

USO DA TRANSFORMADA DE PARK PARA ELIMINAÇÃO DE HARMÔNICAS DURANTE O PROCESSO DE ESTIMAÇÃO DE FASORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

GABRIEL M. T. DOS SANTOS, FELIPE V. LOPES

*Universidade de Brasília (UnB), Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos (LAPSE)
Campus Darcy Ribeiro, Caixa postal 04397, CEP 70910-900, Asa Norte
E-mails: gabrielmelots@hotmail.com, felipevlopes@unb.br*

Abstract— This paper presents a study regarding the use of the Park's transformation (TDQ) as a pre-processing procedure of signals measured in electrical power systems to be applied during the voltage and current phasor estimation process. The goal of the algorithm is to minimize the effects of harmonics on the measured signals, allowing the phasor estimation, even in adverse scenarios in which there is a relevant level of non-fundamental components in the monitored waveforms. To evaluate the referred technique, representative cases related to the phasor estimation process of currents measured in a 230 kV power system modelled in the Alternative Transients Program (ATP) are presented. The output signals of the TDQ-based pre-processing stage are used as the input signals of phasor estimation methods, such as the Full- and Half-cycle Fourier transform, as well as a short window based technique, which is normally reported as one of the simplest techniques available in the literature. From the obtained results, it can be concluded that the TDQ-based pre-processing stage can improve the phasor estimation process, being indicated to systems with significant harmonic and inter-harmonic levels.

Keywords— Phasor estimation, harmonics, positive sequence, electrical power systems, TDQ.

Resumo— Apresenta-se neste artigo um estudo do uso da transformada de Park (TDQ) como uma etapa de pré-processamento de sinais medidos em sistemas elétricos a ser aplicada durante o processo de estimação fasorial de tensões e correntes. O objetivo do algoritmo é minimizar o efeito de harmônicas nos sinais medidos, viabilizando a estimação de fasores mesmo em situações nas quais o nível de componentes não-fundamentais nos sinais é relevante. Para avaliar o desempenho da técnica, apresentam-se casos representativos da estimação dos fasores de correntes medidas em um sistema de 230 kV modelado no *Alternative Transients Program* (ATP). As saídas da etapa de pré-processamento baseada na TDQ são utilizadas como entradas de métodos de estimação de fasores disponíveis na literatura, a exemplo dos algoritmos de Fourier de um e meio ciclo, bem como de um algoritmo de janela curta que figura como um dos mais simples existentes. Dos resultados obtidos, conclui-se que a etapa de pré-processamento baseada na TDQ pode melhorar o desempenho de algoritmos de estimação de fasores, sendo indicado especialmente para sistemas com alto nível de harmônicas e inter-harmônicas.

Palavras-chave— Estimação de fasores, harmônicas, sequência positiva, sistemas elétricos de potência, TDQ.

1 Introdução

Devido à crescente demanda de energia elétrica verificada mundialmente, os mercados de energia se tornaram muito competitivos. Assim, as concessionárias têm envidado esforços para aprimorar cada vez mais seus sistemas de monitoração, especialmente para melhorar a qualidade de seus serviços e manter a segurança de suas instalações (Saha, 2010; Anderson, 1933).

Nos sistemas elétricos de potência, existe a necessidade de se monitorar as componentes fundamentais de tensões e correntes. Para tanto, realiza-se normalmente a estimação de fasores fundamentais, os quais são largamente utilizados em aplicações de diagnóstico de distúrbios, em sistemas de proteção, localização de faltas e até mesmo como dados para auxílio da operação do sistema (Saha, 2010; Anderson, 1933; Lopes et al., 2015; Almeida & Damasceno, 1995). Neste contexto, uma vasta gama de algoritmos também se baseia nas componentes de sequência positiva, negativa e zero para processar as análises de interesse, o que requer normalmente a representação fasorial das grandezas elétricas (Almeida & Damasceno, 1995).

Um ponto comum das aplicações que utilizam fasores é a preocupação com a correta representação das grandezas fasoriais (Anderson, 1933; Phadke &

Thorp, 2009). De fato, caso os fasores sejam estimados de forma incorreta, as análises do sistema podem ser comprometidas.

Uma vez que a presença de componentes harmônicas pode ocasionar erros nos fasores estimados, diversos algoritmos de estimação fasorial têm sido propostos ao longo dos anos, a exemplo dos métodos de Fourier de um e meio ciclo (Phadke & Thorp, 2009). Além desses métodos, também têm sido reportadas soluções para eliminação da componente CC de decaimento exponencial, a exemplo do filtro mímico apresentado em Benmouyal (1995), e algoritmos de janela curta, os quais resultam em atrasos menores no processo de estimação de fasores (Phadke & Thorp, 2009).

Apesar de existirem atualmente algoritmos de estimação fasorial confiáveis, a leitura dos sinais em sistemas elétricos pode se tornar difícil, especialmente durante curtos-circuitos ou na presença de componentes harmônicas e inter-harmônicas. De fato, essas componentes não fundamentais geralmente prejudicam o processo de estimação de fasores, o que tem motivado pesquisas no sentido de eliminá-las antes da estimação fasorial. Caso essa filtragem prévia não seja realizada, os fasores estimados podem apresentar erros relevantes, muitas vezes em forma de oscilações, resultando em problemas na análise da componente fundamental e, portanto, nos processos associados.

Em Soliman et al. (2004) e Soliman & Belkhat (2006), apresenta-se uma solução baseada na Transformada de Park (TDQ) para eliminação de componentes de frequência não fundamental. Essa técnica é proposta para ser utilizada como uma etapa de pré-processamento dos sinais antes da aplicação dos métodos de estimação de fasores, viabilizando a estimação das componentes fundamentais, mesmo em sistemas com elevados níveis de distorções nos sinais medidos. Por questões de simplificação, daqui em diante, chamaremos o algoritmo proposto em Soliman et al. (2004) e Soliman & Belkhat (2006) como “técnica PTDQ”, sigla esta proveniente do termo “pré-processamento baseado na TDQ”.

Neste trabalho, tem-se como objetivo a análise do desempenho da técnica PTDQ, considerando cenários representativos da operação de um sistema elétrico, incluindo situações não contempladas em Soliman et al. (2004). Neste contexto, como objetivos específicos, pode-se destacar a identificação de potencialidades e limitações da técnica PTDQ, bem como a divulgação de uma técnica que pode ser útil para diversas aplicações de grande utilidade para sistemas elétricos de potência.

2 Descrição da Técnica PTDQ

Para remover as harmônicas, inter-harmônicas e a componente CC de decaimento exponencial de sinais de corrente, por exemplo, a PTDQ utiliza a TDQ para estimar as componentes associadas apenas à frequência fundamental do sistema, que neste trabalho é 60 Hz. Nos estudos apresentados nesse trabalho, as rotinas implementadas recebem como entrada registros oscilográficos obtidos de simulações no *Alternative Transients Program* (ATP). Dessa forma, tornou-se possível avaliar situações nas quais apenas existem harmônicas em um sistema sem falta, bem como casos mais adversos de curtos-circuitos em uma linha de transmissão.

O primeiro passo da técnica PTDQ consiste no cálculo da matriz da transformada de Park e sua matriz inversa, as quais são representadas, respectivamente, em (1) e (2). Na sequência, realiza-se a multiplicação do sinal medido pela matriz descrita em (1). Nesta etapa, são obtidos os sinais de eixo direto, de eixo em quadratura e de sequência zero, representados neste trabalho como Ad , Aq e $A0$, respectivamente, onde o termo “A” pode representar tensões ou correntes. Na terceira etapa da técnica PTDQ, o valor médio dos sinais Ad , Aq e $A0$ são extraídos utilizando (3), (4) e (5). Nessas equações, “m” é o número de amostras por ciclo. Dessa forma, na etapa seguinte, subtrai-se o valor médio dos sinais obtidos da TDQ, resultando em sinais que não possuem níveis CC. Neste contexto, deve-se frisar que, nas saídas da TDQ, os níveis CC são relacionados às componentes fundamentais do sistema. Por isso, os valores médios $Ad(CC)$ e $Aq(CC)$, por exemplo, possuem informações apenas e exclusivamente da frequência de 60 Hz.

Como resultado da última etapa descrita, são obtidas as harmônicas do sinal original. O quarto passo

da técnica PTDQ é multiplicar as harmônicas do sinal sem nível CC pela matriz inversa de Park, resultando na representação das harmônicas presentes nos sinais originais. Por fim o quinto e último passo consiste na subtração das harmônicas estimadas do sinal original, resultando na representação pura da componente de 60 Hertz.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t + 120) & \sin(\omega t + 240) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t + 120) & \cos(\omega t + 240) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} * \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \sin(\omega t + 240) & \cos(\omega t + 240) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \sin(\omega t + 120) & \cos(\omega t + 120) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Ad(CC) = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m (Ad)i \quad (3)$$

$$Aq(CC) = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m (Aq)i \quad (4)$$

$$A0(CC) = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m (A0)i \quad (5)$$

Seguindo os passos apresentados, obtém-se a componente de sequência positiva dos sinais processados. Essa componente não possui harmônicas e, portanto, é mais adequada para uso como entrada dos métodos de estimação de fasores. Oportuno se faz mencionar que, para calcular a sequência negativa, basta repetir os passos do algoritmo descrito, alterando apenas a frequência de sintonia da TDQ para o negativo da frequência angular, ou seja, $-\omega$. Além disso, a sequência zero pode ser obtida repetindo, em parte, o procedimento da sequência positiva (com ω positivo). Para tanto, ao se obter a componente zero das harmônicas, segundo Soliman et al. (2004) e Soliman & Belkhat (2006), basta multiplicar os sinais pelo fator $\frac{1}{\sqrt{3}}$, o que, conforme reportado, resulta na sequência zero do sinal analisado.

Para finalizar o processo de recuperação do sinal na frequência fundamental, pode-se aplicar a estimação de fasores, somando em seguida os sinais estimados de sequência positiva, negativa e zero. Assim, torna-se possível reconstruir fasorialmente os sinais ABC do sistema.

3 Algoritmo de Estimação de Fasores

Neste trabalho, consideram-se três algoritmos de estimação de fasores disponíveis na literatura a serem aplicados considerando os sinais originais com conteúdo harmônico e os sinais pré-processados por meio da técnica PTDQ: Algoritmo de Fourier de um e meio ciclo, chamados em inglês de *Full Cycle Discrete Transform of Fourier* (FCDFT) e *Half Cycle Discrete Transform of Fourier* (HCDFT), respectivamente, e um algoritmo de janela curta que requer apenas duas amostras do sinal avaliado (Phadke & Thorp, 2009).

Vale mencionar que os algoritmos FCDFT e HCDFT utilizam a Transformada Discreta de Fourier no processo de estimação da parte real e imaginária dos fasores em questão, usando, para tanto, janelas de dados que deslizam no tempo sobre os sinais avaliados e que possuem um tamanho que é equivalente a um ciclo e meio ciclo fundamental, respectivamente. O terceiro algoritmo avaliado é o mais simples. Sua janela não é proporcional ao período do sinal e possui duas amostras apenas. Nesse contexto, sabe-se que, quanto maior for a janela de dados, melhor é a filtragem das componentes não fundamentais, o que inclui a componente CC de decaimento exponencial em sinais de falta. Assim, serão avaliadas as vantagens e limitações da técnica PTDQ como etapa de pré-processamento dos sinais a terem seus fasores estimados.

4 Resultados e análises

4.1 Cenários Considerados

Foram realizados vários testes considerando diversos cenários adversos que um sistema elétrico pode enfrentar. Basicamente, foram consideradas situações de curtos-circuitos com diferentes ângulos de incidência, nas quais se verificam situações de componentes CC de decaimento exponencial relevantes e não relevantes, bem como cenários nos quais não ocorrem faltas, mas existem harmônicas pares, ímpares e inter-harmônicas nos sinais avaliados. Em cada situação, foram analisados apenas sinais de corrente e a estimação fasorial de suas sequências positivas após o processamento, os quais são suficientes para a consolidação da investigação inicialmente proposta. Por questões de simplificação, foram utilizados os seguintes subscritos: “p”, para representar o sinal pré-processado de sequência positiva pela técnica PTDQ, “FCDFT”, “HCDFT” e “2am” para representar as saídas do módulo estimado dos fasores quando considerados os métodos FCDFT, HCDFT e de 2 amostras, respectivamente.

Conforme mencionado anteriormente, o sistema utilizado nas simulações tem tensão nominal de 230 kV e foi modelado no ATP por meio do software software ATPDraw, conforme ilustrado na Figura 1. O tempo de simulação considerado foi de 0,3 s, com passo de integração de 1 μ s, considerando a linha modelada a parâmetros distribuídos e constantes na frequência. Quando necessário, um bloco para simulação

de faltas foi ativado, tornando possível alterar as características do curto como, por exemplo, o ângulo de incidência, tipo e resistência de falta. Neste trabalho, apenas curtos-circuitos francos AT foram considerados.

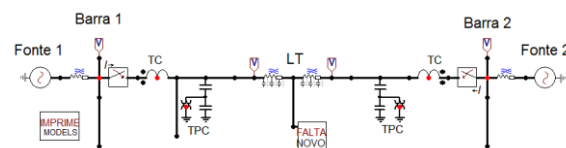


Figura 1 – Circuito simulador de faltas

Para simulação das harmônicas e inter-harmônicas no sinal, obteve-se inicialmente do ATP um sinal sem curto, sendo este editado para conter as harmônicas de interesse. Para tanto, utilizou-se a adição de um sinal senoidal com as características das harmônicas a serem analisadas, as quais serão explicadas a cada etapa da avaliação.

4.1 Resultados Obtidos

As primeiras simulações realizadas foram de um sinal monofásico com falta. Conforme reportado na literatura, os sinais com falta podem apresentar uma componente CC de decaimento exponencial, cuja amplitude depende, dentre outros fatores, do ângulo de incidência do curto. Nesta primeira etapa da avaliação, foram considerados ângulos de incidência de 0° e 90°, os quais resultaram em situação de alta e baixa componentes CC de decaimento exponencial, respectivamente. Os resultados obtidos são ilustrados nas Figuras de 2 a 7 ilustradas a seguir.

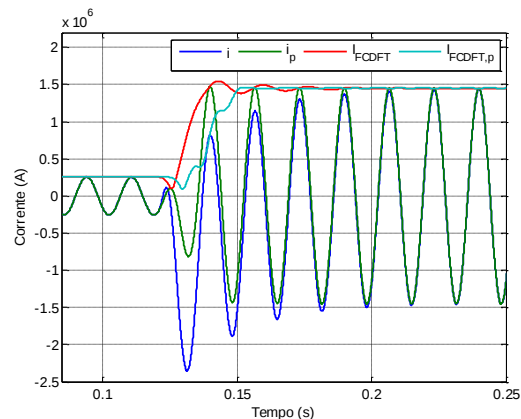


Figura 2 – Caso de alta exponencial usando o método FCDFT.

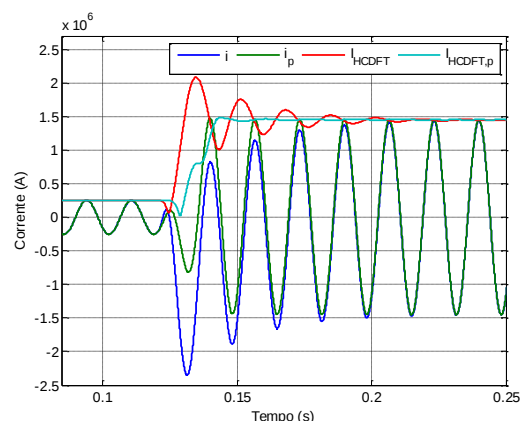


Figura 3 – Caso de alta exponencial usando o método HCDFT.

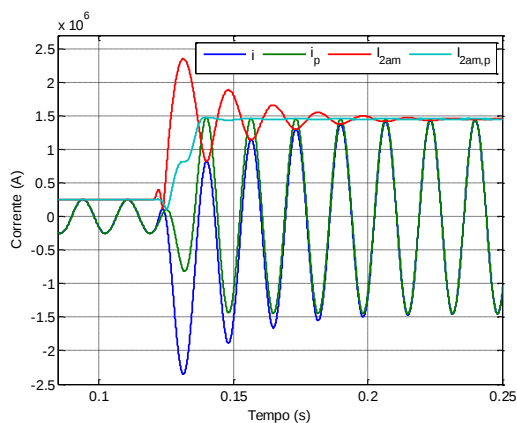


Figura 4 – Caso de alta exponencial usando 2 amostras.

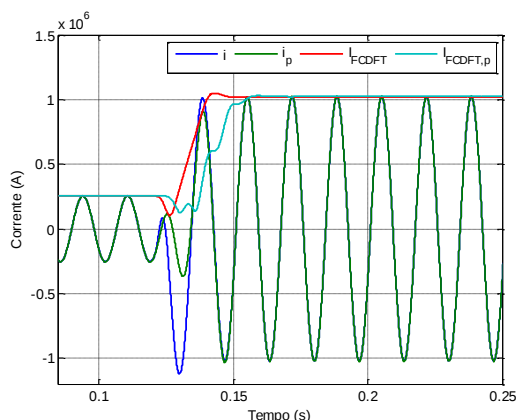


Figura 5 – Caso de baixa exponencial usando o método FCDFT.

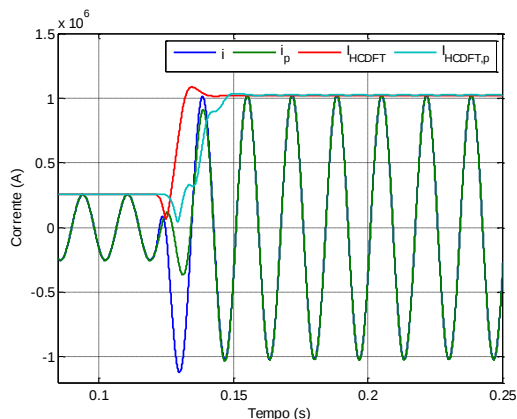


Figura 6 - Caso de baixa exponencial usando o método HCDFT.

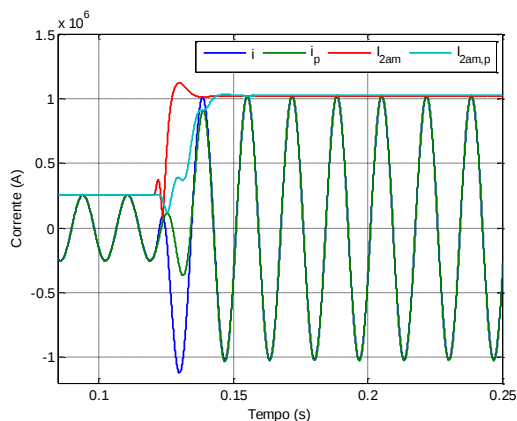


Figura 7 – Caso de baixa exponencial usando 2 amostras.

Observa-se que a estimação fasorial dos métodos avaliados estabiliza mais rapidamente quando a técnica PTDQ é utilizada como uma etapa de pré-processamento. De fato, comparando o sinal original i com o sinal pré-processado i_p , nota-se que, nos primeiros momentos de falta, a componente exponencial é atenuada, impedindo que a estimação fasorial seja afetada. Deve-se destacar que os métodos HCDFT e de 2 amostras, os quais oscilaram de forma significativa quando da utilização dos sinais originais como entradas, passaram a ter um melhor comportamento após a aplicação da técnica PTDQ. No entanto, devido à necessidade do cálculo do valor médio das componentes A_d , A_q e A_0 , conforme explicado na Seção 2, verifica-se um atraso adicional nos métodos de estimação de fasores, o que pode ser visualizado comparando os módulos estimados apenas com os métodos de estimação fasorial (I_{FCDFT} , I_{HCDFT} e I_{2am}) e usando a técnica PTDQ como etapa adicional ($I_{FCDFT,p}$, $I_{HCDFT,p}$ e $I_{2am,p}$).

Nas Figuras, nota-se que o atraso adicional supracitado é proporcional à soma da janela utilizada no processo de estimação fasorial com a janela de um ciclo usada pela técnica PTDQ para estimação dos valores médios de A_d , A_q e A_0 . Ainda assim, embora esse atraso seja uma limitação dos métodos apresentados em Soliman et al. (2004) e Soliman & Belkhat (2006), deve-se destacar que em todos os casos, o uso da técnica PTDQ melhorou a estabilização dos fasores nos cenários de alta componente exponencial, sem comprometer a convergência dos fasores nos casos de baixa componente exponencial. Assim, para aplicações em que não se tem a preocupação com a velocidade de convergência dos fasores estimados, a técnica PTDQ será muito vantajosa, o que ficará mais evidente após a análise dos casos a seguir.

Nas Figuras de 8 a 10, apresentam-se os resultados do uso da técnica PTDQ quando considerada a inserção de harmônicas ímpares de 7ª ordem nos sinais avaliados a partir de 0,135 s da simulação. Daqui em diante, o subscrito “h” representará os sinais com a presença de harmônicas.

Dos resultados, percebe-se que, para o caso de harmônicas ímpares, apenas o método de 2 amostras é afetado. De fato, os algoritmos FCDFT e HCDFT são capazes de eliminar harmônicas ímpares, não sendo, portanto, influenciados de forma significativa. Nesse contexto, é oportuno destacar que o uso da técnica PTDQ viabilizou a correta estimação dos fasores, mesmo quando utilizado o método de 2 amostras. Nota-se na Figura 10 que, após o pré-processamento do sinal, o módulo estimado do fasor estabiliza, evidenciando a correta eliminação das harmônicas.

Nas Figuras de 11 a 13, apresentam-se os resultados para o caso de inserção de harmônicas pares de 4ª ordem nos sinais avaliados a partir de 0,135 s da simulação. Para este cenário, o impacto do uso da técnica PTDQ fica mais evidente, especialmente para os métodos HCDFT e de 2 amostras, os quais não eliminam harmônicas pares.

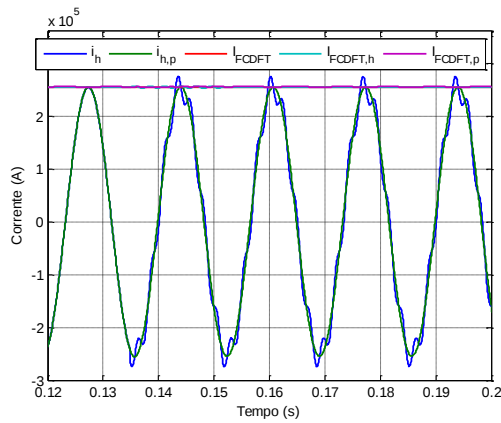


Figura 8 – Caso de harmônicas ímpares usando o método FCDFT.

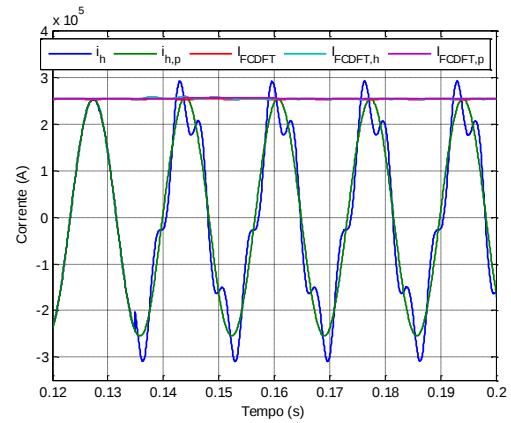


Figura 11 – Caso de harmônicas pares usando o método FCDFT.

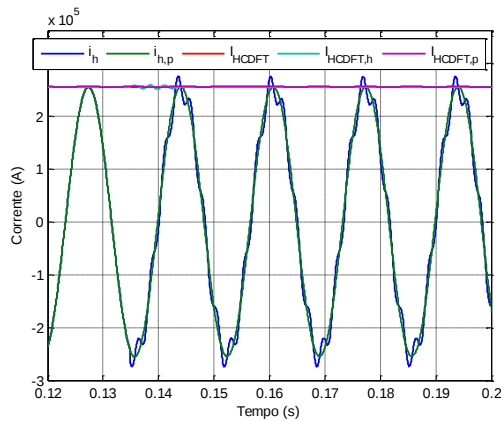


Figura 9 – Caso de harmônicas ímpares usando o método HCDFT.

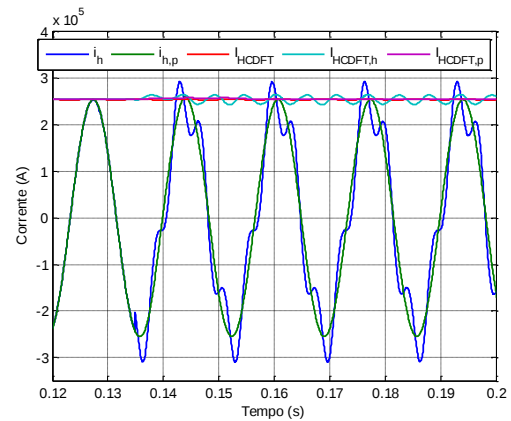


Figura 12 – Caso de harmônicas pares usando o método HCDFT.

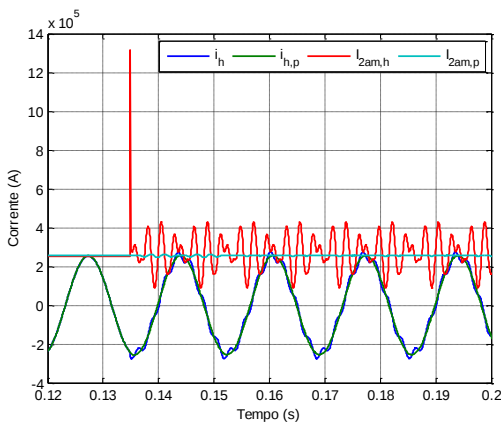


Figura 10 – Caso de harmônicas ímpares usando 2 amostras.

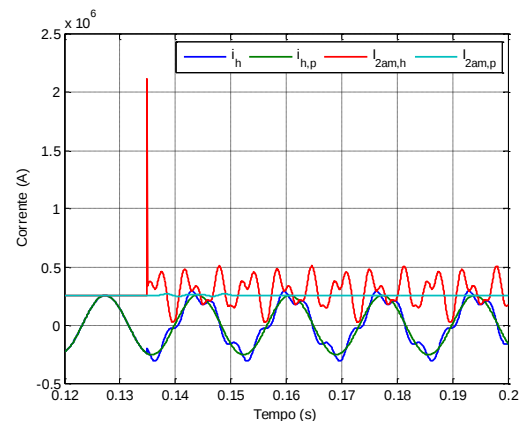


Figura 13 – Caso de harmônicas pares usando 2 amostras.

Dos resultados apresentados, é notório que para os casos analisados até então, o método FCDFT não requer a etapa de pré-processamento baseada na técnica PTDQ. Isso se deve ao fato do algoritmo FCDFT eliminar harmônicas ímpares e pares. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, o mesmo não ocorre para os algoritmos HCDFT e de 2 amostras. Por não eliminar as harmônicas pares, esses métodos resultam em fasores que oscilam ao longo do tempo, o que é uma limitação desses métodos. No entanto, ao aplicar a técnica PTDQ, essas oscilações somem, viabilizando o cálculo correto dos fasores fundamentais de interesse. Tal fato evidencia a eficiência da técnica PTDQ no processo de eliminação de harmônicas.

Dentre os casos mais críticos para os métodos de estimação fasorial, destaca-se o cenário no qual existem inter-harmônicas nos sinais medidos. Nenhum dos métodos de estimação fasorial avaliados nesse trabalho são capazes de eliminar inter-harmônicas, mesmo o FCDFT que apresentou o melhor desempenho nos casos anteriores. Nas Figuras de 14 a 16, apresentam-se os resultados obtidos, quando da inserção de harmônicas de 4ª e 7ª ordem e de uma frequência de 3,5 vezes 60 Hz nos sinais avaliados a partir de 0,135 s da simulação. Conforme esperado, todos os métodos resultaram em oscilações. Além disso, nota-se que a aplicação da técnica PTDQ reduziu as referidas oscilações nos fasores, mas não as eliminou completamente.

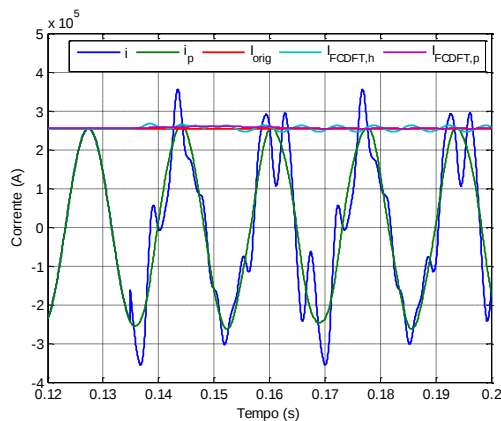


Figura 14 – Caso de inter-harmônicas usando FCDFT.

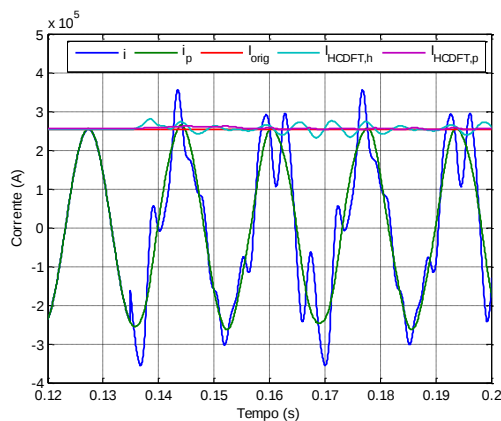


Figura 15 - Caso de inter-harmônicas usando HCDFT.

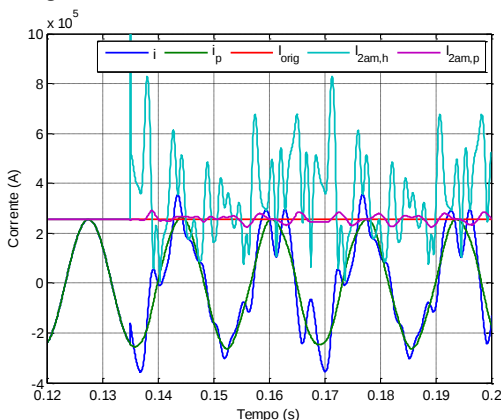


Figura 16 – Caso de inter-harmônicas usando 2 amostras.

Em relação aos resultados obtidos, deve-se destacar que o uso da técnica PTDQ viabilizou uma estimativa mais correta dos fasores, melhorando os resultados de todos os métodos avaliados. Por exemplo, para os métodos FCDFT e HCDFT, as oscilações nos fasores foram praticamente eliminadas. Por outro lado, para o método de 2 amostras, algumas oscilações persistiram, porém muito menos relevantes do que as verificadas quando da não utilização da técnica PTDQ. Assim, pode-se concluir que a inclusão da etapa de pré-processamento apresentada em Soliman et al. (2004) e Soliman & Belkhat (2006) é interessante para as funções de estimação de fasores, exceto dos atrasos adicionais provenientes da janela de média utilizada durante a extração da componente fundamental.

5 Conclusão

Neste trabalho, realizou-se o estudo das vantagens e desvantagens do uso da transformada de Park como uma etapa de pré-processamento de sinais medidos em sistemas elétricos durante o processo de estimação fasorial. A técnica, denominada neste artigo de PTDQ, foi aplicada em conjunto com três métodos diferentes de estimação de fasores: FCDFT, HCDFT e um método de 2 amostras. Dentre os cenários avaliados, foram consideradas situações de faltas, analisando casos de alta e baixa componente CC de decaimento exponencial, bem como situações nas quais os sinais medidos contêm conteúdo harmônico (pares e ímpares) e inter-harmônico.

Dos resultados obtidos, conclui-se que a técnica PTDQ melhora o processo de estimação dos fasores, especialmente em casos da presença de harmônicas e inter-harmônicas que porventura não sejam eliminadas pelos algoritmos de estimação. Como limitação, destaca-se um atraso adicional verificado na estimação das componentes fundamentais, o qual decorre de uma janela de média utilizada no algoritmo da PTDQ. Mesmo assim, de uma forma geral, pode-se dizer que a aplicação da PTDQ é vantajosa para aplicações em sistemas elétricos, especialmente quando não existe preocupação com a velocidade de convergência dessas estimativas.

Referências Bibliográficas

- Saha, M. M.; Izykowski, J.; Rosolowski, E. (2010). Fault Location on Power Networks. London: Ed. Springer, ISBN 978-1-84882-885-8.
- Anderson, P. M. (1999). Power System Protection. Piscataway, NJ - USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- jLopes, F. V.; Barros, D.; Reis, R.; Nascimento, J.; Brito, N.; Neves, W.; Moraes, S. (2015). Disturbance Analysis and Protection Performance Evaluation.
- Almeida, W.G. and Damasceno, W.F (1995). Circuitos Polifásicos. FINATEC.
- Phadke, A. G.; Thorp, J. S. (2009). Computer Relaying for Power Systems. 2nd. ed. New York, USA: John Wiley & Sons Inc.
- Benmouyal, G. (1995). Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 10, n. 2, p. 621–630.
- Soliman, S.A; Alammari, R.A. and El-Hawary, M.E (2004). A new digital transformation for harmonics and DC offset removal for the distance fault locator algorithm. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 26 (2004) 389- 395
- Soliman, S. A. and Belkhat M (2006). Power Systems Fault Type Identification Based on Park's Transformation Algorithm. IEEE Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Halifax, NS, 2006, pp. 141-145.