



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO KALIL PRISCO

Trabalho de Conclusão de Curso

Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada no Espectro de Ondas Viajantes

CAMPINA GRANDE - PB
MAIO DE 2021

RODRIGO KALIL PRISCO

Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada no Espectro de Ondas Viajantes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrotécnica.

Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.

Professor Orientador.

CAMPINA GRANDE - PB

MAIO DE 2021

RODRIGO KALIL PRISCO

Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada no Espectro de Ondas Viajantes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em, 26/05/2021.

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande.
Professor Convidado.

Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande.
Professor Orientador.

CAMPINA GRANDE - PB

MAIO DE 2021

Dedico este trabalho à Deus, minha família, amigos, professores e a todos que contribuíram de forma direta e indireta para essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Marivon e Ana Paula pela educação que me deram e apoio incondicional em todas as situações e pelo amor e carinho dedicado.

A minha irmã e avó, Isabela e Vitória, pelo grande apoio e carinho que me foi dado, como também todo restante da família.

A todos os meus amigos que me acolheram nesse desafio de ir para uma nova cidade, ajudaram ao longo do curso, seja com palavras de apoio ou com ensinamentos. A jornada foi longa e muito prazerosa e não posso deixar de estar colocando uma menção especial a Breno, Augusto, Saulo, Romulo, Antônio, José Lucas, Mário César, Iago, André, Maxwell, Lucas, Rocha, Caio, Dimitri, Arthur e Rafael Rabello, que foram como irmãos para mim.

Ao professor Karcus Marcelus pela disponibilidade e incentivo a realização deste trabalho, apesar de todas as adversidades provenientes do novo coronavírus.

Aos professores Felipe Lopes, Raphael Leite, Washington Neves e Michael Feiginov, que sempre se mostraram disponíveis e interessados em fazer discussões sobre o tema.

A minha namorada Bianca por estar sempre ao meu lado me incentivando nos momentos difíceis e me apoiando apesar da grande distância.

Ao Laboratório de Alta Tensão por ter me proporcionado muitos conhecimentos na área de eletrotécnica durante o curso e no meu desenvolvimento profissional.

Aos professores, mestrandos e doutorandos do curso de Engenharia Elétrica por terem contribuído, não só na formação acadêmica, como também na minha formação como ser humano.

Aos funcionários da UFCG, em especial ao Departamento de Engenharia Elétrica pela presteza e carinho dedicados aos alunos.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente participam da minha vida. Minha vida foi construída com ajuda de todos que já passaram por mim. Colho cada experiência com muito carinho.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

Leonardo da Vinci

RESUMO

Este trabalho visa estudar o fenômeno de ondas viajantes em linhas de transmissão e sua aplicação para localização de faltas. Para isso, foi feita uma revisão bibliográfica e escolhido um dos métodos propostos na literatura para identificação de falhas em linhas de transmissão para ser aprofundado, o qual se baseia na frequência dominante do sinal de tensão na linha, após a abertura dos disjuntores. Foi feita a modelagem de um sistema elétrico baseado em dados reais composto por duas barras, no *software ATP (Alternative Transients Program)*, para que seja possível observar os espectros das ondas viajantes posteriormente à ocorrência de uma falha e a atuação da proteção. Um algoritmo é aplicado no sistema para que seja colhida a frequência dominante dessas ondas residuais e, a partir dela, seja estimado o local exato onde ocorreu a falta. Serão analisados os seguintes tipos de falhas no sistema elétrico: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásica. Para cada tipo de falha foi realizado um estudo de sensibilidade e análise paramétrica com finalidade de avaliar o método com melhor precisão, além de um estudo direcionado a melhorias no método proposto frente a dificuldades encontradas. O método proposto conseguiu ser aplicado com uma taxa de erros muito baixa para todos tipos de faltas. Ele mostrou-se mais eficiente em faltas que ocorrem a partir de 25 km do terminal local e com impedâncias de falta entre 1 e 10 ohms. Para impedâncias a partir de 50 ohms o método apresentou limitações no seu desempenho.

Palavras-Chave: Linhas de transmissão, Ondas viajantes, Localização de faltas, Transitórios eletromagnéticos.

ABSTRACT

This work aims to study the phenomenon of traveling waves in transmission lines and its application for fault location. For this, a bibliographic review was made and one of the methods proposed in the literature was selected to identify failures in transmission lines to be further investigated, which is based on the dominant frequency of the voltage signal in the line, after opening the circuit breakers. A modeling of an electrical system based on real data composed of two bars was made, without ATP software (Alternative Transients Program), so that it is possible to observe the spectra of traveling waves after the occurrence of a fault and the protection action. An algorithm is provided in the system so that the dominant frequency of these residual waves is collected and, from it, the exact location when a fault has occurred is estimated. The following types of faults in the electrical system will be distributed: phase-to-ground, phase-to-phase, phase-to-earth and three-phase. For each type of failure, a sensitivity study and parametric analysis were carried out with evaluation of the method with better precision, in addition to a study aimed at improvements in the method in view of the difficulties encountered. The method was able to be applied with a very low error rate for all types of faults. It was shown to be more efficient in faults that occur from 25 km from the local terminal and with fault impedances between 1 and 10 ohms. For impedances from 50 ohms, the method has limitations in its performance.

Keywords: Transmission lines, traveling waves, fault location, electromagnetic transients.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa do Sistema de Transmissão - Horizonte 2024	17
Figura 2: Elemento Incremental de uma Linha Monofásica sem Perdas.	19
Figura 3: Ondas progressivas e regressivas.....	21
Figura 4: Diagramas de reflexões para faltas em linhas de transmissão.	22
Figura 5: Modelo de SEP utilizado por FENG et al (2008).	25
Figura 6: Esquema de funcionamento para métodos localizadores de falta de dois terminais.	26
Figura 7: Linha de transmissão esquemática.....	27
Figura 8: Registro de transitórios de tensão na extremidade aberta da linha de 500 kV.	28
Figura 9: Diagrama unifilar da ampliação da interligação Norte-Nordeste com horizonte até 2009.	30
Figura 10: Mapa eletro-geográfico do sistema elétrico.....	31
Figura 11: Geometria da LT 500 kV São João do Piauí - Milagres.	32
Figura 12: Sistema modelado no <i>ATPDraw</i>	33
Figura 13: Sinal de tensão típico no isolamento de falha com abertura do disjuntor..	34
Figura 14: Erro Absoluto e Erro Relativo de Faltas Fase-Fase-Terra. Erro! Indicador não definido.	
Figura 15: Erro absoluto e Erro relativo de faltas Fase-Fase-Terra.	40
Figura 16: Erro Absoluto e Erro Relativo de Faltas Fase-Fase.	41
Figura 17: Erro Absoluto e Erro Relativo de Faltas Fase-Terra.....	42
Figura 18: Erro absoluto e erro relativo de faltas fase-terra.	43
Figura 19: Erro Absoluto e Erro Relativo de Faltas Trifásicas.	44
Figura 20: Sinais de Tensão - Falta fase-terra (d = 25 km).....	48
Figura 21: Sinais de tensão V_a e V_{α} (d = 25 km).	49
Figura 22: Sinais de tensão V_a e V_{α} (d = 100 km).	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos métodos do Tipo A, B, C e D para localização de faltas.	21
Tabela 2: Equações propostas por FENG <i>et al.</i> (2008).	25
Tabela 3: Dados dos condutores da LT São João do Piauí – Milagres.	32
Tabela 4: Dados de sequência da LT São João do Piauí – Milagres.	32
Tabela 5: Impedâncias das Fontes.	33
Tabela 6: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 1 \Omega$) – Falta BCT.	38
Tabela 7: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 10 \Omega$) – Falta BCT.	39
Tabela 8: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 100 \Omega$) – Falta BCT.	39
Tabela 9: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 1 \Omega$) – Falta BC.	40
Tabela 10: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 10 \Omega$) – Falta BC.	40
Tabela 11: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 100 \Omega$) – Falta BC.	40
Tabela 12: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 1 \Omega$) – Falta AT.	41
Tabela 13: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 10 \Omega$) – Falta AT.	42
Tabela 14: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 100 \Omega$) – Falta AT.	42
Tabela 15: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 1 \Omega$) – Falta ABCT.	43
Tabela 16: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 10 \Omega$) – Falta ABCT.	43
Tabela 17: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 100 \Omega$) – Falta ABCT.	44
Tabela 18: Análise de localização de faltas ($F_s = 1\text{MHz}$).	45
Tabela 19: Comparativo da eficiência do método variando a F_s .	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP – Sistema Elétrico de Potência.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico.

LT – Linha de Transmissão.

RDP – Registradores Digitais de Perturbações.

GPS – *Global Positioning System*.

SIN – Sistema Interligado Nacional.

ATP – *Alternative Transients Program*.

TDQ0 – Transformada de Park.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética.

CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.

EA – Erro Absoluto.

ER – Erro Relativo.

PF – Ponto da Falta.

PEDF – Ponto da Falta Estimado, utilizando os sinais de tensão no Domínio de Fase.

PETC – Ponto da Falta Estimado, utilizando os sinais de tensão no Domínio de Clarke (modal).

IF – Impedância de Fase

EADF – Erro Absoluto encontrado na aplicação do método, utilizando os sinais de tensão no Domínio de Fase.

ERDF – Erro Relativo encontrado na aplicação do método, utilizando os sinais de tensão no Domínio de Fase.

EATC – Erro Absoluto encontrado na aplicação do método, utilizando os sinais de tensão no Domínio modal.

ERTC – Erro Absoluto encontrado na aplicação do método, utilizando os sinais de tensão no Domínio modal.

‘LISTA DE SÍMBOLOS

t_{11} = Instante de chegada da primeira onda incidente à barra 1;

t_{21} = Instante de chegada da primeira onda incidente à barra 2;

t_{12} = Instante de chegada da onda refletida no ponto da falta à barra 1;

t_{22} e t_{23} = Instante de chegada das ondas refletidas no ponto da falta à barra 2;

t_{22r} = Instante de chegada da onda refratada no ponto da falta à barra 1.

l = Comprimento da linha;

v = Velocidade de propagação da onda mais rápida;

t_1 e t_2 = Tempo de chegada das ondas viajantes às barras 1 e 2;

v_1 e v_2 = Velocidade de propagação das ondas viajantes às barras 1 e 2;

d = Distância do ponto da falta à barra 1.

V_α = Modo aéreo no domínio de Clarke.

V_β = Modo aéreo domínio de Clarke.

V_0 = Modo terra no domínio de Clarke.

f_1 = frequências dominantes do sinal de tensão residual do terminal local.

f_2 = frequências dominantes do sinal de tensão residual do terminal remoto.

L_1 = Ponto da falta pelo método de Faybisovich.

L = Comprimento total da linha pelo método de Faybisovich.

f_A = frequências dominantes do sinal de tensão residual na fase A (domínio de fase).

f_B = frequências dominantes do sinal de tensão residual na fase B (domínio de fase).

f_C = frequências dominantes do sinal de tensão residual na fase C (domínio de fase).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Motivação do trabalho.....	16
1.2. Objetivos do trabalho	18
1.3. Estrutura do trabalho	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. Ondas Viajantes em Sistemas de Transmissão.....	19
2.2. Métodos de localização de faltas na linha de transmissão.....	21
2.2.1. GALE <i>et al.</i> (1993)	22
2.2.2. JIAN <i>et al.</i> (1998)	23
2.2.3. FENG <i>et al.</i> (2008).....	24
2.2.4. LOPES <i>et al.</i> (2014).....	26
2.2.5. FAYBISOVICH <i>et al.</i> (2008)	27
3. METODOLOGIA	30
3.1. Sistema interligado nacional	30
3.2. Sistema elétrico modelado	33
3.3. Método de Localização de Falta.....	35
3.3.1. Escolha da taxa de amostragem.....	35
3.3.2. Análise do sinal de tensão	35
3.3.3. Extração da frequência dominante e análise residual.....	36
3.4. Erro de Localização de Faltas em Linha de Transmissão.....	37
3.4.1. Erro Absoluto (EA).....	37
3.4.2. Erro Relativo (ER)	37
4. RESULTADOS E ANÁLISES	38
4.1. Influência do ponto da falta e impedância de falta (Z).....	38
4.1.1. Faltas Fase-Fase-Terra (BCT).....	38
4.1.2. Fase-Fase (BC).....	40
4.1.3. Fase-Terra (AT)	41
4.1.4. Trifásica (ABCT)	43
4.2. Influência da taxa de amostragem.....	45
4.3. Análise dos resultados.....	45

4.3.1. Tipos de falta.....	45
4.3.2. Impedância de Falta	45
4.3.3. Distância da falta.....	46
4.3.4. Uso da transformada de Clarke	46
4.3.5. Frequência de amostragem.....	50
4.3.6. Dificuldades encontradas o ambiente de simulação	51
5. CONCLUSÃO	52
6. REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência (SEP) é constituído por um conjunto de componentes que tem como finalidade a condução da energia elétrica desde a sua geração até a distribuição para os consumidores. Esses componentes são: subestações e os equipamentos que as compõem; linhas de transmissões; receptores e centrais elétricas compondo a geração, transmissão e distribuição de energia (LOPES, 2014).

A relevância que cada componente tem é muito grande, visto a importância do serviço que é atendido para a população. Dentre eles, as Linhas de Transmissão (LT) são fundamentais, pois, possibilitam existir uma interligação entre a fonte geradora de energia e os demais componentes do sistema, até o destino final. Sendo assim, a transmissão de energia ocorra de modo contínuo, com baixas perdas e, durante desligamentos, sejam eles programados ou não, não deve ultrapassar o limite de tempo regido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Assim, identificar com alta precisão a localização em que ocorreu uma falha no sistema, em curto período e com baixa taxa de erro, é muito importante para que a restauração do serviço ocorra da maneira mais rápida.

A literatura atual apresenta uma vasta gama de técnicas, que utilizam diferentes análises e conceitos para localizar o ponto de ocorrência de curtos-circuitos em LT, as quais são geralmente classificadas em quatro grupos principais (SAHA *et al.*, 2010): métodos baseados na teoria de ondas viajantes (GALE *et al.*, 1993; LOPES *et al.*, 2013b), métodos baseados em inteligência artificial (CHEN; MAUN, 2000), métodos baseados na análise de componentes de alta frequência (FAYBISOVICH *et al.*, 2010; IURINIC *et al.*, 2013) e métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental (TAKAGI *et al.*, 1982) (LOPES, 2014).

Nas últimas décadas, as técnicas baseadas na teoria das ondas viajantes vêm ganhando muito espaço, em razão de sua precisão e eficiência, e serão o foco desse trabalho. Entretanto, esses métodos estão sujeitos a algumas problemáticas, mas, que não necessariamente sejam tomados como uma limitação, e sim como uma tomada de decisão com ônus e bônus. A exemplo disso: aproximação da velocidade de propagação da onda, altas taxas de amostragem, necessidade de aparelhos *Global Positioning System* (GPS) (REIS, 2019) muito precisos, além de sofrerem interferência das reflexões de ondas de outros equipamentos do sistema (FAYBISOVICH; KHOROSHEV, 2008).

Todas as técnicas utilizadas possuem suas vantagens e desvantagens em relação umas às outras. Os avanços tecnológicos em aparelhos essenciais a algumas dessas técnicas como o Registradores Digitais de Perturbações (RDP) e GPS têm proporcionado melhoria aos métodos

quanto a precisão e a confiabilidade. Portanto, as linhas de pesquisas para localização de faltas em SEP tem ganhado grande espaço no ramo da engenharia elétrica, seja na tentativa de aperfeiçoar os métodos existentes ou em desenvolver novos (LOPES, 2014).

O trabalho em questão visa realizar um estudo aprofundado e avaliação sobre o método de dois terminais, baseado na frequência dominante para localização de falhas para linhas de transmissão, proposto em Faybisovich *et al.* (2008). Para tanto, será realizada aplicação do método em uma linha de transmissão com parâmetros reais para proporcionar uma melhor avaliação da técnica e, posteriormente, uma análise dos resultados, juntamente com estudos de melhorias que possam ser feitas. O método em questão foi escolhido por conseguir reprimir alguns dos erros citados e ainda obter uma alta taxa de precisão.

As simulações serão realizadas em um ambiente de simulação proporcionado pelo *software ATP (Alternative Transients Program)*, onde é possível realizar cálculos de transitórios eletromagnéticos e, posteriormente, colher os dados para serem analisados.

1.1. Motivação do trabalho

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto por longas linhas de transmissão, que realizam a interconexão dos sistemas elétricos por meio da malha de transmissão, e propiciam a transferência de energia entre subsistemas, permitem a obtenção de ganhos sinérgicos e exploram a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade. Ainda de acordo com o ONS, o sistema de transmissão nacional (englobando linhas de transmissão com tensão nominal de 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV, 600 kV CC, 750 kV e 800 kV CC) já soma cerca de 142.000 km de extensão, e tem previsão, para 2024, de se expandir até aproximadamente 182.000 km (Sumário PAR/PEL 2020-2024). A distribuição espacial do sistema de transmissão brasileiro é apresentada na Figura 1.

Figura 1: Mapa do Sistema de Transmissão - Horizonte 2024



Fonte: ONS (2021).

Para a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), os serviços prestados de transmissão e distribuição de energia elétrica no SIN devem atender, por norma, condições mínimas de qualidade de energia relacionado a continuidade de serviço e disponibilidade. Para tanto, a identificação de falhas que propiciam desligamentos no sistema elétrico deve ser feita de uma maneira rápida e com a maior precisão possível. Normalmente, após uma primeira estimativa do local do defeito, calculada por dispositivos localizadores instalados no SEP, as concessionárias utilizam vias terrestres e/ou helicópteros para identificar o ponto exato da falta. Em alguns casos, esse procedimento pode ser lento, a depender do comprimento da LT, do relevo da região na qual a LT se encontra instalada, das condições climáticas no momento da inspeção e da precisão dos dispositivos localizadores.

A ampliação dos sistemas de transmissão é uma tendência, em virtude da expansão da economia e do crescimento populacional. Todavia, linhas maiores de transmissão e em maior quantidade têm como consequência aumento da probabilidade de ocorrência de distúrbios, em decorrência de causas naturais ou não naturais, como curtos-circuitos. Em âmbito mundial, por

exemplo, a incidência de faltas do tipo fase-terra em linhas aéreas é hegemônica. (CAMINHA, 1977).

Diversas linhas de pesquisa buscam propor métodos para obtenção do ponto de localização de falta com índices de precisão cada vez maiores. Após realizar um levantamento dos métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes já propostos na literatura, foi escolhido um dos métodos que, se destacou aos demais por conseguir reduzir algumas variáveis de erro intrínsecas do sistema, como: a consideração de velocidade de propagação de onda constante para as duas frentes de ondas e ruídos provenientes a outros equipamentos que estão ligados no SEP. Além disso, o método possui uma redução na complexidade sendo possível utilizar RDPs com uma taxa de amostragem menor, que os que são usados em técnicas baseadas na teoria das ondas viajantes e a não utilização de GPS.

1.2. Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é estudar o fenômeno de ondas viajantes em linhas de transmissão e sua aplicação para localização de faltas. Para tanto, foi feita uma revisão bibliográfica, e escolhido um dos métodos propostos na literatura para aprofundamento, implementação e estudo de caso.

Os objetivos específicos são:

- Estudar os métodos de localização de falha em linhas de transmissão;
- Desenvolver conhecimento no *software* ATP para simulações de sistema elétricos de potência;
- Avaliar metodologias novas que não foram feitas no método de referência;
- Propor sugestões de melhoria para futuros trabalhos.

1.3. Estrutura do trabalho

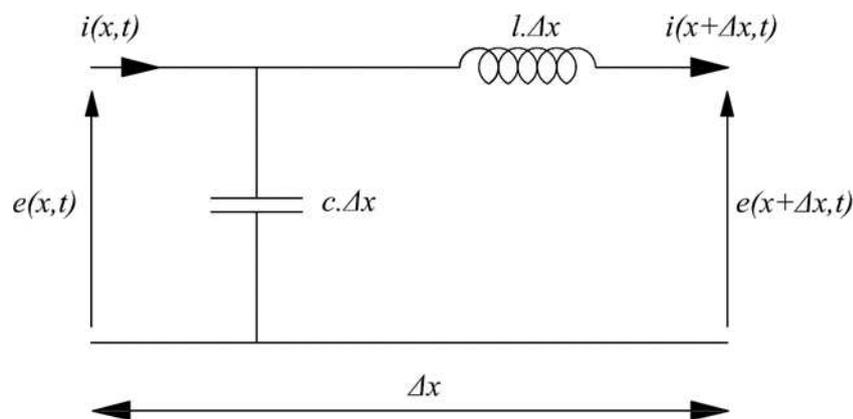
Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2, apresenta fundamentação teórica sobre as ondas viajantes, e uma revisão bibliográfica a respeito dos métodos de localização de falhas em linhas de transmissão. O Capítulo 3 aborda a técnica utilizada para a aplicação do método escolhido. A partir da metodologia, foram obtidos os resultados para uma análise posterior. Esses resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5, discorre-se sobre as percepções do método estudado, sua confiabilidade para identificação de falhas e apontam-se possíveis melhorias.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Ondas Viajantes em Sistemas de Transmissão

Uma linha de transmissão tem seus parâmetros (R, L e C) distribuídos ao longo da sua extensão (ARAÚJO; NEVES, 2005). Qualquer perturbação gerada por manobras de disjuntores, descargas atmosféricas, falhas ou atuações de equipamentos em geral, resultam na propagação de ondas ao longo da linha de transmissão. A ocorrência de uma variação de corrente ou tensão em qualquer dos seus terminais, acaba por produzir efeitos que não são sentidos pelo outro, até que as ondas eletromagnéticas geradas por essas variações percorram todo o comprimento da linha. Por isso, os modelos utilizados atualmente em cálculos de transitórios eletromagnéticos envolvendo linhas de transmissão são baseados na solução das equações de onda de tensão e corrente. Na Figura 2 é apresentado o circuito equivalente de um elemento incremental de uma linha de transmissão monofásica sem perdas.

Figura 2: Elemento Incremental de uma Linha Monofásica sem Perdas.



Fonte: ARAÚJO; NEVES (2005).

Onde: l é a indutância série da linha por unidade de comprimento (H/m);

c é a capacitância shunt da linha por unidade de comprimento (F/m).

A relação entre a tensão e corrente do sistema da Figura 2 é dada conforme evidenciado nas equações 1 e 2 a seguir.

$$e(x + \Delta x, t) = e(x, t) - l\Delta x \frac{\partial}{\partial t} i(x + \Delta x, t). \quad (1)$$

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - c\Delta x \frac{\partial}{\partial t} e(x, t). \quad (2)$$

A partir das equações 1 e 2, podem ser obtidas as equações de onda da tensão e corrente na linha de transmissão, apresentadas nas equações 3 e 4, respectivamente.

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = lc \frac{\partial^2 e}{\partial t^2}. \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = cl \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}. \quad (4)$$

A solução geral das equações 5 e 6 no domínio do tempo é apresentada a seguir.

$$e(x, t) = A(t - x/v) \cdot u(t - x/v) + B(t + x/v) \cdot u(t + x/v). \quad (5)$$

$$i(x, t) = (1/Z) \cdot A(t - x/v) \cdot u(t - x/v) - (1/Z) \cdot B(t + x/v) \cdot u(t + x/v). \quad (6)$$

Onde: $Z = \sqrt{\frac{l}{c}}$, é a impedância característica da linha de transmissão e $v = \sqrt{\frac{1}{lc}}$, é a velocidade de propagação da onda.

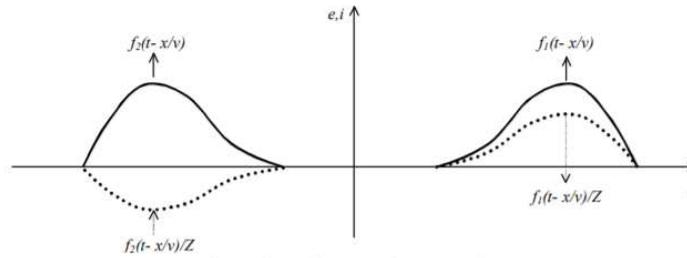
As equações 5 e 6 podem ser reescritas da seguinte forma:

$$e(x, t) = f_1(t - x/v) + f_2(t + x/v). \quad (7)$$

$$i(x, t) = \frac{f_1(t - x/v)}{Z} - \frac{f_2(t + x/v)}{Z}. \quad (8)$$

Pode-se notar que as equações 7 e 8 correspondem a superposição de dois sinais representados por funções. As funções f_1 e f_2 são interpretadas como ondas viajantes, que se propagam em sentidos opostos ao longo da linha de transmissão. A propagação dessas ondas é ilustrada na Figura 3.

Figura 3: Ondas progressivas e regressivas.



Fonte: NEVES (2005).

Na ocorrência de um distúrbio em um ponto X da linha de transmissão, haverá a propagação das ondas eletromagnéticas provenientes em direção às extremidades da linha. Com o uso de GPS e RDP é possível estimar os tempos de trânsito das ondas viajantes do ponto da falta até as barras monitoradas, tornando possível o cálculo da estimativa do local de ocorrência do problema.

2.2. Métodos de localização de faltas na linha de transmissão

Este tópico será composto por uma breve revisão bibliográfica, apresentando algumas das principais técnicas propostas para a identificação de falhas em linhas de transmissão.

De acordo com Gale *et al.* (1993), os métodos de identificação de falhas baseados em ondas viajantes são divididos em quatro grupos. Esses grupos são divididos tendo como critérios o número de terminais monitorados, a utilização de pulsos elétricos e a utilização de ondas refletidas em um mesmo terminal. Os grupos são denominados como A, B, C e D. Na Tabela 1, apresenta-se como os métodos são separados, os tipos A e C monitoram apenas um terminal e utilizam ondas refletidas, entretanto, o grupo C utilizam pulsos elétricos, diferente do grupo A. Já nos grupos B e D, são utilizados dois terminais para realizar os monitoramentos das ondas viajantes. Estes grupos diferem entre si na utilização de pulsos elétricos e de ondas refletidas, onde o grupo B faz a utilização e o grupo D não.

Tabela 1: Classificação dos métodos do Tipo A, B, C e D para localização de faltas.

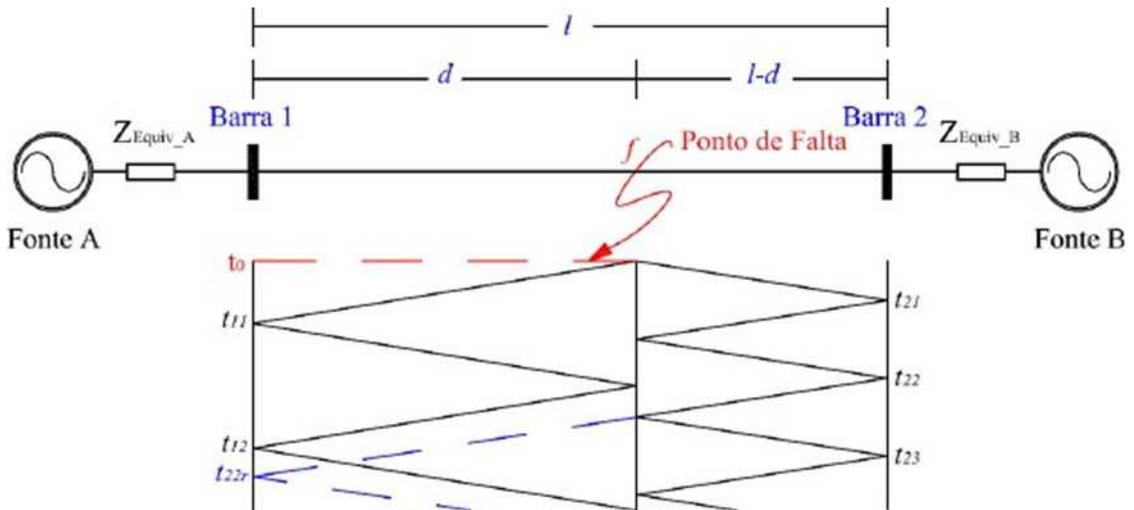
Tipo do Método	Características	Utiliza Pulsos Elétricos	Número de Terminais Utilizados		Utiliza ondas refletidas
			1	2	
TIPO A			√		√
TIPO B		√		√	√
TIPO C		√	√		√
TIPO D				√	

Fonte: GALE (1993).

2.2.1. GALE *et al.* (1993)

A metodologia proposta em Gale *et al.* (1993) depende da identificação dos instantes em que a onda viajante atinge os terminais da linha de transmissão. Na Figura 4, é mostrado o diagrama utilizado para a obtenção dos instantes.

Figura 4: Diagramas de reflexões para faltas em linhas de transmissão.



Fonte: GALE (1993).

Onde:

t_{11} = Instante de chegada da primeira onda incidente à barra 1;

t_{21} = Instante de chegada da primeira onda incidente à barra 2;

t_{12} = Instante de chegada da onda refletida no ponto da falha à barra 1;

t_{22} e t_{23} = Instante de chegada das ondas refletidas no ponto da falha à barra 2;

t_{22r} = Instante de chegada da onda refratada no ponto da falha à barra 1.

Assumindo que v é a velocidade das ondas viajantes, para os métodos que utilizam um terminal, a distância do ponto da falha ao terminal da barra 1 é calculada por:

$$d = \frac{(t_{12} - t_{11}) \cdot v}{2} \quad (9)$$

De acordo com Gale *et al.* (1993), métodos de um terminal, apesar de evitar a utilização de GPS para sincronizar as leituras de tensão e/ou corrente dos terminais monitorados, são métodos mais complexos e mais susceptíveis a erros, uma vez que utilizam ondas refletidas no

cálculo da localização da falta. Uma análise detalhada feita na Figura 4, nota-se que o instante t_{12} pode ser, em alguns casos, confundido com o instante t_{22r} . Isto acaba por gerar erros nos cálculos e consequentemente na localização da falta.

Por outro lado, os métodos que utilizam dois terminais, sobretudo os que não utilizam ondas refletidas (D) são baseados em um princípio bastante simples. Tais métodos consideram apenas os primeiros instantes de chegada dos transitórios às barras 1 e 2, isto é, consideram apenas os instantes t_{11} e t_{21} . Com esses instantes sincronizados via GPS, a distância da falta à barra 1 pode ser calculada pela Equação 10 (GALE, 1993).

$$d = \frac{l + (t_{11} - t_{21}) \cdot v}{2} \quad (10)$$

Os métodos de dois terminais são mais robustos e envolvem a necessidade de mais equipamentos, entretanto, são menos susceptíveis a erros. De fato, mesmo fazendo necessária a utilização de GPS, quando se trata de identificação de falhas no sistema, a precisão é um ponto crucial a ser levado em conta, e, por isso, considera-se que os métodos de dois terminais são os mais indicados para localização de faltas na linha de transmissão.

2.2.2. JIAN *et al.* (1998)

Segundo Jian *et al.* (1998), o maior problema a ser solucionado pelos algoritmos baseados na teoria de ondas viajantes é a determinação do tempo de chegada das frentes de onda às barras monitoradas, devido a isso, são necessário GPS de alta precisão com o intuito de obter esses valores com maior precisão.

Outro grande desafio é determinar da forma mais precisa possível a velocidade de propagação de tais ondas. Ao ser levantado um espectro dos sinais de ondas viajantes que partem em direção aos terminais da linha, é verificado que essas ondas apresentam componentes de frequência dominante diferentes, e por isso podem apresentar velocidades de propagações diferentes. Além disso, esse fenômeno não tem como ser evitado pois dependem tanto do ponto da falta como do tipo de falta.

Levando em consideração essa possível problemática, Jian *et al.* (1998) propõem a determinação das velocidades de propagação das ondas viajantes antes do cálculo da localização da falta. Para tanto, realiza-se uma análise espectral dos sinais coletados nas extremidades da linha com o intuito de identificar as suas respectivas frequências dominantes.

O método é baseado em um coeficiente η capaz de corrigir as variações de velocidade de propagação de onda. O equacionamento está listado a seguir:

$$\eta = \frac{|t_2 - t_1|}{l} \cdot v_c \quad (11)$$

Se η for grande:

$$d = \frac{v_1 v_2 \cdot (t_1 - t_2) + v_1 l}{v_1 + v_2} \quad (12)$$

Se η for pequeno:

$$d = \frac{l + (t_1 - t_2) \cdot v}{2} \quad (13)$$

Onde:

l = Comprimento da linha;

v = Velocidade de propagação da onda mais rápida;

v_c = Velocidade de propagação da luz;

t_1 e t_2 = Tempo de chegada das ondas viajantes às barras 1 e 2;

v_1 e v_2 = Velocidade de propagação das ondas viajantes às barras 1 e 2;

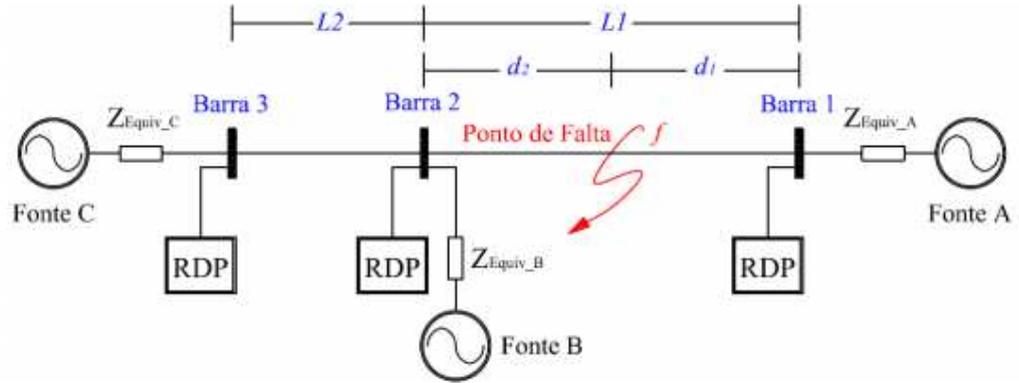
d = Distância do ponto da falta à barra 1.

O método proposto apresenta considerações importantes a respeito da propagação de ondas viajantes em linhas de transmissão e pode, de fato, colaborar para uma identificação do ponto de falta ainda mais precisa. Entretanto, o fator limitante do modelo é a necessidade de se ter um registro oscilográfico completo. O método pode ser melhor praticado *off-line* onde se tem o registro oscilográfico completo antes da falta ocorrer.

2.2.3. FENG *et al.* (2008)

Em Feng *et al.* (2008) é proposta uma técnica de localização de faltas que não necessita, de fato, da velocidade de propagação das ondas viajantes. Para isso, são utilizados três instantes de tempo de chegada diferentes. Para tanto, são utilizadas três barras de monitoramento. O sistema proposto é mostrado na Figura 5.

Figura 5: Modelo de SEP utilizado por FENG et al (2008).



Fonte: FENG *et al.* (2008).

Feng *et al.* (2008) utilizam a Transformada *Wavelet* para a detecção do instante de chegada das ondas e as equações utilizadas para validar o método para o cálculo do ponto da falta são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2: Equações propostas por FENG *et al.* (2008).

Equações Preliminares	Equação para localização da falta
$(t_1 - t_0) \cdot v = d_1$ $(t_2 - t_0) \cdot v = d_2$ $(t_3 - t_0) \cdot v = L_2 + d_2$ $d_1 + d_2 = L_1$	$d_2 = \frac{(t_2 - t_1) \cdot L_2}{2 \cdot (t_3 - t_2)} + \frac{L_1}{2}$

Fonte: FENG *et al.* (2008).

Onde,

t_0 = Instante inicial da falta ocorrida;

v = Velocidade de propagação das ondas viajantes;

t_1 e t_2 e t_3 = Tempos de chegada das ondas nas barras 1, 2 e 3;

d_2 = distância entre a barra 2 e o ponto f de ocorrência da falta.

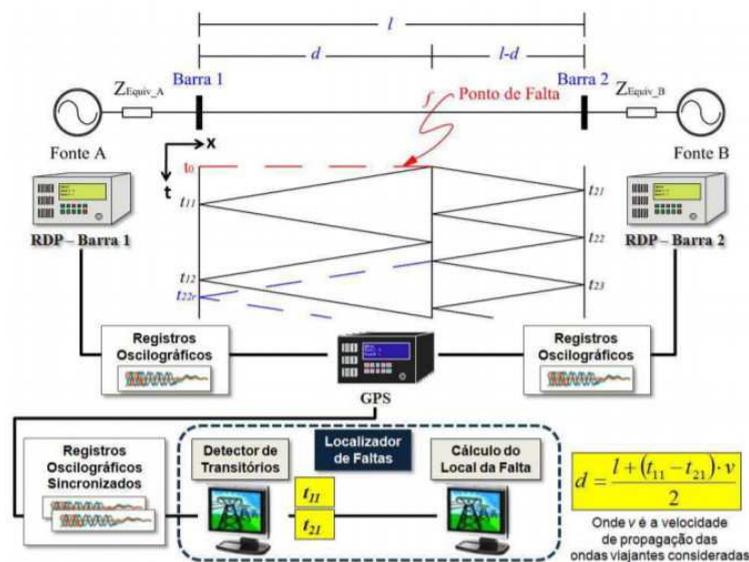
Percebe-se que nesse método Feng *et al.* (2008) utilizam a mesma velocidade de propagação para todos os trechos. Porém, em Jian *et al.* (1998) é afirmado que a velocidade em cada trecho vai variar de acordo com a posição em que ocorra a falha, desse modo, a condição

utilizada pode gerar fontes de erro. Além disso, esse método necessita de três Registradores Digitais de Perturbações (RDP) além de um GPS de alta precisão para sincronizar os tempos, o que torna a técnica tanto mais onerosa quanto mais complexa.

2.2.4. LOPES *et al.* (2014)

Diante da necessidade de elaborar algoritmos que possibilitem a detecção de transitórios de forma simples, rápida e confiável, apresentou-se em Lopes *et al.* (2011a) uma nova técnica para detecção de transitórios baseada na transformada de Park (Tdq0), a qual permite o monitoramento de todas as fases do SEP conjuntamente por meio do processamento apenas dos coeficientes de eixo direto obtidos via Tdq0. Como limitação deste método, pode-se destacar uso de limiares empíricos, o que torna o algoritmo mais susceptível a erros. Com isso, apresentou-se em Lopes *et al.* (2011b) uma versão melhorada do algoritmo proposto em Lopes *et al.* (2011a), na qual os limiares são auto adaptativos às características do SEP. No entanto, o algoritmo apresenta grande sensibilidade a ruídos elétricos, o que motivou a elaboração do algoritmo apresentado em Lopes *et al.* (2013b), no qual a detecção de transitórios é realizada por meio da análise das energias janeladas dos elementos incrementais dos coeficientes de eixo direto obtidos via Tdq0 (LOPES, 2014).. O método aplicado é mostrado na Figura 6.

Figura 6: Esquema de funcionamento para métodos localizadores de falta de dois terminais.



Fonte: LOPES (2011).

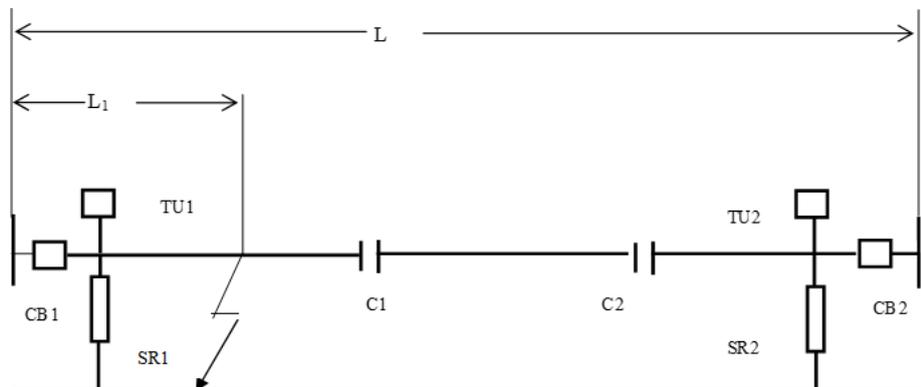
A implementação do algoritmo é dividida em cinco etapas que consistem no cálculo dos parâmetros das linhas em análise, aquisição de dados nas extremidades da linha, aplicação da

Tdq0 aos sinais analisados, identificação dos instantes iniciais dos transitórios nos dois terminais da linha e, por fim, o cálculo da localização da falta.

2.2.5. FAYBISOVICH *et al.* (2008)

Segundo Faybisovich *et al.* (2008), métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes tem como problema a necessidade do uso de GPS de alta precisão para obtenção dos instantes em que a onda viajante atinge os terminais da linha. Um outro grande problema é que o desempenho desses métodos é afetado por ondas refletidas de outros elementos do sistema adjacentes à linha e por falhas fora da linha monitorada. Faybisovich *et al.* (2008) afirmam que essas problemáticas ocorrem, pois, as medições são realizadas enquanto a linha está energizada e os disjuntores estão fechados. Dito isso, é proposto uma medição no momento em que a linha se encontra aberta, após a identificação da falha no sistema e conseguinte a abertura dos disjuntores. O sistema analisado é mostrado na Figura 7.

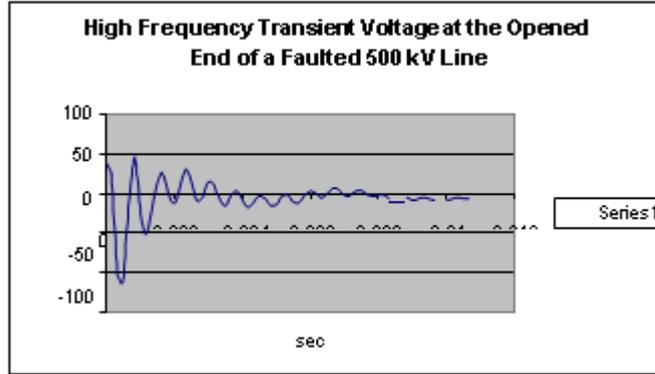
Figura 7: Linha de transmissão esquemática.



Fonte: FAYBISOVICH *et al.* (2008).

A identificação da falha é feita a partir do sinal de tensão residual, exemplificado na Figura 8, que permanece na linha após a abertura do disjuntor. Esse sinal tem uma tendência oscilatória e se atenua ao longo do tempo até que oscile com valores próximos de zero.

Figura 8: Registro de transitórios de tensão na extremidade aberta da linha de 500 kV.



Fonte: FAYBISOVICH *et al.* (2008).

A partir da obtenção dos sinais de tensão residual no terminal remoto e local, é analisado o seu espectro de frequência, a fim de se obter a frequência dominante desse sinal. O equacionamento proposto para identificação do ponto de localização da falha L_1 , utilizando o método de um terminal, tendo como referência o terminal local, é mostrado a seguir (FAYBISOVICH *et al.* 2008):

$$L_1 = \frac{v}{4 \cdot f_1} \quad (14)$$

Onde,

v é a velocidade de propagação da onda viajante;

f_1 é a frequência dominante da onda viajante vista pelo terminal local.

Pode-se perceber que esse método utiliza o parâmetro v em seu cálculo. Dessa forma, como foi visto em Jian *et al.* (1998) e Feng *et al.* (2008), a precisão dele tende a ser menor visto que é feita uma estimativa.

O segundo método proposto, de dois terminais, tem como vantagem a não utilização da velocidade de propagação da onda viajante. Ao invés disso, tem-se como necessário apenas as frequências dominantes do sinal de tensão residual do terminal local e remoto, f_1 e f_2 , respectivamente, e o comprimento total da linha L . O equacionamento para o método é mostrado a seguir.

$$L_1 = L \cdot \frac{f_2}{(f_1 + f_2)} \quad (15)$$

O método de dois terminais proposto em Faybisovich *et al.* 2008 servirá como base de aprofundamento para análise e estudo de caso. Apesar de considerar que a velocidade de propagação é a mesma para as duas frentes de onda, em Lopes *et al.* 2014 é constatado que em casos nos quais os parâmetros da linha monitorada não são conhecidos, o uso de velocidades entre 98% e 100% da velocidade da luz é indicado.

É prudente considerar que a consideração da velocidade de propagação de onda igual tem um impacto na assertividade do método. Porém, após várias simulações realizadas, foi visto que esses impactos não foram significativos.

Na literatura, existem trabalhos mais recentes que estão associados a localização de faltas a partir da obtenção da frequência dominante dos sinais de ondas viajantes. Em Zhengyou He *et al.* 2015, foi desenvolvido o equacionamento para obtenção das componentes de frequências associadas a incidência da falta do sistema. Entretanto, diferente disso, em Faybisovich *et al.* 2008 e Faybisovich *et al.* 2010, a análise é feita com os sinais de ondas viajantes de tensão residual provenientes da abertura do disjuntor. Nesse sentido, percebe-se que, para aplicações práticas, o método opera praticamente em tempo real. Visto que, os sinais são extraídos entre 3 e 6 ciclos após a abertura do disjuntor e o seu religamento não é instantâneo. Dessa forma, o método conseguiria ser aplicado antes mesmo que o disjuntor fosse religado.

3. METODOLOGIA

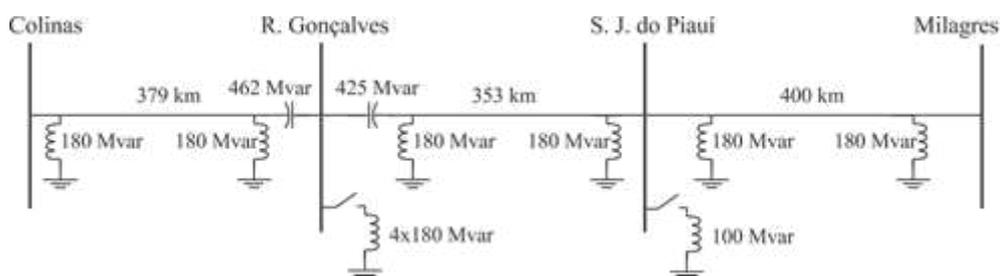
Propõe-se a avaliação do método proposto em Faybisovich *et al.* (2008), para localização de faltas em linhas de transmissão, utilizando medições de tensão residual após a abertura trifásica do disjuntor. Uma etapa essencial para o algoritmo é a obtenção do espectro de frequência do sinal via transformada de Fourier para obtenção dos valores das frequências dominantes dos sinais.

Neste estudo de caso, foi utilizado um SEP com parâmetros reais, a fim de empreender um estudo de sensibilidade e análise paramétrica para validação do método. O *software* ATPDraw foi utilizado para simulações digitais de faltas e abertura de disjuntores, e posterior exportação de dados. Além disso, utilizou-se o *software* MatLAB para criar uma rotina computacional capaz de obter os dados gerados pelo ATPDraw, calcular as componentes de frequência dominante e o ponto de localização da falta.

3.1. Sistema interligado nacional

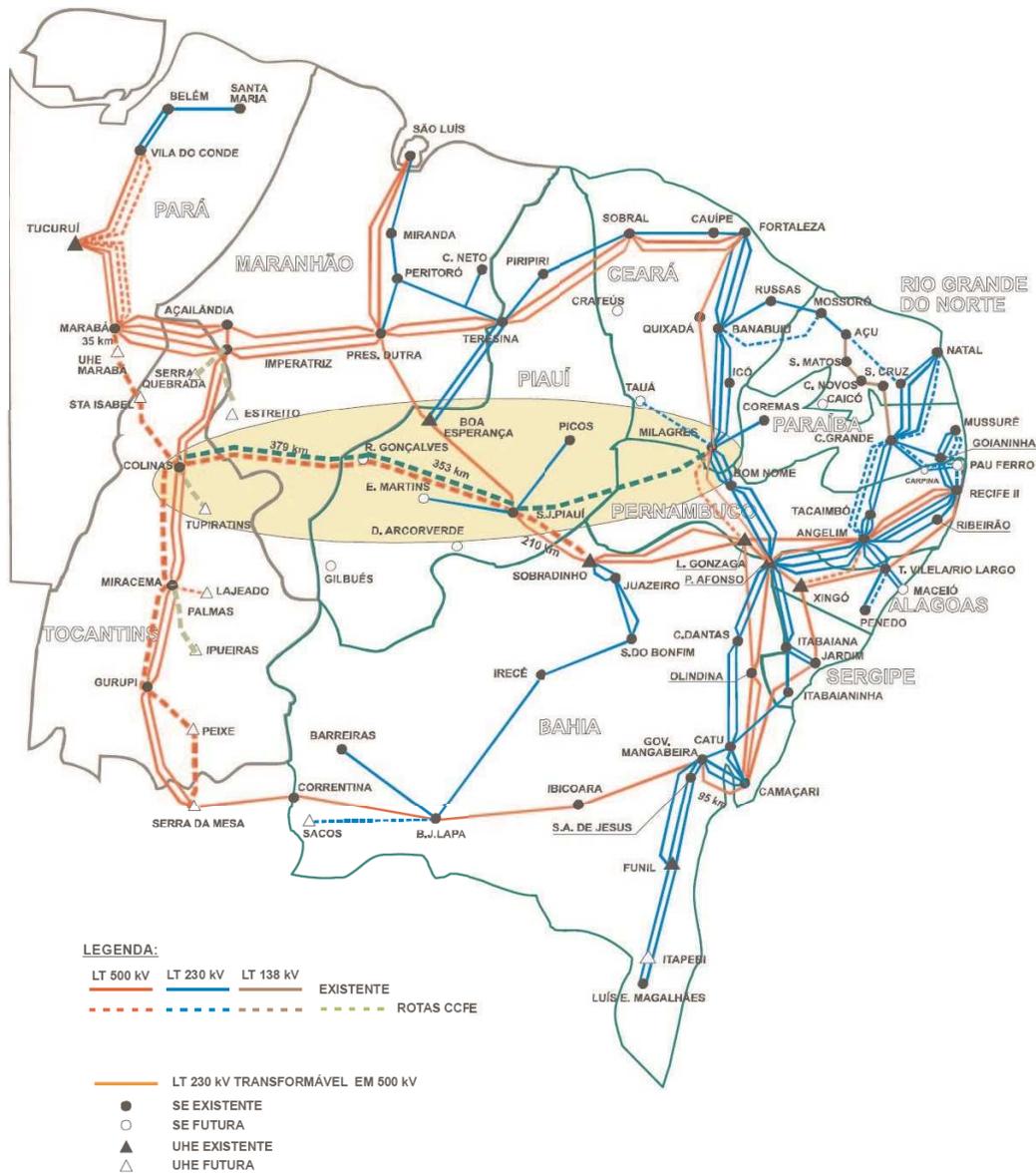
Estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicaram que para transferir parte da energia disponível na região Norte para a região Nordeste, seria necessária a ampliação da interligação entre estas regiões através do segundo circuito da LT 500 kV Colinas - Ribeiro Gonçalves - São João do Piauí e da LT 500 kV São João do Piauí - Milagres (LT SJI-MLG). Esta interligação já se encontra em operação e a configuração deste empreendimento foi definida nos estudos elaborados sob a coordenação da EPE (EPE, 2006). Foi escolhido esse sistema devido ao prévio conhecimento de seus parâmetros de linha, e ainda, o mesmo já foi utilizado por outros autores que atuam no grupo de pesquisa de teoria das ondas viajantes. O diagrama unifilar é apresentado na Figura 9 e na Figura 10 tem-se o mapa eletro-geográfico da área de interesse, ilustrando a configuração já existente ou em fase de implantação, assim como a rede referente ao empreendimento (DANTAS, 2007).

Figura 9: Diagrama unifilar da ampliação da interligação Norte-Nordeste com horizonte até 2009.



Fonte: DANTAS (2007).

Figura 10: Mapa eletro-geográfico do sistema elétrico.



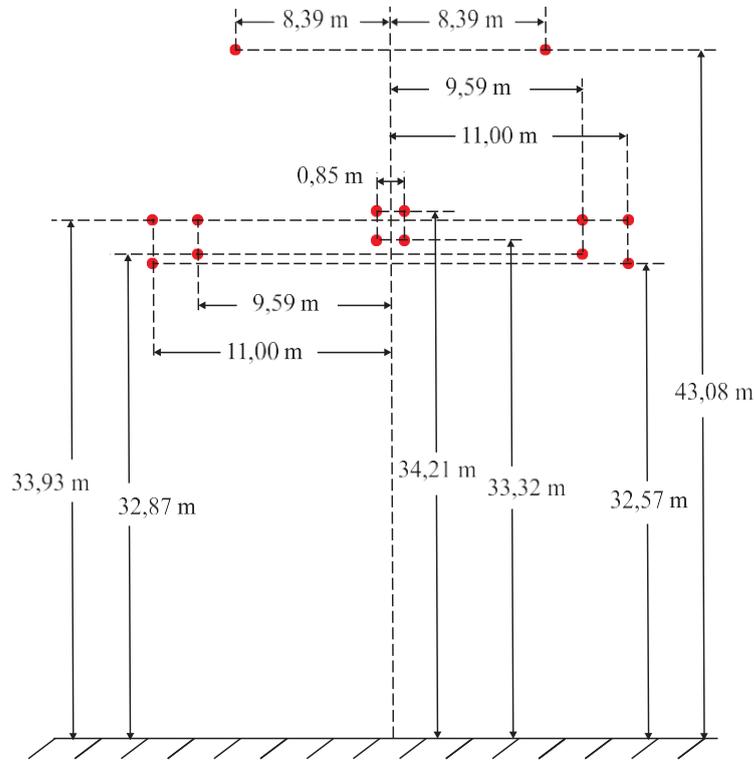
Fonte: EPE (2006).

Para estudo de caso, foi utilizada, mais especificamente, a linha de transmissão referente ao trecho São João do Piauí - Milagres, que tem 400 km de extensão, e reatores em derivação de 180 MVA em cada extremidade. A geometria desta linha é apresentada na Figura 11, e consiste em uma torre de aço estaiada, com quatro condutores geminados por fase e com o feixe expandido. Os dados dos condutores são apresentados na Tabela 3.

A linha foi modelada com parâmetros distribuídos constantes na frequência e os seus parâmetros elétricos de sequência são apresentados na Tabela 4, em que se considera a linha

perfeitamente transposta. A resistividade do solo adotada nas simulações foi de $1000 \Omega \cdot m$ (DANTAS, 2007).

Figura 11: Geometria da LT 500 kV São João do Piauí - Milagres.



Fonte: DANTAS (2007).

Tabela 3: Dados dos condutores da LT São João do Piauí – Milagres.

Parâmetros	Condutor fase	Condutor para-raios
Tipo de cabo	Cabo Rail	Cabo EHS 3/8
Diâmetro externo (cm)	2,96	0,914
Raio médio geométrico (cm)	1,1735	0,0302
Resistência AC (Ω/km)	0,0674	4,271

Fonte: DANTAS (2007).

Tabela 4: Dados de sequência da LT São João do Piauí – Milagres.

Sequência	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ωC ($\mu S/km$)
Zero	0,4930	1,339	2,890
Positiva	0,0186	0,267	6,124

Fonte: DANTAS (2007).

Baseando-se em dados reais obtidos do sistema elétrico de potência de 500 kV da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), foram selecionadas as impedâncias das fontes na Tabela 5 (DANTAS, 2011).

Tabela 5: Impedâncias das Fontes.

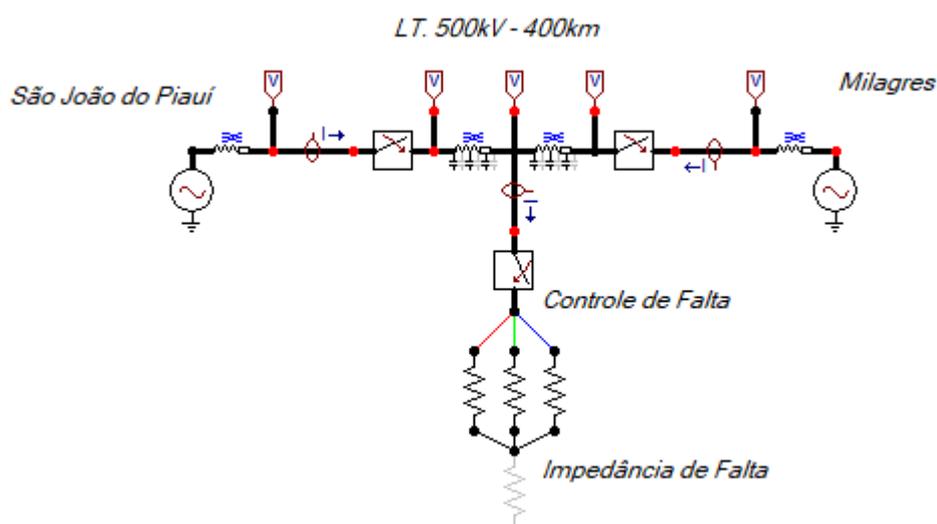
Fonte	Sequencia Zero		Sequencia Positiva	
	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$
S. J. do Piauí	1,1268	20,838	0,9681	20,513
Milagres	1,1268	20,838	0,9681	20,513

Fonte: DANTAS (2007).

3.2. Sistema elétrico modelado

A partir dos parâmetros da linha e fonte da LT 500 kV São João do Piauí – Milagres foi modelado, utilizando o ambiente do ATP, um SEP para realização de simulações, conforme a Figura 12.

Figura 12: Sistema modelado no ATPDraw.



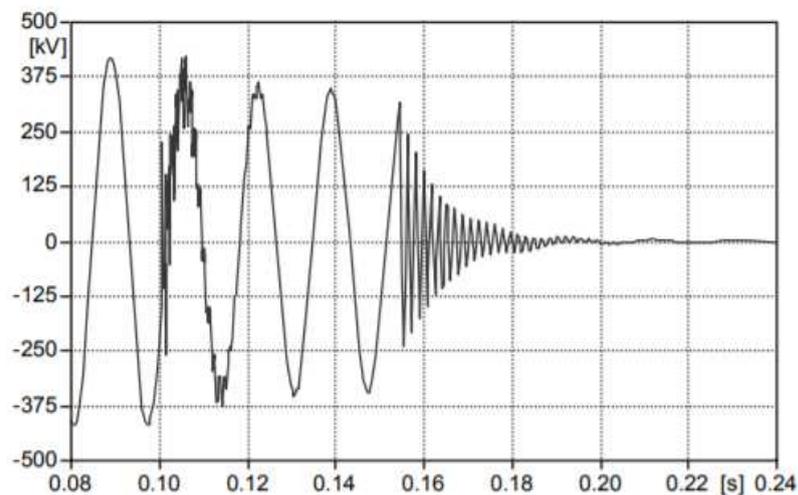
Fonte: Autoria própria.

No sistema modelado é possível realizar o monitoramento dos sinais de tensão nos terminais local e remoto, nas saídas dos disjuntores e no ponto da falta. Além disso, é possível

alterar, com facilidade o ponto onde a falta ocorreu, a impedância de falta e o tipo de falta selecionada, sendo ela: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásica. A alteração desses parâmetros é de suma importância para realização da análise paramétrica e de sensibilidade.

Em Faybisovich *et al.* (2010), é mostrado um exemplo de monitoramento da linha de transmissão em dois estágios considerados pelos autores: durante a inserção da falha e após a abertura trifásica dos disjuntores, chamados de estágio inicial e estágio de eliminação do defeito, respectivamente, como mostrado na Figura 13.

Figura 13: Sinal de tensão típico no isolamento de falha com abertura do disjuntor.



Fonte: FAYBISOVICH *et al.* (2010).

O primeiro estágio, de 0,1 s a 0,12 s, é representado pelo início da falta e dura cerca de 2 a 3 ciclos de onda (FAYBISOVICH *et al.* 2010). Nesse estágio, é possível ser observado os maiores transitórios e a atuação dos relés de proteção, porém os disjuntores ainda não são acionados. Portanto, nesse estágio a falta ainda não foi eliminada da rede.

Já o segundo estágio, a partir de 0,15 s, é caracterizado pela abertura dos disjuntores e a separação da falta da rede. Entretanto, devido às características da linha, após a abertura dos disjuntores uma tensão residual ainda se manifestará durante alguns ciclos. A onda viajante gerada na abertura do disjuntor irá partir dele até o ponto da falta, onde será refletida. Esse movimento ocorre nos dois terminais da linha e se repete até que o sinal de tensão acabe devido à dissipação de energia.

3.3. Método de Localização de Falta

3.3.1. Escolha da taxa de amostragem

Para realização da simulação no ATP é necessário escolher uma taxa de amostragem que seja capaz de amostrar as mais altas componentes de frequência do sinal avaliado. Essa análise é necessária, pois, em faltas que ocorrem próximas aos terminais as componentes de frequências dominantes são muito elevadas e sofre grande influência das reflexões de onda, isso acaba prejudicando a análise com o método de dois terminais. Para esse tipo de falta, o método de um terminal seria melhor utilizável, considerando o terminal oposto como referência.

De fato, a escolha da taxa de amostragem é um fator decisivo para delimitar uma “zona cega” onde não é possível obter a localização do ponto de falta. Por exemplo, utilizando uma taxa de 6000 amostras/s e, respeitando os critérios de Nyquist, teríamos uma frequência máxima amostrada de 3 kHz. Aplicando essa frequência máxima na Equação 14, pode-se notar que a menor distância possível de ser definida seria aproximadamente 25 km. Para esse trabalho, foi adotada a taxa de amostragem de 30000 amostras/s, pois, as componentes de frequência dominante máximas a serem verificadas tem valores máximos em torno de 3-6 kHz. Desse modo, 30 kHz é capaz, teoricamente, de captar todas as frequências dominantes. Além disso, um dos motivos do método foi avaliar o uso de RDPs com menor taxa de amostragem frente os que são utilizados em metodologias usais de ondas viajantes.

Em Faybisovich *et al.* (2010), foi feita a validação do método em campo utilizando a frequência de amostragem dos RDPs de 24 kHz para o terminal local e 28,8 kHz para o terminal remoto.

3.3.2. Análise do sinal de tensão

Após ser feita a simulação pelo ATP, é extraído um sinal de tensão semelhante a Figura 13 e também o sinal de corrente. Por meio do ATP é possível exportar um arquivo “.mat” com o sinal registrado em linhas e colunas capaz de ser aberto no *MatLAB*.

Com o uso do *MatLAB*, é possível extrair do sinal completo apenas o estágio de eliminação do defeito, que contém apenas as informações necessárias para implementação do método. Para tanto, será observado o sinal de tensão de uma das fases em que ocorreu o defeito. O novo sinal se iniciará após a abertura do disjuntor no momento em que a corrente da fase defeituosa atingir valor nulo e termina quando o valor de tensão estiver oscilando muito próximo de zero.

3.3.3. Extração da frequência dominante e análise residual

Após obtidos os sinais amostrados, as tensões do lado da linha de transmissão v_a , v_b e v_c são decompostas em componentes modais com o objetivo de determinar as componentes de frequência existentes nesse sinal e reduzir a influência que o modulo terra gera na detecção da frequência dominante. Para realizar essa transformação, utiliza-se a matriz de Clarke.

A transformação de Clarke é uma transformação modal que origina componentes ortogonais e estacionárias denominadas de modos aéreos, V_α e V_β , e uma terceira denominada modo terra, V_0 , as quais são relacionadas com as grandezas de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente, do sistema trifásico desacoplado (LOPES, 2014), como segue:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

O *software* MatLAB foi utilizado para criar uma rotina computacional automatizada, capaz de realizar a transformada de Clarke e obter as componentes de tensão no domínio modal. Além disso, é feita aplicação da Transformada de Fourier no sinal V_α e V_β com intuito de obter o espectro de frequência do sinal e conseguir extrair suas frequências dominantes.

Para faltas que envolvam apenas a fase A e o terra, não pode ser feita a análise do sinal utilizando a componente modal V_β , considerando-se que essa representação modal não leva em conta a contribuição da fase A. Para esse tipo de falta, é mais aconselhado utilizar a componente V_α . Por essa mesma análise, para os outros tipos de falta é aconselhado utilizar a componente V_β para uma análise mais precisa (ZHENGYOU HE, 2015).

A critério comparativo, será feita a análise do método de extração das frequências dominantes utilizando os sinais de tensão obtidos no domínio de fase.

Com as frequências dominantes encontradas, tanto no terminal local quanto no terminal remoto, utiliza-se a Equação 15 para estimação do ponto da falta.

Desse modo, a análise e estudo do método é baseado em simulações criteriosas que seguindo a metodologia apresentada anteriormente. Foram escolhidas quatro variáveis a serem alteradas e levantou-se as taxas de erro percentual e absoluto para cada uma delas. Foram alterados: o tipo de falta, valores de impedância de falta, ponto de localização da falta e taxa de amostragem.

3.4. Erro de Localização de Falhas em Linha de Transmissão

Como critério de avaliação do método, foi feito o levantamento do erro para cada análise paramétrica e de sensibilidade realizada. Levaram-se em conta o Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER) e o Erro Admissível para métodos baseados em ondas viajantes.

3.4.1. Erro Absoluto (EA)

O erro absoluto é a diferença entre a distância do terminal ao ponto real de ocorrência do distúrbio e a distância do terminal local ao ponto estimado pelo método de localização de falta.

$$EA = |d_{real} - d_{estimada}| \quad (17)$$

Considera-se o EA como sendo o módulo da referida diferença, dado em quilômetros, conforme apresentado na Equação 17, onde d_{real} e $d_{estimada}$ são, respectivamente, as localizações real e estimada, ambas dadas em quilômetros.

O EA possibilita uma análise mais coerente do método de localização da falta em relação ao ER, pois, para linhas muito longas, os valores percentuais tendem a ser fortemente influenciados pelo comprimento l da linha.

3.4.2. Erro Relativo (ER)

O erro relativo é a razão entre o erro absoluto e o comprimento total da linha, esse valor é dado em porcentagem e é descrito na Equação 18.

$$ER = \frac{|d_{real} - d_{estimada}|}{l} \cdot 100 \quad (18)$$

Pode-se notar que esse erro se torna generalista para quaisquer comprimentos de linha de transmissão.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. Influência do ponto da falta e impedância de falta (Z)

Para análise da influência que o ponto da falta e da impedância de falta (Z) exercem no método, foram feitas simulações utilizando o *ATPDraw*. As seguintes considerações foram feitas:

- Como padrão, foi utilizado uma frequência de amostragem de 30 kHz;
- Foi variado o ponto da falta em 10 km, 25 km, 50 km, 75 km, 100 km, 200 km e 300 km a partir da barra;
- A impedância de falta foi variada em 1 Ω , 10 Ω e 100 Ω ;
- Os tipos de faltas avaliados foram: faltas trifásicas; faltas fase-fase; faltas fase-fase-terra e faltas fase-terra.

Os resultados obtidos das simulações foram registrados nas tabelas abaixo, onde PF é o ponto da falta; PEDF é o ponto da falta estimado, utilizando os sinais de tensão no domínio de fase; PETC é o ponto da falta estimado utilizando os sinais de tensão no domínio de modal pela transformada de Clarke; IF é a impedância de falta; EADF e ERDF são, respectivamente, o Erro Absoluto e o Erro Relativo encontrado na aplicação do método, utilizando os sinais de tensão no domínio de fase; EATC e ERTC são, respectivamente, o Erro Absoluto e o Erro Relativo encontrado na aplicação do método, utilizando os sinais de tensão no domínio modal pela transformada de Clarke. Posteriormente à apresentação dos resultados nos tópicos 4.1 e 4.2, serão realizadas as análises dos mesmos no tópico 4.3.

4.1.1. Faltas Fase-Fase-Terra (BCT)

Tabela 6: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke (Z = 1 Ω) – Falta BCT.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	236,1955	9,7699	1	226,1955	56,55%	0,2301	0,06%
25	36,3636	25,4545	1	11,3636	2,84%	0,4545	0,11%
50	50,8254	50,8254	1	0,8254	0,21%	0,8254	0,21%
75	75,2941	75,2941	1	0,2941	0,07%	0,2941	0,07%
100	98,5507	98,5507	1	1,4493	0,36%	1,4493	0,36%
200	236,3636	200	1	36,3636	9,09%	0	0,00%
300	301,4493	301,4493	1	1,4493	0,36%	1,4493	0,36%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 10 \Omega$) – Falta BCT.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	236,1955	9,7699	10	226,1955	56,55%	0,2301	0,06%
25	243,3178	25,4431	10	218,3178	54,58%	0,4431	0,11%
50	64,4885	50,8254	10	14,4885	3,62%	0,8254	0,21%
75	75,2624	75,2624	10	0,2624	0,07%	0,2624	0,07%
100	98,5507	98,5507	10	1,4493	0,36%	1,4493	0,36%
200	200	200	10	0	0,00%	0	0,00%
300	301,4493	301,4493	10	1,4493	0,36%	1,4493	0,36%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 100 \Omega$) – Falta BCT.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	236,1955	9,7699	100	226,1955	56,55%	0,2301	0,06%
25	243,4786	25,4545	100	218,4786	54,62%	0,4545	0,11%
50	50,8475	50,8475	100	0,8475	0,21%	0,8475	0,21%
75	75,2941	75,2941	100	0,2941	0,07%	0,2941	0,07%
100	99,5507	99,5507	100	0,4493	0,11%	0,4493	0,11%
200	199,9339	199,9339	100	0,0661	0,02%	0,0661	0,02%
300	301,4493	301,4493	100	1,4493	0,36%	1,4493	0,36%

Fonte: Autoria própria.

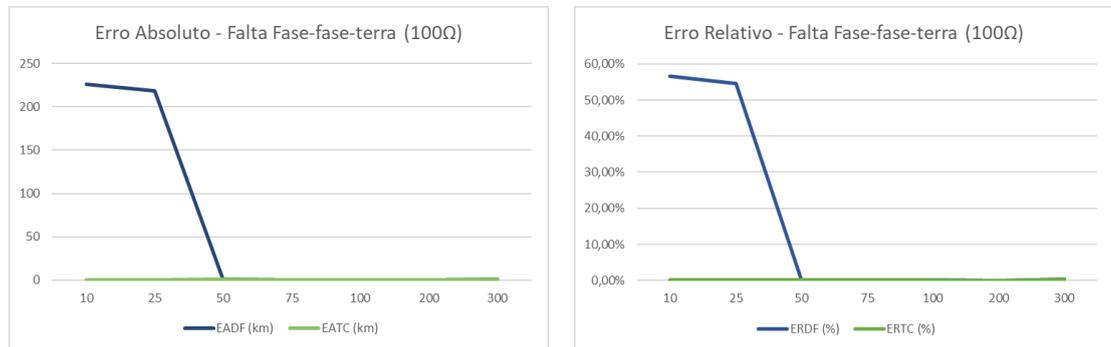
As figuras 14 e 15 trazem a representação gráfica dos dados.

Figura 14: Erro Absoluto e Erro Relativo de Falta Fase-Fase-Terra.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15: Erro absoluto e Erro relativo de faltas Fase-Fase-Terra.



Fonte: Autoria própria

4.1.2. Fase-Fase (BC)

Tabela 9: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 1 \Omega$) – Falta BC.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	110,6383	200	1	100,6383	25,16%	190	47,50%
25	116,6147	199,8686	1	91,6147	22,90%	174,8686	43,72%
50	50,8254	50,8254	1	0,8254	0,21%	0,8254	0,21%
75	75,2941	75,2941	1	0,2941	0,07%	0,2941	0,07%
100	98,5102	98,5102	1	1,4898	0,37%	1,4898	0,37%
200	200	200	1	0	0,00%	0	0,00%
300	301,4898	301,4898	1	1,4898	0,37%	1,4898	0,37%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 10 \Omega$) – Falta BC.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	133,2691	199,8784	10	123,2691	30,82%	189,8784	47,47%
25	140	200	10	115	28,75%	175	43,75%
50	146,2755	50,8254	10	96,2755	24,07%	0,8254	0,21%
75	152,381	75,2941	10	77,381	19,35%	0,2941	0,07%
100	99,5507	98,5507	10	0,4493	0,11%	1,4493	0,36%
200	200,0661	200,0661	10	0,0661	0,02%	0,0661	0,02%
300	241,9274	301,4898	10	58,0726	14,52%	1,4898	0,37%

Fonte: Autoria própria.

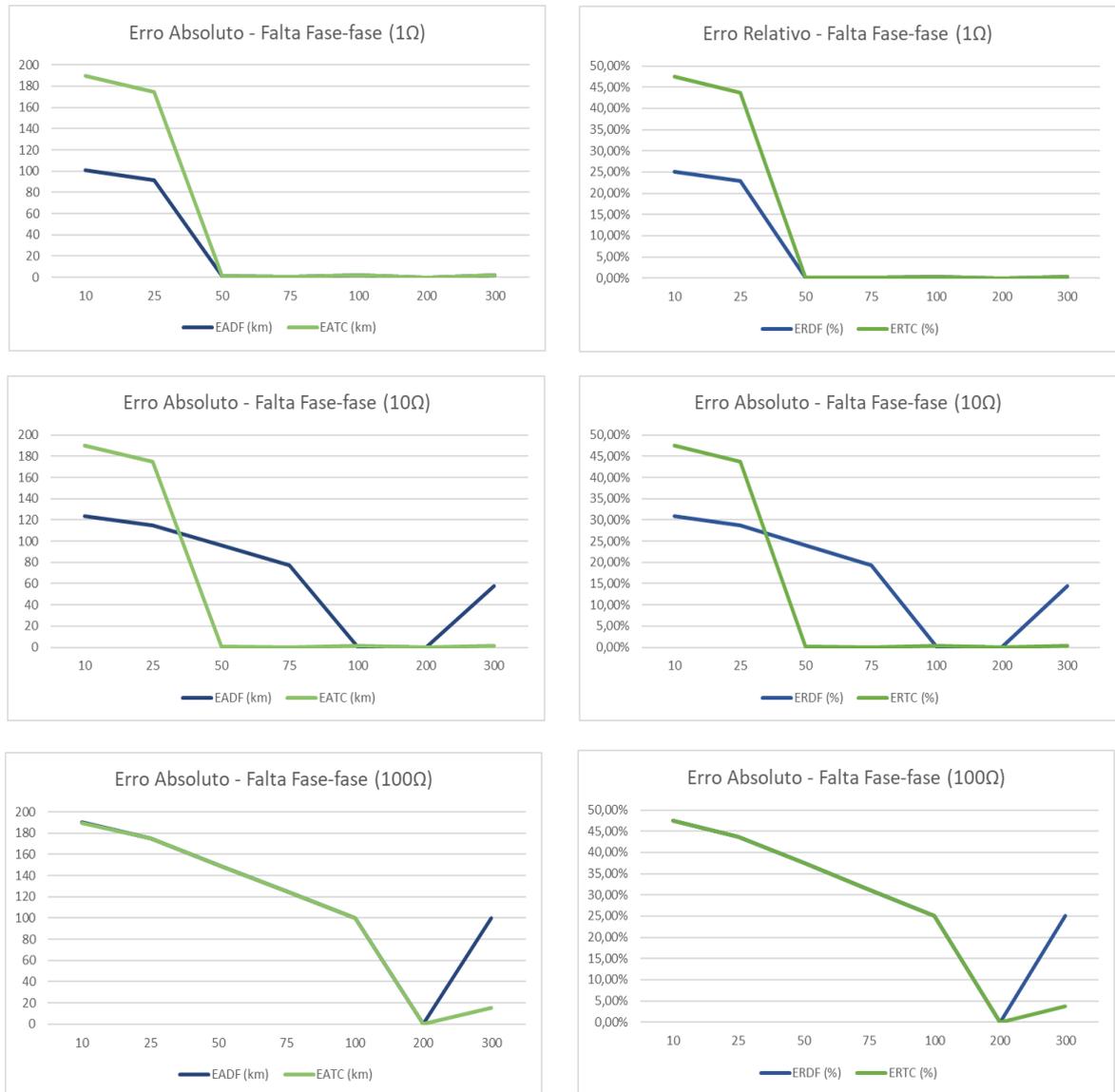
Tabela 11: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 100 \Omega$) – Falta BC.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	199,9339	199,8784	100	189,9339	47,48%	189,8784	47,47%
25	200	200	100	175	43,75%	175	43,75%
50	199,9512	199,9339	100	149,9512	37,49%	149,9339	37,48%
75	200	200	100	125	31,25%	125	31,25%
100	199,9523	199,9947	100	99,9523	24,99%	99,9947	25,00%
200	200,0046	200,0046	100	0,0046	0,00%	0,0046	0,00%
300	200	315,1515	100	100	25,00%	15,1515	3,79%

Fonte: Autoria própria.

A figura 16 traz a representação gráfica dos dados.

Figura 16: Erro Absoluto e Erro Relativo de Falta Fase-Fase.



Fonte: Autoria própria.

4.1.3. Fase-Terra (AT)

Tabela 12: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 1 \Omega$) – Falta AT.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	10,5263	200	1	0,5263	0,13%	190	47,50%
25	25,4661	199,8274	1	0,4661	0,12%	174,8274	43,71%
50	48,3516	48,3516	1	1,6484	0,41%	1,6484	0,41%
75	70,5882	70,5882	1	4,4118	1,10%	4,4118	1,10%
100	100	100	1	0	0,00%	0	0,00%
200	200	200	1	0	0,00%	0	0,00%
300	300	305,8824	1	0	0,00%	5,8824	1,47%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 10 \Omega$) – Falta AT.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	203,0553	203,0553	10	193,0553	48,26%	193,0553	48,26%
25	25,4777	200	10	0,4777	0,12%	175	43,75%
50	48,3299	199,8491	10	1,6701	0,42%	149,8491	37,46%
75	70,5882	70,5882	10	4,4118	1,10%	4,4118	1,10%
100	99,955	79,9648	10	0,045	0,01%	20,0352	5,01%
200	168,8889	200	10	31,1111	7,78%	0	0,00%
300	300	277,3333	10	0	0,00%	22,6667	5,67%

Fonte: Autoria própria.

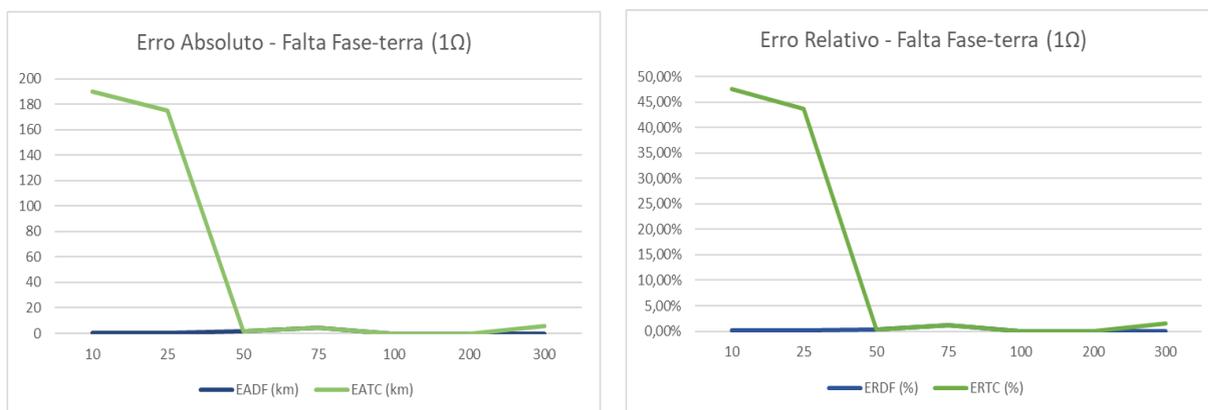
Tabela 14: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 100 \Omega$) – Falta AT.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	199,7981	189,295	100	189,7981	47,45%	179,295	44,82%
25	233,9623	200	100	208,9623	52,24%	175	43,75%
50	200,9623	200	100	150,9623	37,74%	150	37,50%
75	200	137,1429	100	125	31,25%	62,1429	15,54%
100	200	75	100	100	25,00%	25	6,25%
200	200	200	100	0	0,00%	0	0,00%
300	286,9565	277,3333	100	13,0435	3,26%	22,6667	5,67%

Fonte: Autoria própria.

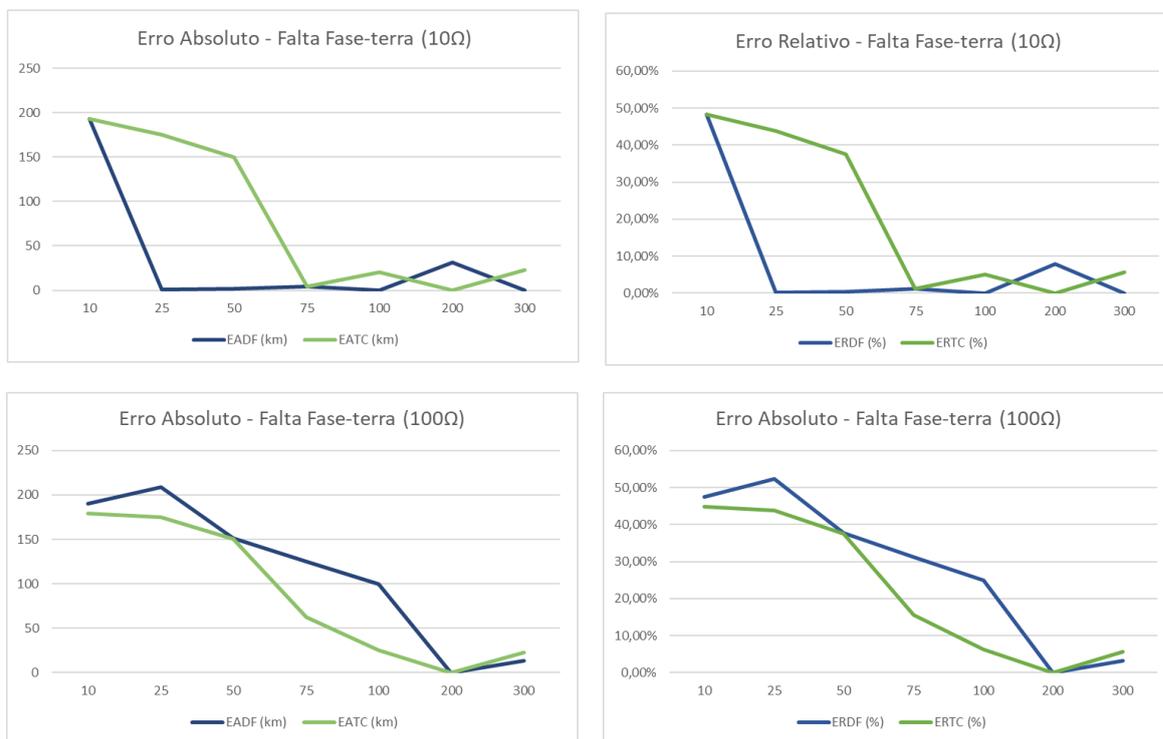
As figuras 17 e 18 trazem a representação gráfica dos dados.

Figura 17: Erro Absoluto e Erro Relativo de Falta Fase-Terra.



Fonte: Autoria própria.

Figura 18: Erro absoluto e erro relativo de faltas fase-terra.



Fonte: Autoria própria.

4.1.4. Trifásica (ABCT)

Tabela 15: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 1 \Omega$) – Falta ABCT.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	197,9221	204,8204	1	187,9221	46,98%	194,8204	48,71%
25	36,484	196,9736	1	11,484	2,87%	171,9736	42,99%
50	71,7222	49,6514	1	21,7222	5,43%	0,3486	0,09%
75	73,5058	73,5058	1	1,4942	0,37%	1,4942	0,37%
100	137,4704	99,97	1	37,4704	9,37%	0,03	0,01%
200	201,2439	197,5854	1	1,2439	0,31%	2,4146	0,60%
300	264,6566	300,4277	1	35,3434	8,84%	0,4277	0,11%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 10 \Omega$) – Falta ABCT.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	156,696	200,0979	10	146,696	36,67%	190,0979	47,52%
25	155,579	198,9245	10	130,579	32,64%	173,9245	43,48%
50	50,5414	49,1555	10	0,5414	0,14%	0,8445	0,21%
75	71,1418	73,7473	10	3,8582	0,96%	1,2527	0,31%
100	67,9702	100,3481	10	32,0298	8,01%	0,3481	0,09%
200	195,6368	197,7153	10	4,3632	1,09%	2,2847	0,57%
300	302,9065	299,9302	10	2,9065	0,73%	0,0698	0,02%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17: Aplicação do método utilizando Transformada de Clarke ($Z = 100 \Omega$) – Falta ABCT.

PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
10	188,9022	208,0753	100	178,9022	44,73%	178,9022	49,52%
25	200,6689	193,7716	100	175,6689	43,92%	175,6689	42,19%
50	190,2365	199,7892	100	140,2365	35,06%	140,2365	37,45%
75	201,1306	199,7168	100	126,1306	31,53%	126,1306	31,18%
100	98,7011	199,304	100	1,2989	0,32%	1,2989	24,83%
200	200	200	100	0	0,00%	0	0,00%
300	199,467	201,5075	100	100,533	25,13%	100,533	24,62%

Fonte: Autoria própria.

A figura 19 traz a representação gráfica dos dados.

Figura 19: Erro Absoluto e Erro Relativo de Falhas Trifásicas.



Fonte: Autoria própria.

4.2. Influência da taxa de amostragem

Para análise da influência da taxa de amostragem foi utilizada a mesma configuração de simulação dos exemplos anteriores, porém, com uma frequência de amostragem de 1 MHz. Aqui, foram avaliados os casos em que houve as maiores taxas de erro absoluto com distâncias próximas aos terminais.

Tabela 18: Análise de localização de faltas ($F_s = 1\text{MHz}$).

Tipo de Falta	PF (km)	PEDF (km)	PETC (km)	IF (Ω)	EADF (km)	ERDF (%)	EATC (km)	ERTC (%)
Trifásica	10	15,7131	10,3462	1	5,7131	1,43%	0,3462	0,09%
Trifásica	25	37,0441	24,8919	1	12,0441	3,01%	0,1081	0,03%
Fase-fase	10	115,7412	10,353	1	105,7412	26,44%	0,353	0,09%
Fase-fase	25	115,788	24,9107	1	90,788	22,70%	0,0893	0,02%
Fase-fase-terra	10	9,64	10,3623	1	0,36	0,09%	0,3623	0,09%
Fase-fase-terra	25	24,8851	24,8851	1	0,1149	0,03%	0,1149	0,03%
Fase-terra	10	10,3257	204,9452	1	0,3257	0,08%	194,9452	48,74%
Fase-terra	25	23,5836	195,5933	1	1,4164	0,35%	170,5933	42,65%

Fonte: Autoria própria.

4.3. Análise dos resultados

4.3.1. Tipos de falta

A partir dos resultados obtidos provenientes das simulações foi possível notar que o método utilizado consegue ser eficiente para todos tipos de faltas. Entretanto, a sua assertividade é afetada diretamente por fatores como a impedância de falta, a taxa de amostragem dos RDPs e a distância em que a falta se encontra em relação aos terminais.

4.3.2. Impedância de Falta

O primeiro fator analisado foi o valor da impedância de falta associado ao curto. Percebe-se que o método possui limitações quanto a isso. A primeira delas é que caso a impedância de surto da linha coincida com a impedância da falta o coeficiente de reflexão da tensão e corrente são nulos. Isso significa que não há reflexão e, conseqüentemente invalida a técnica. Usualmente, a impedância de surto da linha possui valores em torno de 200 Ω e 400 Ω . (ARAÚJO; NEVES, 2005)

Além dessa limitação, em Faybisovich *et al.* (2010), foi consolidado, a partir de muitas simulações, que a partir de resistências próximas a 50 ohms a identificação das frequências dominantes dos sinais deixa de ser eficiente. Isso ocorre, pois, as oscilações tendem a ficar muito distorcidas.

Essas duas limitações são constatações muito importantes para a avaliação do método, pois, em sistemas de transmissão de energia é possível que as impedâncias associadas a faltas tenham valores próximos a impedância de surto ou a partir de 50 ohms. Portanto, é importante verificar, criteriosamente, os ônus e bônus que são associados ao método, com a possibilidade de associar um outro método em paralelo para mitigar esse efeito limitante.

Portanto, para faltas que possuem uma impedância de surto associada na faixa dos 1 ohms a 10 ohms, tem uma maior assertividade. Essa faixa representa a maior parte das impedâncias provenientes de faltas no sistema de transmissão de energia (DOS SANTOS, 2020).

4.3.3. Distância da falta

Outro fator analisado foi a distância do ponto de falta em relação ao terminal local. Percebeu-se que faltas muito próximas a um dos terminais tem uma menor assertividade na localização da falha utilizando o método. Isso ocorre, pois, nesse cenário, as frequências provenientes de ondas viajantes da abertura do disjuntor têm frequências muito elevadas e se sobrepõem com outros sinais ressonantes. Consequentemente, a identificação da frequência dominante é prejudicada.

Percebe-se que, faltas ocorridas a partir de 25 km da barra de tensão, o método aplicado com as componentes modais possui uma grande taxa de assertividade, com erros relativos médios de 0,6%. Quando se trata de identificação de falhas em linhas de transmissão, sabe-se que, entre torres, a distância aproximada é de 400 metros, por isso, métodos com essa taxa de eficiência são muito válidos no ponto de vista de segurança e traduzem uma confiabilidade maior.

Foi percebido que em faltas ocorridas próximas ao terminal remoto os resultados eram semelhantes aos que foram obtidos nas falhas próximas ao terminal local. Entretanto, para futuros trabalhos, sugere-se que sejam feitas simulações com intervalos de distância ainda menores e prolongando os dados até o comprimento total da linha de transmissão modelada.

4.3.4. Uso da transformada de Clarke

A avaliação do método a partir dos sinais de tensão no domínio modal, por meio da transformada de Clarke, proporcionou resultados muito semelhantes aos obtidos utilizando-se os sinais de tensão no domínio de fase. No geral, ele tem uma melhor eficiência para faltas que não afetem somente uma das fases.

Foi feita a utilização da transformada de Clarke, com o intuito de minimizar a influência que o modo terra e o acoplamento eletromagnético entre as fases acarretam nos sinais de tensão da fase onde ocorreu o defeito. Esse fenômeno é conhecido como *mixing mode* (MAGALHÃES, 2021) e ele sempre existirá nos sistemas de transmissão. A análise dos sinais no domínio de fase, na teoria, seria mais influenciada pelo *mixing mode*, pois esse domínio é composto pela sobreposição do modo terra e dos modos aéreos. Esses modos individualmente já sofrem *mixing mode*, e quando passados para o domínio de fase só são agravados.

Para exemplificar a influência do acoplamento, foi feita uma simulação para uma falta fase-terra (AT) ocorrendo a uma distância de 80 km do terminal local. Nessas condições existem dois comprimentos de linhas a serem avaliados, um de 80 km e outro de 320 km. Para um sistema sem acoplamento, considera-se, pela Equação 14, $f_1 = 937$ Hz; $f_2 = 234$ Hz, que são frequências associadas aos comprimentos de linha 80 e 320 km, respectivamente. Além dessas frequências, existem aquelas que são ocorridas por reflexões associadas a $\frac{3}{4}$ de onda, onda completa e meia-onda etc. Diferentemente do esperado, as frequências encontradas foram $f_1 = 778$ Hz e $f_2 = 171$ Hz. Esse é um dos fenômenos que ocorre, pois, quando é incluído o acoplamento as frequências de ressonância podem ser deslocadas. Dito isso, não podemos interpretar as frequências de ressonância de cada fase como sendo algo individual, devemos analisar como frequências do sistema como um todo.

Em Zhengyou He *et al.* 2015, é mostrado, algebricamente, como é possível ser obtido os valores de frequência dominante das ondas viajantes vistas pelo terminal de medição. Esse fenômeno está diretamente associado às impedâncias características da linha e da falta. Sugere-se para trabalhos futuros que seja aplicado a metodologia proposta em Zhengyou He *et al.* 2015, para a situação apresentada neste trabalho, em que a LT fica isolada após a abertura dos disjuntores.

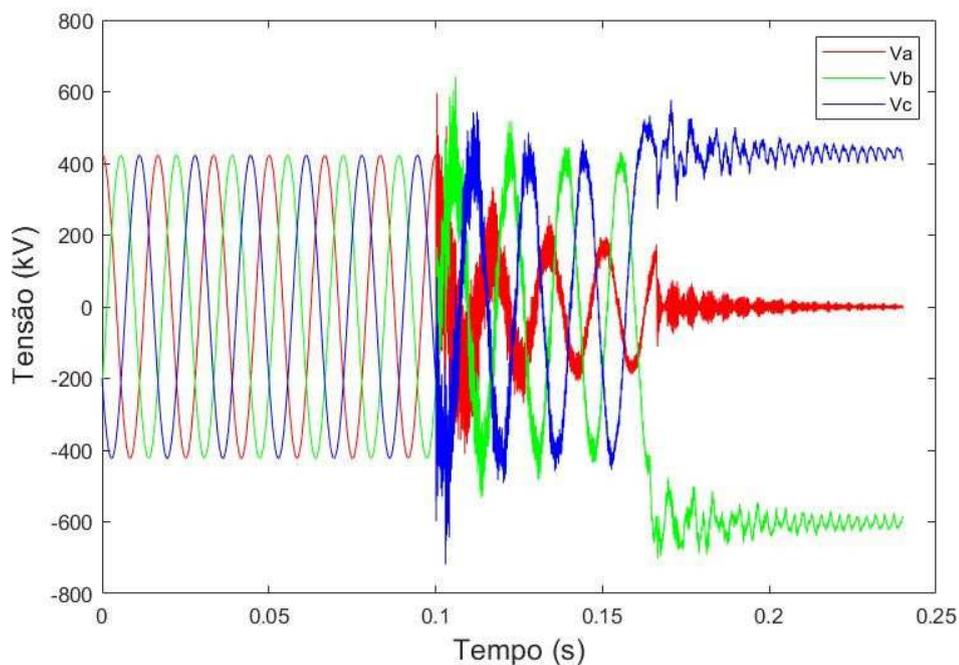
Para o estudo realizado em faltas que envolvem a terra, esperava-se que os resultados fossem melhores, como foi visto nas faltas fase-fase-terra e trifásicas. Porém, para faltas fase-terra, percebe-se que houve uma piora significativa na assertividade do método. Após serem feitas muitas simulações, foram tomadas algumas constatações para explicar tal fenômeno. A primeira delas é vista quando é analisada a Equação 16. Para falhas ocorridas em apenas uma fase, não é possível a utilização da componente V_β para a análise dos sinais. Isso ocorre, pois a componente V_α é uma soma vetorial de todas as fases do sistema. Já a componente V_β , é a soma vetorial de duas fases. Desse modo, a utilização da componente V_β para analisar uma falta

ocorrida exclusivamente na fase A não faz sentido visto que não contempla a fase que ocorreu o defeito.

Ainda assim, o uso da componente V_{α} traz algumas problemáticas. Diferente das falhas que envolvem mais de uma fase, em que todas fases defeituosas são incluídas no cálculo das componentes V_{β} , no caso de uma falta fase-terra (AT) a utilização da componente de Clarke exerce uma soma algébrica da fase A, que sofreu a falha, e as fases B e C, que não sofreram defeito e são influenciadas indiretamente pelo acoplamento eletromagnético com a fase A. Por meio de muitas simulações, foi visto que para faltas próximas ao terminal local as características do sinal da fase A, que é distorcido pelas reflexões de onda viajante em alta frequência, se diferenciam muito das demais. Isso faz com que a componente V_{α} sofra distorções suficientes para impossibilitar a identificação da frequência dominante.

Na figura 20, onde foi simulada uma falta fase-terra a 25 km da barra local, é possível notar o comportamento singular da fase A, em vermelho, em comparação às fases B e C. Nesse caso, a fase A apresenta, fortemente, uma alta frequência, $f_A = 2280$ Hz associada ao comprimento de 25 km da linha como sendo a dominante. Já nas fases B e C, que não sofreram nenhum defeito, foram extraídas as frequências $f_B = f_C = 375$ Hz, que representam a componente de frequência de meia-onda da linha.

Figura 20: Sinais de Tensão - Falta fase-terra (d = 25 km)

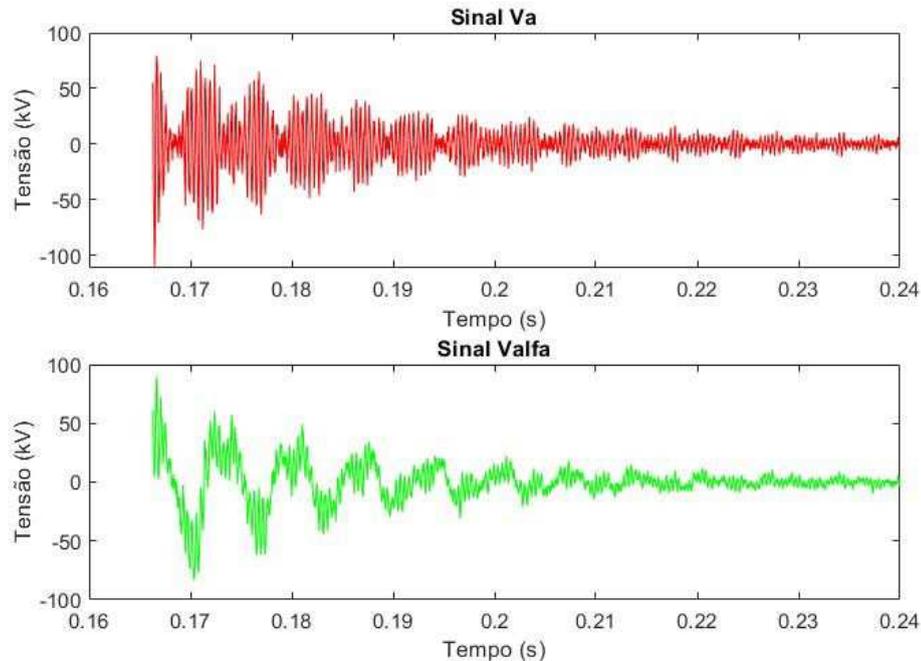


Fonte: Autoria própria.

Na análise do método realizada no domínio de fase, a alta frequência consegue ser identificada facilmente. Porém, utilizando a transformada de Clarke para obter a componente

V_{α} , desacoplada, obtém-se um sinal que perde as características fundamentais da onda viajante da fase A, de modo que a alta frequência desaparece, conforme a Figura 21.

Figura 21: Sinais de tensão V_a e V_{α} ($d = 25$ km).

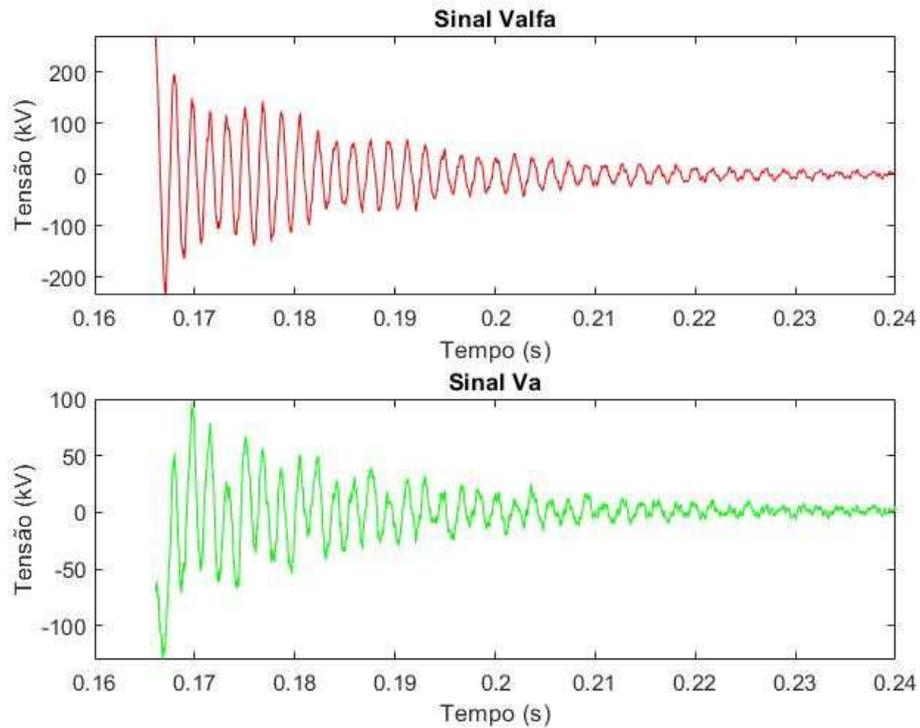


Fonte: Autoria própria.

Em faltas mais afastadas dos terminais, em que as frequências dominantes não são tão elevadas, é possível fazer a utilização do método. Na mesma simulação, sendo alterado a distância da falta para 100 km, pode-se perceber que, fazendo a análise no domínio de fase, as componentes que não sofrem a falta tendem a ter a mesma componente de frequência dominante que a fase com defeito, $f_A = f_B = f_C = 547$ Hz. Desse modo, quando é aplicada a transformada de Clarke, a componente V_{α} consegue carregar as características principais do sinal da fase que sofreu o defeito. Com isso, a identificação da frequência dominante é bem sucedida, conforme Figura 22.

Esse efeito é associado ao acoplamento eletromagnético da linha. No primeiro caso, a alta frequência não é capaz de deslocar a frequência dominante das outras fases. A rigor, as frequências dominantes que conseguem realizar o deslocamento com maior facilidade são aquelas mais próximas. Entretanto, outros fatores também influenciam: a distribuição espacial dos modos individuais (sem acoplamento), relação entre impedâncias de onda, parâmetros de falha etc.

Figura 22: Sinais de tensão V_a e V_α ($d = 100$ km).



Fonte: Autoria própria.

4.3.5. Frequência de amostragem

A frequência de amostragem utilizada nas simulações melhorou consideravelmente a identificação das frequências dominantes, para faltas que ocorreram próximas ao terminal local. Era esperado esse resultado, visto que uma maior taxa de amostragem consegue garantir uma análise mais detalhada do sinal. Em outras palavras, um maior número de amostras ajuda na aplicação na melhor identificação das frequências ao ser aplicado a Transformada de Fourier.

Tabela 19: Comparativo da eficiência do método variando a F_s .

Tipo de Falta	PF (km)	$F_s = 30$ kHz		$F_s = 1$ MHz		Comparativo	
		PEDF (km)	PETC (km)	PEDF (km)	PETC (km)	DF	TC
ABCT	10	197,9221	204,8204	15,7131	10,3462	Melhorou	Melhorou
ABCT	25	36,484	196,9736	37,0441	24,8919	-	Melhorou
BC	10	110,6383	200	115,7412	10,353	-	Melhorou
BC	25	116,6147	199,8686	115,788	24,9107	-	Melhorou
BCT	10	236,1955	9,7699	9,64	10,3623	Melhorou	-
BCT	25	36,3636	25,4545	24,8851	24,8851	Melhorou	-
AT	10	10,5263	200	10,3257	204,9452	-	-
AT	25	25,4661	199,8274	23,5836	195,5933	-	-

Fonte: Autoria própria.

Realizando o comparativo utilizando as frequências de amostragem em 30 kHz e 1 MHz, conforme a Tabela 19, podemos notar que, para a análise do método feita utilizando as transformadas de Clarke, houve uma melhoria significativa para identificação de defeitos próximos aos terminais. Para faltas ABCT, BC e BCT a taxa de erro média foi de 0,06%. Já em faltas AT, as mesmas dificuldades citadas anteriormente se mantiveram e, com isso, a assertividade se manteve a mesma, com erro médio de 45,69%, que foram muito elevados.

Já para a análise do método feita utilizando os sinais no domínio de fase, também houve melhorias na identificação de falhas ABCT e BCT. Para os tipos de falta BC e AT não houve mudanças em termos de assertividade, obtendo erro médio de 24,57% e 0,22%, respectivamente.

4.3.6. Dificuldades encontradas o ambiente de simulação

Durante as simulações realizadas, percebe-se que após a abertura dos disjuntores, as fases que não sofrem o defeito tendem a ter um nível DC associado devido a capacitância shunt da linha, conforme a Figura 20. Esse é um fenômeno que ocasionou em algumas dificuldades na aplicação do método.

Um modo de solucionar esse problema seria a utilização de reatores para a compensação da linha. Desse modo, as fases que não sofrem a incidência da falta não sofreriam o “grampeamento” de tensão e mitigariam a interferência da soma no cálculo das componentes modais. Um outro modo seria a implementação de um TPC (transformador potencial capacitivo), que conseguiria filtrar essa componente DC do sinal, como ocorre na prática. Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação dessas soluções e a avaliação das suas respostas no método.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, realizou-se uma análise de sensibilidade levando em consideração alguns fatores do Sistema Elétrico de Potência capazes de influenciar o desempenho de métodos de localização de faltas, como o valor da resistência de falta, o tipo de falta, a distância da falta e a taxa de amostragem. Além disso, o método foi aplicado utilizando como base em sinais tanto no domínio de fase quanto no modal por meio da transformada de Clarke.

A técnica de localização de faltas que foi longamente referenciada durante a dissertação, consiste na análise das ondas viajantes do sinal de tensão da linha após a abertura dos disjuntores, momentos após a captação da falta pelos relés. Utilizando dois terminais como referência, calculam-se as frequências dominantes dos sinais para a identificação do ponto da falta.

Constatou-se que o método possui limitações associado à resistência de falta e pela distância com relação à barra local de referência. No primeiro caso, em falhas com resistência de falta elevadas avaliadas, 100Ω , a assertividade do método foi reduzida drasticamente devido a distorção e atenuação dos sinais de tensão.

As distorções no sinal também são muito visíveis quando as faltas ocorrem muito próximas a linha. Componentes de alta frequência se sobrepõe às demais além de haver um *mixing mode* associados ao modo aéreo e terra. Todos esses fatores prejudicam a identificação da frequência dominante do sinal.

Constatou-se que o uso dos sinais de tensão no domínio modal, a partir da transformada de Clarke, tem um ganho significativo para faltas próximas a linhas que envolvam mais de uma fase. Entretanto, em faltas fase-terra, ocorre uma piora.

A taxa de amostragem foi avaliada como um dos parâmetros que melhoram a identificação das frequências dominantes, principalmente, em faltas próximas aos terminais.

Em geral, o método consegue ser aplicado com uma taxa de erros muito baixa para todos tipos de faltas. Ele é mais eficiente em faltas que ocorrem a partir de 25 km do terminal local e com impedâncias de falta entre 1 e 10 ohms.

Diante disso, sugere-se como atividades para trabalhos futuros:

- Avaliar o desempenho do método em linhas de transmissão com outras tensões de linha (Ex: 69 kV, 230 kV) e com mais barras;
- Avaliar o desempenho do método com frequências de amostragem superior a 1 MHz.
- Avaliar o desempenho do método utilizando a modelagem de TPCs
- Avaliar o desempenho do método alterando o ângulo de incidência da falta;

6. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. E. A., NEVES W. L. A. Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia. Belo Horizonte, MG – Brasil: Editora UFMG, 2005.

ATP: Alternative Transient Program Rule Book, Leuven EMTP Center, Leuven, K.U., 1987.

CAMINHA, A. C. Introdução à prática dos sistemas elétricos. São Paulo: Blusher, 1977

CHEN, Z.; MAUN, J.-C. Artificial neural network approach to single-ended fault locator for transmission lines. IEEE Transactions on Power Systems, v. 15, n. 1, p. 370–375, 2000. ISSN 0885-8950.

DANTAS, K. M. C. Chaveamento Controlado Aplicado ao Religamento Rápido de Linhas de Transmissão. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 177. 2012.

DANTAS, K. M. C. Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 84. 2007.

DOS SANTOS, André; GASPAR, Catarina; DE BARROS, M.T. Correia; DUARTE, Patricia. "Transmission Line Fault Resistance Values Based on Field Data", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 35, No. 3, pp. 1321 - 1329, June 2020, DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2941432

FAYBISOVICH, V.; FEIGINOV, M.; KHOROSHEV, M. I. Investigation of frequency domain traveling wave fault location methods. In: IEEE PES T D 2010. [S.l.: s.n.], 2010. p. 19. ISSN 2160-8555

FAYBISOVICH, V; M. I. KHOROSHEV, M. I.” Frequency Domain Double-Ended Method of Fault Location for Transmission Lines”. 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 21-24 April 2008.

FENG, Z., JUN, L., LI, Z., ZHIHAO, Y. “A New Fault Location Method Avoiding Wave Speed and Based on Traveling Waves for EHV Transmission Line”. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies - DRPT 2008, Nanjing, China, April 6-9, 2008.

GALE, P. F., CROSSLEY, P. A., XU BINGYIN GE YAOZHONG CORY, B. J., BARKER, J. R. G. “Fault Location Based on Travelling Waves”. Fifth International Conference on Developments in Power System Protection, pp. 54-59, New York, 1993.

IURINIC, L., FERRAZ, R., GUIMARÃES, E. and BRETAS, A. (2013). Transmission lines fault location based on high-frequency components technique: a general formulation for estimation of the dominant frequency, International Conference on Power Systems Transients.

JAMALI, S., GHEZELJEH, A. "Fault Location on Transmission Line Using High Frequency Travelling Waves". International Conference on Developments in Power System Protection, Vol. 1, pp. 220-223, 5-8 April, 2004.

JIAN, Q., XIANGXUN, C., JIANCHAO, Z. "Travelling Wave Fault Location of Transmission Line Using Wavelet Transform". International Conference on Power System Technology - POWERCON'98, Vol. 1, pp. 533-537, Beijing, China, 18-21 August, 1998.

LOPES, F. V. Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Baseada em Ondas Viajantes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, março 2011.

LOPES, F. V. Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, maio de 2014.

LOPES, F. V., FERNANDES Jr., D., NEVES, W. L. A. "Uma Nova Abordagem para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão". *IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America*, São Paulo-SP, Brasil, 8-10 de novembro, 2010.

LOPES, F. V.; IURINIC, L.; NEVES, W. L. A.; BRETAS, A.; FERNANDES Jr., D. Localização de faltas baseada ondas viajantes e aproximações típicas da velocidade de propagação. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte, MG, 20 a 24 de setembro de 2014.

MAGALHÃES, F. M and LOPES, F. V, "Mathematical Study on Traveling Waves Phenomena on Three Phase Transmission Lines Part II: Reflection and Refraction Matrices," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3077730.

MATLAB, High-Performance Numeric Computation and Visualization Software: Reference Guide. Natick, MA: MathWorks, 1992.

REIS, R. L. A. "Aprimoramento de Soluções de Localização de Curtos-Circuitos em Linhas de Transmissão". Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2019.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. Fault Location on Power Networks. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101, n. 8, p. 2892 –2898, aug. 1982. ISSN 0018-9510.

ZHENGYOU HE, Xiaopeng Li; Shuang Chen. A traveling wave natural frequency-based single-ended fault location method with unknown equivalent system impedance. National Natural Science Foundation of China. Grant Number: No. 51307145, 2015,