

# Análise de Funções de Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Baseadas em Componentes de Alta Frequência

Pedro Henrique G. Ferreira, Felipe V. Lopes

**Resumo**—Nesse trabalho, utilizou-se o *software ATP-Draw* para a verificação da viabilidade da aplicação de algoritmos de localização de faltas baseados em componentes de alta frequência, simulando diversas condições de operação e discutindo seu impacto sobre as dificuldades na localização da falta e os espectros dos sinais medidos. Assim, foi possível separar as contribuições individuais de cada parâmetro do sistema de forma clara e sistemática, bem como propor procedimentos eficientes para uma boa leitura do sinal e para o uso dos modelos teóricos.

## I. INTRODUÇÃO

As Linhas de Transmissão são um elemento vital para os Sistemas Elétricos de Potência, garantindo o acesso à energia elétrica em larga escala ao promover a transmissão de energia para pontos afastados das unidades de geração [1], frequentemente vencendo grandes distâncias e obstáculos como relevo e à vegetação.

Entretanto, a necessidade de que as Linhas de Transmissão se estendam por longas distâncias e transponham diversos obstáculos também as torna mais suscetíveis às intemperes que podem provocar perturbações e falhas [1]. Nesse cenário, a importância dos algoritmos de localização de falta se manifesta. Com uma boa previsão da localização da falta na rede elétrica, é possível realizar ações de reparo e proteção de modo orientado e célere, promovendo simultaneamente aumentos na disponibilidade e reduções consideráveis nos prejuízos econômicos causados pela falta de abastecimento e no custo de manutenção. Por sua vez, na ausência de uma solução para localização de faltas, o processo de identificação da falta e reparo se torna consideravelmente lento e complexo, sendo necessário percorrer boa parte da linha [2], por vezes na presença de condições climáticas adversas ou de obstáculos geográficos, implicando em prolongados períodos de indisponibilidade e elevados transtornos econômicos e sociais causados pelo desabastecimento.

Por isso, o estudo de algoritmos para a localização de faltas na rede elétrica é um dos assuntos mais explorados dentro da Engenharia Elétrica [1],[2]. Tradicionalmente, esses algoritmos podem ser divididos em três principais grupos, de acordo com a característica física do sistema explorada para estimar a posição da falta. Eles são: algoritmos baseados nas impedâncias aparentes, cujo princípio de funcionamento passa por usar as tensões e correntes para determinar a impedância da linha pós-falta, algoritmos baseados no método das ondas viajantes,

cujos funcionamento deriva da transmissão e reflexão das ondas viajantes presentes na linha e algoritmos baseados em componentes de alta frequência dos sinais de tensão e corrente, onde a estimação da localização da falta se dá a partir da identificação da frequência característica do sinal no terminal[1]-[4]. Mais recentemente, técnicas de aprendizado de máquinas também vêm sendo aplicadas à localização de falhas.

Nesse artigo, serão explorados os algoritmos baseados na identificação de componentes de alta frequência, visando verificar a influência de parâmetros como o ângulo de incidência da falta, a resistência de falta, a *source impedance ratio* (SIR) e o tipo de sinal utilizado (tensão ou corrente) na performance e na facilidade para identificação de faltas por meio desses algoritmos.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Transitório de Faltas

Em um sistema a parâmetros distribuídos, como uma Linha de Transmissão, perturbações locais se propagam gradualmente, não sendo percebidas imediatamente em todas as localidades do sistema [4]. Uma vez que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na linha depende apenas de parâmetros da própria linha e normalmente é conhecida, é possível estimar a posição da perturbação caso o tempo de propagação entre a perturbação e o terminal também seja conhecido. Essa característica é explorada por dois dos principais grupos de algoritmos para a localização de faltas. Enquanto os algoritmos baseados no denominado método das ondas viajantes visam realizar essa estimação ao determinar esse tempo de propagação diretamente [1],[4], os métodos baseados ditos baseados em componentes de alta frequência, por sua vez, relacionam esse tempo de propagação com a posição da falta de forma indireta, permitindo a determinação da localização da falta a partir da identificação da frequência característica do sinal [1],[4].

Dessa forma, para a determinação o tempo de propagação da perturbação para o terminal, é importante uma sólida compreensão do comportamento das perturbações na rede elétrica. Esse comportamento é melhor caracterizado pela teoria das ondas viajantes, onde o efeito da ocorrência de uma perturbação pode ser modelado pelo lançamento de ondas viajantes na rede. Essas ondas viajantes se propagam em cada direção da linha, ponto a ponto, incidindo ou refletindo de forma proporcional aos valores dos

coeficientes de transmissão e reflexão, respectivamente, e se superpõem, em cada instante e em cada ponto, ao sinal original presente na linha, gerando um novo sinal. Assim, na existência de qualquer perturbação, o sinal medido no terminal consiste, em cada instante, de uma composição do sinal original com as ondas viajantes lançadas pela perturbação, conforme ilustrado pelas figuras dispostas abaixo.

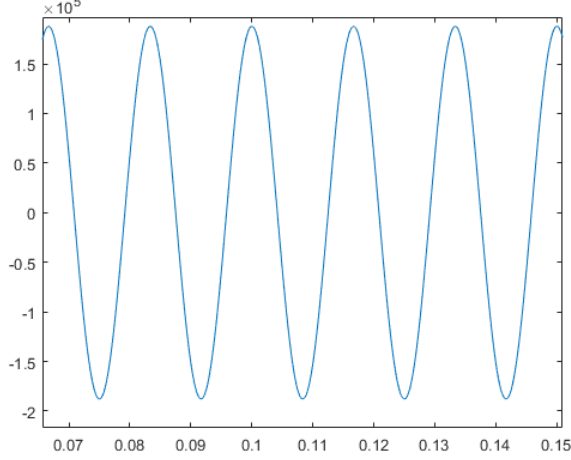


Figura 1. *Sinal de Corrente Puro, sem a ocorrência de nenhuma falta*

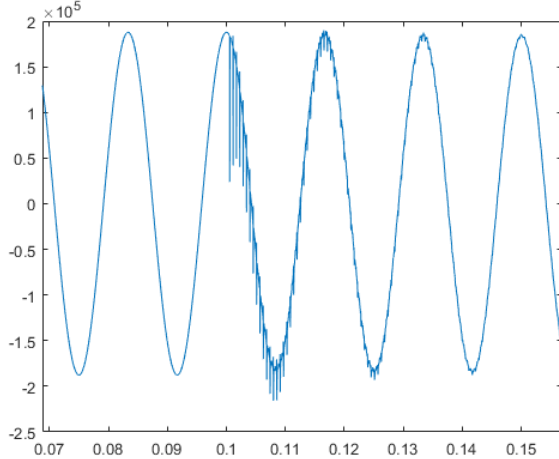


Figura 2. *Sinal de Corrente após Perturbação: É possível perceber a presença das ondas viajantes*

Como as perturbações na rede elétrica normalmente se manifestam de forma abrupta, sendo frequentemente modeladas por funções descontínuas como impulsos ou degraus, é esperado que os sinais gerados por essas perturbações se estendam por largas faixas do espectro de frequência [4]. Usualmente, a magnitude do sinal decresce com o aumento da frequência. Entretanto, como as ondas viajantes vão da falta até o terminal de forma periódica e em um tempo fixo, determinado pela velocidade de propagação e pela distância da falta ao terminal, é espe-

rado que exista uma frequência característica em torno do inverso desse período. Assim, os algoritmos baseados em componentes de alta frequência têm como principal abordagem a identificação da frequência característica, através do processamento no domínio da frequência dos sinais recebidos em cada terminal, e, por meio dela, estimar a localização das faltas.

Em linhas gerais, os algoritmos baseados na identificação de componentes de alta frequência são divididos em dois grandes grupos, tomando como referência o número de terminais onde a frequência característica foi determinada [7],[8]. Nos algoritmos de um único terminal, a estimação da distância entre a falta e o terminal se dá levando em conta apenas a frequência característica aferida localmente no terminal de medida. Por sua vez, os algoritmos baseados em dois terminais realizam a estimação da distância entre a falta e cada terminal levando em consideração simultaneamente as frequências características aferidas em cada terminal.

### B. Análise das Frequências Dominantes

Nesse trabalho, será utilizada, para a determinação da frequência característica, a abordagem proposta por Iurinic *et al.* em [5],[6]. Nessa abordagem, a frequência característica é determinada de forma metódica e sistemática após a decomposição dos sinais de falta em suas componentes 0,  $\alpha$  e  $\beta$  no domínio de Clarke, por meio da aplicação da Transformada de Clarke, e a sucessiva aplicação da Transformada Discreta de Fourier (DFT) nas componentes  $\alpha$  ou  $\beta$ .

Para os métodos de estimação de faltas baseados na análise do sinal em um único terminal, será adotada a relação entre a frequência característica ( $f_c$ ), a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na linha ( $v$ ) e a distância entre a falta e o terminal ( $L$ ) proposta por Iurinic *et al.* em [5], descrita na equação abaixo:

$$L = \frac{2\pi - \Theta}{4\pi f_c} v \quad (1)$$

Onde o ângulo  $\Theta$ , relacionado com a reatância equivalente vista pelo terminal e a impedância de surto da linha, se aproxima de zero caso a falta possa ser modelada como uma impedância muito menor que a impedância de surto da linha, fazendo com que a Equação (1) se reduza a:

$$L = \frac{v}{2f_c} \quad (2)$$

Já para os métodos de baseados na análise do sinal em dois terminais, as relações entre as frequências características em cada terminal ( $f_1$ ,  $f_2$ ), a distância entre os dois terminais ( $d$ ) e as distâncias entre a falta e cada terminal ( $L_1$ ,  $L_2$ ) adotadas serão as propostas por Faybisovich *et al.* em [7], descritas pelas equações abaixo:

$$L_1 = \frac{f_2}{f_1 + f_2} d \quad (3)$$

$$L_2 = \frac{f_1}{f_1 + f_2} d \quad (4)$$

Como padrão, os sinais foram amostrados à uma frequência  $f_s = 200kHz$  e foram utilizados os seguintes parâmetros:  $SIR = 0.01 \Omega$  e  $R_f = 10^{-5}\Omega$ . A falta padrão utilizada foi do tipo AB, localizada a  $d = 80km$  do terminal local e com ângulo de incidência  $\theta = 90^\circ$ . Nos gráficos a seguir, cada parâmetro foi variado individualmente, *ceteris paribus*.

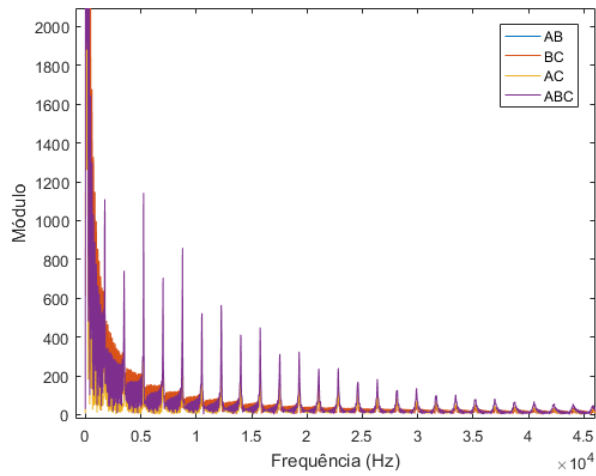


Figura 4. Espectros de Tensão no Terminal Local para cada tipo de falta

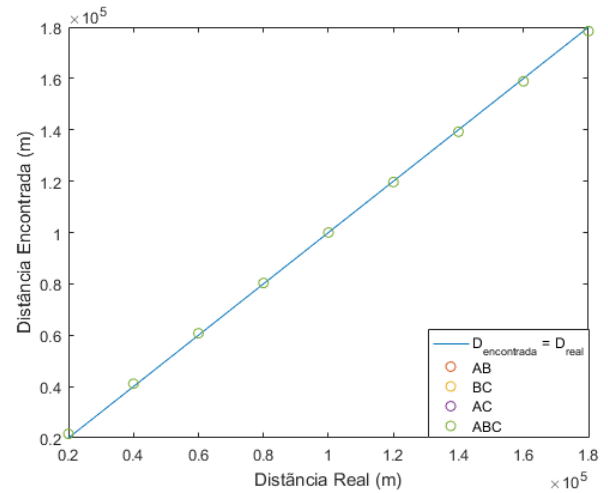


Figura 7. Distância Encontrada por Distância Real da Falta aplicando o Método de Dois Terminais

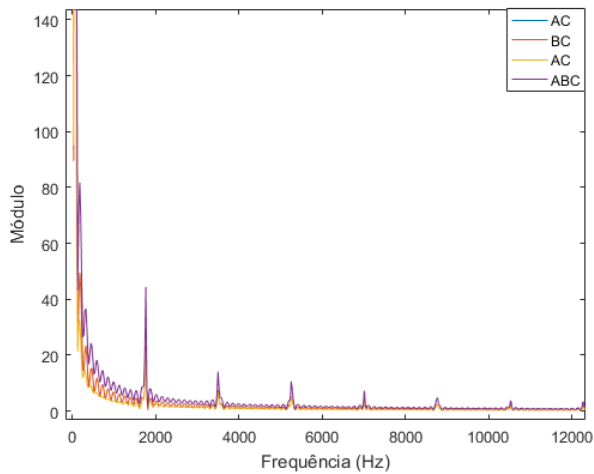


Figura 5. Espectros de Corrente no Terminal Local para cada tipo de falta

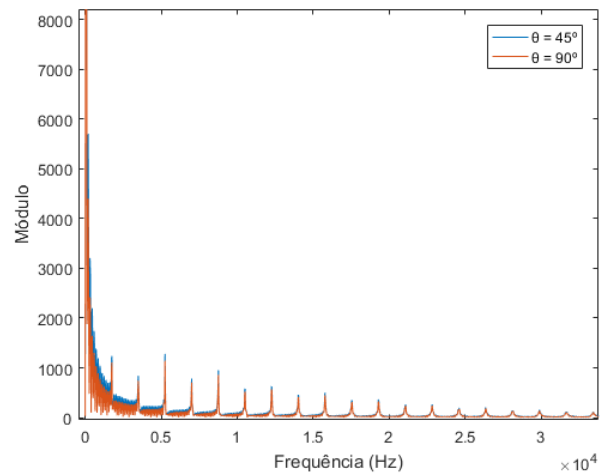


Figura 8. Espectros de Tensão no Terminal Local para cada ângulo de incidência

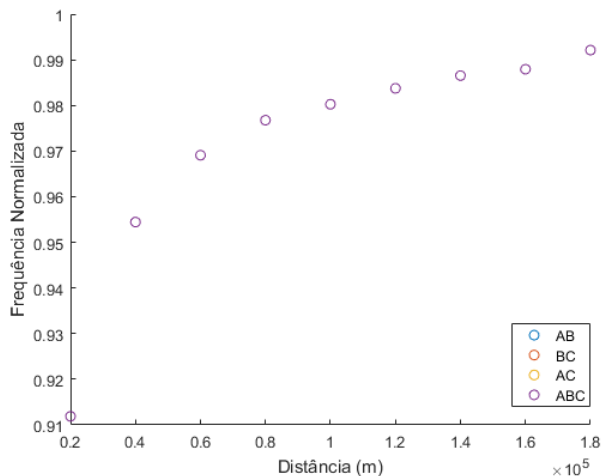


Figura 6. Frequência Normalizada por Distância da Falta aplicando o Método de Um Terminal

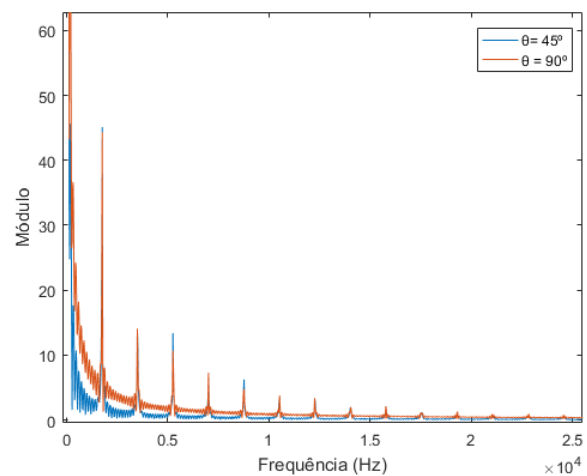


Figura 9. Espectros de Corrente no Terminal Local para cada ângulo de incidência

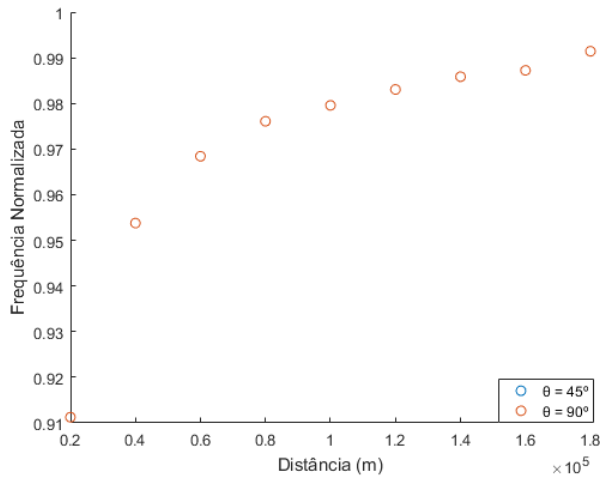


Figura 10. *Frequência Normalizada por Distância da Falta aplicando o Método de Um Terminal*

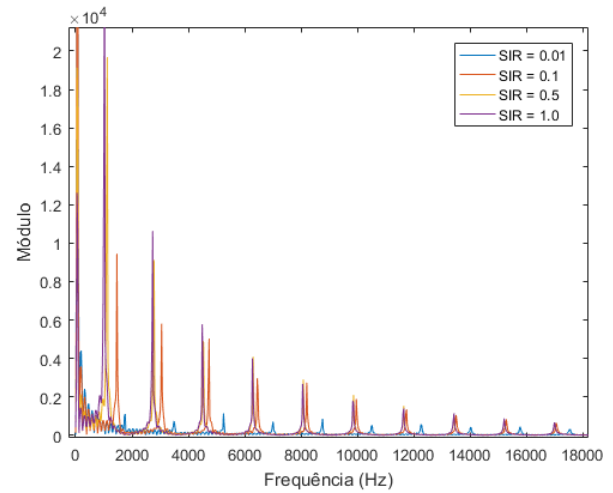


Figura 12. *Espectros de Tensão no Terminal Local para cada SIR*

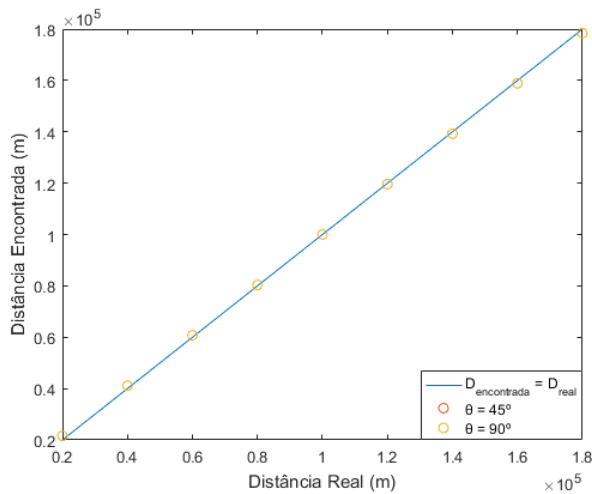


Figura 11. *Distância Encontrada por Distância Real da Falta aplicando o Método de Dois Terminais*

Conforme apresentado pelas Figuras (4)-(11), variações no tipo de falta ou mesmo no ângulo de incidência da falta não produzem efeitos sobre os espectros dos sinais medidos e, tampouco, sobre as frequências características. Esses resultados se tornam particularmente interessantes por revelarem robustez à diferentes ângulos de incidência, uma das principais limitações dos métodos baseados na Teoria de Ondas Viajantes.

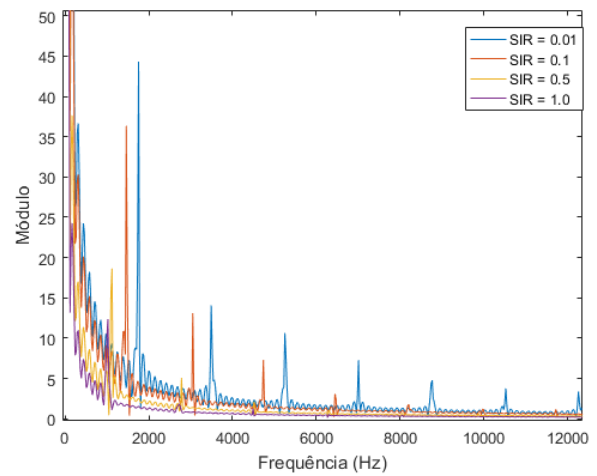


Figura 13. *Espectros de Corrente no Terminal Local para cada SIR*

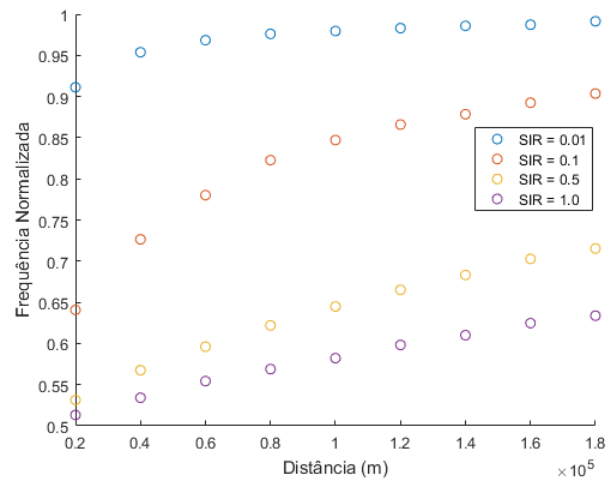


Figura 14. *Frequência Normalizada por Distância da Falta aplicando o Método de Um Terminal*

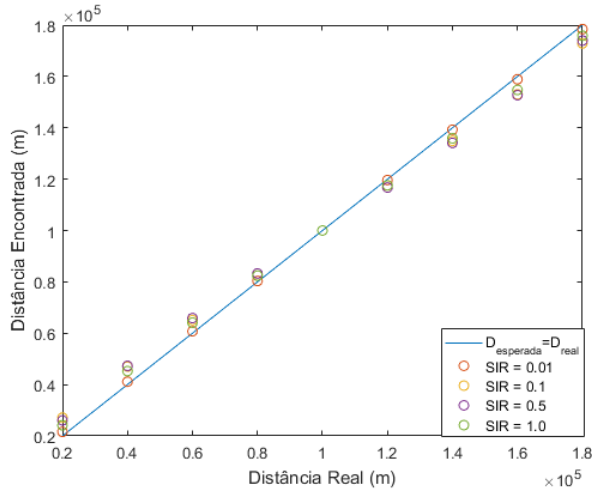


Figura 15. *Distância Encontrada por Distância Real da Falta aplicando o Método de Dois Terminais*

Por outro lado, as Figuras (12)-(15) revelam que alterações na SIR impactam fortemente nos espectros dos sinais recebidos, influenciando de forma distinta os sinais de corrente e tensão e impondo transtornos tanto para métodos de estimação baseados em um único terminal quanto para os baseados em dois terminais. Em linhas gerais, um aumento da SIR desloca a frequência característica medida para a esquerda, distanciando, assim, a frequência observada para a frequência teórica proposta pela Equação (2).

Nesse cenário, em algoritmos baseados em um terminal, faz-se necessária a determinação do ângulo de correção  $\Theta$  e a utilização da Equação (1), um procedimento que pode ser relativamente complexo, para a realização de uma estimação adequada da posição da falta na linha.

Por sua vez, os algoritmos baseados em dois terminais têm como comportamento típico uma inversão do erro. Normalmente, esses algoritmos superestimam a distância de faltas próximas, com a distância estimada decrescendo de forma em que, normalmente, o erro se aproxima de zero conforme a falta se aproxima do meio linha e se inverte - com o algoritmo começando a subestimar a distância da falta - caso a falta esteja localizada após a metade da linha. Conforme mostra a Figura (15), variações na SIR alteram o módulo da excursão do erro em torno da reta  $D_{estimada} = D_{real}$  - onde não há erro -, podendo implicar erros intoleráveis na estimação de erros muito próximos de um dos terminais. É importante notar que, em métodos baseados em dois terminais, a mudança da SIR impacta de forma diferente a frequência característica observada em cada terminal, de forma em que o efeito final na estimação se relaciona com a composição dos efeitos individuais, não sendo possível determinar diretamente se um aumento ou redução no SIR vai provocar um aumento ou redução na excursão.

É possível observar que, além do deslocamento da frequência característica para a esquerda, um aumento da SIR provoca, em sinais de corrente, um alargamento dos

lóbulos secundários e uma redução significativa no módulo dos picos. Já para sinais de tensão, além do alargamento dos lóbulos secundários, há um aumento significativo no módulo dos picos. Dessa forma, baixos valores da SIR tornam favorável a identificação da frequência característica por meio de sinais de corrente, enquanto para altos valores de SIR, o uso de sinais de tensão se mostra mais apropriado.

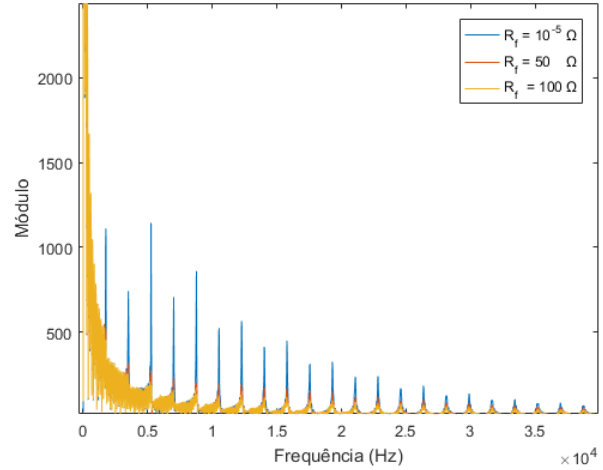


Figura 16. *Espectros de Tensão no Terminal Local para cada resistência de falta*

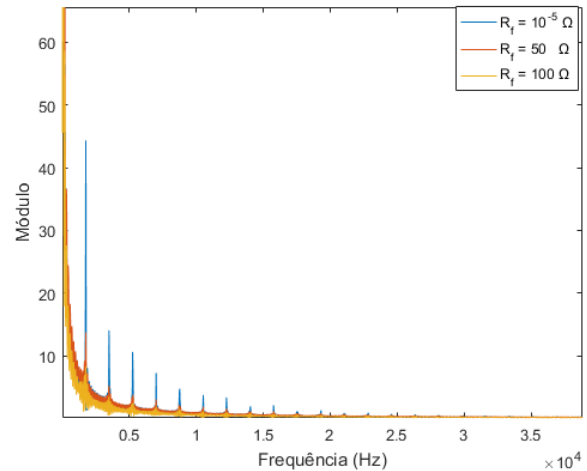


Figura 17. *Espectros de Corrente no Terminal Local para cada resistência de falta*

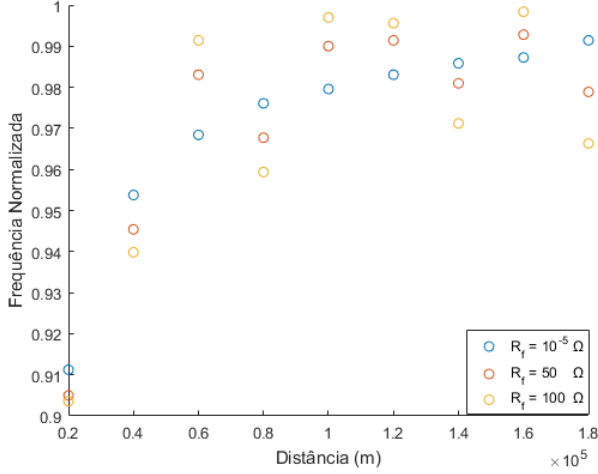


Figura 18. *Frequência Normalizada por Distância da Falta aplicando o Método de Um Terminal*

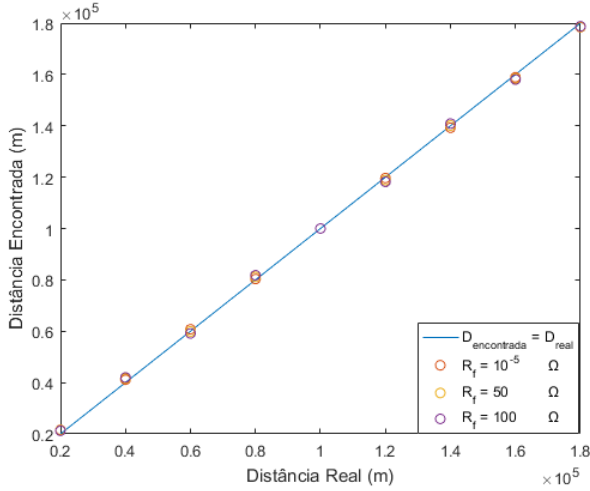


Figura 19. *Distância Encontrada por Distância Real da Falta aplicando o Método de Dois Terminais*

Por sua vez, as Figuras (16)-(19) demonstram o impacto da variação da resistência de falta na caracterização da frequência característica e da estimação da posição de faltas. Embora as Figuras (16) e (17) deixem claro que um aumento na resistência de falta não desloca a frequência característica, esses aumentos influenciam significativamente no módulo dos sinais, tornando o sinal processado muito mais vulnerável à presença de ruído e à ação de fontes de interferência, sobretudo ecos do terminal remoto, assim, dificultando significativamente a detecção da frequência característica.

Dessa forma, embora um aumento na resistência de falta não implique diretamente em uma variação da frequência característica, ele reduz o módulo do espectro dos sinais medidos. Esse efeito, combinado com a presença de ruído e de ecos do terminal remoto, pode fazer com que um componente de outra frequência supere, em módulo, a componente de frequência característica, causando, assim, uma identificação incorreta na frequência característica e,

portanto, causando erros no processo de estimação.

Embora, em geral, as frequências erradamente identificadas como características não estejam tão distantes das frequências características reais, de forma em que os erros gerados por essa identificação incorreta sejam muito menores que os gerados pelo aumento da SIR sem a utilização do ângulo de correção  $\Theta$ , deve-se perceber que esse erros de identificação não dependem exclusivamente da resistência de falta, se relacionando também com de fenômenos exógenos e difíceis de modelar, tornando complexa uma previsão exata da influência de um aumento na resistência de falta na estimação da posição de falta.

## V. CONCLUSÃO

As investigações conduzidas nesse trabalho permitem uma decomposição clara dos fatores que afetam a leitura no espectro de frequência e a localização de faltas, demonstrando a robustez dos métodos baseados em componentes de alta frequência às variações no tipo de falta e no ângulo de incidência, bem como expondo o efeito de deslocamento da frequência característica para a esquerda com o aumento da SIR, assim como o aumento na vulnerabilidade à erros de identificação da frequência característica com o aumento na resistência de falta.

Por meio desses resultados, é possível determinar os limites de operações da aproximação da impedância da falta como uma impedância muito menor a impedância de surto da linha, sendo uma aproximação razoável para baixos valores de resistência de falta e, principalmente de SIR, enquanto apresenta grandes erros para elevados valores de SIR, sendo necessária a utilização da forma exata do algoritmo de um único terminal para fornecer uma boa estimativa.

Adicionalmente, por meio da comparação do comportamento dos algoritmos baseados em único terminal e dos algoritmos baseados em dois terminais em diversos cenário de operação, foi possível verificar que, apesar do excelente desempenho dos últimos para faltas próximas à metade da linha e ao terminal remoto, a natureza do algoritmo impõe uma maior sensibilidade às variações da SIR, uma vez que a estimação é baseada apenas nas frequências características, não existindo uma forma exata para a correção dos efeitos da SIR. Dessa forma, espera-se também que esse trabalho pavimente o caminho para uma potencial extensão da abordagem exata de um único terminal para uma abordagem de dois terminais, conciliando robustez à SIR elevadas com a acurácia do método.

## REFERÊNCIAS

- [1] Felipe V. Lopes, Damásio Fernandes Jr. e Washington L. A. Neves, 'Localização de Faltas em Linhas de Transmissão: Revisão da Literatura e Tendências Recentes', ISSN 2177-61641
- [2] Mora, Jason, Meléndez, Joaquim, Vinyoles, Marc, Sánchez, Jorge e Castro, Manel. (2004). 'An Overview to Fault Location Methods in Distribution System Based on Single End Measures of Voltage and Current'. Renewable Energy and Power Quality Journal.

- [3] Shilpa G., Sophi, Mokhlis, Hazlie, Illias, Hazlee. (2017). '*Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review.*' Renewable and Sustainable Energy Reviews. 74. 949-958. 10.1016/j.rser.2017.03.021.
- [4] M. M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski. Fault Location on Power Network. New York: Springer-Verlag, 2010.
- [5] L. U. Iurinic, A. S. Bretas, E. S. Guimarães e D. P. Marzec, "*Analysis of single-ended traveling-wave fault location based on continuous wavelet transform inferred from signal*", 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012), Birmingham, UK, 2012, pp. 1-6.
- [6] L. U. Iurinic, R. G. Ferraz, E. S. Guimarães e A. S. Bretas, '*Transmission Lines Fault Location Based on High-Frequency Components Technique: a general formulation for estimation of the dominant frequency*';
- [7] V. Faybisovich, M. Feiginov e M. I. Khoroshev, "*Investigation of frequency domain traveling wave fault location methods*", Transmission and Distribution Conference and Exposition 2010 IEEE PES, pp. 1-9, 2010.
- [8] V. Faybisovich e M. I. Khoroshev, "*Frequency domain double-ended method of fault location for transmission lines*", 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL, 2008, pp. 1-6.
- [9] M. S. Mami e M. Arkan, "*FFT based fault location algorithm for transmission lines*", 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, 2011, pp. 1-71-1-75.