84–95.
- Xavier, L. S., Cupertino, A. F., Mendes, V. F., and Pereira, H. A. (2015). A novel adaptive current harmonic control strategy applied in multifunctional single-phase solar inverters. In *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pages 1–6.
- Yepes, A. G., Freijedo, F. D., Doval-Gandoy, J., Lopez, O., Malvar, J., and Fernandez-Comesana, P. (2012). Correction to "effects of discretization methods on the performance of resonant controllers"[jul 10 1692-1712]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(12):4976–4976.

- Yu, Y., Xu, Y., and Liu, X. (2011). Research of improved iterative dft method in harmonic current detection. In *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pages 1–4.

