

COURY
DENIS VINICIUS
BRASIL ⑫

173

SAL
10.10.96



Denis
3.30.00.00-7
3.38.11.00-2

**7º Congreso
Latinoamericano
de Control Automático**



**XV Simposio Nacional de
Control Automático**

**BUENOS AIRES SHERATON HOTEL
9 al 13 de Setiembre de 1996**

TRABAJOS PRESENTADOS
Volumen 1

7º CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CONTROL AUTOMATICO - LACC • IFAC
9 al 13 de Setiembre de 1996 - Buenos Aires - Argentina

CONTROL EN SISTEMAS DE POTENCIA (048)

ESTUDO COMPARATIVO DE FILTROS DIGITAIS PARA PROTEÇÃO
COMPUTADORIZADA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

C 8662

605417

Denis Vinicius Coury
Hélio Glauco Ferreira Brito

SYSNO	0913384
PROD	-002098
ACERVO EESC	

Depto. de Engenharia Elétrica
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo, C.P. 359
13560-250 São Carlos (SP) Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo comparativo de algumas técnicas de filtragem digital para obtenção dos componentes fundamentais (60Hz) dos sinais de tensão e corrente de uma linha de transmissão de energia sob condição de curto-circuito. Este estudo é de fundamental importância para o desenvolvimento de algoritmos aplicados a proteção digital de sistemas elétricos de potência. As técnicas estudadas são baseadas na teoria da Transformada Discreta de Fourier, funções Walsh e filtro de Kalman.

Palavras chave: Filtros Digitais, Proteção, Harmônicos, Sistemas Elétricos de Potência.

Abstract: This work presents a comparative study of some digital filtering techniques for extraction of voltage and current fundamental components (60 Hz) from a faulted power transmission line. This study is very important for the development of algorithms applied to digital protection of power systems. The studied techniques are based on Discrete Fourier Transform, Walsh Functions as well as Kalman Filtering.

Keywords: Digital Filters, Protection, Harmonics, Power Systems.

1. INTRODUÇÃO

A maior parte dos estudos em proteção digital de sistemas de potência são direcionados para linhas de transmissão de energia, pois estas constituem a maior parte física do sistema e onde, conseqüentemente, há maior probabilidade de ocorrerem faltas. Vários tipos de relés são utilizados para proteger essas linhas. A filosofia mais usada está baseada na família dos relés de distância. Um dos tipos de relés de distância mais usados é o de impedância que avalia a impedância da linha, em um terminal, através dos sinais de tensão e corrente (Phadke e Thorp, 1988 ; Ramamoorthy, 1972). No entanto, durante a ocorrência de uma falta ou outros distúrbios as formas de ondas dos sinais de tensão e corrente podem conter harmônicos, bem como

componentes CC. A presença destes ruídos resulta em erro na estimação dos componentes fundamentais (60Hz) dos sinais para cálculo da impedância aparente. Assim é desejável que se tenha uma boa técnica de filtragem dos sinais, com a finalidade de diminuir o erro no cálculo da impedância, evitando assim uma atuação errônea do sistema de proteção.

Este artigo apresenta um estudo comparativo de algumas técnicas de filtragem digital para obtenção dos componentes fundamentais (60Hz) dos sinais de tensão e corrente de uma linha de transmissão de energia sob condição de curto-circuito. Foi dado ao estudo, dois tipos de enfoques: (1) Estudos de técnicas não recursivas baseadas nas Funções Walsh e teoria da Transformada Discreta de Fourier e (2)

Estudo de técnicas recursivas baseadas na teoria do Filtro de Kalman e novamente na teoria de Fourier. O filtro de Fourier já é bem conhecido como técnica não recursiva, porém usado recursivamente representa uma inovação das técnicas de filtragem. O filtro baseado nas funções Walsh é intimamente ligado a teoria de Fourier, mas com os sinais ortogonais definidos como ± 1 . O filtro de Kalman é um estimador ótimo recursivo.

2. FILTROS DIGITAIS NÃO RECURSIVOS

2.1-O Algoritmo de Fourier

Como explicitado anteriormente, as formas de onda de tensão e corrente em sistemas elétricos de potência podem incluir harmônicos de formas de onda fundamentais (60Hz) e ruídos aleatórios devido a faltas e outras perturbações no sistema. A forma de onda fundamental do sinal pode ser descrita como (Lobos, 1989):

$$f(t) = X_a \sin(\omega_0 t) + X_b \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

O fasor complexo é dado por

$$G = X_b - jX_a \quad (2)$$

Os parâmetros X_a e X_b podem ser calculados dos N valores amostrados f_n de tensão e corrente através do método dos mínimos quadrados:

$$X_a = \frac{1}{AC - B^2} \sum_{n=0}^{N-1} f_n [C \sin(n\omega_0 T) - B \cos(n\omega_0 T)] \quad (3)$$

$$X_b = \frac{1}{AC - B^2} \sum_{n=0}^{N-1} f_n [A \cos(n\omega_0 T) - B \sin(n\omega_0 T)] \quad (4)$$

onde

$$A = \sum_{n=0}^{N-1} \sin^2(n\omega_0 T)$$

$$B = \sum_{n=0}^{N-1} \sin(n\omega_0 T) \cos(n\omega_0 T)$$

$$C = \sum_{n=0}^{N-1} \cos^2(n\omega_0 T)$$

e T = período de amostragem, ω_0 = frequência fundamental, e f_n = valores amostrados de tensão e corrente.

Introduzindo-se a notação

$$K_{an} = \frac{1}{AC - B^2} [C \sin(n\omega_0 T) - B \cos(n\omega_0 T)] \quad (5)$$

$$K_{bn} = \frac{1}{AC - B^2} [A \cos(n\omega_0 T) - B \sin(n\omega_0 T)] \quad (6)$$

obtem-se a forma

$$X_a = \sum_{n=0}^{N-1} K_{an} f_n \quad (7)$$

$$X_b = \sum_{n=0}^{N-1} K_{bn} f_n \quad (8)$$

Se a janela de amostragem é igual a um ciclo do componente fundamental, tem-se que

$$A = C = \frac{N}{2}; \quad B = 0$$

e o fasor complexo da forma de onda fundamental pode ser representado por:

$$G = \sum_{n=0}^{N-1} f_n [K_{bn} - jK_{an}] \quad (9)$$

substituindo-se $K_n = K_{bn} - jK_{an}$, obtém-se a forma do filtro não recursivo (Hoseman e Lobos, 1987):

$$G = \sum_{n=0}^{N-1} K_n f_n \quad (10)$$

2.2-O Algoritmo de Walsh

Neste método as formas de ondas dos sinais são aproximações de funções Walsh retangulares e ortogonais. O algoritmo também tem a forma das Equações (7) e (8). No entanto, os coeficientes do algoritmo de Walsh para uma janela de amostragem de um ciclo do componente básico são:

$$K_{an} = \frac{2k_w}{N} \begin{cases} 1 & \text{para } 0 \leq n\omega_0 t < \pi \\ -1 & \text{para } \pi \leq n\omega_0 t < 2\pi \end{cases} \quad (11)$$

$$K_{bn} = \frac{2k_w}{N} \begin{cases} 1 & \text{para } 0 \leq n\omega_0 t < \pi/2; \\ & 3\pi/2 \leq n\omega_0 t < 2\pi \\ -1 & \text{para } \pi/2 \leq n\omega_0 t < 3\pi/2 \end{cases} \quad (12)$$

onde $k_w \approx 0.774$, referente a função Walsh que representa uma onda quadrada para um ciclo fundamental dos sinais (Blanchman, 1974). Como os coeficientes diferem somente em sinal, a implementação computacional do algoritmo é muito simples.

3. FILTROS DIGITAIS RECURSIVOS

3.1 O Algoritmo Recursivo de Fourier

Se a janela de dados é igual a um ciclo fundamental, tem-se que o fasor complexo das formas de ondas fundamentais pode ser calculado dos N valores amostrados por (Lobos, 1989):

$$G = X_b - jX_a = \sum_{n=0}^{N-1} K_n f_n \quad (13)$$

onde

$$K_n = K_{bn} - jK_{an} = \frac{2}{N} [\cos(n\omega_0 T) - j\sin(n\omega_0 T)] \quad (14)$$

ou

$$\mathbf{K}_n = \frac{2}{N} e^{-jn\omega_0 T} \quad (15)$$

Os valores complexos do coeficiente \mathbf{K}_n representam a resposta ao impulso no plano complexo. A transformada Z da resposta representa a função de transferência do método no domínio Z.

$$Z[\mathbf{K}_n] = H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{K}_n z^{-n} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [e^{-j\omega_0 T} z^{-1}]^n \quad (16)$$

Neste sentido, obtém-se a soma da projeção geométrica dada por

$$H(z) = \frac{2}{N} \frac{1 - z^{-N}}{1 - e^{-j\omega_0 T} z^{-1}} \quad (17)$$

O correspondente algoritmo recursivo é descrito como

$$\mathbf{G}_n = \mathbf{G}_{n-1} e^{-j\omega_0 T} + \frac{2}{N} (\mathbf{f}_n - \mathbf{f}_{n-N}) \quad (18)$$

onde os valores amostrados complexos \mathbf{f}_n são definidos como

$$\mathbf{f}_n = \mathbf{f}_n e^{-j\omega_0 T} = \mathbf{f}_n [\cos(\omega_0 T) - j \sin(\omega_0 T)] \quad (19)$$

Separando-se a parte real e imaginária do fasor \mathbf{G}_n na Equação (17), obtém-se:

$$X_{an} = X_{an-1} \cos(\omega_0 T) + X_{bn-1} \sin(\omega_0 T) + \frac{2}{N} \sin(\omega_0 T) (\mathbf{f}_n - \mathbf{f}_{n-N}) \quad (20)$$

$$X_{bn} = X_{bn-1} \cos(\omega_0 T) + X_{an-1} \sin(\omega_0 T) + \frac{2}{N} \cos(\omega_0 T) (\mathbf{f}_n - \mathbf{f}_{n-N}) \quad (21)$$

Através do cálculo "on-line", X_a e X_b são atualizados a cada valor amostrado.

3.2 - O Filtro de Kalman

O filtro de Kalman é um estimador ótimo recursivo. É um dos métodos bem conhecidos para controle e engenharia de comunicações, que pode ser usado para estimações de fasores de frequência fundamental de medidas ruidosas. No entanto, no desenvolvimento do Filtro de Kalman, um prévio conhecimento estatístico das condições iniciais do modelo ruidoso do processo e das medidas é necessário. Para o modelamento dos sinais de ruído da tensão e corrente, foi estudada a função de autocorrelação para os vários tipos de falta, a variância do sinal e seu espectro de frequências (Girgis e Brown, 1981).

Filtro de Kalman de Dois Estados para Estimação de Tensão

O filtro de Kalman de dois estados pode ser definido como:

1 - Equações de estado:

$$\begin{bmatrix} X_{a_{k+1}} \\ X_{b_{k+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{a_k} \\ X_{b_k} \end{bmatrix} \quad (22)$$

2 - Equação de medida:

$$z_k = [\cos(\omega_0 k \Delta t), -\sin(\omega_0 k \Delta t)] \begin{bmatrix} X_{a_k} \\ X_{b_k} \end{bmatrix} + \varepsilon_k \quad (23)$$

$k = 0, 1, \dots, N$

3 - Matriz de covariância inicial:

$$P_0^- = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

onde σ_v^2 é a variância para o sinal de tensão.

O vetor processo inicial \hat{x}_0^- é calculado usando amostras dos valores de pré-falta que são assumidos serem senoidais.

Filtro de Kalman de Três Estados para Estimação de Corrente

Um filtro de Kalman de três estados é considerado para a estimação da corrente. O terceiro estado é o componente exponencial no sinal de ruído da corrente, devido ao componente CC presente neste sinal. O modelo pode ser definido como se segue:

1 - Equações de estado:

$$\begin{bmatrix} X_{a_{k+1}} \\ X_{b_{k+1}} \\ X_{c_{k+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\beta \Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{a_k} \\ X_{b_k} \\ X_{c_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ y_k \end{bmatrix} \quad (25)$$

$k = 0, 1, \dots, N$

onde β é uma constante de tempo.

2 - Equação de medida:

$$z_k = [\cos(\omega_0 k \Delta t) \quad -\sin(\omega_0 k \Delta t) \quad 1] \begin{bmatrix} X_{a_k} \\ X_{b_k} \\ X_{c_k} \end{bmatrix} + \varepsilon_k \quad (26)$$

$k = 0, 1, \dots, N$

3 - Matriz de covariância inicial:

$$P_0^- = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_i^2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

onde σ_i^2 é a variância para o sinal corrente.

O vetor \hat{x}_0^- do processo inicial é o mesmo que no modelo de dois estados para \hat{x}_{a0}^- e \hat{x}_{b0}^- . A estimativa inicial de X_e é considerada zero.

4. DESEMPENHO DOS FILTROS ESTUDADOS

O modelo do sistema de potência estudado é mostrado na Fig. 1.

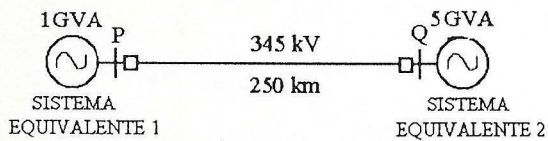


Fig. 1 - Modelo do sistema de potência estudado

O sistema corresponde a uma linha de transmissão de 345 kV de 250 km, interligando duas estações geradoras de 1 GVA e 5 GVA, respectivamente. Os dados para teste dos algoritmos foram obtidos através do "software" TEER, que simula os sinais de uma linha de transmissão sob condição de curto-circuito (Johns e Aggarwal, 1976). A resposta do algoritmo para uma falta a-terra é ilustrado na Fig. 2.

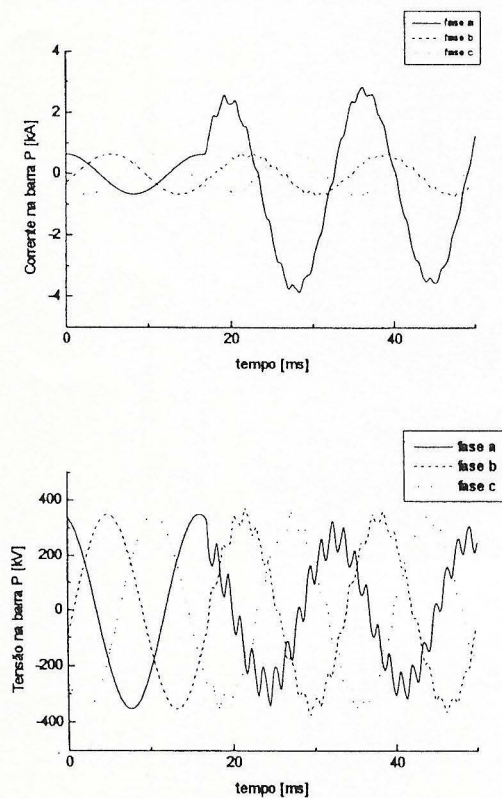


Fig. 2 - Ondas típicas de corrente e tensão para uma falta fase-terra com um ciclo de dados pré-falta

4.1 Filtros digitais não recursivos

A Fig. 3(a-b) representa a resposta em frequência dos filtros digitais não recursivos de Fourier e Walsh

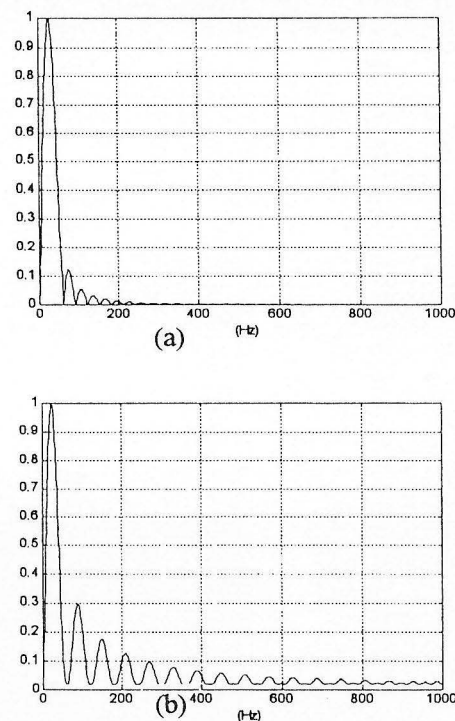


Fig. 3- Resposta em frequência dos filtros digitais não recursivos de Fourier e Walsh, respectivamente

respectivamente, para uma onda senoidal normalizada (60Hz). Percebe-se claramente pela Fig.3 (a-b) que o filtro baseado na teoria de Fourier rejeita eficientemente os altos harmônicos, enquanto o filtro baseado nas funções Walsh não apresenta o mesmo desempenho. Percebe-se com os resultados apresentados a seguir, que a influência destes componentes de alta frequência resulta em erro na estimação do componente fundamental.

Para cada tipo de falta apresentada são mostrados os resultados de ambos os filtros Fourier e Walsh, juntamente com a onda estabilizada, em regime permanente para efeito de comparação de resultados. Considerando o regime permanente como a referência base para o resultado esperado, pode-se facilmente verificar o desempenho de cada filtro em cada caso apresentado em função do módulo do erro calculado. Para todos os casos estudados foi considerada uma resistência de falta média de 16 Ohms. Deve ser ressaltado, que em todos os casos o tamanho da janela de amostragem é de um ciclo fundamental dos sinais de tensão e corrente. A Tabela 1 (a-b) mostra o resultado da extração dos componentes fundamentais (60Hz) nas três fases, dos sinais de tensão e corrente, através dos filtros digitais não recursivos baseados na teoria de Fourier e Walsh para uma falta fase a-terra, a 48 km do barramento P. A Tabela 2 (a-b) mostra os resultados para uma falta fase-fase-terra, envolvendo as fases a e b, a 144 km do barramento P.

Tabela 1 Extração dos componentes fundamentais (teoria Fourier e Walsh) para uma falta a-terra a 48 km de P.

(a) Tensão

	fase A		fase B		fase C	
	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)
Estab.	0.30	-0.52	1.47	-2.17	1.39	2.30
Fourier	0.31	-0.52	1.46	-2.18	1.38	2.28
Erro%	3.33	0.00	0.68	0.46	0.71	0.86
Walsh	0.40	-0.61	1.89	-2.26	1.74	2.21
Erro%	33.33	17.30	28.57	4.14	25.17	3.91

(b) Corrente

	fase A		fase B		fase C	
	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)
Estab.	11.87	-1.29	3.35	-0.82	2.34	-2.36
Fourier	11.00	-1.30	3.29	-0.82	2.33	-2.37
Erro %	7.32	0.77	1.79	0.00	0.42	0.42
Walsh	13.70	-1.39	4.13	-0.90	3.01	-2.45
Erro %	15.41	7.75	23.28	9.75	28.63	3.81

Tabela 2 Extração dos componentes fundamentais (teoria Fourier e Walsh) para uma falta a-b terra a 144 km de P.

(a) Tensão

	fase A		fase B		fase C	
	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)
Estab.	0.59	-0.42	0.43	-2.44	1.41	2.16
Fourier	0.57	-0.36	0.46	-2.28	1.40	2.15
Erro %	3.38	14.28	6.97	6.55	0.70	0.46
Walsh	0.70	-0.42	0.65	-2.39	1.78	2.07
Erro %	18.64	0.00	51.16	2.04	26.24	4.16

(b) Corrente

	fase A		fase B		fase C	
	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)
Estab.	10.68	-0.92	11.54	2.84	2.45	-2.70
Fourier	8.69	-0.90	9.57	3.10	2.46	-2.67
Erro %	18.63	2.17	17.07	9.15	0.40	1.11
Walsh	10.47	-0.95	12.25	3.11	3.17	-2.73
Erro %	1.96	3.26	6.15	9.50	29.38	1.11

Por razões de brevidade, apenas alguns resultados são apresentados neste artigo. Deve ser ressaltado que os algoritmos de filtragem foram exaustivamente testados. Através dos resultados pode-se verificar que o filtro digital não recursivo baseado na teoria de Fourier apresentou melhores resultados que o filtro digital não recursivo baseado nas funções Walsh na extração dos componentes fundamentais (60Hz) dos sinais de ruído de tensão, pois elimina quase que completamente os efeitos dos harmônicos de alta frequência presentes nestes sinais. Contudo, para os sinais de corrente fica evidente que seus resultados

são afetados pelo componente CC. Em situações onde a presença do componente CC foi mais acentuada (Tabela 2 (b)), foi observado em poucos casos um melhor comportamento do filtro de Walsh em relação ao filtro de Fourier.

4.2 Filtros Digitais Recursivos

Uma importante análise no estudo dos filtros digitais recursivos é a observação da estimação dos estados dos componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente. A Fig. 4 (a-b) mostra a estimação dos estados X_a e X_b dos sinais de tensão e corrente da fase a, através dos filtros digitais de Kalman e Fourier recursivo respectivamente, para uma falta fase a-terra a 48 km do barramento P. Para estudo dos filtros digitais recursivos, os resultados da extração dos componentes fundamentais (60Hz) de tensão e corrente são também mostrados juntamente com a onda estabilizada, em regime permanente. A Tabela 3(a-b) mostra o resultado da extração dos componentes fundamentais, dos sinais de tensão e corrente, usando os filtros digitais recursivos de Kalman e Fourier para uma falta fase a-terra, a 48 km do barramento P. A Tabela 4 (a-b) mostra os resultados para uma falta fase-fase-terra, envolvendo as fases a e b, a 144 km do barramento P.

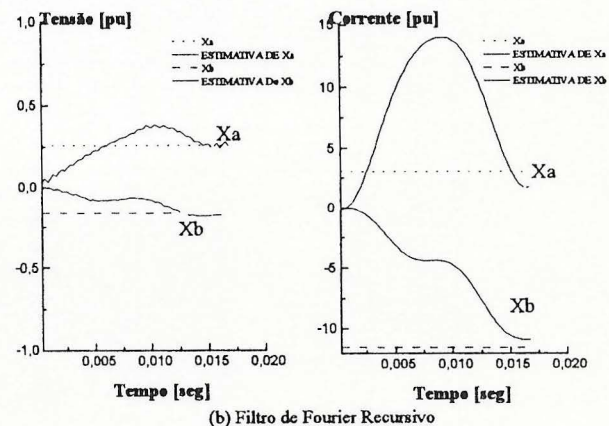
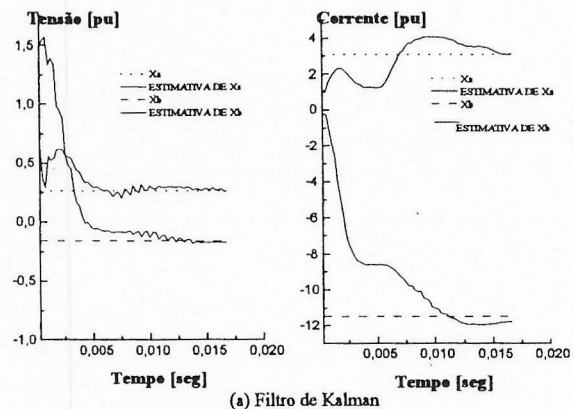


Fig. 4 Estimação X_a e X_b dos sinais de tensão e corrente através de Kalman e Fourier para uma falta a terra a 48 km de P.

Tabela 3 Extração dos componentes fundamentais (teoria Kalman e Fourier) para uma falta a-terra a 48 km de P.

(a) Tensão

	fase A		fase B		fase C	
	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)
Estab.	0.30	-0.52	1.47	-2.17	1.39	2.30
kalman	0.30	-0.56	1.47	-2.17	1.35	2.30
Erro %	0.00	7.69	0.00	0.00	2.87	0.00
Fourier	0.30	-0.57	1.44	-2.26	1.37	2.18
Erro %	0.00	9.61	2.04	4.14	1.43	5.21

(b) Corrente

	fase A		fase B		fase C	
	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)
Estab.	11.87	-1.29	3.35	-0.82	2.34	-2.36
kalman	12.21	-1.31	3.34	-0.83	2.32	-2.35
Erro %	2.86	1.55	0.29	1.21	0.85	0.42
Fourier	11.00	-1.40	3.26	-0.93	2.29	-2.44
Erro %	7.32	8.52	2.68	13.41	2.13	3.38

Tabela 4 Extração dos componentes fundamentais (teoria Kalman e Fourier) para uma falta a-b terra a 144 km de P.

(a) Tensão

	fase A		fase B		fase C	
	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)
Estab.	0.59	-0.42	0.43	-2.44	1.41	2.16
kalman	0.62	-0.44	0.38	-2.40	1.37	2.14
Erro %	5.08	4.76	11.62	1.63	2.83	0.92
Fourier	0.56	-0.46	0.46	-2.37	1.40	2.04
Erro %	5.08	9.52	6.97	2.86	0.70	5.55

(b) Corrente

	fase A		fase B		fase C	
	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)	M(pu)	Φ (rd)
Estab.	10.68	-0.92	11.54	2.84	2.45	-2.70
kalman	10.78	-0.91	11.60	2.76	2.31	-2.67
Erro %	0.93	1.08	0.51	2.81	5.71	1.11
Fourier	8.60	-1.01	9.29	3.00	2.40	-2.75
Erro %	19.47	9.78	19.49	5.63	2.04	1.85

Para os filtros digitais recursivos pode-se observar nos casos estudados que o filtro de Kalman apresentou resultados altamente satisfatórios na obtenção dos componentes fundamentais (60Hz) dos sinais de ruído de tensão e corrente. Para os sinais de ruído de tensão, onde há predominância de harmônicos de alta frequência, o filtro de Fourier recursivo apresenta comportamento similar ao filtro de Kalman. No entanto, para os sinais de ruído de corrente na presença do componente CC (Tabela 4

(b)), o filtro de Kalman apresenta um desempenho muito superior ao filtro de Fourier.

5. CONCLUSÕES

Um estudo comparativo de filtros digitais utilizados para proteção digital de linhas de transmissão foi desenvolvido e apresentado neste trabalho.

De uma maneira geral pode-se concluir através dos casos estudados que o filtro de Kalman apresentou os melhores resultados em relação aos outros filtros, porque é um estimador ótimo e sob condições transitórias dá uma estimativa ótima das formas de onda fundamentais em presença do ruído. Contudo, deve ser ressaltado que a aplicação prática do filtro de Kalman tem a grande dificuldade de necessitar dos levantamentos estatísticos citados anteriormente, cuja obtenção é bastante complexa e sem os mesmos torna-se dificultada a aplicação do filtro. Os demais filtros não necessitam de tal levantamento.

REFERÊNCIAS

- Blanchman, N.M. (1974). Sinusoids versus Walsh Functions. *Proc. IEEE*, **62**, 346-354.
- Girgis, A.A. e Brown, R. G.(1981). Application of Kalman Filtering in Computer Relaying *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS-100, N° 7, 3387-3397
- Hoseman, G.; Schneider, E. e Lobos, T (1987). Echtzeitberechnung der Modalen Drehstromkomponenten nach plötzlichen Zustandänderungen. *Arch. Elektrotech.*, **70**, 237-253.
- Johns, A.T. e Aggarwall, R.K.(1976). Digital Simulation of Faulted EHV Transmission Lines with Particular Reference to Very High Speed Protection. *Proc. IEE*, Vol. **123**, N° 4, 353-359.
- Lobos, T. (1989). Methods for Real-Time Determination of Basic Waveforms of Voltages and Currents. *IEE Proceedings*, Vol. **136**, Pt. C, N° 6.
- Phadke, A.G. e Thorp, J.S. (1988). *Computer Relaying for Power Systems*. John Wiley and Sons, New York.
- Ramamoorthy, M (1972). Application of Digital Computers to Power System Protection, *Journal of Inst. Eng., India*, Vol. **52**, N° 10, 235-238.