

CORREÇÃO FASORIAL DA TENSÃO SECUNDÁRIA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS

DÉBORA TAYNARA DO NASCIMENTO FERNANDES*, EUBIS PEREIRA MACHADO*, DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR[†], WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES[†]

**Colegiado de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Vale do São Francisco
Av. Antônio Carlos Magalhães, 510, Santo Antônio, Juazeiro-BA, Brasil*

*[†]Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, Campina Grande-PB, Brasil*

*E-mails: debora.tnf@gmail.com, eubis.machado@univasf.edu.br,
damasio@dee.ufcg.edu.br, waneves@dee.ufcg.edu.br*

Abstract— This work presents the investigation of a method for the correction of phasors of the coupling capacitor voltage transformer secondary voltage. The method investigated is based on a simple digital filter, and does not depend directly on the topology nor on the characteristics of the protected system. To investigate the method, the essential modules of a basic numerical digital relay were implemented first, through algorithms, on the MATLAB platform. Also in this platform, later, the phasor estimation algorithms and the voltage corrector filter were implemented. The input data used were oscillographic records obtained through simulations in the ATP (Alternative Transient Program) of a test system that operates under short circuit conditions. Phasor estimation algorithms were evaluated according to performance indices in relation to oscillations, overshoots and convergence velocity. The simulations prove the efficacy of the filter phasor voltage corrector, in addition to its better effectiveness in conjunction with Guo algorithm.

Keywords— Capacitive voltage transformer, digital filter, phasor estimation, phasor correction.

Resumo— Este trabalho apresenta a investigação de um método para correção do fasor tensão do secundário de transformadores de potencial capacitivos. O método investigado é baseado em um filtro digital simples, e não depende diretamente nem da topologia nem das características do sistema protegido. Para investigação do método, primeiramente foi implementado os principais módulos de um relé numérico digital básico, por meio de algoritmos na plataforma MATLAB. Ainda nesta plataforma, posteriormente, implementou-se os algoritmos de estimação de fasores e o filtro corretor de tensão. Os dados de entrada utilizados foram registros oscilográficos obtidos via simulação no ATP (*Alternative Transient Program*) de um sistema teste que opera sob condições de curto-circuito. Os algoritmos de estimação de fasores foram avaliados segundo índices de desempenho em relação às oscilações, *overshoots* e velocidade de convergência. As simulações comprovam a eficácia do filtro corretor do fasor tensão, além de sua melhor eficácia em conjunto com algoritmo de Guo.

Palavras-chave— Transformador de potencial capacitivo, filtro digital, estimação de fasores, correção fasorial.

1 Introdução

Em sistemas elétricos de potência (SEP) com tensões superiores a 138 kV, normalmente utilizam-se transformadores de potencial capacitivos (TPC), que são transdutores de tensão com o propósito de reduzir o nível de tensão a valores adequados aos instrumentos de medição, proteção e controle. Contudo, a tensão secundária desses transdutores pode apresentar erros de amplitude e de fase quando o sistema opera tanto em regime permanente quanto transitório. Na tecnologia atual, relés numéricos com a função de distância integrada fazem uso de filtros digitais para extrair a componente fundamental dos sinais tensão e corrente presentes no secundário dos TPC e dos transformadores de corrente (TC), respectivamente. A partir de operações algébricas com os valores da amplitude e da fase dos fasores computados, os relés tomam sua decisão de operação.

Com o advento dos relés numéricos, diversas técnicas de correção da tensão secundária de TPC têm sido reportadas na literatura (IZYKOWSKI et al., 1998; KANG et al., 2009; PAJULEO et al., 2008; AJAEI et al., 2012; YU et al., 2015; MACHADO et al., 2018).

Contudo, no estado atual de fabricação dos relés numéricos, essas técnicas de correção só podem incorporadas aos relés durante o processo de fabricação. Isto se deve ao fato dos dispositivos disponibilizarem para o usuário apenas os fasores tensão e corrente, não permitindo o processamento dos sinais antes da etapa de estimação de fasores. Dentre os trabalhos reportados na literatura, Yu et al. (2015) é um dos poucos que propõe uma metodologia de correção dos fasores, mas que apresenta limitações por requerer o modelo de TPC e seus parâmetros, informações dificilmente obtidas na prática.

Como uma extensão do trabalho de Machado et al. (2018), onde um processo de síntese de filtros digitais recursivos (FDR) foi desenvolvido para corrigir amostras temporais da tensão secundária de TPC, independentemente do modelo de TPC e dos seus parâmetros, este trabalho investiga a aplicabilidade dos FDR na correção dos fasores obtidos via amostras da tensão secundária. A fim de avaliar índices de desempenho dos fasores da tensão secundária de um TPC de 500kV, são empregadas diferentes técnicas de estimação. Os sinais temporais de tensão correspondem a registros oscilográficos obtidos via simulação de um sistema teste no ATP

(Alternative Transient Program), enquanto a estimação fasores, o FDR, bem como os principais módulos de um relé numérico foram desenvolvidos na plataforma MATLAB.

2 Representação computacional de relés numéricos

A modelagem via *software* dos diversos componentes de um relé numérico é onerosa, de modo que se recorre apenas a implementação das principais unidades, tais quais apresentadas na Figura 1.

Para o detalhamento e implementação computacional dos diversos elementos presentes nos módulos pode-se reportar a Loiola (2015). Apenas o processo de estimação fasores será delineado neste trabalho, pois se trata do objeto em estudo.

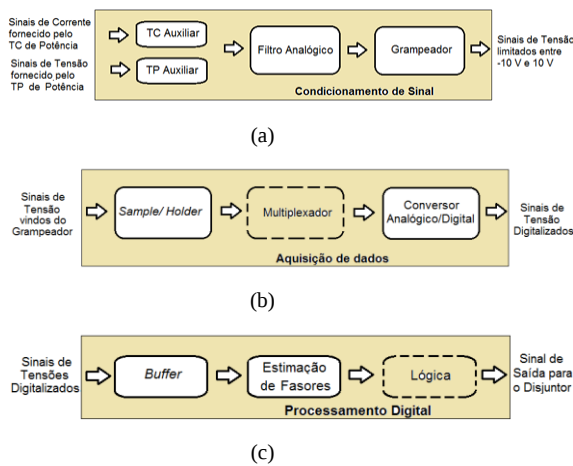


Figura 1 - Representação da estrutura básica de um relé numérico. (a) Módulo de condicionamento de sinais. (b) Módulo aquisição de dados. (c) Módulo de processamento digital.

3 Estimação de fasores

A proposição de algoritmos de estimação de fasores é uma área em constante evolução. De modo geral, busca atender requisitos especiais como rejeição à componente DC de decaimento exponencial e componentes harmônicas, banda de passagem em torno da frequência fundamental e uma boa resposta transitória.

A fim de investigar o desempenho da correção fasorial dos transitórios da tensão secundária de um TPC 500 kV, foram implementados os algoritmos de filtragem baseados na Transformada de Fourier, o algoritmo Cosseno Modificado (HART et al., 2000) e o algoritmo de Guo (GUO et al., 2003).

3.1 Algoritmos baseados na transformada de Fourier

Filtros digitais baseados na Transformada de Fourier utilizam amostras de um, meio ou frações do ciclo de um sinal $x(t)$ para extrair a componente fundamental do sinal. Como apenas amostras de $x(t)$ são processadas, os filtros de Fourier podem ser investigados por meio da DFT (*Discrete Fourier Transform*).

A DFT pode ser escrita na forma exponencial complexa por:

$$\hat{X}_h = M_0 \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-jn \frac{2\pi h}{N}} \quad (1)$$

Em que:

- $\hat{X}_h$ – fasor da h -ésima componente harmônica de $x(n)$;
- M_0 – fator de correção da amplitude da DFT;
- $x(n)$ – sequência de amostras de um sinal contínuo $x(t)$;
- n – ordem das amostras de entrada, $n = 0, 1, \dots, N-1$;
- N – número de amostras por ciclo de $x(n)$;
- j – operador $\sqrt{-1}$;
- h – ordem da frequência harmônica, $h = 0, 1, \dots, N-1$.

Sob a ótica de sistemas elétricos, a sequência $x(n)$ corresponde a amostras de tensão ou de corrente oriundas do secundário dos transformadores para instrumentos. Logo, apresenta uma componente senoidal com um valor de pico A_0 dentro da janela de comprimento N . Segundo Lyon (2010), como resultado da DFT, essa componente apresentará a amplitude $\frac{A_0 N}{2}$. Portanto, para se obter a amplitude correta da componente utiliza-se o fator de correção:

$$M_0 = \frac{2}{N} \quad (2)$$

Apresentando numa forma conveniente para a implementação computacional, a parte real e imaginária da componente fundamental, contemplando uma janela de N amostras, quando a k -ésima amostra de $x(n)$ está sendo processada vale, respectivamente:

$$X_{ReDFT}(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(k-n) \cos\left(\frac{2\pi}{N}(n+1)\right) \quad (3)$$

$$X_{ImDFT}(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(k-n) \sin\left(\frac{2\pi}{N}(n+1)\right) \quad (4)$$

Estas equações formam o filtro de Fourier de um ciclo. A amplitude e fase da componente fundamental de $x(n)$ extraídas por esse filtro valem, respectivamente:

$$|\hat{X}_1(k)| = \sqrt{X_{Re}^2(k) + X_{Im}^2(k)} \quad (5)$$

$$\phi_1(k) = \tan^{-1}\left(\frac{X_{Im}(k)}{X_{Re}(k)}\right) \quad (6)$$

De modo análogo ao filtro de Fourier de um ciclo, o filtro de Fourier de meio ciclo também consiste em extrair a componente fundamental de $x(n)$ a partir do produto deste sinal com as funções seno e cosseno. A diferença deste algoritmo para o de um ciclo é o uso de

apenas metade das amostras de um ciclo. As componentes estimadas pelo filtro de Fourier de meio ciclo são:

$$X_{ReDFT2}(k) = \frac{4}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(k-n) \cos\left(\frac{2\pi}{N}(n+1)\right) \quad (7)$$

$$X_{ImDFT2}(k) = \frac{4}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(k-n) \sin\left(\frac{2\pi}{N}(n+1)\right) \quad (8)$$

3.2 Algoritmo Cosseno Modificado

Schweitzer & Hou (1993) propuseram uma nova estratégia de filtragem denominada de filtro cosseno. Nela, o filtro cosseno de Fourier é aplicado à janela de dados atual e a uma janela de dados defasada de um quarto de ciclo, pois os autores concluíram que este filtro apresenta melhores características de filtragem do que os de Fourier em relação à eliminação da componente DC de decaimento exponencial. Porém, o filtro possui a desvantagem de apresentar um atraso de um quarto de ciclo com relação ao algoritmo de Fourier de um ciclo, o que levou Hart et al. (2000) a desenvolverem uma nova versão: Filtro Cosseno Modificado.

As expressões que permitem o cálculo das partes real e imaginária da componente fundamental do sinal são apresentadas pelas Equações (9) e (10) (HART et al., 2000). Observa-se que o cálculo da parte real é idêntico ao filtro de Fourier de um ciclo.

$$X_{ReCOS}(k) = X_{ReDFT}(k) \quad (9)$$

$$X_{ImCOS}(k) = \frac{X_{ReCOS}(k-1) - X_{ReCOS}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \quad (10)$$

3.3 Algoritmo de Guo

Guo et al. (2003) propuseram um novo algoritmo para eliminação da componente DC de decaimento exponencial através da definição de novas somas parciais das amostras em um ciclo de sinal. Este algoritmo também é baseado em adaptações do algoritmo de Fourier de um ciclo, havendo modificações no cálculo da parte imaginária conforme se pode verificar nas equações que regem o algoritmo (GUO et al., 2003):

$$X_{ReGUO}(k) = X_{ReDFT}(k) \quad (11)$$

$$X_{ImGUO}(k) = X_{ImDFT}(k) + \frac{2}{N} \cot g\left(\frac{2\pi}{N}\right) (PS_2 - PS_1) \quad (12)$$

Em que,

$$PS_1 = \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} x(2n-1) \quad (13)$$

$$PS_2 = \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} x(2n) \quad (14)$$

4 Filtro digital recursivo para correção dos fasores da tensão secundária de TPC

Uma metodologia de obtenção de filtros digitais capazes de corrigir os transitórios de baixa frequência presentes na tensão secundária de TPC foi apresentada em Machado et al. (2018). Apesar de ter proporcionado melhorias na segurança, na confiabilidade e na velocidade da proteção de distância, os filtros digitais recursivos foram concebidos para processarem amostras temporais da tensão secundária de TPC, as quais não são acessíveis aos usuários dos relés numéricos comerciais. Sabendo-se que apenas os fasores são disponibilizados para processamento, segundo a tecnologia empregada por alguns fabricantes, esta seção estende a metodologia proposta por Machado et al. (2018), no sentido demonstrar que os filtros digitais utilizados para corrigir amostras temporais da tensão secundária de TPC também podem ser empregados para corrigir os fasores obtidos a partir de amostras da tensão secundária.

Assumindo a premissa de que existe um FDR capaz de corrigir os transitórios de baixa frequência presentes nas amostras temporais, $x(n)$, da tensão secundária de um TPC, então a função de transferência de tal filtro pode ser expressa na forma:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{i=0}^{gn} a_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^{gd} b_i z^{-i}} \quad (15)$$

Expressando o sinal de saída do filtro $H(z)$, tem-se:

$$Y(z) = \sum_{i=0}^{gn} a_i X(z) z^{-i} - \sum_{i=1}^{gd} b_i Y(z) z^{-i} \quad (16)$$

Aplicando a transformada z inversa na Equação (16), tem-se a equação de diferenças:

$$y(k) = \sum_{i=0}^{gn} a_i x(k-i) - \sum_{i=1}^{gd} b_i y(k-i) \quad (17)$$

Sendo $x(k-i)$ e $y(k-i)$ a i -ésima amostra temporal da tensão secundária do TPC e da tensão secundária corrigida, respectivamente.

Definindo-se h_c e h_s como sendo filtros digitais responsáveis por extrair as componentes real e imaginária de uma janela móvel contendo N amostras de $y(k)$, as componentes real e imaginária do fasor $\hat{Y}(k)$ podem ser expressas, respectivamente, por:

$$Y_{c1}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(k-n)h_c(n+1) \quad (18)$$

$$Y_{s1}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(k-n)h_s(n+1) \quad (19)$$

Substituindo-se a Equação (17) em (18) e (19) tem-se, respectivamente:

$$Y_{c1}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{gn} a_i x(k-n-i) h_c(n+1) - \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{gn} b_i y(k-n-i) h_c(n+1) \quad (20)$$

$$Y_{s1}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{gn} a_i x(k-n-i) h_s(n+1) - \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{gn} b_i y(k-n-i) h_s(n+1) \quad (21)$$

Invertendo-se a ordem dos somatórios nas Equações (20) e (21), tem-se as equações equivalentes:

$$Y_{c1}(k) = \sum_{i=0}^{gn} a_i \sum_{n=0}^{N-1} x(k-n-i) h_c(n+1) - \sum_{i=1}^{gd} b_i \sum_{n=0}^{N-1} y(k-n-i) h_c(n+1) \quad (22)$$

$$Y_{s1}(k) = \sum_{i=0}^{gn} a_i \sum_{n=0}^{N-1} x(k-n-i) h_s(n+1) - \sum_{i=1}^{gd} b_i \sum_{n=0}^{N-1} y(k-n-i) h_s(n+1) \quad (23)$$

Uma vez que os filtros digitais h_c e h_s extraem as componentes real e imaginária, respectivamente, das N amostras de $x(k-n)$ e de $y(k-n)$, pode-se escrever:

$$Y_{c1}(k) = \sum_{i=0}^{gn} a_i X_{c1}(k-i) - \sum_{i=1}^{gd} b_i Y_{c1}(k-i) \quad (24)$$

$$Y_{s1}(k) = \sum_{i=0}^{gn} a_i X_{s1}(k-i) - \sum_{i=1}^{gd} b_i Y_{s1}(k-i) \quad (25)$$

Sendo $Y_{c1}(k)$ e $Y_{s1}(k)$ a parte real e imaginária de $\hat{Y}(k)$. A forma cartesiana deste fasor assume a forma:

$$\hat{Y}(k) = \sum_{i=0}^{gn} a_i \hat{X}(k-i) - \sum_{i=1}^{gd} b_i \hat{Y}(k-i) \quad (26)$$

Em que $\hat{X}(k-i)$ e $\hat{Y}(k-i)$ correspondem a i -ésima amostra fasorial da tensão secundária do TPC e da tensão secundária corrigida, respectivamente.

Com exceção ao domínio de operação, nota-se que as Equações (17) e (26) são equivalentes. Portanto, presume-se que se existe um filtro digital $H(z)$ capaz de corrigir amostras temporais da tensão secundária de um TPC, então o digital filtro poderá ser aplicado para corrigir amostras dos fasores da tensão secundária.

5 Resultados e discussões

Para investigar a análise de desempenho do processo de correção fasorial da tensão secundária de um TPC de 500 kV, fez-se uso do sistema elétrico apresentado na Figura 2, cujos valores de SIR (System impedance Ratio) são os indicados. As linhas de transmissão são de mesmo comprimento físico e seus parâmetros são apresentados nas Tabelas 1 e 2. As tensões das fontes são aquelas indicadas na Tabela 3.

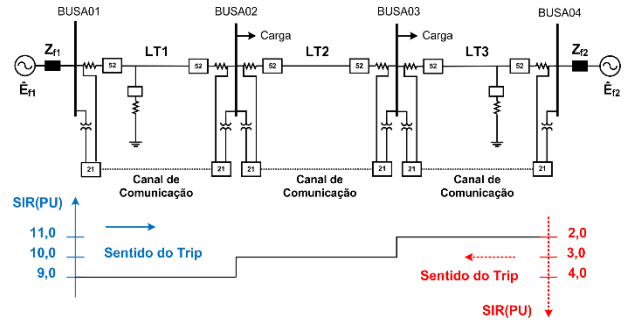


Figura 2 - Sistema elétrico utilizado para análise de desempenho da correção fasorial da tensão secundária do TPC de um TPC 500 kV.

Tabela 1. Parâmetros de sequência zero da linha de transmissão.

Tensão da LT (kV)	Sequência zero			Comp. (km)
	R0(Ω/km)	X0(Ω/km)	Y0(Ω/km)	
500	0,3763	1,411	3,064	250

Tabela 2. Parâmetros de sequência positiva da linha de transmissão.

Tensão da LT (kV)	Sequência positiva			Comp. (km)
	R1(Ω/km)	X1(Ω/km)	Y1(Ω/km)	
500	0,0246	0,3219	5,12	250

Tabela 3. Tensão das fontes.

Fonte	Módulo (pu)	Fase (graus)
1	1	20
2	0,95	0

O sistema foi representado no ATP (*Alternative Transient Program*) de modo a se obter registros oscilográficos a serem processados pelo modelo de relé numérico apresentado na Figura 1. Por simplicidade, apenas as tensões secundárias dos TPC instalados nas fases A e B do terminal emissor da LT2 (BUSA02) foram investigadas durante a ocorrência de faltas bifásicas envolvendo as fases A e B da LT2.

5.1 Índices de desempenho

Com os relés numéricos implementados computacionalmente, os fasores das tensões do secundário e do primário do TPC foram estimados pelos filtros de Fourier de um ciclo, de meio ciclo, filtro cosseno modificado e filtro de Guo. Conhecidos os fasores da tensão secundária, os mesmos foram processados pelo FDR.

Para avaliar quantitativamente cada método utilizado na estimação fasorial, utilizou-se os índices de desempenho propostos por Benmouyal (1995) e por Balamourougan e Sidhu (2006). Estes índices, que vão de ID_1 a ID_6 , medem diversas características referentes à resposta dos algoritmos de estimação de fasores.

Os índices ID_1 e ID_2 estão relacionados com o nível de oscilação da resposta em amplitude e são expressos por (SILVA, 2014; MACHADO et al., 2011):

$$ID_1 = \sum_{k=T_0A}^{NT} [amp - y(k)]^2 \Delta t \quad (27)$$

$$ID_2 = \sum_{k=T_0\theta}^{NT} [ang - \theta(k)]^2 \Delta t \quad (28)$$

Sendo, T_0A o número da amostra onde a amplitude converge, $T_0\theta$ o número da amostra onde o ângulo de fase converge, NT o número de ciclos investigados, amp o módulo do fasor da tensão de referência (réplica da tensão primária), $y(k)$ o módulo do fasor da tensão secundária, ang o ângulo da tensão de referência, $\theta(k)$ o ângulo de fase da tensão secundária e Δt o intervalo de tempo entre as amostras.

Valores de ID_1 e ID_2 devem ficar próximos de zero para indicar que a saída está sendo pouco influenciada por oscilações. Na simulação, para determinar T_0A , foi considerado que a amplitude do sinal converge quando o nível de oscilação é menor que 0,001 pu, e que o ângulo de fase converge quando a oscilação é menor do que 2° .

Nas Tabelas 4 e 5 encontram-se os resultados do índice ID_1 de cada algoritmo utilizado, para as fases A e B, respectivamente, comparando-se tanto os valores sem quanto os valores com o uso do FDR.

Tabela 4. Índices ID_1 dos algoritmos investigados - fase A.

Índice de desempenho	Fourier de um ciclo	Fourier de meio ciclo	Cosseno modificado	Guo
ID1 sem FDR	83,043E-06	29,205E-06	16,935E-06	36,461E-06
ID1 com FDR	1,4187E-06	233,82E-06	2,7306E-06	2,2429E-06

Tabela 5. Índices ID_1 dos algoritmos investigados - fase B.

Índice de desempenho	Fourier de um ciclo	Fourier de meio ciclo	Cosseno modificado	Guo
ID1 sem FDR	11,778E-06	28,417E-06	1600,0E-06	257,18E-06
ID1 com FDR	1,2269E-06	43,347E-06	2,6473E-06	2,4780E-06

Nas Tabelas 6 e 7 encontram-se os resultados do índice ID_2 de cada algoritmo utilizado, para as fases A e B, respectivamente, comparando-se tanto os valores sem quanto os valores com o uso do filtro corretor.

Tabela 6. Índices ID_2 dos algoritmos investigados - fase A.

Índice de desempenho	Fourier de um ciclo	Fourier de meio ciclo	Cosseno modificado	Guo
ID2 sem FDR	128,1409	66,1488	0,3862	130,4601
ID2 com FDR	4,7603E-04	2484E-04	9,1805E-04	7,1919E-04

Tabela 7. Índices ID_2 dos algoritmos investigados - fase B.

Índice de desempenho	Fourier de um ciclo	Fourier de meio ciclo	Cosseno modificado	Guo
ID2 sem FDR	190,8495	135,1170	133,3001	131,3310
ID2 com FDR	549,02E-06	134,3083	981,12E-06	732,38E-06

Os índices ID_3 e ID_4 estão relacionados com o nível de *overshoot* da resposta em amplitude e ângulo de fase. Estes índices são expressos por (SILVA, 2014; MACHADO et al., 2011):

$$ID_3 = 100. |y_{max}(k) - amp| \quad (29)$$

$$ID_4 = 100. |\theta_{max}(k) - ang| \quad (30)$$

Sendo $y_{max}(k)$ o valor máximo de $y(k)$, e $\theta_{max}(k)$ o valor máximo de $\theta(k)$.

Nas Tabelas 8 e 9 encontram-se os resultados do índice ID_3 de cada algoritmo utilizado, para as fases A e B, respectivamente, comparando-se tanto os valores sem, quanto os valores com o uso da correção fasorial.

Tabela 8. Índices ID_3 dos algoritmos investigados - fase A.

Índice de desempenho	Fourier de um ciclo	Fourier de meio ciclo	Cosseno modificado	Guo
ID3 sem FDR	119,6710	239,6861	84,8408	87,4205
ID3 com FDR	1,2713	4,7671	3,9298	1,8538

Tabela 9. Índices ID_3 dos algoritmos investigados - fase B.

Índice de desempenho	Fourier de um ciclo	Fourier de meio ciclo	Cosseno modificado	Guo
ID3 sem FDR	120,0226	239,5035	61,6978	90,1578
ID3 com FDR	1,4835	3,6419	2,1549	2,0123

Nas Tabelas 10 e 11 encontram-se os resultados do índice ID_4 de cada algoritmo utilizado, para as fases A e B, respectivamente, comparando-se tanto os valores sem, quanto os valores com o uso do FDR.

Tabela 10. Índices ID_4 dos algoritmos investigados - fase A.

Índice de desempenho	<i>Fourier de um ciclo</i>	<i>Fourier de meio ciclo</i>	<i>Cosseno modificado</i>	<i>Guo</i>
ID4 sem FDR	3,530E04	3,4829E04	0,09870E04	3,555E04
ID4 com FDR	11,9041	153,7901	42,3255	23,3813

Tabela 11. Índices ID_4 dos algoritmos investigados - fase B.

Índice de desempenho	<i>Fourier de um ciclo</i>	<i>Fourier de meio ciclo</i>	<i>Cosseno modificado</i>	<i>Guo</i>
ID4 sem FDR	3,594E04	3,5940E04	3,5943E04	3,5942E04
ID4 com FDR	19,9407	3,5930E04	44,6843	19,2372

Os índices ID_5 e ID_6 estão relacionados com o tempo de convergência da resposta em amplitude. Estes índices são apresentados por (SILVA, 2014):

$$ID_5 = \frac{T_0 A}{N} \quad (31)$$

$$ID_6 = \frac{T_0 \theta}{N} \quad (32)$$

Sendo N é o número de amostras por ciclo do sinal. Quanto maior os valores assumidos por ID_5 e ID_6 , menor será a velocidade de convergência apresentada pelo algoritmo.

Nas Tabelas 12 e 13 encontram-se os resultados do índice ID_5 de cada algoritmo utilizado, para as fases A e B, respectivamente, comparando-se tanto os valores sem, quanto os valores com o uso do FDR.

Tabela 12. Índices ID_5 dos algoritmos investigados - fase A.

Índice de desempenho	<i>Fourier de um ciclo</i>	<i>Fourier de meio ciclo</i>	<i>Cosseno modificado</i>	<i>Guo</i>
ID5 sem FDR	3,1563	3,5625	3,5625	3,2813
ID5 com FDR	0	0,4375	0,1563	0

Tabela 13. Índices ID_5 dos algoritmos investigados - fase B.

Índice de desempenho	<i>Fourier de um ciclo</i>	<i>Fourier de meio ciclo</i>	<i>Cosseno modificado</i>	<i>Guo</i>
ID5 sem FDR	4,3125	3,9063	0,5625	2,4063
ID5 com FDR	0,1250	0,4375	0,0625	0,1875

Nas Tabelas 14 e 15 encontram-se os resultados do índice ID_6 de cada algoritmo utilizado, para as fases A e B, respectivamente, comparando-se tanto os valores sem, quanto os valores com o uso do FDR.

Tabela 14. Índices ID_6 dos algoritmos investigados - fase A.

Índice de desempenho	<i>Fourier de um ciclo</i>	<i>Fourier de meio ciclo</i>	<i>Cosseno modificado</i>	<i>Guo</i>
ID6 sem FDR	1,0313	0,6250	0,6563	0,9063
ID6 com FDR	0	0	0	0

Tabela 15. Índices ID_6 dos algoritmos investigados - fase B.

Índice de desempenho	<i>Fourier de um ciclo</i>	<i>Fourier de meio ciclo</i>	<i>Cosseno modificado</i>	<i>Guo</i>
ID6 sem FDR	0,8125	0,4688	0,9375	0,6875
ID6 com FDR	0	0	0	0

De modo geral, o filtro de Fourier de um ciclo e o filtro de Guo apresentaram os melhores índices com o uso do FDR. Na próxima seção, será observado graficamente como se comportaram os fasores estimados por cada algoritmo, com e sem o uso do FDR.

5.1 Análise gráfica da correção

O comportamento do módulo dos fasores computados para as fases A e B do relé instalado no terminal emissor da LT2, para os diferentes tipos de estimação de fasores, são apresentados nas Figuras 3-6. Utilizando como referência o fasor tensão obtido a partir de uma réplica da tensão do primário do TPC, com base nos resultados apresentados nas Figuras 3-6 percebe-se como o filtro corretor de tensão corrigiu os módulos dos fasores em todos os algoritmos, o que demonstra, graficamente, as reduções observadas no índice ID_1 de cada fase para cada algoritmo.

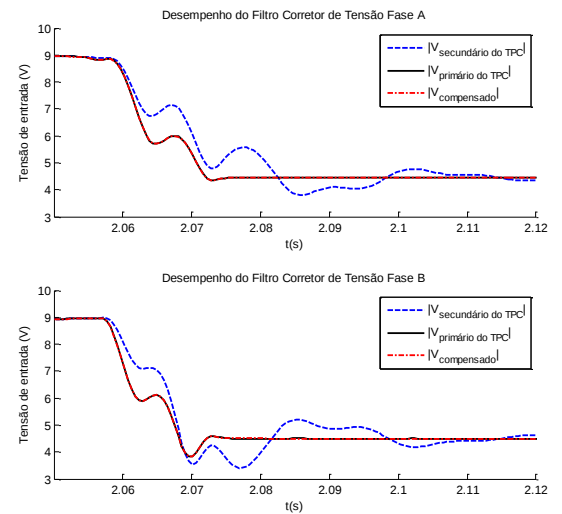


Figura 3. Análise da compensação dos módulos dos fasores do secundário do TPC com algoritmo de Fourier de um ciclo.

Na Figura 4, os *overshoots* presentes nos fasores computados a partir do algoritmo de Fourier de meio ciclo foram corrigidos, caracterizando um bom desempenho da correção fasorial, corroborando o índice ID_3 .

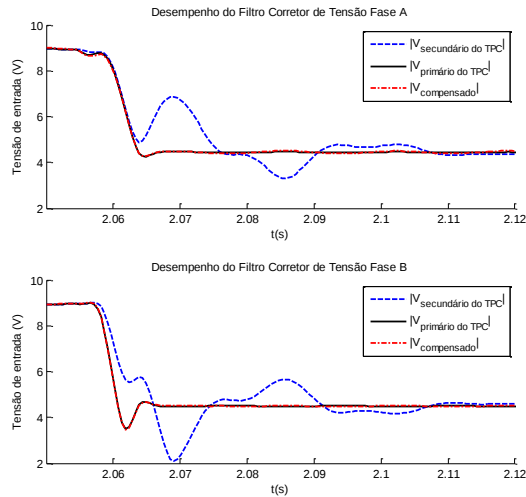


Figura 4. Análise da compensação dos módulos dos fasores do secundário do TPC com algoritmo de Fourier de meio ciclo.

Tipicamente, os transitórios da tensão secundária dos TPC apresentam componentes de baixa frequência que não podem ser eliminadas pelos filtros de Fourier de meio ciclo e de um ciclo, proporcionando dificuldades na convergência da estimação fasorial. A partir das Figuras 3 e 4, nota-se que a correção dos fasores da tensão secundária do TPC proporciona um perfeito rastreamento do fasor de referência.

Por proporcionarem uma maior rejeição as componentes de baixa frequência, os filtros cosseno modificado e de Guo apresentaram os melhores resultados.

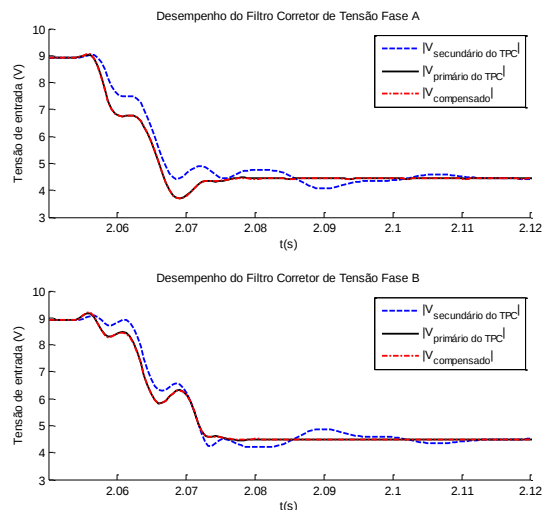


Figura 5. Análise da compensação dos módulos dos fasores do secundário do TPC com algoritmo Cosseno Modificado.

Mesmo antes de serem rebaixados pelo TPC a níveis seguros para leitura pelos equipamentos de proteção, o sinal de tensão do primário apresenta distorções causadas pela falta. Estas distorções já se mostram sendo corrigidas por cada algoritmo, mas deve-se notar que o algoritmo de Guo pode ser avaliado como o que apresentou os melhores resultados em conjunto com o FDR.

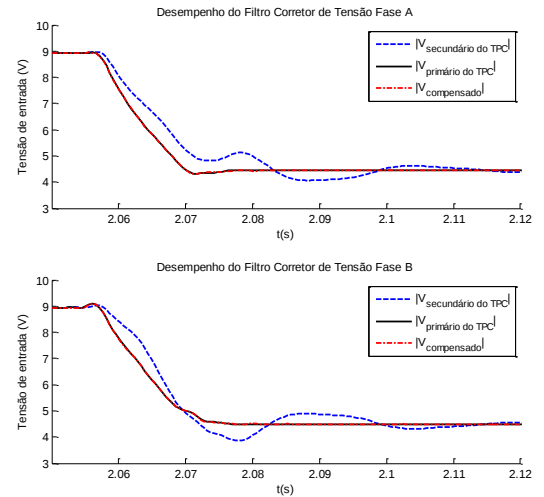


Figura 6. Análise da compensação dos módulos dos fasores do secundário do TPC com algoritmo de Guo.

6 Conclusão

Os índices de desempenho dos algoritmos se mostraram uma boa ferramenta para avaliar os sinais obtidos dos filtros, pois indicaram as variações e melhorias causadas pelo uso do FDR em conjunto com os algoritmos de estimação.

O FDR mostrou-se bastante eficiente na correção dos fasores da tensão secundária do TPC, para todos os algoritmos, conforme indicado pela melhoria dos índices de desempenho. Graficamente, verificou-se que a correção dos transitórios dos fasores da tensão secundária seguiu a referência fasorial, aquele obtido a partir de amostras da tensão primária do TPC. Os únicos valores não conformes foram verificados no caso do algoritmo de Fourier de meio ciclo para a fase B, o qual apresentou índices de oscilação e *overshoot*, em relação aos ângulos de fase, pouco otimizados com o uso do filtro, que podem ter sido causados por valores divergentes presentes nos sinais residuais do registro oscilográfico obtido via ATP.

Dentre os algoritmos de estimação de fasores investigados, o algoritmo de Guo mostrou ser uma melhor combinação de velocidade de convergência e menor oscilação da resposta, além de apresentar menos transitórios durante as faltas, sendo um bom indicado para maior investigação da aplicação em projetos futuros. A quantificação do impacto das distorções em amplitude e fase dos fasores com e sem o uso do FDR, requer a realização de estudos de proteção distância nos quesitos de segurança, confiabilidade e velocidade.

Referências Bibliográficas

- AJAEI, F. B.; SANAYE-PASSAND, M.; REZAEI-ZARE, A.; IRAVANI, R. Mitigating the impacts of CCVT subsidence transients on the distance relay, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, pp. 497–505, April 2012.

- BALAMOUROUGAN, V.; SIDHU, T. S. A new filtering technique to eliminate decaying DC and harmonics for power system phasor estimation. Power India Conference, 2006.
- BENMOUYAL, G. Removal of DC-offset in current waveforms using digital mimic filtering. IEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp. 621-630, April 1995.
- GUO, Y.; KEZUNOVIC, M.; CHEN, D. Simplified Algorithms for Removal of the Effect of Exponentially Decaying DC-offset on the Fourier Algorithm. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, pp. 711-717, July 2003.
- HART, D. G.; NOVOSEL D.; SMITH, R. A.; Modified Cosine Filters. U.S. Patent 6, 154, 687, November 2000.
- IZYKOWSKI, J.; KASZTENNY, B.; ROSOŁOWSKI, E.; SAHA, M. M.; HILLSTROM, B. Dynamic Compensation of Capacitive Voltage Transformers. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp. 116-122, January 1998.
- KANG, Y.-C.; ZHENG, T.-Y.; CHOI, S.-W.; KIM, Y.-H.; KIM, Y.-G.; JANG, S.-I.; KANG, S.-H. Design and Evaluation of a Compensating Algorithm for the Secondary Voltage of a Coupling Capacitor Voltage Transform in Time Domain, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 3, No. 3, pp. 793-800, May 2009.
- LOIOLA, L. F. Representação de Relés Numéricos em Estudos de Transitórios Eletromagnéticos – Uma Abordagem Via MODELS. 2015. Projeto final de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, Juazeiro, 2015.
- LYONS, R. G. Understanding Digital Signal Processing. 3. ed.: Prentice Hall PTR, 2010.
- MACHADO, E. P.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A. Tuning CCVT Frequency Response Data for Improvement of Numerical Distance Protection. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 33, No. 3, pp. 1062-1070, June 2018.
- MACHADO, T. M.; CARDOSO JR., G.; STEFANELLO, N.; MORAIS, A. P.; MARIOTTO, L. Análise da resposta em regime transitório e permanente de algoritmos para filtragem digital utilizados em relés numéricos: velocidade de convergência, overshoot e sensibilidade em relação a constante de tempo. Sba Controle & Automação, Campinas, Vol. 22, No. 1, pp. 65-78, Fevereiro 2011.
- PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. Strengths and Limitations of a New Phasor Estimation Technique to Reduce the CCVT Impact in Distance Protection. Power System Research, Vol. 80, No. 4, pp. 417-425, April 2010.
- SCHWEITZER, E. O.; HOU, D. Filtering for Protective Relays. In: 47th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, April, 1993.
- SILVA, C. D. L. Estimativa Fasorial Aplicada a Relés de Proteção Numérico Utilizando os Métodos de Ajuste de Curvas e Redes Neurais Artificiais. 2014. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2014.
- YU, C.-S.; CHANG, L.-R.; CHOU, C.-J. Line Voltage Phasor Reconstruction on Capacitive Voltage Transformers Using Dynamic Phasor Approach, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 38, No. 7, pp. 821-832, April 2015.