

Influência de Transformadores Para Instrumentos e Filtros *Anti-Aliasing* Sobre Localizadores de Falhas Baseados na Teoria de Ondas Viajantes

R. L. A. Reis, W. L. A. Neves, D. Fernandes Jr.

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Campina Grande
Campina Grande, Brasil
raphael.reis@ee.ufcg.edu.br

F. V. Lopes

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Brasília, Brasil
felipevlpes@unb.br

Resumo—Neste trabalho é avaliado o desempenho de três métodos de detecção de falhas baseados na teoria de ondas viajantes frente à influência de dois modelos de transformadores de potencial capacitivos (TPC) e um modelo de transformador de corrente, conjuntamente com três tipos de filtros *anti-aliasing*. Estes filtros são tipicamente utilizados pelos sistemas de aquisição de dados de relés de proteção e localizadores de falta e influenciam diretamente na medição de componentes de alta frequência. Vários cenários de falta foram simulados no *Alternative Transients Program* variando-se resistência, ângulo de incidência, tipo e local de falta. Dos resultados obtidos, percebe-se que a confiabilidade dos algoritmos de detecção é influenciada diretamente pela resposta em frequência dos TPC e filtros, bem como das medições disponíveis de tensão e/ou corrente.

Palavras-chaves—Transformador de potencial capacitivo, transformador de corrente, detecção de transitórios, ondas viajantes, localização de falhas.

I. INTRODUÇÃO

Durante uma falta em um determinado ponto de uma linha de transmissão (LT), ondas viajantes de tensão e corrente trafegam para os terminais da mesma, sofrendo reflexões e refrações sucessivas entre o ponto de falta e os terminais da LT até que os transitórios sejam completamente amortecidos.

Os algoritmos de detecção de falhas baseados na teoria de ondas viajantes utilizam, como dados de entrada, os sinais transitórios de tensão e/ou corrente gerados pelo distúrbio, oriundos de transformadores para instrumentos (TI), para identificar os instantes iniciais de incidência das ondas viajantes nos terminais monitorados da LT, possibilitando a estimação do local do defeito [1].

Os TI, como os transformadores de corrente (TC) e os transformadores de potencial capacitivos (TPC), são equipamentos projetados para reduzir altos valores de corrente e tensão do sistema elétrico de potência (SEP) em níveis adequados para utilização em dispositivos de medição e proteção. Em regime permanente de operação, as informações repassadas pelos TI apresentam boa precisão e confiabilidade. Por outro lado, durante falhas no SEP, tais informações podem

se apresentar de forma distorcida aos elementos conectados em seus terminais secundários, podendo comprometer, assim, a atuação correta e confiável dos algoritmos de detecção e localização de falhas e dos sistemas de proteção [1]-[3].

Antes dos sinais secundários de tensão e corrente serem digitalizados por conversores analógico-digital (A/D), presentes em sistemas de aquisição de dados de relés de proteção e registradores digitais de perturbação (RDP), e aplicados como entrada dos algoritmos de detecção e localização de falhas, estas informações passam por um filtro passa-baixas denominado de filtro *anti-aliasing*, que tem como objetivo evitar que ocorra uma sobreposição de espectros durante o processo de amostragem. A depender do filtro utilizado, as discrepâncias presentes nos sinais secundários dos TI durante transitórios no SEP podem se tornar mais nítidas e comprometer ainda mais a precisão dos algoritmos de proteção e localização [1], [4].

Neste contexto, vários trabalhos reportam que o comportamento dos TPC durante transitórios influi diretamente no desempenho dos sistemas de proteção e localização de falhas [1], [3], [5], bem como os TC quando operam em condições de saturação [2]. Quando o filtro *anti-aliasing* é levado em consideração, alguns trabalhos retratam a influência do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing* sobre processos de localização de falhas [1], [4]. Entretanto, poucas análises foram divulgadas no que concerne à influência do conjunto TI+filtro *anti-aliasing* sobre algoritmos de detecção e localização de falhas, campo este que ainda necessita de maiores investigações e tem motivado o desenvolvimento deste trabalho.

Sendo assim, o impacto de dois modelos de TPC de 230 kV e um modelo de TC, reportados na literatura, e de três tipos de filtro *anti-aliasing* são analisados frente ao desempenho de três métodos de detecção de transitórios baseados na teoria de ondas viajantes. Para tanto, foram simulados no *Alternative Transients Program* (ATP) [6] vários cenários de falhas em um SEP e os erros de localização de falhas estimados são comparados quando se considera medições ideais de tensão e corrente (tomadas diretamente do circuito primário do SEP),

medições secundárias (apenas com o TPC e/ou TC) e medições secundárias filtradas (com os TPC e/ou TC e filtro *anti-aliasing* em cascata).

II. TRANSFORMADORES PARA INSTRUMENTOS E FILTROS ANTI-ALIASING AVALIADOS

O comportamento dinâmico de dois modelos de TPC de 230 kV e um modelo de TC são analisados conjuntamente com três filtros *anti-aliasing*, dos tipos Butterworth e Chebyshev. Para fins de simplificação, os TPC avaliados serão referenciados por TPC 1 e TPC 2, cujas topologias e parâmetros podem ser encontrados em [7] e [8], respectivamente, como também estão descritos em [1]. O projeto detalhado do modelo de TC utilizado encontra-se descrito em [7].

A. Filtros Anti-Aliasing Avaliados

Para que uma determinada componente de frequência f do sinal analógico possa ser completamente reconstituída durante um processo de digitalização realizado por conversores A/D, a frequência de amostragem deve ser, no mínimo, igual a $2f$, frequência esta denominada de frequência de Nyquist [9]. Como os transitórios oriundos de distúrbios no SEP apresentam componentes de alta frequência superpostas à frequência fundamental, e como a taxa de amostragem dos conversores presentes nos dispositivos de proteção é tipicamente fixa, faz-se necessário realizar uma filtragem analógica antes dos relés realizarem o processamento dos sinais obtidos dos TI com o objetivo de evitar a ocorrência da sobreposição de espectro (ou *aliasing*). Este fenômeno pode fazer com que informações falsas no sinal digitalizado sejam transmitidas aos algoritmos de proteção e localização. Para evitar tal ocorrência, filtros passa-baixas, denominados de filtros *anti-aliasing*, são utilizados com uma frequência de corte que deve ser idealmente igual a, no máximo, metade da taxa de amostragem, obedecendo ao critério de Nyquist [9].

Existem diversos tipos de filtros analógicos, como Butterworth, Chebyshev, Bessel. Em algoritmos de proteção, os filtros Butterworth de segunda ordem são normalmente os mais utilizados devido ao fato de não apresentarem oscilações ao longo da faixa de passagem [9]. Por apresentar oscilações ao longo da faixa de passagem, os filtros Chebyshev quase não são levados em consideração em aplicações de proteção e localização de faltas, mas há uma escassez de trabalhos que apresentem o impacto de tal filtro. Desta forma, são avaliados os desempenhos de dois filtros Butterworth de segunda e terceira ordens e um filtro Chebyshev de terceira ordem conjuntamente com os TI frente ao processo de estimação do local do defeito.

Como o algoritmo de localização de faltas analisado utiliza uma taxa de amostragem f_s de 20 kHz, valor este próximo à taxa utilizada por RDP convencionais, a frequência de corte f_c dos filtros *anti-aliasing* deve ser, no máximo, igual a $f_s/2$ para obedecer ao critério de Nyquist, o que corresponde a 10 kHz. Deste modo, f_c foi adotada como sendo 8 kHz. As funções de transferência dos filtros Butterworth de segunda, H_{B2} , e terceira, H_{B3} , ordens e de Chebyshev de terceira ordem, H_{C3} , são descritas em (1), (2) e (3), respectivamente.

$$H_{B2}(s) = \frac{2,527 \cdot 10^9}{s^2 + 7,109 \cdot 10^4 s + 2,527 \cdot 10^9} \quad (1)$$

$$H_{B3}(s) = \frac{1,27 \cdot 10^{14}}{s^3 + 1,1005 \cdot 10^5 s^2 + 5,053 \cdot 10^9 s + 1,27 \cdot 10^{14}} \quad (2)$$

$$H_{C3}(s) = \frac{3,183 \cdot 10^{13}}{s^3 + 3,002 \cdot 10^4 s^2 + 2,346 \cdot 10^9 s + 3,183 \cdot 10^{13}} \quad (3)$$

As respostas em frequência de módulo e fase são apresentadas na Fig. 1.

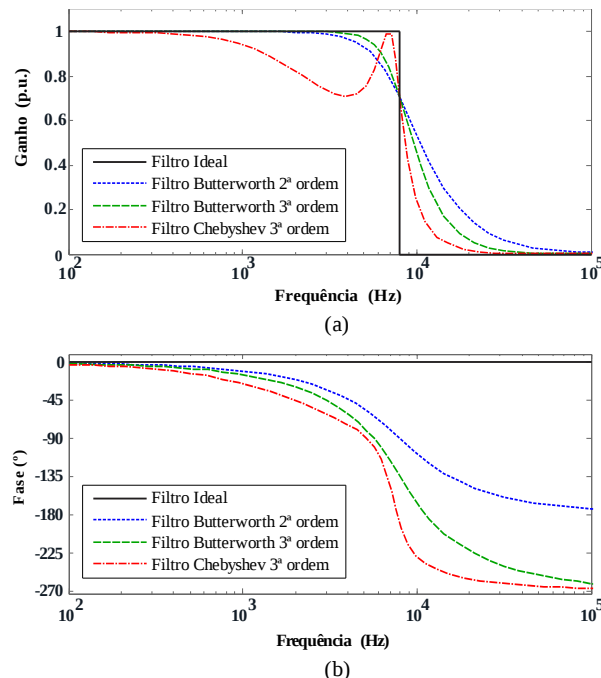


Figura 1. Respostas em frequência dos filtros ideal, Butterworth e Chebyshev: (a) Ganho; (b) Fase.

B. Transformadores Para Instrumentos Avaliados

Por possuírem topologia e parâmetros distintos, as respostas em frequência dos modelos de TPC considerados apresentam diferenças significativas entre si, levando-os a apresentarem comportamentos dinâmicos diferentes quando ocorrem fenômenos de natureza transitória no SEP [1], [3], [4]. Com o intuito de simular as respostas em frequência de módulo e fase dos TPC analisados, utilizou-se a rotina *Frequency Scan* do ATP, que utiliza repetições de solução fasorial de regime permanente da função de transferência a partir do incremento automático da frequência de fontes senoidais [6]. A faixa de frequência utilizada foi de 1 Hz a 100 kHz.

As respostas em frequência de módulo e fase dos TPC 1 e TPC 2, sendo considerados os sinais primário (V_{PRI}), secundário (V_{SEC}), secundário e filtro *anti-aliasing* Butterworth de 2ª ordem ($V_{SEC+But2}$), secundário e filtro *anti-aliasing* Butterworth de 3ª ordem ($V_{SEC+But3}$) e secundário e filtro *anti-aliasing* Chebyshev de 3ª ordem ($V_{SEC+Che3}$) são ilustradas nas Figs. 2 e 3, respectivamente.

De modo a permitir análises comparativas entre as respostas em frequência dos TPC com a tensão obtida nos terminais primário dos equipamentos (neste trabalho, a tensão do primário é tomada como o sinal de referência), todas as respostas em frequência de módulo foram normalizadas para valores em por unidade (p.u.).

Dos modelos de TPC avaliados, pode ser visto que, na fre-

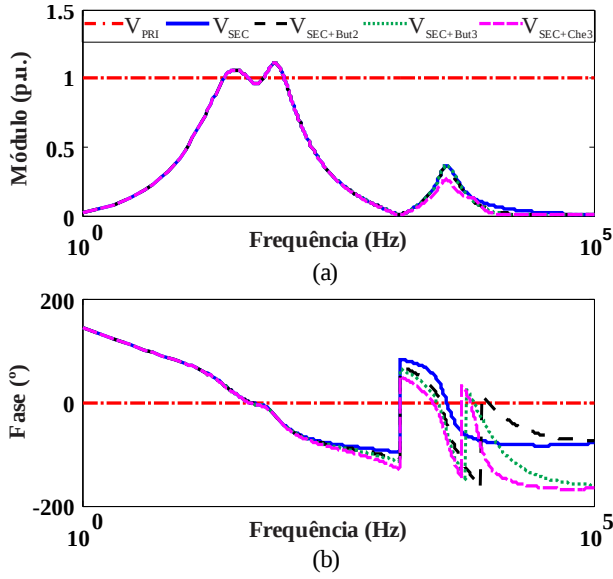


Figura 2. Resposta em frequência do TPC 1: (a) Módulo; (b) Fase.

quência fundamental, a tensão secundária se aproxima muito da tensão primária (1 p.u.), mesmo quando considerados os sinais filtrados (Figs. 2 e 3). Em contrapartida, para frequências diferentes da fundamental, a tensão secundária difere da tensão primária. Sendo assim, pequenos desvios no sinal de tensão primário ocasionados por faltas no SEP não são apropriadamente seguidos pela tensão secundária dos TPC. Nestas situações, o comportamento dos TPC durante transitórios impossibilitam uma medição precisa dos sinais de alta frequência, podendo comprometer, assim, o desempenho dos algoritmos baseados na teoria de ondas viajantes. Vale ressaltar que, embora o TPC 2 apresente um comportamento dinâmico não usual, dado que há uma amplificação das componentes de alta frequência (ver Fig. 3a), todos os seus parâmetros foram estimados com base em medições de laboratório, conforme descrito em [8].

De acordo com [2], no que tange ao comportamento dinâmico do TC frente a distúrbios no SEP, a amplitude da resposta em frequência de um modelo de TC típico é constante em um grande espectro de frequência, até 50 kHz, onde também não há desvios de fase do sinal secundário em relação ao primário. Desta forma, pode-se considerar que o TC praticamente não influencia no conteúdo espectral do sinal primário, desde que o fluxo eletromagnético no núcleo opere na região linear. Caso o TC opere em condições de saturação, distorções significativas aparecem no sinal secundário. A saturação do TC não é levada em conta neste trabalho.

Para ilustrar no domínio do tempo a resposta dos modelos de TI considerados durante transitórios ocasionados por um curto-circuito, os sinais primário e secundário dos TPC 1 e 2 e do TC devido a uma falta monofásica a 75 km do ponto de medição de um SEP de 230 kV, sistema este descrito na seção IV, são apresentadas nas Figs. 4 e 5.

Da Fig. 4, pode-se observar que o sinal secundário do TPC 2, $V_{SEC\ TPC\ 2}$, além de não representar uma réplica da tensão do

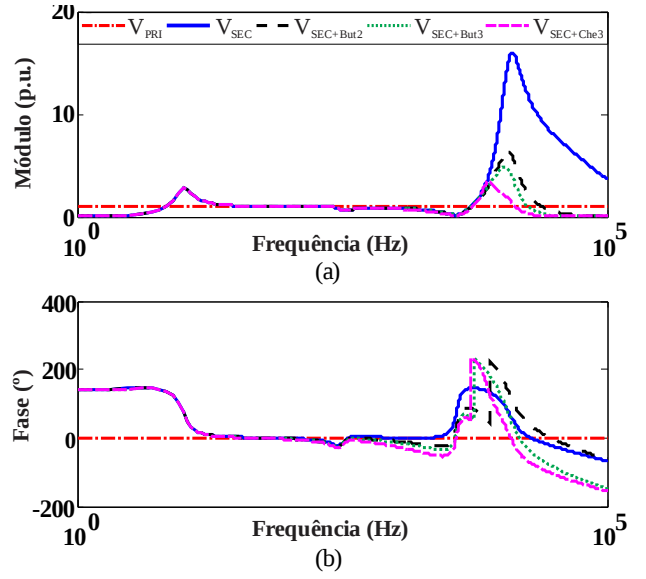


Figura 3. Resposta em frequência do TPC 2: (a) Módulo; (b) Fase.

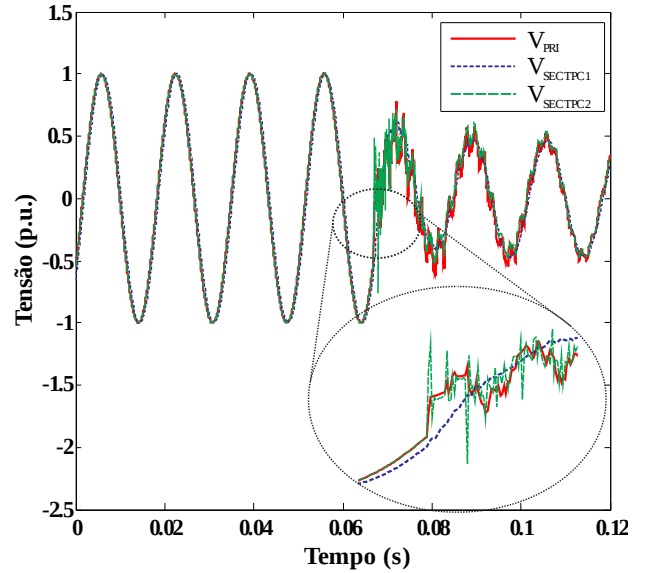


Figura 4. Sinais de tensão primário e secundário dos TPC 1 e 2 durante uma falta monofásica.

primário durante a falta, amplifica consideravelmente as componentes de alta frequência. Isto ocorre devido à sua resposta em frequência que apresenta um ganho significativo para altas frequências, conforme ilustrado na Fig. 3a. Por outro lado, o comportamento dinâmico do TPC 1 se configura por uma atenuação dos componentes transitórios, conforme mostrado na Fig. 2a. Desta forma, o comportamento oscilatório apresentado pelos sinais secundários dos TPC pode comprometer o desempenho dos algoritmos de detecção e localização de faltas.

No que concerne à resposta apresentada pelo TC frente a mesma situação de falta, percebe-se que, da Fig. 5, o sinal secundário de corrente, I_{SEC} , tende a seguir o mesmo comportamento apresentado pelo sinal primário, I_{PRI} , uma vez que o dispositivo atua na região linear de operação.

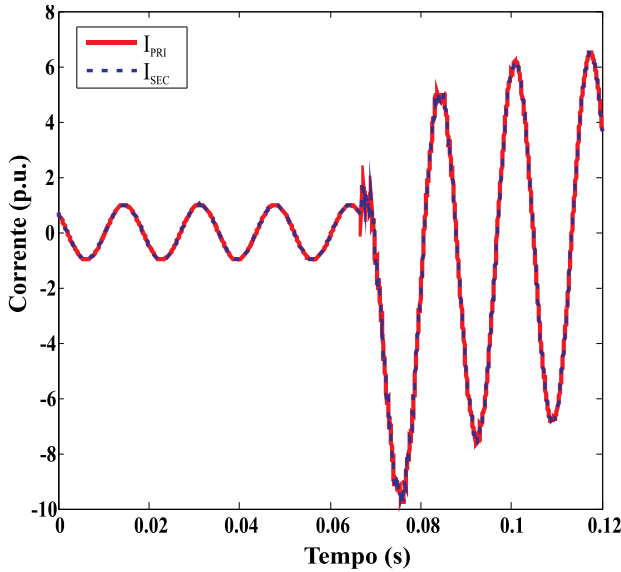


Figura 5. Sinais de corrente primário e secundário do TC durante uma falta monofásica.

III. LOCALIZADOR DE FALTAS BASEADO NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES

O método de localização de faltas utilizado neste trabalho consiste no método de dois terminais descrito em [10]. Segundo [10], métodos de dois terminais são mais robustos e menos susceptíveis a erros, pois necessitam apenas da detecção do instante de chegada das primeiras ondas viajantes aos terminais da LT, apesar de necessitarem da sincronização de dados em ambos os terminais. Aqui, como o intuito é avaliar a influência dos TI e filtros *anti-aliasing*, consideraremos que ambos os terminais da LT estão perfeitamente sincronizados. Sendo assim, a estimação do local do defeito pode ser realizada segundo (4):

$$d = \frac{\ell + (t_{11} - t_{21})v_p}{2}, \quad (4)$$

sendo ℓ o comprimento da LT, t_{11} o instante de incidência da primeira onda viajante na barra local da LT, t_{21} o instante de incidência da primeira onda viajante na barra remota da LT e v_p a velocidade de propagação das ondas viajantes. Neste trabalho, v_p é considerado como 98% da velocidade da luz no vácuo, assim como utilizado em [4].

Neste contexto, percebe-se que a parte crucial para a estimativa do local do distúrbio reside na detecção dos primeiros instantes de incidência das ondas viajantes nos terminais monitorados da LT (ver (4)). Várias pesquisas voltam-se para o desenvolvimento de técnicas mais precisas para a detecção destes instantes, uma vez que, quanto mais preciso for o valor estimado da detecção, mais confiável será o método de localização de faltas [11], [12].

Os algoritmos de detecção de faltas utilizados neste trabalho estão reportados em [11] e [12] e são brevemente descritos aqui.

A. Método TDQ: Proposto em [11]

O método proposto em [11] é baseado na transformada de Park, a qual gera um eixo referencial que gira em sincronismo com a frequência dos fasores de tensão e corrente do SEP. Para

um observador sob o eixo referencial síncrono, sinais de tensão e corrente de regime permanente apresentam valores desprezíveis, enquanto que para um distúrbio no SEP, grandes variações surgem, possibilitando a identificação do transitório. Diferentemente dos métodos convencionais de detecção rápida de faltas, o algoritmo também é capaz de detectar desbalanceamentos no SEP, o que o torna uma ferramenta atrativa para detecção de faltas, mesmo em casos em que os transitórios são atenuados.

A implementação do algoritmo consiste basicamente de três passos: processamento das componentes de eixo direto; calibração do limiar de detecção auto-adaptativo e detecção do instante de ocorrência da falta. Vale ressaltar que o limiar auto-adaptativo de detecção utilizado é ajustado de acordo com níveis de ruído e desbalanceamento durante operação em regime permanente do SEP.

B. Método wavelet: Proposto em [12]

Um dos métodos propostos em [12] é baseado nos coeficientes *wavelet*, que são calculados a partir da Transformada Wavelet Discreta Redundante (TWDR). Embora os métodos baseados na TWDR sejam significativamente influenciados pela escolha da *wavelet* mãe, sabe-se que a *wavelet* Daubechies 4 (db 4) é uma das mais indicadas para detecção rápida de transitórios, uma vez que os quatro coeficientes dos filtros passa-altas da db 4 possibilitam um cálculo rápido dos coeficientes *wavelet* [12].

Durante o regime permanente, os sinais de tensão e corrente do SEP são compostos por uma componente de frequência fundamental, alguns harmônicos e ruídos de baixa e alta frequências com distribuição de probabilidade normal. Os coeficientes *wavelet*, em regime normal de operação, são bastante influenciados pelos ruídos de alta frequência, de tal modo que seus comportamentos podem ser aproximados por uma função com distribuição de probabilidade normal com parâmetros dados pela amplitude média μ_ω e o desvio padrão σ_ω . Assim, durante o regime permanente, espera-se que todos os coeficientes *wavelet* estejam dentro do intervalo $[\mu_\omega - 4\sigma_\omega, \mu_\omega + 4\sigma_\omega]$, cujos limiares correspondem aos limiares para detecção da falta.

C. Método ε_ω : Proposto em [12]

Outro método reportado em [12] para detecção de distúrbios leva em consideração a energia dos coeficientes *wavelet* (ε_ω). A energia ε_ω apresenta um comportamento praticamente constante durante o regime permanente no SEP, sendo influenciada pelos ruídos de alta frequência. Contudo, após a ocorrência de um distúrbio, variações abruptas em ε_ω são perceptíveis, facilitando a detecção dos transitórios. Assim como o método baseado nos coeficientes *wavelet*, assume-se que a energia ε_ω apresenta um comportamento descrito por uma distribuição de probabilidade normal com parâmetros dados pela energia média μ_{ε_ω} e desvio padrão $\sigma_{\varepsilon_\omega}$. A falta é detectada quando $\varepsilon_\omega > \varepsilon_1$, sendo $\varepsilon_1 = \mu_{\varepsilon_\omega} + 4\sigma_{\varepsilon_\omega}$.

IV. ANÁLISES E RESULTADOS

Vários cenários de falta foram simulados no ATP em um SEP de 230 kV para verificar a influência dos TI e filtros *anti-aliasing* sobre os processos de estimação do local de falta. O

SEP utilizado é ilustrado na Fig. 6 e seus parâmetros estão descritos em [7]. As faltas foram aplicadas na Linha LT 3, que contém 150 km de extensão. Em cada simulação, utilizou-se um passo de integração de 5 μ s.

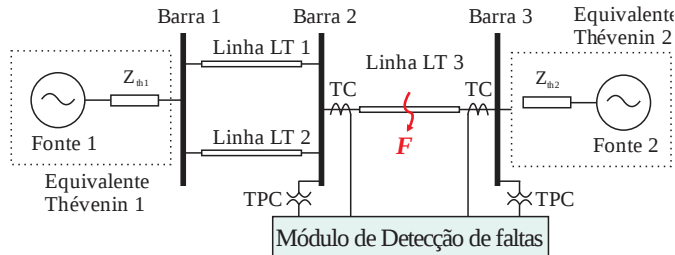


Figura 6. SEP de 230 kV modelado no ATP.

Um total de 1400 simulações para cada sinal avaliado do conjunto TPC+TC foram realizadas¹. Em cada situação foram variados a resistência, o ângulo de incidência, o local e o tipo de falta. As variáveis de simulação estão dispostas na Tabela I.

TABELA I. VARIÁVEIS DE SIMULAÇÃO UTILIZADAS PARA CADA CENÁRIO DE FALTA

Variáveis de Simulação	Valores
Localização da falta (km)	25, 50, 75, 100 e 125
Tipo de falta	AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT e ABC
Resistência de falta (Ω)	1, 10, 50 e 100
Ângulo de incidência ($^\circ$)	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180

Após cada simulação, o local da falta é estimado utilizando como dados de entrada dos algoritmos avaliados o sinal primário, sinal secundário e os sinais secundários filtrados digitalizados de tensão, corrente ou ambos simultaneamente. Nos casos em que ambas as amostras de tensão e corrente são digitalizadas concomitantemente, a detecção do instante inicial em que a onda viajante alcança o terminal monitorado da LT é dado como sendo a amostra relativa à incidência da primeira onda, seja ela de tensão ou corrente. Os erros percentuais são calculados após cada simulação segundo (5):

$$\epsilon_k = \frac{|d - \tilde{d}_k|}{\ell} \cdot 100, \quad (5)$$

sendo d o local real de aplicação da falta, $\tilde{d}_k$ o local estimado, ℓ o comprimento da LT e $k = \text{PRI, SEC, SEC+But2, SEC+But3 ou SEC+Che3}$.

Vale salientar que os métodos baseados na teoria de ondas viajantes são diretamente influenciados pela taxa de amostragem dos conversores A/D, sendo o tempo de detecção dos transitórios um múltiplo do passo de integração Δt usado pelo conversor. Desta forma, alguns erros podem surgir devido a limitação do *hardware*, tendo o erro máximo admissível calculado por [4]:

$$|\epsilon| = \frac{\Delta t \cdot c}{2}, \quad (6)$$

onde c é a velocidade da luz. Como f_s utilizado neste trabalho foi de 20 kHz, ϵ corresponde a 7,5 km. Portanto, os casos em que o local estimado da falta encontra-se abaixo deste valor são

considerados como casos satisfatórios (S), caso contrário, são classificados como não satisfatórios (NS). O número de casos S e NS utilizando os três métodos de detecção de faltas estão dispostos na Tabela II quando o TPC 1 está conectado nos terminais da LT, e na Tabela III quando o TPC 2 está conectado.

TABELA II. INFLUÊNCIA DO TPC 1 E TC SOBRE O LOCALIZADOR DE FALTAS

TI utilizado	Sinal avaliado	TDQ		wavelet		ϵ_ω	
		NS	S(%)	NS	S(%)	NS	S(%)
TPC 1	V_{PRI}	0	100	0	100	0	100
	V_{SEC}	0	100	0	100	9	99,36
	$V_{\text{SEC+But3}}$	7	99,50	2	100	14	99,00
	$V_{\text{SEC+But2}}$	4	99,71	0	100	10	99,29
	$V_{\text{SEC+Che3}}$	8	99,43	2	99,86	35	97,50
TC	I_{PRI}	0	100	0	100	0	100
	I_{SEC}	0	100	0	100	0	100
	$I_{\text{SEC+But3}}$	5	99,64	0	100	4	99,71
	$I_{\text{SEC+But2}}$	0	100	0	100	0	100
	$I_{\text{SEC+Che3}}$	6	99,57	2	99,86	5	99,64
TPC 1 e TC	V_{PRI} e I_{PRI}	0	100	0	100	0	100
	V_{SEC} e I_{SEC}	0	100	0	100	0	100
	$V_{\text{SEC+But3}}$ e $I_{\text{SEC+But3}}$	0	100	0	100	0	100
	$V_{\text{SEC+But3}}$ e $I_{\text{SEC+But2}}$	0	100	0	100	0	100
	$V_{\text{SEC+But2}}$ e $I_{\text{SEC+But2}}$	0	100	0	100	0	100
	$V_{\text{SEC+Che3}}$ e $I_{\text{SEC+Che3}}$	0	100	0	100	0	100
	$I_{\text{SEC+Che3}}$	0	100	0	100	0	100

Dos resultados apresentados na Tabela II, pode-se perceber que há uma piora no desempenho dos métodos avaliados quando apenas dados de tensão secundária estão disponíveis (vale ressaltar que o sinal primário é tomado como referência). De fato, o comportamento dinâmico do TPC 1 configura-se por uma atenuação significativa das componentes de alta frequência (ver Fig. 2). Esta característica influencia negativamente os métodos de detecção baseados na teoria de ondas viajantes, uma vez que estes são mais sensíveis às componentes de alta frequência. Por outro lado, de acordo com os resultados dispostos na Tabela III, constata-se que quando são utilizados dados de tensão secundária do TPC 2, o desempenho dos métodos de detecção de faltas é melhorado, quando comparado com os resultados obtidos pelo TPC 1. Este comportamento se deve ao fato de que a resposta em frequência do TPC 2 amplifica consideravelmente as componentes de alta frequência (ver Fig. 3a).

No que tange às estimativas dos locais de faltas obtidas apenas com amostras de corrente, o número de casos NS são menores do que quando apenas dados de tensão estão disponíveis, para qualquer que seja o método de detecção avaliado, indicando que o desempenho dos algoritmos é mais confiável quando utilizados amostras de corrente. Em contrapartida, quando tanto dados de corrente como amostras de tensão estão disponíveis, o desempenho dos métodos é mais preciso e confiável, conforme resultados apresentados nas Tabelas II e III.

No que concerne à influência dos filtros *anti-aliasing*, percebe-se que o maior número de casos NS é obtido quando o filtro Chebyshev é utilizado. De fato, as oscilações presentes ao

¹1400 casos simulados quando V_{PRI} é utilizado como entrada do algoritmo localizador de faltas, 1400 quando V_{SEC} é considerado, etc.

TABELA III. INFLUÊNCIA DO TPC 2 E TC SOBRE O LOCALIZADOR DE FALTAS

TI utilizado	Sinal avaliado	TDQ		wavelet		ε_ω	
		NS	S(%)	NS	S(%)	NS	S(%)
TPC 2	V_{PRI}	0	100	0	100	0	100
	V_{SEC}	0	100	0	100	0	100
	$V_{SEC+But3}$	0	100	0	100	3	99,79
	$V_{SEC+But2}$	0	100	0	100	1	99,93
	$V_{SEC+Che3}$	2	99,86	0	100	12	99,14
TC	I_{PRI}	0	100	0	100	0	100
	I_{SEC}	0	100	0	100	0	100
	$I_{SEC+But3}$	3	99,79	0	100	0	100
	$I_{SEC+But2}$	0	100	0	100	0	100
	$I_{SEC+Che3}$	7	99,50	0	100	0	100
TPC 2 e TC	V_{PRI} e I_{PRI}	0	100	0	100	0	100
	V_{SEC} e I_{SEC}	0	100	0	100	0	100
	$V_{SEC+But3}$ e $I_{SEC+But3}$	0	100	0	100	0	100
	$V_{SEC+But3}$ e $I_{SEC+But2}$	0	100	0	100	0	100
	$V_{SEC+Che3}$ e $I_{SEC+Che3}$	0	100	0	100	0	100

longo da faixa de passagem deste filtro (ver Fig. 1a) compromete o desempenho dos algoritmos avaliados. Quanto aos filtros Butterworth, constata-se que as estimativas dos locais dos distúrbios com o filtro de segunda ordem apresenta resultados ligeiramente melhores do que quando é utilizado o filtro de terceira ordem. Isto se deve ao fato de que este tipo de filtro apresenta menor atraso em relação ao de terceira ordem, auxiliando os métodos de detecção rápida de transitórios.

Quanto ao desempenho dos métodos, percebe-se que o método *wavelet* apresentou melhores resultados. Vale salientar que o nível de ruído do SEP utilizado é baixo, fazendo com que os limiares de tal método sejam menores, facilitando a detecção dos transitórios induzidos pelo curto-circuito. No entanto, os métodos TDQ e ε_ω utilizam variações abruptas na forma de onda da energia de coeficientes como artifício para a detecção de distúrbios. Algoritmos que utilizam energia de coeficientes tendem a ser mais retardados uma vez que o cálculo da energia depende de amostras passadas contidas em uma determinada janela de dados. Todavia, estes métodos tendem a ser mais precisos e confiáveis quando os níveis de ruído do SEP são maiores. Portanto, dos algoritmos que utilizam energia de coeficientes, o método TDQ mostrou-se como o mais robusto.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliados a influência de TI conjuntamente com três tipos de filtros *anti-aliasing*, frente ao desempenho de três métodos de detecção de faltas baseados na teoria de ondas viajantes. Vários cenários de falta foram simulados no ATP. Após cada simulação, a estimação do local do distúrbio foi realizada tomando-se como dados de entrada os sinais primário, secundário e secundário filtrados dos TI.

Dos resultados obtidos, constatou-se que quando o comportamento dinâmico do TPC caracteriza-se por uma atenuação dos componentes de alta frequência, o desempenho

dos métodos de detecção é comprometido, tornando as estimativas dos locais de falta menos confiáveis caso apenas medições de tensão estejam disponíveis. Por outro lado, caso a resposta em frequência do TPC amplifique as componentes de alta frequência, as estimativas dos locais de falta são mais precisas. Todavia, comprovou-se que a confiabilidade dos algoritmos avaliados é maior quando apenas amostras de corrente são avaliadas, e ainda melhor quando tanto dados de tensão como corrente estão disponíveis.

Quanto aos filtros *anti-aliasing* analisados, o filtro Chebyshev demonstrou os piores resultados, fato este já esperado devido a este filtro apresentar oscilações na banda de passagem. Em contrapartida, o filtro Butterworth de segunda ordem mostrou-se como o mais propício a detecção rápida de transitórios por apresentar menor atraso em relação ao filtro de terceira ordem.

Dos algoritmos de detecção avaliados, o método *wavelet* apresentou os melhores resultados, dado que o SEP utilizado nas simulações tem baixo nível de ruído. Dos métodos que utilizam a energia de coeficientes, o método TDQ mostrou-se como mais robusto.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Reis, "Influência de Transformadores de Potencial Capacitivos e Filtros Anti-Aliasing Sobre Métodos de Localização de Faltas Baseados na Teoria de Ondas Viajantes," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2015.
- [2] B. Naodovic, "Influence of Instrument Transformers on power system protection," Dissertação de Mestrado, Texas A&M University, 2005.
- [3] R. L. A. Reis, F. V. Lopes, W. L. A. Neves, and D. Fernandes Jr, "Influence of Coupling Capacitor Voltage Transformers on Travelling Wave-Based Fault Locators," in International Conference on Power Systems Transients, Cavtat, Croatia, June 2015.
- [4] F. V. Lopes, D. Fernandes Jr., W. L. A. Neves, "Influência dos Transformadores de Potencial Capacitivos e Filtros Anti-Aliasing sobre Algoritmos de Localização de Faltas Baseados em Componentes Transitórias," em Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Araxá, MG, 2013.
- [5] M. C. S. Cruz e M. F. Medeiros Jr., "Influência de Erros de Transformadores para Instrumentos na Estimação da Localização de Defeitos em Linhas de Transmissão," em Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, PR, 2014.
- [6] ATP - Alternative Transient Program, Leuven EMTP Center, Herverlee, Belgium, 1987.
- [7] *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*, IEEE Power System Relaying Committee, 2004. [Online]. Available: <http://www.pes-psrc.org>.
- [8] A. V. Carvalho Jr., "Interação transitória entre transformadores de potencial capacitivos e linhas de transmissão: Uma contribuição para minimizar falhas," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, agosto 2008.
- [9] A. G. Phadke, and J. S. Thorp, "Computer Relaying for Power Systems," 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 2009.
- [10] P. Gale, P. Crossley, X. Bingyin, G. Yaozhong, B. Cory, and J. Barker, "Fault location based on travelling waves," in Fifth International Conference on Developments in Power System Protection, 1993, pp. 54–59.
- [11] F. V. Lopes, D. Fernandes Jr., W. L. A. NEVES, "A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators," *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 3, p. 1626-1634, 2013, ISSN 0885-8977.
- [12] F. B. Costa, "Fault-Induced Transient Detection Based on Real-Time Analysis of the Wavelet Coefficient Energy," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 1, pp. 140–153, Fevereiro de 2014.