

## Localização de Curtos-Circuitos em Linhas de Transmissão: Desafios para os Métodos Baseados no Domínio do Tempo com Dados de Um Terminal

Mirella I. P. da Silveira\* Raphael L. de A. Reis\*\*  
Washington L. A. Neves\*

\*Universidade Federal de Campina Grande (UFCG),  
Campina Grande, Paraíba, Brasil  
(e-mail: mirella.silveira@ee.ufcg.edu.br).

\*\*Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE),  
Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco, Brasil  
(email: raphael.reis@ufrpe.br)

\* Universidade Federal de Campina Grande (UFCG),  
Campina Grande, Paraíba, Brasil  
(e-mail: waneves@dee.ufcg.edu.br)

---

**Abstract:** To estimate the short-circuit distance in transmission lines, the two-ended traveling wave (TW)-based fault location methods are usually reported as the most reliable kind of techniques to be applied in the field, since they use more information about the power system to estimate the fault point. However, in cases in which the communication means nor time-stamping devices are available, the one-terminal TW-based algorithms appear as alternative solutions. These kind of routines typically depends on the correct identification of successive reflection and/or refraction from the fault point, whose detection may be affected by the fault parameters or even by the system configurations. In this way, a sensitivity analysis is performed in this paper to investigate the challenges faced by the traditional one-ended algorithms that may restrict their use in practical applications, taken into account factors such as the fault resistance, inception angle, the System Impedance Ratio (SIR), and voltage measurements obtained from coupling capacitor voltage transformers. The analyses are carried out through extensive fault simulations in a 230 kV/60 Hz power system using the Alternative Transients Program (ATP).

**Resumo:** Os métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes (TW) são comumente reportados como mais confiáveis a serem aplicados em campo para estimar a distância de curto-circuito nas linhas de transmissão, uma vez que usam mais informações sobre o sistema de potência para estimar o ponto de falta. No entanto, nos casos em que não estão disponíveis os canais de comunicação, os algoritmos baseados em TW de um terminal aparecem como soluções alternativas. Esse tipo de rotina normalmente depende da identificação correta de reflexões e/ou refrações sucessivas a partir do ponto de falta, cuja detecção pode ser afetada pelos parâmetros de falta ou mesmo pelas configurações do sistema. Dessa forma, uma análise de sensibilidade é realizada neste artigo para investigar os desafios enfrentados pelos algoritmos tradicionais de um terminal que podem restringir seu uso em aplicações práticas, levando em consideração fatores como a resistência de falta, ângulo de incidência de falta, a relação de impedância do sistema (SIR) e medições de tensão obtidas a partir de transformadores de potencial capacitivo. As análises são realizadas por meio de extensas simulações de faltas em um sistema de energia de 230 kV / 60 Hz, utilizando o Alternative Transients Program (ATP).

**Keywords:** CCVT , one-terminal algorithms , sensitivity analysis, transmission lines, traveling waves.

**Palavras-chaves:** algoritmos de um terminal, análise de sensibilidade, linhas de transmissão, ondas viajantes.

---

### 1. INTRODUÇÃO

O aumento da complexidade dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) verificado nos últimos anos, sobretudo devido às crescentes demandas de energia e as interligações dos sistemas existentes, tem impulsionado a melhoria dos equipamentos de controle, proteção e localização de faltas. O aperfeiçoamento desses dispositivos visa reduzir os períodos de instabilidade proporcionando confiabilidade, qualidade e economia dos sistemas de potência.

As linhas de transmissão (LT) integram elementos importantes do sistema elétrico, apresentando papel fundamental no transporte de energia elétrica entre as subestações. Neste cenário, por possuírem grandes extensões, as LT são mais suscetíveis a ocorrência de distúrbios, a exemplo de descargas atmosféricas. Assim, a aplicação de algoritmos que apontem precisa e rapidamente o local do curto-circuito é crucial, de modo a proporcionar maior agilidade das equipes de manutenção na tomada de decisões para restabelecer o funcionamento normal do SEP. À vista

disso, formulações de algoritmos de localização de faltas em LT cada vez mais robustos são essenciais.

Vários métodos de localização de curtos-circuitos em LT são reportados na literatura, com destaque para as técnicas baseadas no domínio do tempo (teoria de ondas viajantes) pela exatidão de seus resultados em comparação com outros métodos tradicionalmente utilizados, sendo, inclusive, embarcadas nos dispositivos de proteção mais atuais (Guzmán *et al.*, 2018).

Quanto ao número de terminais monitorados em que são feitas as medições, os algoritmos de localização de faltas podem ser classificados de acordo com a dependência de medições oriundas de um ou mais terminais monitorados da LT. Técnicas que utilizam dados de dois terminais ou mais, são comumente reportadas como mais robustas frente a técnicas de um terminal, pois dependem apenas da detecção da primeira frente de onda dos terminais monitorados, apesar de necessitar de canais de comunicação. Por outro lado, funções de um terminal necessitam de medições provenientes apenas de um terminal da LT, configurando-se como uma alternativa de menor custo.

Apesar de técnicas que utilizam dados de tensão serem menos reportadas na literatura, Ha *et al.* (2003) propuseram uma técnica de localização de distúrbios no domínio do tempo utilizando dados de um terminal, em que uma função proveniente da tensão tende a ser mínima no ponto de falta. Entre as limitações da técnica estão o grau de complexidade da implementação e a influência do acomplamento mútuo entre as LT sobre o desempenho do método. Além disso, análises de sensibilidade para o uso de medições provenientes do TPC não foram estudadas. Já Liu *et al.* (2012) reportaram um algoritmo de um terminal que depende apenas da detecção de ondas incidentes, apesar de não necessitar da detecção de ondas refletidas a aplicação desta técnica é restrita a faltas monofásicas, limitando sua aplicação para outros tipos de curtos-circuitos.

Tipicamente, as soluções de um terminal reportadas na literatura são sensíveis a fatores como resistência de falta, Transformador de Potencial Capacitivo (TPC), *System Impedance Ratio* (SIR), entre outros (Saha *et al.*, 2010). Todavia, poucos trabalhos que realizam análises de sensibilidade avaliam o impacto desses fatores sobre o desempenho dessas técnicas.

Portanto, de modo a preencher esta lacuna na literatura, análises de sensibilidade são realizadas com vistas a identificar os parâmetros que mais afetam o desempenho de métodos baseados na teoria de ondas viajantes para um terminal, de modo a proporcionar o desenvolvimento de novas formulações que sejam mais imunes aos parâmetros avaliados. Além deste tópico introdutório, este artigo está organizado em seis seções. Na seção 2 e 3 uma fundamentação teórica sobre a localização de faltas utilizando dados provenientes de um terminal e da técnica de detecção de ondas viajantes utilizada é realizada, respectivamente. Na seção 4, é apresentada a metodologia utilizada nas simulações e na seção 5, são discutidos os resultados obtidos pela análise dos parâmetros de falta. Por último, na seção 6, as conclusões são apresentadas.

## 2. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS UTILIZANDO DADOS PROVENIENTES DE UM TERMINAL

### 2.1 Reflexões e Refrações

O conceito de ondas viajantes em linhas de transmissão pode ser melhor compreendido pelo diagrama de *Bewley*, ou diagrama espaço-tempo, ilustrado na Fig. 1, em que as relações tempo-espaço são apresentadas por meio da chegada de ondas incidente, refletidas e refratadas nos terminais A e B da LT.

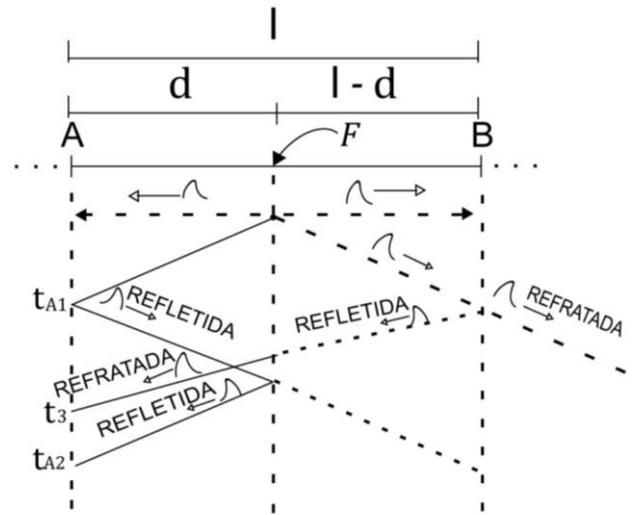


Fig. 1: Diagrama de *Bewley*

A ocorrência de um curto-circuito no ponto *F* produz ondas de tensão e corrente que se propagam a partir do ponto de defeito para ambos os terminais da linha. Ao encontrar uma descontinuidade, como as barras A e B, essas ondas refletem e retornam ao ponto de defeito, onde novas reflexões e refrações acontecerão até serem completamente amortecidas e o estado de pós-falta alcançado. A primeira onda que atinge o terminal monitorado (terminal A, por exemplo) é denominada onda incidente, sendo as duas ondas originadas dela denominadas ondas refletidas e refratadas (transmitidas). Basicamente, essas ondas satisfazem as leis de *Kirchoff* (Bewley, 1963).

Para melhor compreender os eventos decorrentes de ondas viajantes em LT, a relação entre as ondas viajantes de tensão e corrente pode ser estabelecida:

$$Z_c = \frac{V_i}{I_i} = -\frac{V_r}{I_r} \quad (1)$$

em que  $Z_c$  é a impedância característica da linha,  $V_i$  e  $I_i$  as ondas incidentes de tensão e corrente, respectivamente, e  $V_r$  e  $I_r$  as ondas refletidas de tensão e corrente, respectivamente. Quando as ondas incidentes de tensão e corrente atingem um terminal da linha, uma parte da mesma reflete e a outra refrata, conforme ilustrado na Fig. 2. A relação entre as ondas incidente, refletida e transmitida depende da impedância vista do ponto de descontinuidade ( $Z_t$ ), de acordo com (2).

$$Z_t = \frac{V_i + V_r}{I_i + I_r} \quad (2)$$

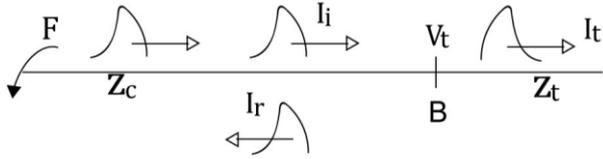


Fig. 2: Ilustração das ondas viajantes incidentes, transmitida e refletida

A relação entre as correntes refletida e incidente pode ser obtida, segundo:

$$\Gamma = \frac{I_r}{I_i} = \frac{Z_c - Z_t}{Z_c + Z_t} \quad (3)$$

em que  $\Gamma$  é o coeficiente de reflexão.

Similarmente, a relação entre a corrente refratada e a corrente incidente resulta na obtenção do coeficiente de refração (T), conforme:

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{2Z_c}{Z_c + Z_t} \quad (4)$$

## 2.2 Determinação da localização da falta

Conhecendo-se os tempos  $t_{A1}$  e  $t_{A2}$  apresentados na Fig. 1, a distância do ponto de falta,  $d$ , referente à barra A (terminal de medição), pode ser calculada por:

$$d = v \cdot \frac{t_{A2} - t_{A1}}{2} \quad (5)$$

em que  $v$  é a velocidade de propagação das ondas,  $t_{A1}$  o tempo em que a primeira frente de onda (incidente) é detectada no ponto de medição e  $t_{A2}$  o tempo de propagação da primeira onda refletida do ponto de falta. A velocidade de propagação de modo aéreo das ondas para uma LT sem perdas é definida por  $v = 1/\sqrt{lc}$ , sendo  $l$  e  $c$  a indutância e capacitância do modo aéreo por unidade de comprimento, respectivamente. Diante da independência de sincronização de dados entre os terminais da LT, as técnicas baseadas em medições de um terminal tornam-se mais simples, contudo, são mais passíveis a erros devido à necessidade de se identificar corretamente as ondas refletidas do ponto de falta, que podem ser confundidas com ondas refratadas em outros pontos do SEP, a exemplo do instante  $t_3$  ilustrado na Fig. 1 (Reis, 2019).

## 3. DETECÇÃO DAS ONDAS VIAJANTES

Para realizar a detecção das ondas viajantes induzidas pelos curtos-circuitos, diversas ferramentas matemáticas têm sido utilizadas, a exemplo do filtro differentiator-smoother (Guzmán *et al.*, 2018), da transformada de Park (Lopes, 2014) e da transformada *wavelet* (Costa; Souza, 2011).

Particularmente no que tange à transformada *wavelet*, é possível representar um sinal simultaneamente nos domínios do tempo e da frequência, o que tipicamente não é possível utilizando a transformada de Fourier.

Em 1992, *Daubechies* iniciou os estudos e conceituou a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) (*Daubechies*, 1992). Segundo *Ngu et al.* (2009), a *wavelet* mãe *Daubechies* 4, ou

db4, é uma das mais apropriadas para realizar uma detecção rápida dos transitórios em sistemas de potência.

A TWD foi originalmente a mais utilizada (*Saha et al.*, 2010), apesar da existência da TWDR (Transformada *Wavelet* Discreta Redutante), que consiste em uma versão da TWD e também tem sido amplamente utilizada na detecção de transitórios rápidos de falta em SEP (*Percival; Walden*, 2000).

Ainda que a TWD tenha sido precursora, *Costa & Souza* (2011) recomendam a TWDR como a técnica mais apropriada para detectar transitórios, uma vez que não utiliza o processo de subamostragem por dois, necessário pela TWD, trazendo como consequências a perda de resolução dos sinais no tempo. Basicamente, o algoritmo rápido para o cálculo dos coeficientes *wavelet* da TWDR é dado por (*Costa; Souza*, 2011):

$$w(k) = \sum_{l=1}^L h(l)x(k+l-L), \quad (6)$$

desde que  $\exists\{x(k-L+1), \dots, x(k-1), x(k)\}$ ; sendo  $w(k)$  os coeficientes *wavelet* do sinal  $x$  (que pode ser de tensão ou corrente),  $h$  os coeficientes do filtro *wavelet* e  $L = 4$  para *wavelet* db4.

Neste artigo, o algoritmo reportado em *Costa & Souza* (2011) foi utilizado para realizar a detecção dos surtos induzidos pelos curtos-circuitos, o qual foi aplicado aos sinais de tensão e corrente obtidos das medições no terminal local do sistema elétrico avaliado, que é descrito na seção 4.

## 4. METODOLOGIA DAS AVALIAÇÕES

O sistema elétrico de 230 kV/60 Hz, ilustrado na Fig. 3, foi implementado no Alternative Transients Program (ATP) (Leuven EMTP Center, 1987), em que curtos-circuitos foram aplicados ao longo da LT de 100 km de extensão, considerando-a perfeitamente transposta. Os parâmetros da LT foram obtidos de uma linha real que interliga as subestações Recife-Bongi (*Lopes*, 2014) os quais são apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2, sendo modelada a parâmetros distribuídos constantes na frequência. O passo de integração utilizado para as simulações foi de  $1 \mu s$ . Os dados obtidos pela simulação via ATP foram carregados no *software* Matlab® onde uma avaliação *offline* foi realizada. As medições de tensão e corrente repassadas ao algoritmo localizador de falta na barra local (Barra S) são fornecidos por um transformador de potencial capacitivo (TPC) e transformador de corrente (TC) ideais, exceto nas análises realizadas na seção 5.4, em que um modelo digital de TPC reportado na literatura é considerado.

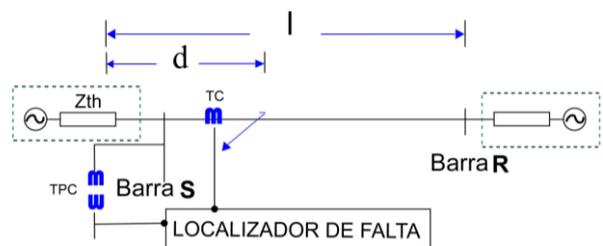


Fig. 3: Representação do SEP analisado

Sequência	Resistência ( $\Omega/\text{km}$ )	Reatância ( $\Omega/\text{km}$ )	Susceptância ( $\mu\text{S}/\text{km}$ )
Positiva	0,098	0,530	3,252
Zero	0,522	1,432	2,293

Tabela 1: Parâmetros elétricos da LT (Lopes, 2014)

Fontes	$V_{th}$ (p. u.)	Sequência Zero ( $\Omega$ )	Sequência Positiva ( $\Omega$ )
Barra S	$1,02e^{j0}$	$18,78e^{j86,91}$	$25,67e^{j89,81}$
Barra R	$0,98e^{-j10}$	$20,87e^{j86,90}$	$28,53e^{j88,06}$

Tabela 2: Parâmetros elétricos equivalentes de Thévenin das fontes (Lopes, 2014)

Após serem carregados no Matlab®, a transformada *wavelet* foi aplicada aos sinais de tensão e corrente do SEP para detecção e identificação dos tempos referentes às chegadas das ondas incidente e refletida do ponto de falta na barra S. A identificação foi realizada a partir do pico do coeficiente *wavelet* estimado e correspondente a onda incidente e refletida do surto. Por fim, uma análise de sensibilidade dos parâmetros de curtos-circuitos que mais podem afetar o desempenho dos algoritmos de localização de faltas, tais como: distância do curto-circuito, resistência de falta, ângulo incidente de falta, valor do SIR e o impacto do TPC são realizados. Na Fig. 4 a metodologia seguida é apresentada.



Fig. 4: Metodologia utilizada durante as simulações

Para se estimar o local da falta, a polaridade das ondas refletidas e das ondas refratadas originadas pelos pontos de descontinuidade na linha devem ser identificadas, de modo a detectar o tempo em que a primeira onda refletida do ponto de falta atinge o terminal monitorado e o tempo que a onda incidente leva para percorrer a distância entre o ponto de falta e o barramento monitorado. Assim, o primeiro pico do coeficiente *wavelet* se refere ao tempo que a onda incidente atinge a barra monitorada. Para determinar a polaridade de ondas refletidas empregou-se a expressão apresentada em (3). Para as análises com dados de corrente a impedância característica da linha é dada por  $Z_c = \sqrt{L_1/C_1}$ , para uma resistência de falta ( $R_f$ ) de  $1 \Omega$ ,  $Z_t = Z_1/R_f$ , resultando em  $\Gamma = 0,9951$ . Deste modo, a polaridade das ondas refletidas do ponto de falta para dados de corrente tem polaridade positiva. Na Figura 5, por exemplo, o pico do coeficiente *wavelet* relacionado a onda incidente e refletida do ponto de falta, para uma falta a 20 km do terminal S, resistência de falta de  $1 \Omega$  e ângulo de incidência de falta de  $90^\circ$ , são apontados.

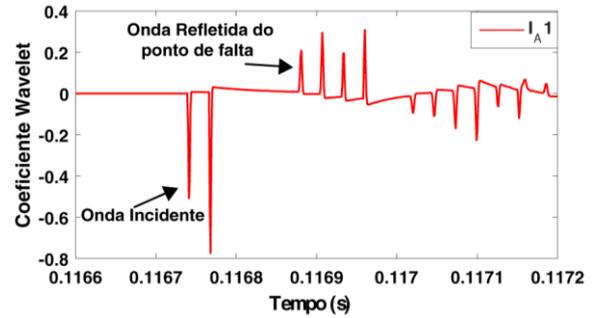


Fig. 5: Identificação dos picos incidente e refletido

Para efeitos comparativos, o erro da simulação é dado por:

$$\varepsilon(\%) = \frac{d - \tilde{d}}{\ell} \cdot 100 \quad (7)$$

em que  $d$  é a distância real da falta até a barra monitorada,  $\tilde{d}$  a distância estimada na simulação e  $\ell$  o comprimento da linha.

## 5. ANÁLISES E RESULTADOS

### 5.1 Influência da distância do ponto de falta

Uma análise dos registros oscilográficos dos coeficientes *wavelet* obtidos pela medição de corrente do terminal monitorado foi realizada para diversos locais de aplicação dos curtos-circuitos na LT, para uma falta monofásica da fase A para terra (AT), com resistência de falta de  $1 \Omega$  e ângulo de incidência de  $90^\circ$ . De modo a comparar as estimativas obtidas pelas simulações, o erro percentual relativo entre o ponto de aplicação do curto-circuito e o local estimado da falta foi calculado. Na Fig. 6 são apresentados os resultados obtidos para o erro relativo percentual e o local de aplicação da falta considerando a barra S como referência.

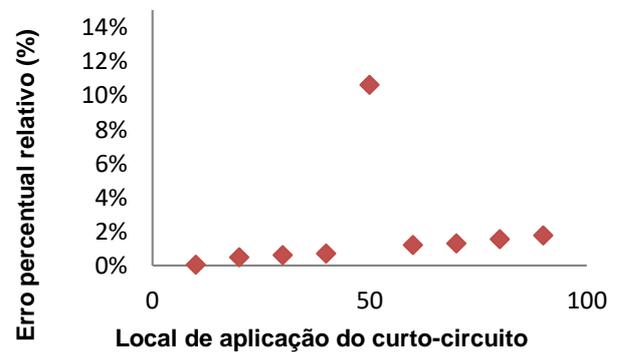


Fig. 6: Influência da distância para localização do curto-circuito

Da Fig. 6, à medida que o local do curto-circuito se afasta da barra monitorada, o erro percentual relativo tende a crescer, sobretudo apresentando maiores erros para faltas localizadas no meio da linha, para  $L=50$  km o erro relativo percentual obtido foi de  $\varepsilon = 11,8\%$ , em decorrência da sobreposição de ondas refletidas do ponto de falta e ondas refletidas do terminal remoto. Neste sentido, nas Fig. 7 e 8 são apresentados os primeiros picos dos coeficientes *wavelet* para faltas distantes 20 km e 50 km, respectivamente.

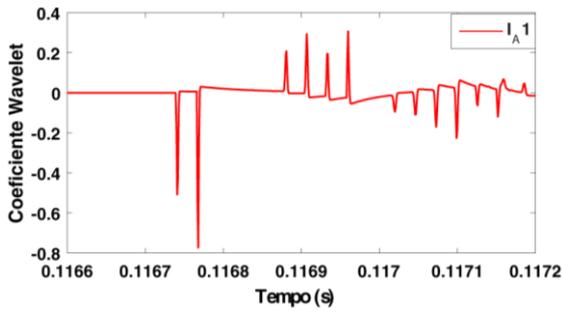


Fig. 7: Coeficientes *wavelet* para uma falta AT a 20 km da barra S

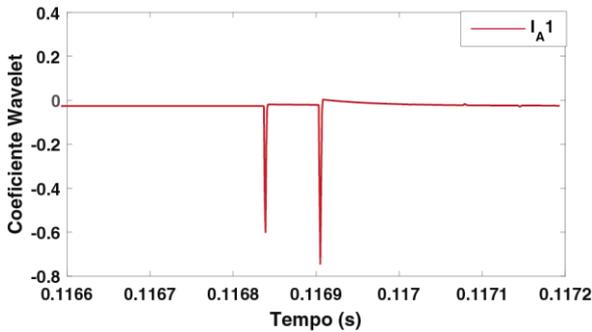


Fig. 8: Coeficientes *wavelet* para uma falta AT a 50 km da barra S

Das Fig. 7 e 8, maiores erros são encontrados para faltas no meio da LT devido a sobreposição entre as ondas refletidas do terminal remoto (Barra R) e as ondas refletidas do ponto de falta, fazendo com que a identificação correta do pico referente a onda refletida do ponto de falta seja comprometida. Além disso, caso o sistema fosse composto por mais barras o erro de medição tenderia a crescer para faltas mais distantes do terminal de referência, visto que ondas refletidas do ponto de falta poderiam ser confundidas com outras reflexões de outras discontinuidades do sistema.

### 5.2 Influência da resistência de falta

Para análises de sensibilidade da resistência de falta, curtos-circuitos monofásicos da fase A para terra, distantes 20 km do terminal monitorado, foram aplicados para diferentes valores de resistências de falta, a exemplo de 1, 10, 100, 500, 1000 e 1500  $\Omega$ . Na Fig. 9 e Fig. 10 são ilustrados os registros oscilográficos dos coeficientes *wavelet* para faltas de 1  $\Omega$  e 1500  $\Omega$ , respectivamente.

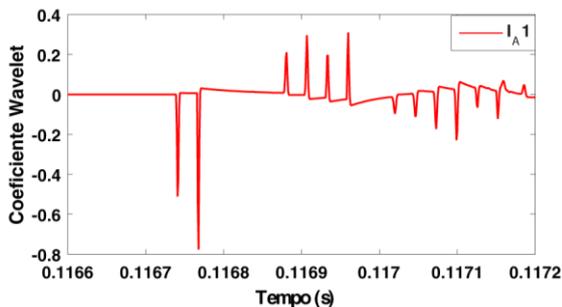


Fig. 9: Coeficientes *wavelet* para uma falta AT a 20 km da barra S para uma resistência de falta de 1  $\Omega$

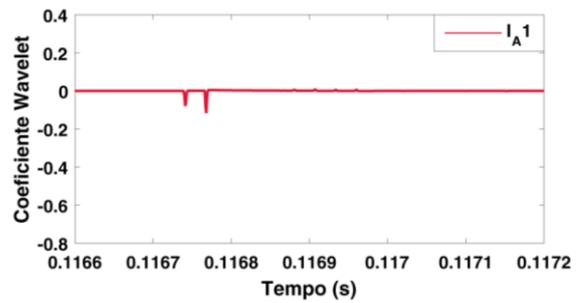


Fig.10: Coeficientes *wavelet* para uma falta AT a 20 km da barra S para uma resistência de falta de 1500  $\Omega$

Das Fig. 9 e 10, percebe-se que ocorrem atenuações para resistências muito altas provocando uma redução na amplitude dos coeficientes *wavelet*, podendo afetar na detecção correta das ondas viajantes, e, conseqüentemente, na estimativa do local de curto-circuito.

### 5.3 Influência do ângulo de incidência

Tipicamente, curtos-circuitos que têm origem no pico da tensão envolvida com a falta podem ser mais perceptíveis pelos dispositivos de monitoramento devido a uma maior variação de tensão. Em contrapartida, os transitórios para faltas que tem início no instante que a tensão envolvida no distúrbio passa próximo a zero podem ser menos notórios (Reis, 2019) como pode ser visto nas Fig. 11 e Fig. 12 pela representação do sinal de tensão da fase A, para um curto-circuito AT simulado via ATP para  $\theta$  próximo a zero e 90°, respectivamente:

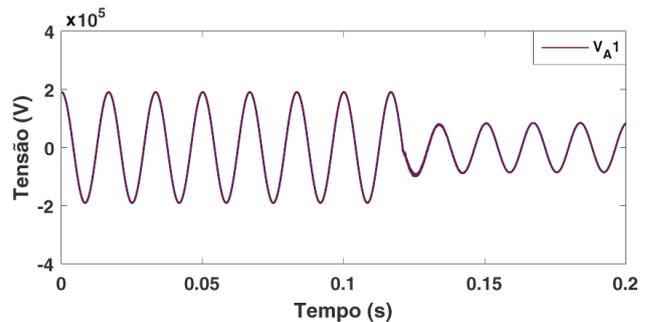


Fig. 11: Sinal de tensão da fase A para uma falta AT com ângulo incidente próximo a zero

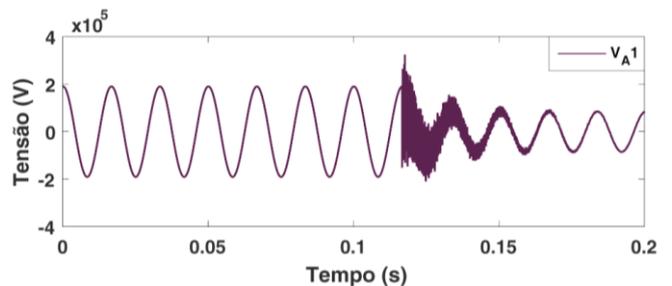


Fig. 12: Sinal de tensão da fase A para uma falta AT com ângulo incidente próximo ao pico da tensão

De modo a realizar uma análise de sensibilidade do ângulo de incidência de falta para algoritmos baseados no domínio do tempo, uma falta monofásica AT a 20 km da barra

monitorada foi simulada via ATP para ângulos incidentes de falta iguais a 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, 165° e 180°. Os erros relativos percentuais obtidos para cada simulação são ilustrados na Fig. 13.

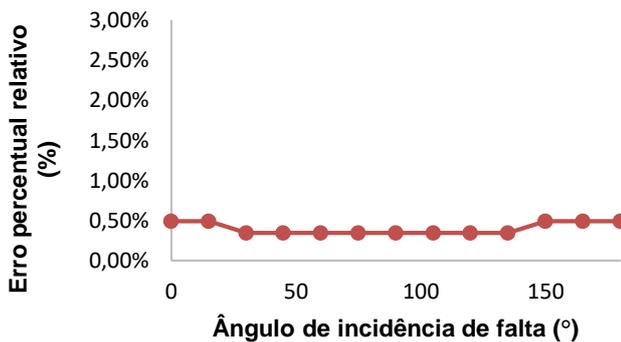


Fig. 13: Influência do ângulo de incidência de falta para localização do curto-circuito

Dos resultados obtidos, observa-se que desbalanceamentos são detectados para ângulos próximos a 0°, além disso, praticamente não houve grandes variações, visto que ruídos não foram considerados.

#### 5.4 Influência do TPC

O modelo de TPC utilizado para as análises desta seção é reportado em IEEE POWER SYSTEMS RELAYING COMMITTEE (2004) para estudos de proteção. Como o objetivo é investigar o impacto de medições de tensão em funções de localização de faltas baseadas no domínio do tempo, o TC é utilizado como um modelo ideal evitando assim problemas de saturação ou desvios de módulo e fase das correntes. A resposta em frequência para o modelo avaliado é ilustrada na Fig. 14, para a resposta de módulo, e na Fig. 15 para a resposta de fase, ao longo de um espectro de 10 Hz a 10 kHz.

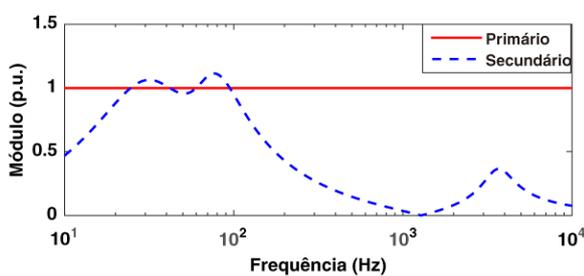


Fig. 14: Resposta em frequência de módulo (p.u.)

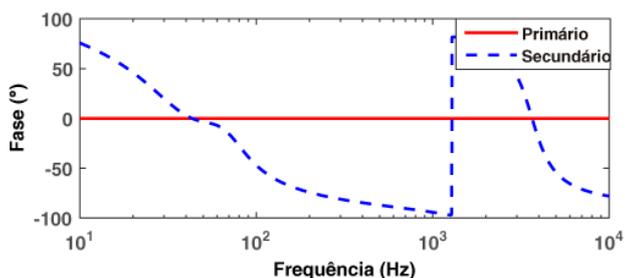


Fig. 15: Resposta em fase (°)

Com base na resposta em frequência do TPC ilustrada na Fig. 14, verifica-se atenuação dos componentes de altas frequências. Ademais, desvios de fase surgem dos sinais de tensão medidos para componentes diferentes da fundamental, conforme apresentado na Fig. 15. Portanto, mesmo que em regime permanente os sinais do secundário sejam uma réplica do primário, durante curtos-circuitos os sinais do secundário não o são. Assim, estes comportamentos podem impactar o desempenho dos processos de proteção, especialmente para algoritmos de localização de curtos-circuitos em que os dados de tensão são utilizados como entrada de tais técnicas (Reis *et al.*, 2019).

Apresenta-se, na Fig. 16, os sinais de tensão do primário e do secundário do TPC, simulado no ATP durante uma falta ABT no SEP da Fig. 3, com ângulo de incidência de falta de 90° e resistência de falta de 1 Ω aplicado a 10 km do terminal de medição.

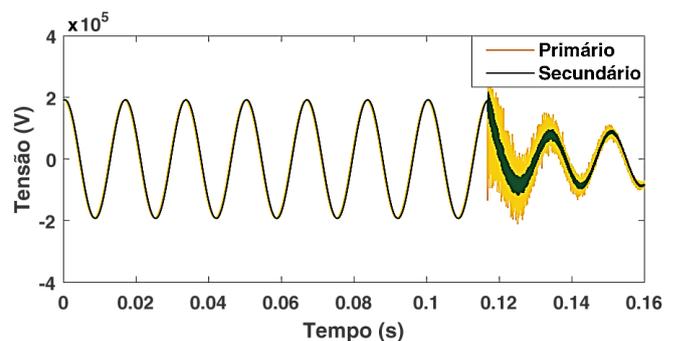


Fig. 16: Resposta dinâmica dos sinais de tensão do primário e do secundário do TPC

Conforme ilustrado na Fig. 16, durante o regime permanente a curva de tensão secundária é uma réplica da tensão primária. Contudo, após o ponto de aplicação da falta, a medição de tensão é prejudicada, de modo que os transitórios do secundário são consideravelmente amortecidos, estando de acordo com a resposta em frequência apresentada na Fig. 14. Portanto, algoritmos de localização de faltas podem atuar indevidamente diante da atenuação sofrida pelo sinal do secundário durante a ocorrência de uma falta (Kasztenny *et al.*, 2000). Neste cenário, na Fig. 17 são ilustrados os primeiros coeficientes *wavelet* normalizados para um curto-circuito (ABT) a uma distância de 20 km, com ângulo incidente de 0° e resistência de falta de 1 Ω para os sinais de tensão do primário e do secundário.

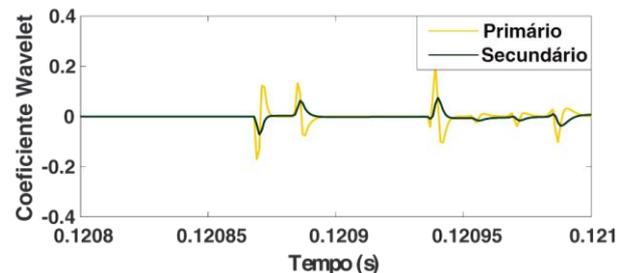


Fig. 17: Coeficientes *wavelet* referente ao primário e ao secundário do TPC para uma falta ABT a 20 km da barra S

Da Fig. 17, os sinais transitórios dos coeficientes *wavelet* do secundário não representam uma réplica do

primário, o que pode afetar o desempenho das técnicas de localização de faltas de um terminal, dado que  $t_{A2}$  será detectado de maneira incorreta.

Nesta conjuntura, para determinar a polaridade das ondas refletidas de tensão, utilizando as equações (1) e (2) o coeficiente de reflexão das tensões é dado por:

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_c - Z_t}{-Z_c - Z_t'} \quad (8)$$

como  $Z_c = \sqrt{L_1/C_1}$ , para uma resistência de falta ( $R_f$ ) de  $1 \Omega$ ,  $Z_t = Z_1/R_f$ ,  $\Gamma = -0,9951$ . Dessa forma, a polaridade das ondas refletidas do ponto de falta, para dados de tensão, tem polaridade negativa. No que tange às polaridades das ondas viajantes calculadas a partir das medições do TPC, simulações para a mesma configuração da Fig. 17 foram executadas de modo a comparar os sinais transitórios de tensão obtidos com um TPC ideal, cujo resultado é ilustrado na Fig. 18:

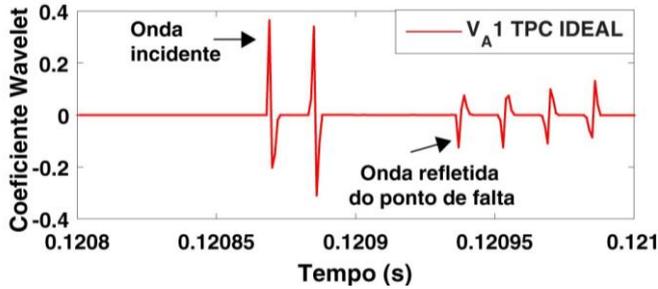


Fig. 18: Coeficientes *wavelet* para uma falta ABT a 20 km da barra S para uma resistência de falta de  $1 \Omega$ , ângulo de incidência de  $0^\circ$  referente ao sinal de tensão do TPC ideal

Das Fig. 17 e 18, observa-se a inversão de polaridade das ondas viajantes para o sistema com o TPC real. Como a primeira onda que atinge o terminal de medição é a onda incidente, os primeiros picos se referem aos tempos em que a onda incidente atinge o terminal de medição em ambas as figuras. Como indicado na Fig. 18, o terceiro coeficiente *wavelet* se refere ao tempo que onda refletida do ponto de falta atinge o terminal monitorado. Entretanto, para a Fig. 17, o quarto coeficiente *wavelet* do sinal do secundário estaria relacionado à chegada da onda refletida no terminal monitorado (polaridade negativa), porém da Fig. 18 (TPC ideal) o mesmo não se refere à onda refletida do ponto de falta, conseqüentemente maiores erros seriam obtidos neste caso devido à inversão de polaridade causada pelo TPC.

Deste modo, a resposta dinâmica do TPC afeta a confiabilidade dos algoritmos de localização de faltas de um terminal. Caso apenas medições de tensão estejam disponíveis, o TPC pode alterar a polaridade das ondas viajantes, fazendo com que o desempenho da técnica seja comprometido.

### 5.5 Influência do SIR

O SIR consiste na relação entre a impedância da fonte e a impedância da linha, que é definido conforme (Christopoulos; Wright, 1999):

$$SIR = \frac{|Z_{fonte}|}{|Z_{linha}|} \quad (9)$$

Para verificar a influência do SIR variou-se a impedância da fonte de modo a obter valores de SIR iguais a 0,5, 1, 10 e 20. As análises foram feitas através dos gráficos dos coeficientes *wavelet* obtidos pelos sinais de tensão de um TPC ideal e do modelo utilizado na seção 5.4. Curtos-circuitos foram simulados para faltas AT distantes a 20 km da barra S, para uma resistência de falta de  $1 \Omega$  e ângulo de incidência de falta igual a  $90^\circ$ . Na Fig. 19 são apresentados os resultados obtidos para as medições provenientes de um TPC ideal e do modelo avaliado de TPC.

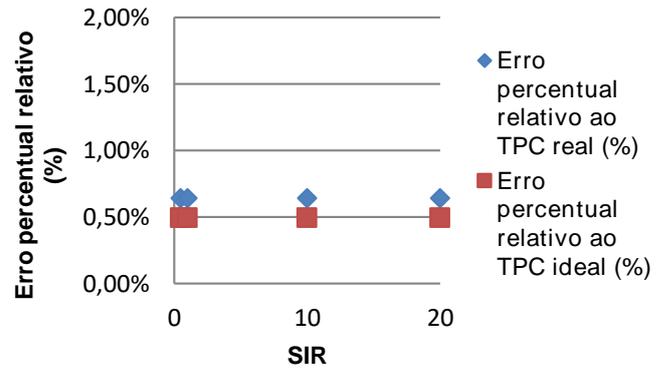


Fig. 19: Influência do SIR para localização de faltas

Da Fig. 19, nota-se que medições provenientes de TPC apresentam maiores erros, apesar disso o aumento do valor do SIR não interferiu na identificação da onda refletida do ponto de falta para uma distância de 20 km considerando uma linha de 100 km. Além disso, espera-se que maiores erros sejam obtidos para curtos-circuitos localizados no meio e na segunda metade da LT, uma vez que a identificação da onda refletida torna-se mais complicada principalmente pelas distorções introduzidas pelo TPC.

A técnica utilizada neste artigo se configura basicamente na determinação das polaridades das ondas refletidas e detecção dos tempos referentes à onda incidente e refletida do ponto de falta, obtidas por meio da aplicação da TWDR nos sinais de tensão e corrente do terminal avaliado. Sendo a detecção realizada de forma visual, o que se configura como a principal limitação desta técnica. Entre os desafios dos algoritmos de localização de faltas utilizando dados de um terminal, estão o desenvolvimento de técnicas mais robustas que viabilizam a detecção mais confiável das ondas refletidas do ponto de ocorrência do curto-circuito e que sejam imunes aos parâmetros que mais afetam os algoritmos de localização de faltas, a exemplo dos parâmetros avaliados nesta última seção.

## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo, análises de sensibilidade foram realizadas frente ao desempenho de métodos de localização de faltas de um terminal baseados no domínio do tempo, de modo a identificar suas limitações e ressaltar os desafios a serem

enfrentados para o desenvolvimento de novas soluções, uma vez que este tipo de técnica mostra-se como uma alternativa robusta e de menor custo que os métodos de dois terminais, visto que sua aplicação não depende de canais de comunicação. Para tanto, os impactos dos parâmetros de falta, de dispositivos de medição e de diferentes valores de SIR foram avaliados.

A partir dos resultados obtidos, constatou-se que para o SEP avaliados maiores erros foram encontrados para curtos-circuitos localizados no meio da linha e para ângulos de incidência de falta próximos de 0° devido à atenuação sofrida pelos transitórios para tais tipos de curtos-circuitos. Além disso, altas resistências de falta também provocam atenuação dos transitórios.

O impacto do TPC na alteração da polaridade das ondas viajantes pode afetar na detecção correta do tempo em que a onda refletida atinge o terminal de referência e, conseqüentemente, na estimativa da localização do curto-circuito. Basicamente, o aumento do valor do SIR não provocou grandes discrepâncias na estimativa da localização dos curtos-circuitos avaliados.

Como sugestões para continuidade das pesquisas realizadas neste trabalho, particularmente no que tange ao método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes com dados de um terminal, propõe-se o estudo de formas que viabilizam a detecção mais confiável das ondas refletidas do ponto de ocorrência do curto-circuito. Além disso, fazem-se necessárias análises dos benefícios em se compensar a resposta dinâmica dos TPC, análise de diferentes configurações do sistema, esquema de transposição das LT, outros tipos de métodos, etc.

#### AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Copele) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo suporte financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- Bewley, L. V. (1963) *Traveling waves on transmission systems*. New York: Dover Publications Inc.
- Christopoulos, C; Wright, A. (1999). *Electrical Power System Protection*. 2nd Edition, Springer
- Costa, F. B.; Souza, B. A. (2011). Fault-induced transient analysis for real-time fault detection and location in transmission lines. *International Conference on Power Systems Transients*, Delft, Netherlands.
- Daubechies, I. *Ten Lectures on Wavelets*. New Jersey: Springer, 1992.
- Gale, P. F.; Crossley, P. A; Bingyin, Xu; Yaozhong, Ge; Cory, B. J.; Barker, J. R. G. (1993). Fault location based on travelling waves. *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, p. 54 – 59.
- Guzmán, A.; Kastenny B.; Tong Y.; Mynam, M. V. (2018). Accurate and Economical Travelling-Wave Fault Locating Without Communications. *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc*.
- Ha, H. X.; Zhang, B. H.; Lv, Z. L. (2003). A novel principle of single-ended fault location technique for ehv transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 4, p. 1147– 1151. ISSN 0885-8977.
- IEEE Power Systems Relaying Committee, 2004. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org>>.
- Kasztenny, B.; Sharples, D.; Asaro, V.; Pozzuoli. (2000). M. Digital relays and capacitive voltage transformers: Balancing speed and transient overreach. *Texas A&M 53rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, Texas, April.
- Leuven EMTP Center. (1987). *ATP - Alternative Transient Program: Rule book*. Hervelee, Belgium.
- Liu, Y.; Sheng, G.; He, Z.; Jiang, X. (2012). A traveling wave fault location method for earth faults based on mode propagation time delays of multi-measuring points. *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)*. ISSN 0033-2097.
- Lopes, F. V. (2014). *Localização de faltas em tempo real baseada na teoria de ondas viajantes usando dados não sincronizados de dois terminais*. Tese (Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande.
- Ngu, E. E.; Montañó, R.; Ramar, K.; Cooray, V. (2009). Influence of various transmission line models on the wavelet transformation based fault location methods. *IEEE International Conference on Signal and Image Processing Application*, p. 48 – 52, Nov.
- Percival, D. B.; Walden, A. (2000). *Wavelet Methods for Time Series Analysis (Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics)*. [S.l.]: Cambridge University Press.
- Reis, R. L. de A. (2019). *Aprimoramento de soluções de localização de curtos circuitos em linhas de transmissão*. Tese (Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande
- Saha, M. M.; Izykowski, J.; Rosolowski, E. (2010). *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8.