



## Detecção de harmônicas pares e componentes CC em redes elétricas trifásicas visando a redução do tempo de convergência na sincronização pela Generalização de Cancelamento por Sinal Atrasado (GDSC-PLL)

*Detection of even harmonics and DC components in three-phase electrical grids in order to reduce the convergence time for synchronization by the Generalized Delayed Signal Cancellation (GDSC-PLL)*



Submetido em 13.03.15 | Aceito em 13.04.15 | Disponível on-line em 12.01.16

**Ygo Neto Batista\*** e **Helber Elias Paz de Souza**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco –IFPE, campus Pesqueira | \*  
ygo@pesqueira.ifpe.edu.br

**Francisco de Assis dos Santos Neves**

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Departamento de Engenharia Elétrica.

### RESUMO

*Para conectar conversores elétricos à rede de distribuição, por exemplo, é necessário conhecer a magnitude e o ângulo de fase da componente harmônica fundamental de sequência positiva (Fundamental-Frequency Positive-Sequence - FFPS) do vetor tensão da rede elétrica. Geralmente, é aplicado um método de sincronização trifásico para obter esses dados e algumas métricas de desempenho são comumente utilizadas para comparar os métodos de sincronização, sendo o tempo de convergência crítico para muitas aplicações. O método baseado na generalização de cancelamento por sinal atrasado (Generalized Delayed Signal Cancellation - GDSC), aplicado como pré-filtro em um PLL trifásico (GDSC-PLL), apresenta um bom desempenho em geral. Este artigo expõe que o tempo de convergência do GDSC-PLL pode ser reduzido pela metade quando os sinais de entrada não contêm harmônicas pares nem componente CC, assim como apresenta e analisa alternativas para detectar a presença de harmônicas pares e componente CC na rede elétrica trifásica.*

**Palavras-chaves:** GDSC-PLL, PLL trifásico, detecção de harmônicas, sincronização.

### ABSTRACT

*Applications of grid-connected converters, for instance, require knowing the correct magnitude and phase-angle of the Fundamental-Frequency Positive-Sequence (FFPS) grid voltage vector. Usually a three-phase synchronization method is applied to meet this target and some performance metrics are often used to compare them, being the convergence time critical in many applications. The Generalized Delayed Signal Cancellation (GDSC) applied as pre-filter for a classical three-phase PLL (GDSC-PLL) presents a good overall performance.*

*This paper shows that the GDSC-PLL convergence time can be reduced by half when the input signals do not contain even harmonics or DC components as well as presents and analyzes alternatives to detect the presence of DC components and even harmonics in three-phase electrical grids.*

**Keywords:** GDSC-PLL, three-phase PLL, harmonic detection, synchronization.

## 1. Introdução

O uso de fontes de energia renováveis, tais como, solar e eólica, tem aumentado, principalmente, como complemento para as fontes de base no fornecimento de energia elétrica, tais como as grandes hidrelétricas e termelétricas. A especificação do sistema de controle e dispositivos de eletrônica de potência necessários para realizar a interface entre a geração e a transmissão, distribuição e consumo da energia afeta diretamente na operação, eficiência e segurança do sistema de potência. (Carrasco et al., 2006)

Dispositivos de eletrônica de potência para aplicações industriais é outro segmento que se tem desenvolvido. As crescentes aplicações de cargas não lineares nas indústrias, e conseqüentemente, o aumento de contaminação na rede elétrica por componentes harmônicas, impulsionou o desenvolvimento de novos filtros ativos, mais eficientes e capazes de solucionar problemas tradicionais dos filtros passivos. Existem vários métodos de controle para filtros ativos, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, e o sistema de controle irá impactar no tempo de convergência para os valores de referência e na distorção harmônica do sinal filtrado. (Asiminoaei et al., 2007)

Os dois exemplos citados, inserção de novas fontes na rede elétrica e filtragem de componentes harmônicas da rede, necessitam de um método de sincronização, o qual proporciona a geração dos valores de tensão e corrente de referência para o sistema de controle. A escolha do método de sincronização impacta na capacidade de rejeição de distorção, na imunidade a ruídos, na precisão, na robustez quanto ao desbalanço na rede, adaptabilidade quanto à frequência e ângulo de fase, simplicidade estrutural e dinâmica / tempo de

convergência, sendo essa última, crítica para diversas aplicações (Li et al., 2014).

Atualmente, diversos estudos são conduzidos com o objetivo de reduzir o tempo de convergência dos métodos de sincronização (0; Matas et al., 2014; Zeng et al., 2014). Porém, não identificamos nenhum método de sincronização capaz de identificar a componente fundamental (vetor *FFPS*), em um sinal qualquer, em um tempo inferior a um período do ciclo da fundamental. Essa é uma limitação teórica e pode ser observada a partir da transformada de *Fourier*.

No entanto, em diversos casos práticos, como na conexão com a rede elétrica de alta tensão e na filtragem de harmônicas em cargas não lineares típicas, a presença de componentes harmônicas pares não é comum. Nesses casos, se for possível detectar que não existem componentes harmônicas pares ou CC na rede, é possível utilizar um método para identificação do vetor *FFPS* em apenas meio ciclo da fundamental baseado no método *GDSC* (Neves et al., 2010a, 2012).

Este artigo expõe que é possível reduzir o tempo de convergência do *GDSC-PLL* se for detectado que o ambiente não possui componentes harmônicas pares ou CC, bem como apresenta diversas tentativas, erros e acertos, para realizar a detecção das componentes harmônicas pares e CC em um sinal trifásico qualquer.

## 2. Aperfeiçoamento do GDSC em ambientes sem componentes harmônicas pares

Neves et al. apresentou o *GDSC* (Neves et al., 2010a) para obter a componente fundamental de seqüência positiva de um sinal trifásico (*FFPS*) e, no *design* apresentado em (Neves et al. 2012), sistematizou a implementação do *GDSC* através de simples

transformações matemáticas no referencial estacionário. Se aplicarmos as transformações  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  e  $E$ , conforme (Neves et al., 2012), as únicas componentes harmônicas presentes na saída do  $GDSC$  serão aquelas da família  $h = 1 + 32n, \forall n \in \mathbb{Z}$ . O tempo de resposta total das transformações  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  e  $E$  é de  $31/32$  período da fundamental, ou seja, aproximadamente um ciclo da fundamental.

Dentre todas as transformações  $GDSC$ , a transformação  $A$ , que filtra todas as harmônicas pares e  $CC$ , é a mais lenta e requer um tempo de meio ciclo da fundamental para seu processamento. Como visto na introdução, a transformação  $A$  pode ser desnecessária na maioria dos casos práticos, ou substituída por uma transformação que filtre apenas a componente  $CC$  para aplicações apresentem esta componente na rede. Logo, caso a transformação  $A$  seja totalmente descartada, o tempo de detecção da  $FFPS$  é reduzido de  $31/32$  para  $15/32$  período da fundamental, ou seja, para aproximadamente meio ciclo da fundamental. Porém, para obter esse ganho de desempenho, inicialmente é necessário detectar a existência de componentes pares na rede.

### **3. Detecção das componentes pares presentes na rede**

O objetivo desta seção é analisar métodos capazes de detectar a presença de componentes harmônicas específicas. Os três requisitos fundamentais que devem ser atendidos são: (i) capacidade de detectar harmônicas pares em até meio ciclo da fundamental, (ii) possibilidade de implementação em sistema embarcado de tempo real e (iii) precisão na identificação de harmônicas pares. A partir da detecção das harmônicas pares será possível que o sistema, automaticamente, insira ou não a transformação

A no fluxo de dados do  $GDSC$ . Na Seção 3.1 analisamos a identificação de componentes harmônicas através de transformadas, na Seção 3.2 mediante blocos  $GDSC$  e sistemas de equações lineares. Já banco de filtros e análise vetorial da transformação  $A$  são apresentados nas Seções 3.3 e 3.4, respectivamente.

#### **3.1. Detecção de componentes harmônicas pares através das transformadas de Fourier (FT), Wavelets (WT), de Stockwell (ST), quadráticas (QT) e de vetores espaciais (SVFT)**

Quando se deseja detectar a presença de componentes harmônicas, algumas ferramentas de análise espectral devem ser imediatamente listadas:  $FT$ ,  $WT$ ,  $ST$ ,  $QT$ ,  $SVFT$ , e suas derivações.

O algoritmo mais tradicional, e o utilizado como referência nas normas técnicas, é o de *Fourier (FT)* (Standard, 2002). Nesse algoritmo, o tamanho e a forma da janela de amostragem influenciam no modo em que as componentes harmônicas e inter-harmônicas afetam a medição da harmônica desejada. Diversos aperfeiçoamentos em relação ao janelamento foram realizados. Por exemplo, em 0 a janela aplicada melhora a precisão da medição, mas aumenta o tempo de resposta do sistema. Nenhum sistema baseado em  $FT$  identificou a existência de harmônicas pares em até meio ciclo da fundamental.

Em vez de um sinal periódico, como senos e cossenos na  $FT$ , a transformada de *Wavelet* utiliza famílias de pequenas ondas não periódicas (*wavelets*), dilatadas e transladadas, para compor o sinal. A  $WT$  permite uma análise multirresolução do sinal, ou seja, é possível analisar sinais de baixas e altas frequências com a mesma qualidade. Uma analogia bastante citada na explicação da  $WT$  é o fato de que é

possível ver a floresta, as árvores e as folhas. A versão complexa da transformada de *Wavelet* (*CWT*) pode extrair amplitude e fase. Porém as componentes de *Fourier* e as de *Wavelets* não são correlacionadas diretamente. Além disso, os tempos de resposta das *WT* e *CWT* não atendem ao requisito de detecção da harmônica par em meio ciclo da fundamental. Tanto a *FT*, quanto a *WT* e a *CWT*, podem ser implementadas em sistemas embarcados de tempo real.

Quando se quer o benefício da multirresolução da *WT*, evitando o problema de janelamento da *FT*, mas deseja-se comparar com as componentes de *Fourier*, a transformada de *Stockwell* (*ST* ou *S-Transform*) apresenta bons resultados. A *ST* é basicamente uma *WT* com janela gaussiana, melhorando a representação do sinal no tempo *versus* frequência, relacionando diretamente com as componentes de *Fourier*. Já a transformada quadrática (*QT*), especialmente a distribuição *Wigner-Ville* (*WVD*), aperfeiçoa a distribuição no plano tempo *versus* frequência, tornando o resultado mais representativo. Porém, tanto a *ST* quanto a *QT* realizam o processamento em bloco, não sendo apropriadas para aplicações em tempo real.

Portanto, após analisar a *FT*, *WT*, *ST* e *QT*, observamos que essas não são adequadas para aplicações que exijam resposta rápida em tempo real (até meio ciclo da fundamental). De fato, essas quatro transformadas são amplamente aplicadas em análise do sinal para classificação ou localização da falta, ou para análise da qualidade da energia. Geralmente, nessas aplicações, essas transformadas estão associadas a um sistema de reconhecimento e classificação, como redes neurais, lógica *fuzzy* e algoritmo genético. Em (Saini et al., 2012) é apresentada uma tabela comparativa com 24 artigos, comparando essas transformadas na classificação de distúrbios da rede elétrica.

Já a *Space-Vector discrete-time Fourier Transform* (*SVFT*) (Neves et al., 2010b), ou transformada de *Fourier* em tempo discreto para vetores espaciais, foi a única transformada dentre as analisadas que identifica, diretamente, uma componente harmônica específica, de sequência positiva ou negativa, no sinal trifásico. Além disso, essa transformada possui menor complexidade computacional e melhor resposta quando comparada às técnicas baseadas na *FT* e na *WT* executadas em tempo real. Porém, o tempo de resposta da *SVFT* de um ciclo não atende ao requisito de detecção de harmônicas pares em meio ciclo. Aplicações para a *SVFT* são os filtros ativos e os restauradores dinâmicos de tensão.

Como resultado dessa análise, *FT* com aperfeiçoamento no janelamento, transformada de *Stockwell* e *SVFT* apresentam a precisão requerida, no entanto, nenhuma das três transformadas citadas atende ao requisito fundamental de detectar harmônicas pares em até meio ciclo em um sistema embarcado de tempo real.

### 3.2. Identificação de componentes harmônicas pares através de transformações *GDSC* e sistema de equações lineares

Uma vez que as transformações baseadas na *GDSC* são lineares, construímos um sistema de equações lineares com blocos *GDSC* em paralelo para que, a partir de suas entradas e saídas, fosse possível calcular a quantidade de cada componente harmônica.

Um sistema linear, considerando que este tem solução única e que suas equações são linearmente independentes, deve ter o mesmo número de equações e de incógnitas (Lay, 1997).

Para testar o método, elaboramos diversos sistemas de equações visando identificar as harmônicas de ordem -6 (6ª

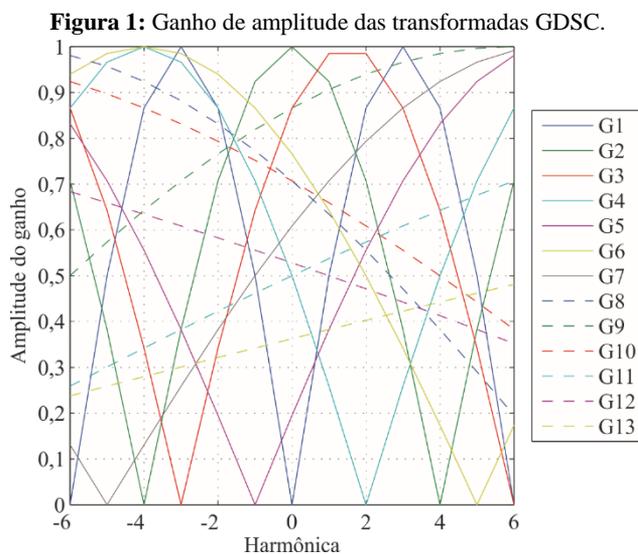
harmônica de sequência negativa) até a +6 (6ª harmônica de sequência positiva), totalizando 13 variáveis. Não consideramos as inter-harmônicas e incluímos a componente de ordem zero. Logo, para 13 incógnitas são necessárias 13 equações, obtidas a partir de 13 transformações GDSC. O sistema linear complexo pode ser observado na Equação 1.

$$\left| \vec{H} \right|_{13 \times 1} = \left| \vec{G} \right|_{13 \times 13} \cdot \left| \vec{S} \right|_{13 \times 1} \quad (1)$$

Em que,  $\left| \vec{S} \right|$  é o sinal de entrada nas transformações GDSC, composto exclusivamente pelas componentes harmônicas de -6 a +6, com cada componente harmônica assumindo uma posição específica no vetor  $\left| \vec{S} \right|$ ; na matriz  $\left| \vec{G} \right|$ , cada linha diz respeito a uma transformação, enquanto, cada coluna contém os ganhos complexos para cada componente

harmônica entre -6 e +6; e,  $\left| \vec{H} \right|$  é o vetor com a saída das 13 transformações GDSC. É importante observar que, como as transformações GDSC estão em paralelo, o tempo de resposta global do sistema é igual ao tempo de resposta da transformação mais lenta.

Como ilustração, apresentamos um dos casos simulados. Neste caso, o bloco mais lento tem processamento em um quarto de ciclo da fundamental, atendendo ao requisito de identificar harmônicas pares em até meio ciclo da fundamental. Adicionalmente, a identificação das harmônicas pares entre -6 e +6 é suficiente para definir a presença de harmônicas pares no sinal como um todo, uma vez que normalmente, em sistemas de potência, quando o sinal possui componentes harmônicas pares, as principais componentes são de baixa ordem. Os ganhos das transformações GDSC utilizados podem ser observados graficamente na Figura 1.

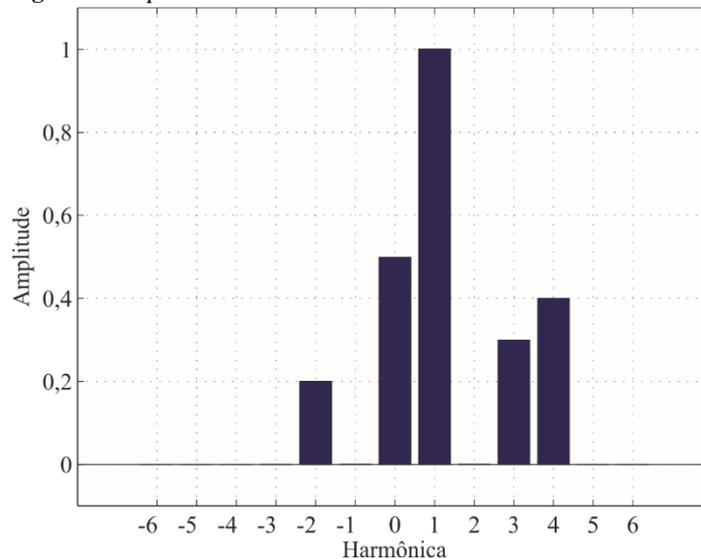


Apesar de termos considerado que cada elemento de  $|\vec{S}|$  contém uma harmônica específica, ainda não se sabe o espectro desse sinal. De fato, conhecer o espectro de  $|\vec{S}|$  é o objetivo destes cálculos. Então, para decompor um sinal qualquer  $|\vec{S}|$ , em suas componentes harmônicas entre -6 e +6, é necessário multiplicar a saída das transformações *GDSC* pela matriz inversa do ganho, conforme a Equação 2.

$$|\vec{S}|_{1 \times 3 \times 1} = |\vec{G}|_{1 \times 3 \times 1}^{-1} \cdot |\vec{H}|_{1 \times 3 \times 1} \quad (2)$$

O resultado, o vetor  $|\vec{S}|$ , apresenta amplitude e fase para cada componente harmônica presente no sinal entre -6 e +6, conforme exemplificado na Figura 2, mostrando-se apenas as amplitudes.

**Figura 2.** Amplitude das harmônicas identificadas em um sinal trifásico.



O sistema identifica corretamente as harmônicas entre -6 e +6 para qualquer sinal aplicado na entrada, o qual continha exclusivamente essas componentes. Todavia, a matriz inversa do ganho complexo é mal condicionada, levando a erros grosseiros quando o sinal possui quantidades mínimas de inter-harmônicas ou de harmônicas acima da 6ª ordem. (Lay, 1997)

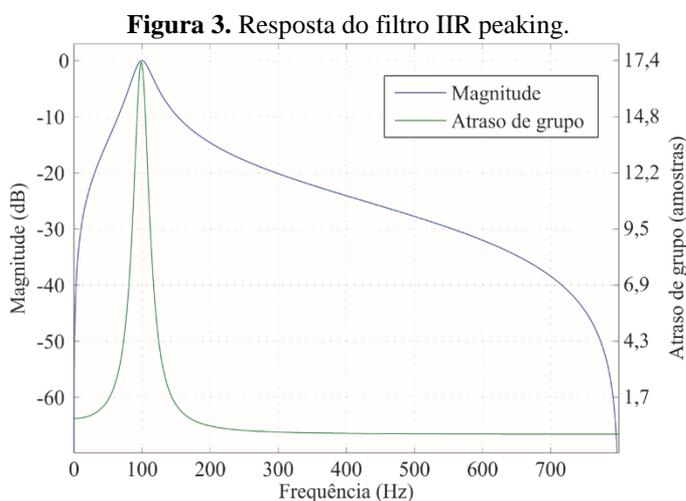
Um sistema linear está ligado à álgebra linear e é importante o entendimento dos espaços vetoriais, dos isomorfismos, das transformações lineares, da interpolação de *Lagrange*, da decomposição de um polinômio em fatores primos, de anéis comutativos, do teorema da decomposição primária, da forma de *Jordan* e das formas bilineares. O aprofundamento na álgebra linear não está no escopo deste estudo.

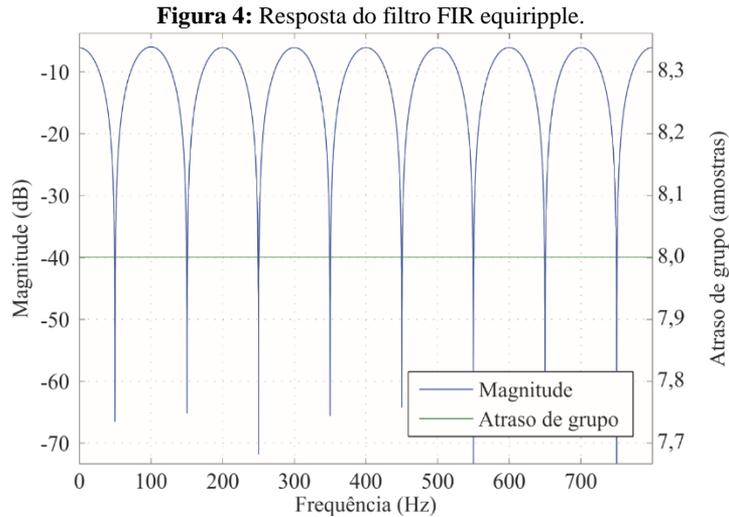
### 3.3. Detecção de harmônicas pares através de banco de filtros passa faixa

Conforme visto na Seção 3.2, normalmente, em sistemas de potência, quando o sinal possui componentes harmônicas pares, as principais componentes são de baixa ordem. Com três filtros passa faixa em paralelo, sintonizados nas 2<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 6<sup>a</sup> harmônicas, é possível estimar se existe ou não harmônicas pares presentes no sinal. Foram verificadas diversas topologias e parâmetros para filtros *IIR* e *FIR*.

Foram testados alguns filtros clássicos *IIR*, como o de *Bessel*, *Butterworth*, *Chebyshev* e elíptico. Em geral, quando se obtém atraso de grupo inferior a meio ciclo da fundamental, a atenuação da fundamental é insuficiente para garantir o correto funcionamento do sistema. Por exemplo, ao aplicar um filtro *IIR peaking* sintonizado na 2<sup>a</sup> harmônica, com atraso de grupo máximo de meio ciclo da fundamental (16 amostras para amostragem em 1.600 Hz), a atenuação da fundamental (50 Hz) é de 14 dB, conforme apresentado na Figura 3. Ou seja, restarão 20% da componente fundamental do sinal após o filtro *IIR*.

Os filtros *FIR*'s apresentam melhor resultado. Foram testados filtros *equiripple*, *least-square*, *window*, *constr. least-square*, *least Pth-norm*, *generalized equiripple* e *constr. band equiripple*. As características de fase linear e atraso de grupo constante dos filtros *equiripple* se apresentam como uma vantagem competitiva em relação aos demais. Ajustando apropriadamente os parâmetros do filtro *equiripple*, um único filtro pode servir para todas as frequências pares. Na Figura 4 apresentamos a resposta de um filtro com atraso de grupo de 8 amostras, que representa 1/4 da fundamental na taxa de amostragem utilizada, apresentando a resposta mais rápida dentre as técnicas pesquisadas. A atenuação de aproximadamente 6 dB para as frequências desejadas (componentes harmônicas pares) e de 48 dB para as frequências a serem rejeitadas (componentes harmônicas ímpares) são adequadas para detecção das harmônicas pares, contudo a presença de 0.4% da fundamental na saída ainda fornece uma imprecisão indesejada para a decisão de utilizar ou não a transformação *A* no fluxo de dados do *GDSC*.





### 3.4. Identificação de harmônicas pares através da distância vetorial entre entrada e saída da transformação $A$ do GDSC

Esta técnica foi desenvolvida neste trabalho e consiste na principal contribuição deste artigo. Utilizamos uma transformação  $A$  (Neves et al., 2012) e, a partir de sua entrada e saída, pode-se avaliar se essa transformação está influenciando ou não na resposta global do sistema.

No GDSC e considerando as componentes harmônicas inteiras, a transformação  $A$  é a única que tem apenas dois níveis de ganho: sendo unitário para as componentes harmônicas ímpares e zero para as pares, o que facilita na identificação de componentes harmônicas pares do sistema. Logo, essa técnica não se aplica na avaliação da necessidade de utilizar os blocos  $B$ ,  $C$ ,  $D$  ou  $E$  no GDSC.

Usando a mesma notação de (Neves et al., 2012), a distância vetorial entre entrada e saída de uma transformação qualquer do GDSC em regime permanente é dada pela Equação 3.

$$\vec{s}_T - \vec{s}(kT_s) = \sum_{h=-\infty}^{+\infty} \left\{ \left[ -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} e^{j(\theta_r - h\frac{2\pi}{N}k_d)} \right] |\tilde{s}(h)| e^{j(h\frac{2\pi}{N}k + sgn(h)\varphi_h)} \right\}. \quad (3)$$

Substituindo os parâmetros descritos em (Neves et al., 2012) para a transformação  $A$ ,  $\theta_r = \pi$  e  $k_d = \frac{N}{2}$ , temos as Equações 4 e 5.

$$\vec{s}_{TA} - \vec{s}(kT_s)|_{h=0+2n, \forall n \in \mathbb{Z}} = -\sum_{h=-\infty}^{+\infty}|_{h=0+2n} \left\{ |\tilde{s}(h)| e^{j(h\frac{2\pi}{N}k + sgn(h)\varphi_h)} \right\}, \quad (4)$$

$$\vec{s}_{TA} - \vec{s}(kT_s)|_{h=1+2n, \forall n \in \mathbb{Z}} = 0. \quad (5)$$

Então, verificamos que se a distância vetorial entre entrada e saída for diferente de zero implica necessariamente que existem componentes harmônicas pares no sinal trifásico de entrada.

Portanto, essa técnica tem a capacidade de identificar harmônicas pares em até meio ciclo da fundamental, com possibilidade de implementação em sistema embarcado de tempo real e possui boa precisão na detecção de harmônicas pares.

#### 4. Resultados e Discussões

Na Seção 2 observamos que a transformação A pode ser desnecessária na maioria dos casos práticos, sendo possível retirá-la ou substituí-la por um filtro CC. Porém para descartar a transformação A é necessário

que o sistema não detecte a presença de harmônicas pares ou componente CC em até meio ciclo da fundamental. Na Seção 3 analisamos quatro métodos para detecção das componentes harmônicas pares e componente CC, que estão relacionados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Atendimento aos requisitos fundamentais.

Método	Tempo de resposta <sup>(i)</sup>	Implementação <sup>(ii)</sup>	Precisão <sup>(iii)</sup>
<b>Transformadas</b>	Não atende	<i>FT</i> , <i>WT</i> e <i>SVFT</i> atendem	<i>FT</i> e <i>SVFT</i> atendem
<b>Sistema de equações</b>	Atende	Atende	Não atende
<b>Banco de Filtros</b>	Atende	Atende	Não atende
<b>Transformação A do GDSC</b>	Atende	Atende	Atende

Na Tabela 1, os requisitos fundamentais são:

- (i) Capacidade de detectar harmônicas pares em até meio ciclo da fundamental;
- (ii) Possibilidade de implementação em sistema embarcado de tempo real;
- (iii) Precisão na identificação de harmônicas pares.

Portanto, a única técnica que atendeu aos três requisitos fundamentais foi utilizar a transformação A do GDSC para detectar a presença de harmônicas pares no sinal elétrico trifásico.

É importante destacar o tempo de resposta do filtro *FIR equiripple*, que foi capaz de filtrar as componentes pares em 1/4 do ciclo da fundamental. Apesar da resposta não ter a precisão requerida, deixando passar 0.4% da fundamental, pode servir como rápido estimador em aplicações futuras.

#### 5. Conclusões

A escolha adequada do método de sincronização pode impactar significativamente no desempenho de sistemas de controles aplicados em dispositivos de eletrônica de potência. A fim de possibilitar a redução do tempo de resposta do método de sincronização GDSC em meio ciclo da fundamental é necessário detectar a presença de componentes harmônicas pares e componente CC. Dentre as técnicas desenvolvidas e testadas para essa detecção, a que obteve melhor resultado foi aplicar uma operação GDSC em uma arquitetura específica para essa finalidade. Outra técnica que obteve bons resultados no tempo de resposta foi a aplicação de um filtro *FIR equiripple*, porém a imprecisão desse torna-o mais adequado como um estimador rápido em aplicações específicas.

## 6. Referências

- ASIMINOAEI, Lucian; BLAABJERG, Frede; HANSEN, Steffan. Detection is key-Harmonic detection methods for active power filter applications. *Industry Applications Magazine, IEEE*, v. 13, n. 4, p. 22-33, 2007.
- CARRASCO, Juan Manuel et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 53, n. 4, p. 1002-1016, 2006.
- DE LA O, J. A.; ALTUVE, H. J.; DIAZ, I. A new digital filter for phasor computation. I. Theory [power system protection]. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 13, n. 3, p. 1026-1031, 1998.
- LAY, David C. Álgebra linear e suas aplicações. LTC, 1997.
- LEE, Kyoung-Jun et al. A novel grid synchronization PLL method based on adaptive low-pass notch filter for grid-connected PCS. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 61, n. 1, p. 292-301, 2014.
- LI, Weiwei et al. Grid synchronization systems of three-phase grid-connected power converters: a complex-vector-filter perspective. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 61, n. 4, p. 1855-1870, 2014.
- MATAS, José et al. An adaptive prefiltering method to improve the speed/accuracy tradeoff of voltage sequence detection methods under adverse grid conditions. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 61, n. 5, p. 2139-2151, 2014.
- NEVES, Francisco AS et al. A generalized delayed signal cancellation method for detecting fundamental-frequency positive-sequence three-phase signals. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 3, p. 1816-1825, 2010 a.
- NEVES, Francisco AS et al. Digital filters for fast harmonic sequence component separation of unbalanced and distorted three-phase signals. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 59, n. 10, p. 3847-3859, 2012.
- NEVES, Francisco AS et al. A space-vector discrete Fourier transform for unbalanced and distorted three-phase signals. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 57, n. 8, p. 2858-2867, 2010 b.
- SAINI, Manish Kumar; KAPOOR, Rajiv. Classification of power quality events—a review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 43, n. 1, p. 11-19, 2012.
- STANDARD, I. E. C. 61000-4-7. General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, 2002.
- ZENG, Zheng et al. Adaptive synchronization of utility in abnormal voltage conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 61, p. 152-162, 2014.