LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADA NA ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS DE ALTAS FREQUÊNCIAS

ANA K. APOLO[1], GUSTAVO D. FERREIRA[2]

[1]Laboratório Lasep, Departamento de Engenheria Electrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 103, Porto Alegre, RS, CEP: 90035190
E-mails: haniapolo@gmail.com

[2]Laboratório Lasep, Departamento de Engenheria Electrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 103, Porto Alegre, RS, CEP: 90035190
E-mails: gferreira@ufrgs.br

Abstract— Electric power distribution systems are continuously exposed to faults, therefore fast and accurate fault location is of paramount importance for utilities. Although the currently available techniques are able to estimate fault distance with relative accuracy, some intrinsic characteristics of distribution systems still impose limitations to fault location in radial feeders. In this context, this work presents a methodology based on the analysis of the high frequency transient generated by faults using only one-terminal measurements. The fault distance from the measurement terminal is determined by correlating the characteristic frequencies identified in the transient spectrum and theoretical frequencies calculated for the possible propagation paths. The formulation is based on a detailed model of distribution lines, considering the modification of Carson's equations, the frequency dependence and inclusion of skin effects and the ground current return at high frequencies. The proposed technique was evaluated considering fault simulations in the IEEE 34 nodes distribution feeder. Results presented include the comparison with a fault location method currently considered as the state of the art.

Keywords— Fault Location, transients, Electric power distribution systems, power system, frequency characteristic

Resumo— Os sistemas de distribuição de energia estão constantemente expostos à ocorrência de faltas, o que torna de primordial importância para as concessionárias que estas sejam localizadas com rapidez e precisão. Embora as técnicas disponíveis atualmente sejam capazes de estimar a distância das faltas com relativa exatidão, algumas características intrínsecas aos sistemas de distribuição ainda impõem limitações à localização de faltas em alimentadores radiais. Neste contexto, este trabalho apresenta uma metodologia baseada na análise dos transitórios de alta frequência gerados pelas faltas utilizando medições somente no terminal local. A distância da falta em relação ao terminal de medição é determinada através da comparação entre as frequências características identificadas no espectro do transitório, e as frequências teóricas calculadas para os possíveis caminhos de propagação. A formulação é baseada em um modelo detalhado das linhas de distribuição, considerando a modificação nas equações de Carson, a dependência da frequência e a inclusão dos efeitos pelicular e da corrente de retorno pela terra para altas frequências. A técnica proposta foi avaliada considerando simulações de faltas no alimentador IEEE 34 barras. Os resultados apresentados incluem a comparação com um método de localização de faltas considerado estado da arte atualmente.

Palavras-chave— Localização de faltas, transitórios, sistemas de distribuição de energia, sistemas de potência, frequência caraterística.

1 Introdução

A constante expansão dos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) e a crescente demanda por confiabilidade por parte dos consumidores são alguns fatores que motivam as concessionárias a buscarem formas de mitigar o impacto das faltas que ocorrem nas redes elétricas. A Localização de Faltas (LF) é considerada uma alternativa eficiente para a redução da duração das interrupções, pois permite maior rapidez no restabelecimento das cargas.

Métodos de LF baseados na análise da Impedância Aparente (IA) vêm sendo utilizados há muitos anos, em especial devido ao baixo custo de implementação (Saha, Izykowski, Rosolowski, 2010). No entanto, como os SDEE tradicionais possuem grande número de ramais laterais, a aplicação destes métodos torna-se limitada (Ferreira, 2013).

Os métodos descritos em Lee, *et al.* (2004), Zhu, *et al.* (1997) e Choi, *et al.* (2004) consideram a existência de laterais no alimentador. Porém a técnica proposta para redução dos laterais e cargas não é adequada para alimentadores de grande porte (Ferreira, 2013).

Atualmente, os avanços tecnológicos na área de transdução e processamento digital de sinais têm viabilizado, do ponto de vista técnico e econômico, a implantação de novas técnicas, como Transitórios de Alta Frequência (TAF), capazes de estimar o local da falta de forma única e com exatidão satisfatória (Ferreira, 2013). Em geral, TAF utilizam uma transformação tempo-frequência para análise do conteúdo espectral do transitório originado pela falta. Esta análise permite identificar frequências características associada à LF, as quais apresentam a maior amplitude (energia) no espectro, e geralmente localizam-se na faixa de frequências acima de 10 kHz (Swift, 1979, Magnago, Abur 1999). Em relação às técnicas baseadas na IA, a análise de TAF mostra-se menos suscetível às condições pré-falta da rede, em especial à incerteza associada à carga (Pourahmadi-Nakhli, Safavi, 2011).

Em Borghetti *et al.* (2006) a análise de TAF foi efetuada utilizando a transformada Wavelet contínua visando à estimação da distância da falta. Melhorias no desempenho do método foram possíveis considerando a inferência da Wavelet-mãe a partir da TAF gerado pela falta (Borghetti *et al.*, 2008), bem como através da correlação dos transitórios transmitidos e refletidos (Borghetti *et al.*, 2011). Em comum as técnicas utilizam a modelagem de linhas transpostas, sendo que a matriz de transformação modal é obtida por meio de simulações no ATP/EMTP (Boneville Power Administration, 2007). Pourahmadi-Nakhli e Safavi (2011) propuseram uma técnica similar à de Borghetti *et al.* (2006). No entanto, foi proposta a utilização de uma rede neural artificial para identificar a frequência característica no espectro do transitório gerado pela falta. Em Gazzana *et al.*, (2014) é proposta uma abordagem que integra a análise da IA e de TAF, visando a determinação da distância e do ramal em falta, respectivamente. Da mesma forma como em Pourahmadi-Nakhli e Safavi (2011), a modelagem da propagação dos transitórios na rede foi simplificada com o uso de uma matriz de transformação modal constante e independente da frequência, o que implica em erros consideráveis na estimativa da LF.

As técnicas previamente descritas têm aplicação limitada a redes de pequeno porte, sendo pouco efetivas frente à complexidade da topologia dos SDEE típicos. Neste contexto, este artigo apresenta uma metodologia inovadora baseada na análise de TAF, a qual é capaz de estimar a LF em SDEE ramificados a partir de medições no terminal local. A distância da falta em relação ao terminal de medição é determinada através das frequências características identificadas no espectro do transitório. Um dos principais diferenciais do método diz respeito à modelagem detalhada das linhas de distribuição, considerando a transformação modal dependente da frequência e a inclusão dos efeitos pelicular e da corrente de retorno pela terra para altas frequências. O desempenho do método proposto na identificação da distância da falta é demonstrado através de um estudo de caso, incluindo a comparação com os resultados apresentados em Borghetti, *et al.* (2008).

2 Metodologia Proposta

A metodologia proposta foi desenvolvida visando à aplicação em SDEE, utilizando medições no terminal local e no terminal de saída de reguladores de tensão. Neste caso, assume-se a existência de uma etapa anterior para detecção e classificação da falta, bem como a disponibilidade dos sinais das tensões trifásicas durante a falta por meio de um oscilógrafo. Considerando estes pressupostos, as etapas do método são detalhadas a seguir.

2.1 Filtragem

O sinal de tensão associado ao transitório é filtrado utilizando um filtro passa-altas, assegurando que os componentes espectrais sejam avaliados em uma escala adequada. Neste trabalho foi adotado o filtro passa-altas do tipo Butterworth de ordem 3, com uma frequência de corte de 2 kHz.

2.2 Transformação Tempo-Frequência

O espectro do transitório apresenta diferentes distribuições de frequências de acordo com a localização das faltas. A transformação tempo-frequência do sinal transitório permite identificar a frequência característica associada a uma falta específica, sendo esta frequência caracterizada pela maior amplitude dentre as demais componentes do espectro para as três fases. Neste trabalho, a transformação tempo-frequência dos sinais de tensão é efetuada pela aplicação da Transformada de Fourier Janelada, expressa de acordo com (1):

$$X(\omega,m) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]\, w_s[n-m]\, e^{-j\omega_k n}, \quad k = 1,\ldots,K-1. \quad (1)$$

Onde $x[n]$ é a n-ésima amostra do sinal de tensão no domínio do tempo (V), N é o número total de amostras do sinal, K é o número de componentes do espectro, m é o tamanho da janela, $\omega_k = 2\pi k/K$; e w_S é a função janela de Hamming (Oppenheim, Schafer, 2009).

2.3 Cálculo das Matrizes de Impedância e Admitância

A determinação dos parâmetros das linhas na frequência fundamental permite simplificações nas equações de Carson (Kersting, 2002), as quais não são aplicáveis para a análise de TAF. Desta forma, neste trabalho a matriz impedância das linhas é calculada considerando sua dependência da frequência (Dommel, 1996). Essa abordagem se mostra mais rigorosa, tendo em vista que o modelo considera além do desequilíbrio entre as fases, o refinamento das equações de Carson, considerando os efeitos da circulação de corrente pela terra para o caso dos TAF, bem como o efeito pelicular, o qual demonstra relevância nas faixas de frequências de interesse (Hedman, 1965). A matriz impedância ($\mathbf{Z}$) tem seus elementos dados por:

$$Z_{ii} = R_i + \Delta R_{ii} + j\left(\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{2h_i}{r_i} + X_i + \Delta X_{ii}\right) \quad (2)$$

$$Z_{ij} = \Delta R_{ij} + j\left(\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{S_{ij}}{D_{ij}} + \Delta X_{ij}\right) \quad (3)$$

onde ω é a frequência associada à maior energia no espectro do transitório (rad/s); R_i é a resistência AC do condutor (Ω/m); X_i é a reatância própria do condutor (Ω/m); h_i é a altura do condutor em relação ao solo (m); r_i é o raio do condutor (m); S_{ij} é a distância entre o condutor i e a imagem do condutor j (m); D_{ij} é a distância entre os condutores das fases i e j (m); μ_0 = 4π.10–7 H/m é a permeabilidade magnética do vácuo; e ΔR_{ii}, ΔR_{ij}, ΔX_{ii} e ΔX_{ij} são fatores de correção que consideram o efeito da corrente de retorno pela terra (Ω/m). A determinação destes fatores é demonstrada no Apêndice.

O cálculo da resistência (R_i) e da reatância (X_i) do condutor considerando o efeito pelicular é efetuado a partir de (4) e (5), respectivamente (Stevenson, 1966):

$$R_i = \frac{mr\,R_i^0}{2}\frac{ber(mr)bei'(mr)-bei(mr)ber'(mr)}{bei'(mr)^2+ber'(mr)^2} \quad (4)$$

$$X_i = \frac{4}{mr}\frac{bei(mr)bei'(mr)-ber(mr)ber'(mr)}{bei'(mr)^2+ber'(mr)^2} \quad (5)$$

Onde R_o^i é a resistência em corrente contínua do condutor da fase i (Ω/m); r é o raio do condutor (m); *ber* e *ber*' são as funções reais de Bessel de primeira e segunda ordem; e *bei* e *bei*' são as funções imaginárias de Bessel de primeira e segunda ordem; e

$$m = \sqrt{\frac{\omega\,\mu_o\,\mu_r}{R_i^o}} \quad (6)$$

onde μ_r é a permeabilidade relativa do condutor e $\mu_0 = 4\pi.10^{-4}$ H/km é a permeabilidade magnética do vácuo.

A matriz admitância das linhas (**Y**) por sua vez, não requer modificações para aplicações em frequências inferiores a 1 MHz (Hedman, 1965), sendo determinada conforme descrito em (Kersting, 2002).

2.4 Transformação modal

A decomposição modal de sistemas de transmissão equilibrados geralmente é efetuada por meio de matrizes constantes, tais como as matrizes de Clarke, Fortescue e Karrembauer. No caso especial das linhas trifásicas não-transpostas que apresentam simetria vertical, a aplicação da matriz de Clarke resulta em um modo de propagação exato e dois modos mutuamente acoplados, denominados quase-modos. Esta matriz é utilizada pela grande maioria das técnicas de LF baseadas em TAF encontradas na literatura, sendo que esta abordagem não se mostra adequada para o caso das linhas desequilibradas que compõem os SDEE (Faria, Briceno, 1997).

No caso dos sistemas desequilibrados a decomposição nos modos de propagação é efetuada através da matriz de transformação $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1\ \mathbf{p}_2\ \mathbf{p}_3]$, onde $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$ e $\mathbf{p}_3$ são autovetores complexos e linearmente independentes associados aos autovalores do produto **YZ**, tal que (Hedman, 1965):

$$(\lambda_i\mathbf{I}-\mathbf{ZY}) = \mathbf{0} \quad (7)$$

Onde λ_i são os autovalores do produto **ZY**; e **I** é a matriz identidade de ordem 3.

A matriz de propagação modal (γ) é calculada de acordo com (8):

$$\boldsymbol{\gamma} = \sqrt{\mathbf{P}^{-1}(\mathbf{ZY})\mathbf{P}} \quad (8)$$

A matriz (8) é complexa, sendo sua forma geral dada por (9):

$$\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\alpha} + j\boldsymbol{\beta} \quad (9)$$

Onde $\boldsymbol{\alpha}$ é a matriz de atenuação modal (nepers); e $\boldsymbol{\beta}$ é a matriz fator de fase modal (radianos).

Por fim, a velocidade de propagação do modo i (m/s) pode ser obtida conforme (10):

$$v_i = \frac{2\pi f}{\beta_i} \quad (10)$$

Onde f é a frequência de maior amplitude no espectro do transitório (Hz).

2.5 Determinação da Frequência Teórica

A frequência teórica associada a uma dada falta é estimada por meio de (11).

$$f_{cm} = \frac{(\theta_s+\pi)v_i}{n_p\pi d_f} \quad (11)$$

Onde v_i é a velocidade de propagação do modo i (m/s^2); d_f é a distância da falta (m); θ_s é o ângulo do coeficiente de reflexão no terminal da fonte (rad.); e n_p é o coeficiente relacionado ao número de reflexões da onda no terminal local e nos demais terminais da linha para o caminho de propagação do transitório p.

O coeficiente n_p pode assumir os valores 2 ou 4, conforme os seguintes critérios (Borghetti *et al.*, 2008):

- n_p = 2 se os dois terminais entre o caminho de propagação p são circuitos abertos ou curto-circuitos, ou quando o terminal da linha contém um transformador (considerado como circuito aberto em altas frequências).
- n_p = 4 se um dos terminais do caminho de propagação p é um circuito aberto e o outro é um curto-circuito. Ou ainda, se o caminho p apresenta descontinuidades (derivações ou conexões de linhas com impedâncias características distintas).

2.6 Análise do Espectro

A análise do espectro tem como objetivo identificar a frequência característica associada ao caminho de propagação do transitório gerado pela falta. Assumindo que o tipo de falta seja conhecido, neste artigo a tensão de modo 0 é utilizada no caso de faltas envolvendo à terra, enquanto que a tensão de modo 1 é analisada para as demais faltas (Gazzana *et al.*, 2014).

Conforme comentado anteriormente, a identificação da frequência característica associada à falta é efetuada pela análise da energia de cada componente do espectro. Como a componente associada à falta não é originada da reflexão, é menos sujeita à atenuação. Desta forma, pode ser identificada como a componente de maior energia dentre as demais frequências do espectro. A energia associada à componente de frequência k é normalizada em relação à maior energia do espectro do transitório, conforme (12):

$$E_k = \frac{X(\omega_k, m)^2}{\max\limits_k\left\{X(\omega_k, m)^2\right\}}, \quad k = 1,...,K-1. \quad (12)$$

onde $X(\omega_k, m)$ é calculado de acordo com (1).

2.6 Determinação da Distância da Falta

A distância da falta em relação ao terminal de medição (d_f) é calculada de acordo com:

$$d_f = \frac{(\theta_s + \pi)v_i}{4\pi f_{cm}} \qquad (13)$$

Onde f_{cm} é a frequência característica com maior energia no espectro do transitório (Hz).

3 Estudo de Caso

O desempenho da metodologia proposta foi avaliado utilizando o alimentador IEEE 34 barras (Kersting, 2001), sendo as faltas no alimentador simuladas por meio do ATP/EMTP (Boneville Power Administration, 2007). Para fins de comparação, foram adotadas as mesmas modificações consideradas em Borghetti *et al.* (2008), as quais incluem a utilização de linhas equilibradas e cargas balanceadas.

O modelo do alimentador IEEE 34 barras implementado no ATP/EMTP é mostrado na Figura 1. O sistema equivalente a montante da subestação é representado por uma fonte de 115 kV (50 Hz) e uma impedância equilibrada $Z_0 = 4 + j48{,}38\ \Omega$ e $Z_1 = Z_2 = 1{,}9 + j22{,}88\ \Omega$. Os transformadores da subestação e das cargas foram representados pelo modelo BCTRAN, com parâmetros nominais de 5 MVA, 150/24 kV, *V*sc = 9% e 1 MVA, 24/0,4 kV, *V*sc = 4%, respectivamente (Borghetti *et al.*, 2008). A existência de dois reguladores de tensão ao longo da rede requer a inclusão de medidores em suas barras terminais, tendo em vista que os mesmos se comportam como circuitos abertos na faixa das altas frequências. Desta forma, é considerada a existência de medidores nas barras 800 (subestação) e 832 (regulador de tensão). A representação das linhas foi efetuada pelo modelo JMARTI de parâmetros distribuídos.

4 Resultados

A seguir são demonstrados os resultados de testes comparativos entre a metodologia apresentada neste trabalho e a proposta por Borghetti, *et al.*, (2008), a qual é considerada como base para diversas técnicas propostas posteriormente (Pourahmadi-Nakhli e Safavi, 2011; Sadeh, Bakhshizadeh e Kazemzadeh, 2013; Gazzana *et al.*, 2014). Tendo em vista a reprodução dos cenários de teste apresentados em Borghetti, *et al.*, (2008), serão consideradas faltas sólidas do tipo fase-terra e faltas trifásicas à terra.

A Figura 2 mostra o espectro do transitório associado ao modo de propagação 1, para uma falta trifásica na barra 812. Neste caso, a componente de maior energia é associada à frequência de 3,68 kHz, sendo este resultado semelhante ao apresentado em Borghetti *et al.* (2008).

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação entre os erros nas frequências teóricas associadas a cada caminho de propagação do transitório gerado pela falta originada na barra 812, obtidas por meio da técnica proposta e relatadas em Borghetti *et al.* (2008). Observa-se que a metodologia proposta permite uma melhor estimativa da frequência teórica associada à falta (3,35 kHz), tendo em vista o menor erro em relação à frequência inferida a partir do espectro do transitório (3,68 kHz). Além disso, a maior diferença entre as frequências teóricas associadas aos demais caminhos de propagação em relação à inferida do espectro resulta na maior confiabilidade da estimativa do ramal em falta. Não foi possível determinar o erro entre a frequência teórica e a frequência do espectro associada ao ramal 808, tendo em vista que a última não apresentou energia suficiente para sua detecção. No caso do ramal 808, a frequência teórica é igual a 6,93 kHz.

Tabela 1. Frequências caraterísticas teóricas para uma falta trifásica na barra 812.

Barra Terminal	Distância (m)	Erro Método Proposto	Erro Método de Borghetti, (2008)
812	22.570	8,96%	10,59%
810	12.920	19,08%	18,03%

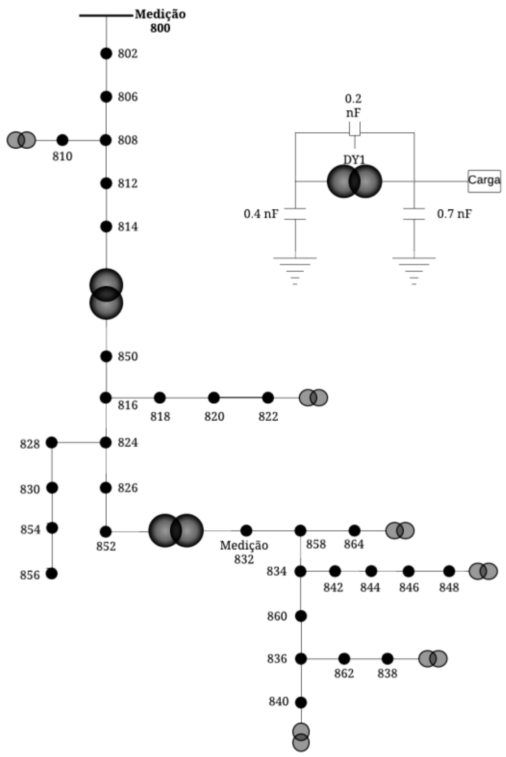

Figura 1. Modelo do alimentador IEEE 34 barras implementado no ATP/EMTP.

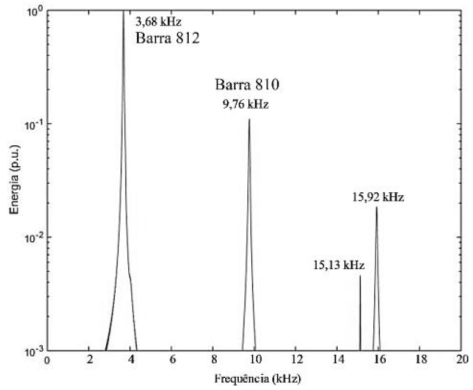

Figura 2. Espectro de frequências para uma falta trifásica na barra 812.

Nos resultados apresentados a seguir, os erros percentuais na estimativa das distâncias das faltas foram calculados de acordo com (14):

$$e = \frac{|d_f - d_s|}{d_f}.100\% \tag{14}$$

onde *df* é a distância estimada da falta (m) e *ds* é a distância da falta simulada (m).

Na Figura 3 é mostrada a comparação do método proposto com o método de Borghetti *et al.* (2008) para faltas trifásicas sólidas à terra simuladas em 16 barras ao longo da rede. Observa-se que os erros nas estimativas são proporcionais à distância da falta para ambos os métodos. As reduções abruptas nos erros ocorrem devido às impedâncias dos reguladores de tensão, que apresentam valores bastante elevados nas altas frequências. Isso resulta na divisão da rede em três subsistemas com terminais de medição independentes. As faltas no subsistema associado à barra de medição 832 (barras 834, 836, 838, 840, 842, 844, 846, 848, 858, 860, 862, 864) apresentam erros superiores, tendo em vista o maior número de reflexões nos ramais laterais.

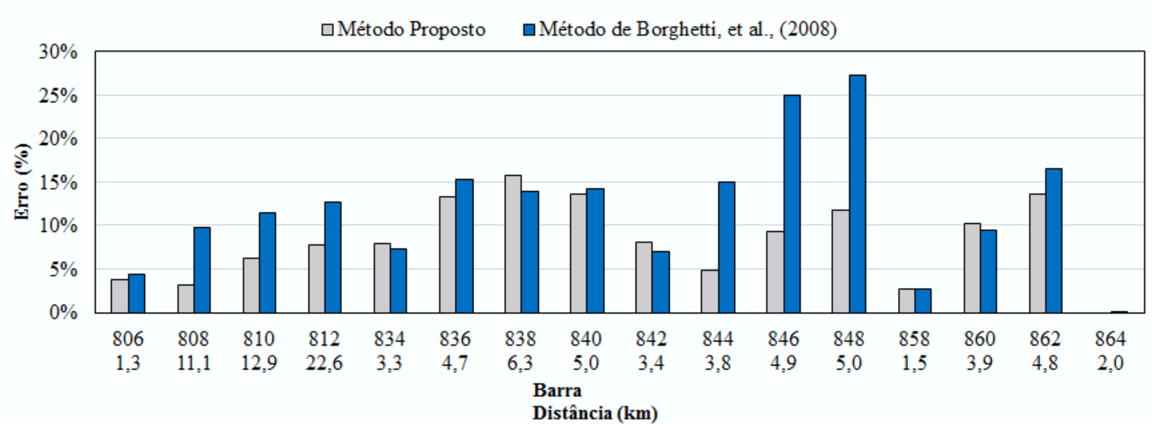

Figura 3. Comparação do método proposto com o de Borghetti, *et al.*, (2008) em termos dos erros percentuais nas estimativas para faltas trifásicas sólidas.

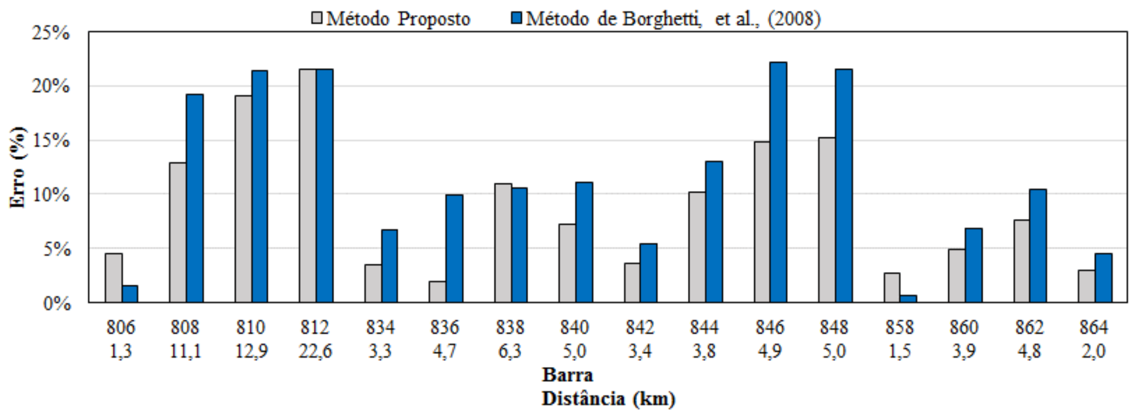

Figura 4. Comparação do método proposto com o de Borghetti, *et al.*, (2008) em termos dos erros percentuais nas estimativas para faltas fase-terra.

Ainda em relação à Figura 3, nota-se que os maiores erros são associados aos ramais 846 e 848, localizados a 4,9 e 5 km da barra de medição 832, respectivamente. Estes erros se devem ao fato de que existem 4 ramais entre estas seções e a barra de medição, o que causa atenuação dos transitórios devido à reflexão nos terminais da rede. A atenuação resulta na diminuição da energia associada à frequência caraterística da falta, dificultando a sua identificação. Por outro lado, os erros são reduzidos para as faltas nas barras próximas aos medidores tais como nas barras 806, 858 e 864. Assim a eficiência de ambos os métodos está intimamente relacionada ao número de laterais do alimentador entre a falta e a barra de medição. Estes resultados indicam que o desempenho do método proposto é superior ao de Borghetti, *et al.*, (2008) em 11 dos 16 casos avaliados. Para as faltas nas barras 846 e 848, o método de Borghetti, *et al.*, (2008) apresenta erros superiores ao dobro dos erros associados ao método proposto.

A Figura 4 apresenta uma comparação similar à anterior, porém considerando as faltas sólidas do tipo fase-terra. Novamente, o método proposto apresenta desempenho superior ao de Borghetti, *et al.*, (2008), exceto em 3 dos casos avaliados. Conforme também se verifica na Figura 3, os menores erros ocorrem nas barras 806 e 858, as quais têm distâncias inferiores a 2 km em relação ao terminal de medição, e não apresentam derivações no caminho de propagação do transitório.

A Tabela 2 demonstra a sensibilidade do método proposto em relação ao aumento da resistência da falta, considerando os erros obtidos para faltas fase-terra nas barras 806 e 808. Observa-se que o aumento do erro com a resistência de falta, bem como com o número de ramais entre a falta e o terminal de medição.

Tabela 2. Erros percentuais na estimativa da distância de acordo com a resistência das faltas fase-terra nas barras 806 e 808.

Impedância de Falta (Ω)	Erro barra 806	Erro barra 808
0	4,55%	11,66%
10	6,81%	11,98%
20	7,78%	12,30%

5 Conclusão

Este trabalho apresentou uma contribuição para a solução do problema de LF em SDEE, a qual utiliza medições na subestação e nos terminais de saída reguladores de tensão. A técnica é baseada na relação entre frequências teóricas, associadas aos possíveis caminhos de propagação do transitório, e frequências características, identificadas como as componentes de maior energia no espectro. A distância em relação ao terminal de medição é obtida a partir da frequência associada ao transitório que se propaga da falta diretamente para o terminal local. Esta componente do sinal transitório não é originada da reflexão, sendo menos sujeita à atenuação. Desta forma, pode ser identificada como o componente de maior energia dentre as demais frequências do espectro.

A principal contribuição deste trabalho é relacionada à formulação da matriz de transformação modal dependente da frequência, desenvolvida a partir da modificação nas equações de Carson para inclusão dos efeitos pelicular e da corrente de retorno pela terra para altas frequências. Por outro lado, a maioria dos métodos baseados na análise TAF considera a matriz de transformação constante (Pourahmadi-Nakhli e Safavi, 2011; Gazzana *et al.*, 2014) ou são dependentes da simulação computacional da rede para sua obtenção (Borghetti *et al.*, 2006; Borghetti *et al.*, 2008; Borghetti *et al.*, 20011). De acordo com os resultados apresentados, o modelo analítico dispensa o uso de simulações computacionais, além de resultar em uma melhor aproximação dos parâmetros que descrevem a propagação dos transitórios no domínio modal. Com a eliminação das aproximações usualmente adotadas na literatura, em especial a relacionada à velocidade de propagação, a técnica obteve um melhor desempenho em comparação ao método de Borghetti, *et al.*, (2008), considerado como o estado da arte na LF utilizando análise de TAF. Devido à limitação de espaço, os testes apresentados não contemplaram a aplicação do método em SDEE desequilibrados.

Os resultados apresentados também demonstraram que a técnica é relativamente insensível ao tipo de falta. Por outro lado, observou-se a degradação do desempenho com o aumento da distância em relação ao terminal de medição e da da quantidade de derivações do circuito no caminho de propagação do transitório, bem como com o aumento da resistência de falta. Desta forma, o método não se mostra adequado para a localização de faltas de alta impedância, tendo em vista que a atenuação do transitório dificulta a identificação das frequências características no espectro.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

Boneville Power Administration. (2007). Alternative Transients Program: ATP-EMTP. Portland.

Borghetti, A.; Corsi, C; Nucci, C; Paolone, M; Peretti, L; Tibarelli, R. (2006). On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 28, n° 9, p 608-617.

Borghetti, A; Bosetti, M; Di Silvestro, M; Nucci, C; e Paolone, M. (2008). Continuous-Wavelet Transform for Fault Location in Distribution Power Networks: Definition of Mother Wavelets Inferred From Fault Originated Transients. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, n°. 2, pp. 380-388.

Borghetti, A; Bossetti, C; Paolone, M; Abur, A. (2010). "Integrated Use of Time-Frequency Wavelet Decompositions for Fault Location in Distribution Networks: Theory and Experimental Validation," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, n°. 4, pp. 3139-3146.

Brandão, F; e Briceno, J. (1997). On the modal analysis of asymmetrical three-phase transmission lines using standard transformation matrices. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, n°. 4, pp. 1760-1765.

Carson, J. (1926). Wave propagation in overhead wires with ground return. The Bell System Technical Journal, Vol. 5, n°. 4, pp. 539-554.

Choi, M; Lee, S; Lee, D; Jin, B. (2004). A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, pp. 35-41.

Dommel. H. (1996). Electromagnetic Transient Program Theory Book. Vancouver: University of British Columbia.

Gazzana, D; Ferreira, G; Bretas, A; Bettiol, A; Carniato, A; Passos, L; Ferreira, A; Silva, J. (2014). An integrated technique for fault location and section identification in distribution systems. Electric Power Systems Research, Vol. 115, pp. 65-73.

Ferreira, G; Gazzana, D; Bretas, A; Bettiol, A; Carniato, A; Passos, L; Ferreira, A; e Silva, J. (2013). Ferramenta de Diagnóstico de Faltas em Sistemas de Distribuição Baseada na Análise Integrada da Impedância Aparente e Decomposição Espectral do Transitório. Anais do VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL).

He, Z. (2016). Wavelet Analysis and Transient Signal Processing Applications for Power Systems. John Wiley & Sons Singapore, China.

Hedman, D. (1965). Propagation on Overhead Transmission Lines I-Theory of Modal Analysis. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 84, n°. 3, pp. 200-205.

Kersting, W. (2001). Radial distribution test feeders, in IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2. pp. 908-912.

Kersting, W. (2002). Distribution System Modeling and Analysis. CRC Press. New Mexico.

Lee, S; Choi, M; Kang, S; Jin, B; Lee, D; Ahn, D; Yoon, N; Kim, H; Wee, S. (2004). An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, pp. 524-532.

Magnago, F; e Abur, A. (1999). A new fault location technique for radial distribution systems based on high frequency signals. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364), Edmonton, Alta., Vol. 1, pp. 426-431.

Mathworks. (2011). Matlab 7 User´s Guide Mathworks. Natrick: MA.

Oppenheim, A; e Schafer, R. (2009). Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed., Vol 1, Prentice-Hall London.

Pourahmadi-Nakhli, M; Safavi, A. (2011). Path Characteristic Frequency-Based Fault Locating in Radial Distribution Systems Using Wavelets and Neural Networks. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, n°. 2, pp. 772-781.

Saha, M; Izykowski, J; Rosolowski, E. (2010). Fault Location on Power Networks. Springer-Verlang. London.

Stevenson, W. (1985). Analises de Sistemas Elétricos de Potencia, 2. ed. McGraw-Hill, Mexico.

Swift, G. (1979). The Spectra of Fault-Induced Transients. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, n°. 3, pp. 940-947.

Tang, Y; Wang, H. F; Aggarwal, H. F; e Johns, A. T. (2000). Fault indicators in transmission and distribution systems, DRPT2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Proceedings (Cat. No.00EX382), London, pp. 238-243.

Zhu, D; Lubkeman, L; Girgis, A. (1997). Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, pp. 801-809.

Apêndice

Os fatores de correção ΔR_{ii}, ΔR_{ij}, ΔX_{ii} e ΔX_{ij} têm efeito significativo nas componentes resistivas da matriz impedância para frequências na faixa da frequência fundamental até 1 MHz (HEDMAN, 1965). Segundo Dommel (1996), estes fatores dependem do coeficiente dado por:

$$a = 1{,}12.10^{-3}\, S\sqrt{\frac{\omega}{\rho}} \tag{15}$$

Onde ρ é a resistividade do solo (Ω.m); e

$$S = \begin{cases} 2h_i \ \text{para } i = j. \\ S_{ij}, \text{ caso contrário.} \end{cases} \tag{16}$$

Para $a \leq 5$, os fatores de correção são calculados de acordo com (17) e (18) (DOMMEL, 1996):

$$\begin{aligned} \Delta R_{ij} = 4\omega \times 10^{-7} \Big\{ & \frac{\pi}{8} - b_1 a \cos(\phi_{ij}) \\ & + b_2\left[\left(c_2 - \ln(a)\right) a^2 \cos(2\phi_{ij}) + a^2 \sin(2\phi_{ij})\right] \\ & + b_3 a^3 \cos(3\phi_{ij}) \\ & - d_4 a^4 \cos(4\phi_{ij}) \\ & - b_5 a^5 \cos(5\phi_{ij}) \\ & + b_6\left[\left(c_6 - \ln(a)\right) a^6 \cos(6\phi_{ij}) + a^6 \sin(6\phi_{ij})\right] \\ & + b_7 a^7 \cos(7\phi_{ij}) \\ & - d_8 a^8 \cos(8\phi_{ij}) + \ldots \Big\} \end{aligned} \tag{17}$$

$$\Delta X_{ij} = 4\omega \times 10^{-7} \left\{ \frac{1}{2}\left[0,61593 - \ln(a)\right] + b_1 a \cos(\phi_{ij}) \right.$$
$$-d_2 a^2 \cos(2\phi_{ij})$$
$$+b_3 a^3 \cos(3\phi_{ij})$$
$$-b_4\left[\left(c_4 - \ln(a)\right) a^4 \cos(4\phi_{ij}) + \phi_{ij} a^4 \sin(4\phi_{ij})\right]$$
$$+b_5 a^5 \cos(5\phi_{ij}) \qquad (18)$$
$$-d_6 a^6 \cos(6\phi_{ij})$$
$$+b_7 a^7 \cos(7\phi_{ij})$$
$$-b_8\left[\left(c_8 - \ln(a)\right) a^8 \cos(8\phi_{ij}) + \phi_{ij} a^8 \sin(8\phi_{ij})\right]$$
$$\left. +\ldots \right\}$$

Onde ϕ_{ij} é o ângulo entre os condutores das fases i e j da linha. Observa-se que (17) e (18) são válidas inclusive para $i = j$, sendo que neste caso $\phi_{ij} = \phi_{ii} = 0$. Os coeficientes b_k, c_k, e d_k (k = 1, 2, ...) são calculados através de (19), (20) e (21), respectivamente.

$$b_k = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{6} \text{ para } k = 1. \\ \frac{1}{16} \text{ para } k = 2. \\ \mathrm{b}_{k-2} \frac{sign}{k(k+2)}, \text{ caso contrário.} \end{cases} \qquad (19)$$

$$c_k = \begin{cases} 0 \text{ para } k = 1. \\ 1,3659 \text{ para } k = 2. \\ c_{k-2} + \frac{1}{k} + \frac{1}{k+2}, \text{ caso contrário.} \end{cases} \qquad (20)$$

$$d_k = \frac{\pi}{4} b_k \qquad (21)$$

Em (19), o operador *sign* assume os valores +1 e –1 de forma alternada, a cada 4 valores sucessivos de k. Como exemplo, *sign* = +1 para k = 1, 2, 3, 4 e *sign* = –1 para k = 5, 6, 7, 8.

Para $a > 5$, ΔR_{ij} e ΔX_{ij} são calculados a partir de (22) e (23) respectivamente (DOMMEL, 1996).

$$\Delta R_{ij} = \frac{4\omega \times 10^{-4}}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{\cos\phi_{ij}}{a} - \frac{\sqrt{2}\cos 2\phi_{ij}}{a^2} + \frac{\cos 3\phi_{ij}}{a^3} + \frac{3\cos 5\phi_{ij}}{a^5} - \frac{45\cos 7\phi_{ij}}{a^7} \right\} \qquad (17)$$

$$\Delta X_{ij} = \frac{4\omega \times 10^{-4}}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{\cos\phi_{ij}}{a} - \frac{\cos 3\phi_{ij}}{a^3} + \frac{3\cos 5\phi_{ij}}{a^5} + \frac{45\cos 7\phi_{ij}}{a^7} \right\} \qquad (18)$$

Da mesma forma que (17) e (18), (22) e (23) também são válidas para $i = j$, tal que neste caso, $\phi_{ij} = \phi_{ii} = 0$.