



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

RENATO OLIVEIRA RODRIGUES

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS MEDIANTE ABORDAGEM
INTEGRADA DA TRANSFORMADA WAVELET
DISCRETA E ONDAS VIAJANTES**

Bom Jesus da Lapa–BA
Agosto de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA

Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

Renato Oliveira Rodrigues

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS MEDIANTE ABORDAGEM
INTEGRADA DA TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA E
ONDAS VIAJANTES**

Projeto final de curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Stefânia de Oliveira Silva

Bom Jesus da Lapa—BA
Agosto de 2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

RENATO OLIVEIRA RODRIGUES

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS MEDIANTE ABORDAGEM INTEGRADA DA TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA E ONDAS VIAJANTES

Esta monografia foi aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, aprovada em sua forma final pelo Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Bom Jesus da Lapa, 21 de Agosto de 2024

Prof^ª. Dra. Stefânia de Oliveira Silva (UFOB)
(Orientadora)

Prof^ª. Ma. Andressa Pereira Oliveira (UFOB)
(Membro avaliador)

Prof^ª. Dra. Yonatha Marques Pereira de Melo (Unifesspa)
(Membro avaliador)

FICHA CATALOGRÁFICA

R696

Rodrigues, Renato Oliveira

Localização de faltas mediante abordagem integrada da Transformada Wavelet Discreta e Ondas Viajantes. / Renato Oliveira Rodrigues. – 2024.

60f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Stefânia de Oliveira Silva
TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2024.

1. Transmissão de Energia Elétrica. 2. Transformadores. 3. Engenharia Elétrica. I. Silva, Stefânia de Oliveira. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 621.319

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

“Deus esteve comigo desde o primeiro dia e é a Ele que dedico a concretização deste trabalho.”

Agradecimentos

Aos meus pais, Paulo Rodrigues de Souza e Vânora da Silva Oliveira Rodrigues, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e pelos valores que me transmitiram, que foram fundamentais para a minha formação pessoal e profissional. Vocês são a base de tudo o que conquistei até hoje.

À minha irmã, Beatriz Oliveira Rodrigues, pela amizade, pelo incentivo e por estar sempre ao meu lado nos momentos mais importantes. Sua presença e apoio tornaram esta jornada mais leve e significativa.

À minha esposa, Mel Maurícia Nunes Ribeiro Sobral Rodrigues, pelo amor, paciência e apoio incondicional durante toda essa jornada. Sua compreensão e incentivo foram fundamentais nos momentos de dificuldade, e sua presença constante me deu a força necessária para seguir em frente.

À minha orientadora, Prof^ª. Dra. Stefânia de Oliveira Silva, pela orientação e valiosas contribuições ao longo deste trabalho. Sua sabedoria, dedicação e disponibilidade foram essenciais para a realização deste estudo. Agradeço por me guiar com tanto profissionalismo.

À Universidade Federal do Oeste da Bahia, pela oportunidade de crescimento acadêmico e pessoal, pelos recursos e pelo ambiente propício ao desenvolvimento deste estudo. Sinto-me honrado em fazer parte desta instituição que tanto contribuiu para a minha formação.

E a todos os meus amigos que me ajudaram direta ou indiretamente, pelo apoio, incentivo que tornaram esta caminhada mais leve. A amizade e os momentos compartilhados foram essenciais para a conclusão deste trabalho. A todos, o meu mais sincero agradecimento.

“Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar mais uma vez.”

(Thomas Edison)

Resumo

A estabilidade do sistema elétrico de potência é o princípio fundamental para garantir a continuidade do fornecimento de energia. As linhas de transmissão, responsáveis por transportar energia por longas distâncias, desempenham um papel importante nesse contexto. Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma abordagem integrada que combina a Transformada Wavelet Discreta com a Teoria das Ondas Viajantes para a localização de faltas em sistemas elétricos, utilizando o sistema IEEE 9 barras como base para análises. A modelagem inclui uma linha de transmissão de 500 kV com 200 km e frequência de amostragem de 1 MHz, permitindo a avaliação dos métodos propostos. Por meio da formulação pertinente e do uso dos *softwares* ATPDraw e MATLAB, foram realizadas simulações dos sinais elétricos em diferentes cenários. Os resultados obtidos demonstraram que a abordagem integrada proporciona uma capacidade eficiente para determinar os locais de ocorrência de faltas. A validação do método proposto foi realizada por meio de simulações, utilizando variáveis críticas como a distância de falta, a impedância e o tipo de falta. Os resultados dessas simulações confirmaram a eficácia do método na localização das faltas.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão, Estabilidade do Sistema Elétrico, Transformada Wavelet Discreta, Teoria das Ondas Viajantes, Localização de Faltas.

Abstract

The stability of the power system is the fundamental principle for ensuring the continuity of energy supply. Transmission lines, responsible for transporting energy over long distances, play a crucial role in this context. This work presents an integrated approach that combines the Discrete Wavelet Transform with the Theory of Traveling Waves for fault location in electrical systems, using the IEEE 9-bus system as the basis for the analyses. The modeling includes a 500 kV transmission line with 200 km, allowing a detailed evaluation of the effectiveness of the proposed methods. Through the relevant formulation and the use of ATPDraw and MATLAB software, simulations of electrical signals in different scenarios were conducted, providing a comprehensive analysis. The results obtained demonstrated that the integrated approach provides an efficient capability for determining the locations of faults, with promising results that validate the effectiveness of the proposed method for fault location.

Keywords: Transmission Lines, Power System Stability, Discrete Wavelet Transform, Theory of Traveling Waves, Fault Location.

Lista de Figuras

1	Sistema elétrico brasileiro.....	21
2	Diagrama de Bewley para ilustração da teoria de ondas viajantes.	23
3	Decomposição wavelet em quatro níveis.....	24
4	Sistema Teste IEEE 9 barras.	31
5	Fluxograma.	34
6	Falta aplicada a 15% da linha de 200km - Barra 7 como referência.....	36
7	Falta aplicada a 50% da linha de 200km - Barra 7 como referência.....	38
8	Falta aplicada a 90% da linha de 200km - Barra 7 como referência.....	38
9	Instantes de tempo referente a 1ª e 2ª reflexão na barra 7.....	40
10	Instantes de tempo referente a 1ª e 2ª reflexão na barra 5.....	41

Lista de Tabelas

1	Parâmetros da Linha de Transmissão.....	32
2	Características dos Geradores.....	32
3	Localização da falta para $RF = 0.1\Omega$	36
4	Localização da falta para $RF = 1\Omega$	37
5	Localização da falta para $RF = 10\Omega$	37
6	Localização da falta para $RF = 100\Omega$	37
7	Localização da falta em 50%.....	38
8	Localização da falta em 90% para $RF = 0.1 \Omega$	39
9	Localização da falta em 90% para $RF = 1 \Omega$	39
10	Localização da falta em 90% para $RF = 10 \Omega$	39
11	Localização da falta em 90% para $RF = 100 \Omega$	40
12	Reflexões na 1ª Barra (Barra 7).....	41
13	Reflexões na 2ª Barra (Barra 5).....	41

Lista de quadros

1	Síntese bibliográfica.	30
---	-----------------------------	----

Lista de abreviaturas, acrônimos e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATPDraw	Alternative Transient Program
AMR	Análise Multirresolução
LMS	<i>Least Mean Squares</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
SIN	Sistema Interligado Nacional
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC's	Transformadores de Corrente
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
TWD	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta
TOV	Teoria das Ondas Viajantes
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
LT	Linha de Transmissão
LT's	Linhas de Transmissão

Lista de Símbolos

π	Pi
Hz	Hertz
MHz	Megahertz
A	Ampère
V	Volt
kV	Quilovolt
km	Quilômetro
W	Watt
s	Segundos
ms	Milissegundo

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivos específicos	19
1.3	Metodologia da pesquisa	19
1.4	Organização do texto	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Faltas em Linhas de Transmissão	21
2.2	Teoria das Ondas Viajantes	23
2.3	Transformada <i>Wavelet</i>	24
2.4	Localização de Faltas	25
2.5	ATPDraw	26
2.6	MATLAB	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
4	SISTEMA TESTE	31
4.1	Modelagem	31
4.1.1	Processamento de Sinais com o <i>Toolbox Wavelet Analyzer - MATLAB</i>	32
4.1.2	Seleção da <i>Wavelet Mãe</i>	33
4.1.3	Definição dos Níveis de Decomposição	33
4.2	Processo de Cálculo	33
4.3	Características intrínsecas ao sistema teste	34
5	RESULTADOS	35
5.1	Análise de erro	35
5.2	Validação dos Resultados	36

5.2.1	Estudo de caso para falta bifásica.....	40
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	45
	Apêndice	46
A	MODELAGEM DO SISTEMA IEEE DE 9 BARRAMENTOS NO ATP-DRAW	46

INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem como principal objetivo fornecer energia elétrica de forma confiável e imediata, tanto para grandes quanto para pequenos consumidores. Para atender essas necessidades, o sistema precisa garantir a continuidade do serviço, estar em conformidade com padrões estabelecidos, ser flexível para se adaptar a diferentes situações, garantir a segurança dos consumidores e permitir uma rápida restauração em caso de faltas (VASCONCELOS, 2017).

Além do mais, a estrutura do sistema elétrico é composta por quatro componentes principais, geração de energia, transmissão, distribuição, e consumidores. A geração de energia elétrica ocorre normalmente afastada dos centros consumidores. Dessa forma, é necessário um extenso sistema de transmissão para que a energia gerada alcance os centros consumidores (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2014).

As Linhas de Transmissão (LT's) são responsáveis por transportar energia elétrica por longas distâncias, de tal maneira que o sistema permaneça estável e operando continuamente para que atenda aos requisitos de qualidade de energia estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Este mesmo órgão, fiscaliza e regula o Operador Nacional do Sistema (ONS) que é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Os sistemas de potência estão constantemente sujeitos a perturbações que afetam suas grandezas elétricas, como corrente, tensão, frequência e potência. Essas perturbações podem resultar em violações operacionais graves, colocando em risco a integridade dos equipamentos e das instalações. Entre as perturbações mais comuns e severas, destacam-se as faltas, que ocorrem quando há ruptura do isolamento entre as fases ou entre fase

e terra. Para mitigar esses efeitos, é fundamental adotar medidas preventivas e, quando necessário, corretivas. Ações adequadas podem limitar as consequências desses distúrbios, garantindo a confiabilidade e a segurança dos sistemas de potência (SATO; FREITAS, 2015).

Com o propósito de minimizar os danos decorrentes de faltas, pesquisadores em diversas partes do mundo têm se empenhado em desenvolver métodos para localização de faltas de forma confiável e precisa. Visto que, nas últimas décadas, diversos algoritmos foram propostos, com destaque aos fundamentados por meio da Teoria das Ondas Viajantes (TOV) os quais têm demonstrado resultados promissores. Dentre os métodos baseados em TOV, as medições realizadas em uma ou duas extremidades da linha são comumente utilizadas (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009).

O estudo apresentado por Lopes et al. (2017), propõe uma formulação inovadora para a localização de faltas, fundamentada na análise da TOV em dois terminais. Esta abordagem supera as limitações identificadas na literatura, oferecendo uma metodologia mais eficaz. Na presente formulação, a determinação do ponto de falta ocorre por meio da análise temporal entre a primeira incidência da onda viajante e as reflexões subsequentes do ponto de falta em cada extremidade da linha. Logo, a equação proposta dispensa a necessidade de referências externas de tempo comum ou velocidade de propagação da onda viajante. Assim, não é requerida a sincronização entre dados e parâmetros da linha elétrica. Tais vantagens não foram identificadas em abordagens prévias de localização de faltas baseadas em onda viajante. Portanto, esta solução proposta apresenta-se como uma alternativa favorável para as concessionárias durante os procedimentos de localização de faltas.

Experiências mostram que as correntes que fluem em diferentes partes de um sistema elétrico, imediatamente após a ocorrência de uma falta, diferem-se das correntes em regime permanente que fluíam instantes antes da falta (FRAZÃO, 2019).

Para uma análise precisa das características dos sinais em diferentes escalas de tempo e frequência, é fundamental empregar uma técnica de processamento de sinal adequado. A Transformada Wavelet emerge como a escolha mais apropriada, pois dispensa a necessidade de assumir estacionariedade ou periodicidade nos sinais, mesmo durante a janela de análise. Ela permite rastrear as mudanças de sinal no domínio do tempo e, simultaneamente, decompor o sinal no domínio da frequência. Assim, a Transformada Wavelet se mostra mais indicada quando não há exigência de uma frequência precisa, sendo suficiente uma concentração de frequências para alcançar os objetivos desejados (MEHER; PRADHAN, 2010).

Para evidenciar as vantagens da abordagem proposta, foram realizadas simulações abrangendo diversos cenários de falta aplicadas na LT 7-5 do sistema IEEE de 9 barras,

com tensão de 500 kV e frequência correspondente a 60 Hz, cuja extensão possui 200 km. Essas simulações contemplaram não apenas situações próximas às usinas geradoras de energia elétrica, mas também àquelas próximas aos centros consumidores. Os resultados obtidos demonstram que o método de localização de faltas proposta produz valores relevantes.

1.1 Justificativa

Todo sistema elétrico está sujeito a faltas, definidas como o fenômeno elétrico que gera perturbações no sistema, podendo-o levar a um estado crítico de operação. O curto circuito representa a principal falta que acomete os sistemas elétricos, este é determinado como a perturbação elétrica causada pela conexão de baixa impedância entre os condutores de um circuito elétrico alimentado por geradores de tensão, cuja consequência é uma corrente extremamente elevada (FRAZÃO, 2019).

A rápida detecção e localização de faltas em LT's é crucial para garantir a confiabilidade e a segurança do SEP. Atualmente, diversas técnicas e métodos têm sido desenvolvidos para esse propósito, visando reduzir o tempo de identificação das falhas e minimizar os impactos causados por interrupções no fornecimento de energia.

Nesse contexto, a utilização da TOV e a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) têm se mostrado técnicas promissoras para a localização de faltas em LT's (NASCI-MENTO et al., 2021a). Por meio da simulação do SEP no *software* Alternative Transient Program (ATPDraw) e da aplicação da TWD no MATLAB, é possível realizar uma análise eficiente das ondas viajantes geradas pela falta, permitindo a identificação da localização aproximada do ponto de falha.

O presente trabalho foi motivado pela elaboração do artigo Modelagem do Sistema IEEE de 9 Barramentos no ATPDraw (RODRIGUES; SILVA; FERREIRA, 2022), publicado para o (COBENGE, 2022), evento realizado em setembro do mesmo ano. O referido artigo encontra-se anexado como Apêndice A deste trabalho, onde é possível consultar a íntegra da pesquisa.

1.2 Objetivos

Localizar faltas em um sistema de transmissão de energia de 500 kV com linhas de 200 km, por meio da aplicação da teoria das ondas viajantes utilizando a Transformada Wavelet.

1.2.1 Objetivos específicos

- Analisar as técnicas de modelagem para o SEP no *software* ATPDraw;
- Modelar o sistema IEEE de 9 barras e aplicar faltas à Linha de Transmissão (LT) que possui 500 kV em suas linhas e 200 km de extensão;
- Aplicar a TWD ao sinal de falta;
- Realizar processos analíticos por meio da TOV dentro do ambiente MATLAB;
- Localizar o ponto de falta na LT.

1.3 Metodologia da pesquisa

Realizou-se uma revisão bibliográfica para adquirir embasamento teórico sólido e identificar as principais abordagens e técnicas usadas na localização de faltas. O objetivo dessa revisão foi compreender os conceitos teóricos, métodos e abordagens empregados na localização de faltas em LT's, abrangendo desde os fundamentos teóricos da TOV e da TWD até estudos de caso e trabalhos científicos que aplicaram esses conceitos. Essa etapa foi essencial para obter conhecimento aprofundado dos princípios teóricos subjacentes, identificou-se as melhores práticas, a serem exploradas na pesquisa.

Além disso, essa revisão bibliográfica também embasou a escolha das ferramentas utilizadas, como o *software* ATPDraw e o MATLAB, que são amplamente reconhecidos e relevantes para simulações e análises em SEP, bem como para a aplicação da TWD.

1.4 Organização do texto

No Capítulo 2 – Foi apresentado os principais conceitos utilizados para embasar a pesquisa, como impactos e características das faltas que acometem o SEP e também a teoria e as ferramentas utilizadas para a implementação do algoritmo proposto.

No Capítulo 3 – Evidenciou-se a revisão bibliográfica, abordando as técnicas relacionadas ao tema do presente trabalho.

No Capítulo 4 – Foi exibida a modelagem do sistema teste no ATPDraw. Além disso, é descrito o algoritmo desenvolvido para a localização das faltas no sistema.

No Capítulo 5 – Demonstrou-se os resultados, obtidos por meio da TWD gerada no MATLAB e analisados com TOV.

No Capítulo 6 – Destacou-se as principais conclusões sobre a pesquisa.

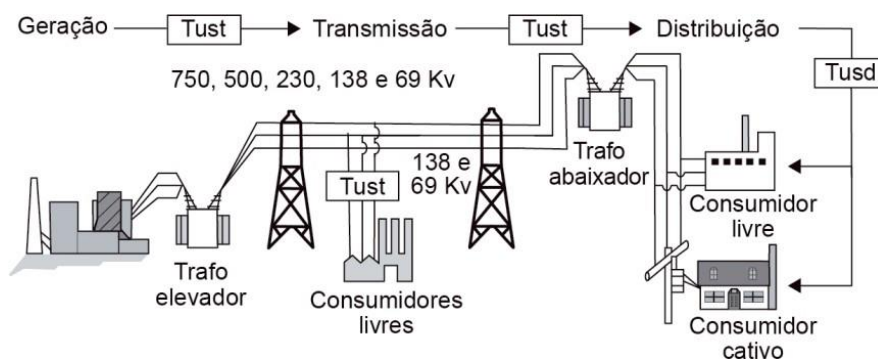
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção integra as bases teóricas e ferramentas necessárias para o desenvolvimento do trabalho, por meio de um breve estudo sobre o SEP, bem como os impactos proporcionados pelas faltas e as vulnerabilidades do sistema diante de adversidades.

2.1 Faltas em Linhas de Transmissão

As LT's desempenham um papel crucial ao permitir o transporte eficiente de energia em longas distâncias. Elas são responsáveis por transmitir a energia gerada nas usinas de geração até os centros de consumo, como cidades e indústrias, assim como ilustrado na Figura 1. As LT's são compostas por cabos, torres, isoladores, transformadores e outros dispositivos elétricos, e sua modelagem é fundamental para a análise e o planejamento do sistema elétrico.

Figura 1 – Sistema elétrico brasileiro.



Fonte: (PINTO, 2014)

O sistema de transmissão de energia representa o elo entre as usinas geradoras e as subestações, logo, dentro de um ambiente competitivo, busca maximizar a capacidade de transferência de energia minimizando os custos totais de transporte. Portanto, os principais equipamentos que compõem o sistema elétrico devem ser protegidos de forma segura e confiável, com finalidade de evitar um severo desabastecimento de energia aos consumidores finais (FRAZÃO, 2019).

As faltas em LT's referem-se a eventos indesejáveis que podem ocorrer, como curtos-circuitos ou interrupções no fluxo de energia elétrica. Essas faltas podem ser causadas por diferentes motivos, como faltas em equipamentos, condições climáticas adversas, problemas na operação do sistema ou faltas humanas. A ocorrência de faltas pode levar a interrupções no fornecimento de energia elétrica, danos a equipamentos e até mesmo riscos de segurança. Portanto, é essencial que as faltas sejam identificadas e localizadas com precisão, a fim de que as medidas corretivas adequadas possam ser tomadas rapidamente. A localização precisa de faltas permite que as equipes de manutenção atuem de forma eficiente, minimizando o tempo de interrupção e reduzindo o impacto causado pela falta no sistema elétrico.

Todo sistema elétrico está sujeito a faltas. Entende-se como falta todo fenômeno elétrico que gera perturbações no sistema, podendo-o levar a um estado crítico de operações. Várias são as faltas que podem ocorrer, contudo, as que estão no seletor grupo das críticas são: instabilidades de tensão, instabilidades de frequência, sobrecargas e curtos-circuitos (FRAZÃO, 2019).

Quanto menor a impedância vista no ponto onde ocorreu o curto-circuito, maior será a corrente resultante. Essa simples constatação rege os preceitos fundamentais sobre o estudo de falta em sistemas elétricos. Por conseguinte, é possível notar a relevância da atemporal 1ª Lei de Ohm no cálculo de curtos-circuitos. Na prática, um sistema elétrico está sujeito a cinco tipos de curtos-circuitos.

1. Os três condutores de um sistema trifásico estão eletricamente conectados entre si, nesse caso, tem um curto-circuito trifásico.
2. Apenas dois condutores estão eletricamente conectados entre si, o que consiste em uma falta entre fases.
3. Dois condutores estão eletricamente conectados à terra, assim, tem-se uma falta fase-fase-terra.
4. Um único condutor está eletricamente conectado à terra, nesse caso, há uma falta fase-terra.
5. Tem o curto-circuito ocasionado por descargas atmosféricas

Em essência, o quarto tipo de curto-circuito é o que mais acomete os sistemas elétricos de transmissão e distribuição (GRAINGER; JR, 1994). Experiências mostram que as correntes que fluem em diferentes partes de um sistema elétrico, imediatamente após a ocorrência de um curto-circuito, diferem-se das correntes em regime permanente que fluíam instantes antes da falta. Essa característica governa os esquemas de proteção que utilizam relés dedicados à mitigação dos efeitos de curtos-circuitos (FRAZÃO, 2019).

2.2 Teoria das Ondas Viajantes

As ondas viajantes representam fenômenos de corrente e tensão que se propagam ao longo das LT's. Durante uma falta, conforme previsto pela teoria das ondas viajantes (MAGNUSSON et al., 2017), tanto a corrente quanto a tensão, e experimentam refração e reflexão tanto no ponto de falta quanto nos terminais de medição. Essa dinâmica resulta na detecção de picos nos sinais de corrente e tensão, permitindo a determinação precisa no momento da ocorrência da falta.

A detecção de picos nos sinais de tensão e corrente, permite calcular o momento estimado de uma falta. O diagrama de Bewley (1963) é empregado para visualizar graficamente esses fenômenos em LT's. Este diagrama, conhecido como *Bewley's lattice diagram*, utiliza um eixo vertical para o tempo e um eixo horizontal para representar a distância entre os terminais A e B da LT, conforme a Figura 2 (SANCHEZ et al., 2019). O momento da falta é considerado como o tempo zero, com uma linha no eixo dos tempos indicando o ponto da falta. Nesse instante, as ondas são lançadas em ambas as direções ao longo da LT, facilitando a identificação precisa do local da falta.

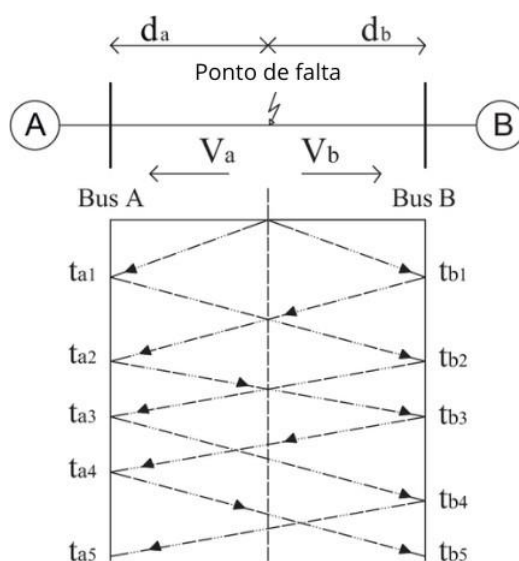


Figura 2 – Diagrama de Bewley para ilustração da teoria de ondas viajantes.

2.3 Transformada *Wavelet*

A detecção de descontinuidade em formas de onda é uma característica interessante da TWD. Sua relevância na localização de faltas em sistemas elétricos é notável, pois possibilita a identificação de instantes no tempo em que ocorrem as reflexões das ondas viajantes durante eventos de falta. A TWD, expressa pela Equação 1, emprega a função da Wavelet mãe $\Psi(\cdot)$, e os parâmetros de escala e translação a e b , os quais são dependentes de um parâmetro inteiro m . Esse parâmetro possibilita a expansão da Wavelet mãe em Wavelets filhas. Ademais, o parâmetro k está relacionado com o número de amostras do sinal de entrada, enquanto o parâmetro n representa o nível de decomposição do sinal (GRILO et al., 2022).

$$TWD(m, k) = \frac{1}{a_0^m} \sum_n x(n) \psi \left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (1)$$

A análise Wavelet, divide um sinal em duas componentes, representando as partes de baixa frequência, e detalhes, correspondendo às partes de alta frequência. Esse processo ocorre por meio de filtragens sucessivas, conhecido como Análise Multirresolução (AMR), em que o sinal é decomposto em diferentes escalas de resolução com filtros passa-baixa e passa-alta.

A técnica de análise multirresolução é ilustrada na Figura 3, com quatro níveis de resolução, no qual cada número de nível depende de uma aplicação. Os sinais de aproximação e detalhe são obtidos por meio de bancos de filtros, compostos por filtros passa-baixa e passa-alta. No processo, o sinal original $f(x)$ é decomposto em aproximações e detalhes, utilizando bancos de filtros compostos por filtros passa-baixa (h_0) e passa-alta (h_1).

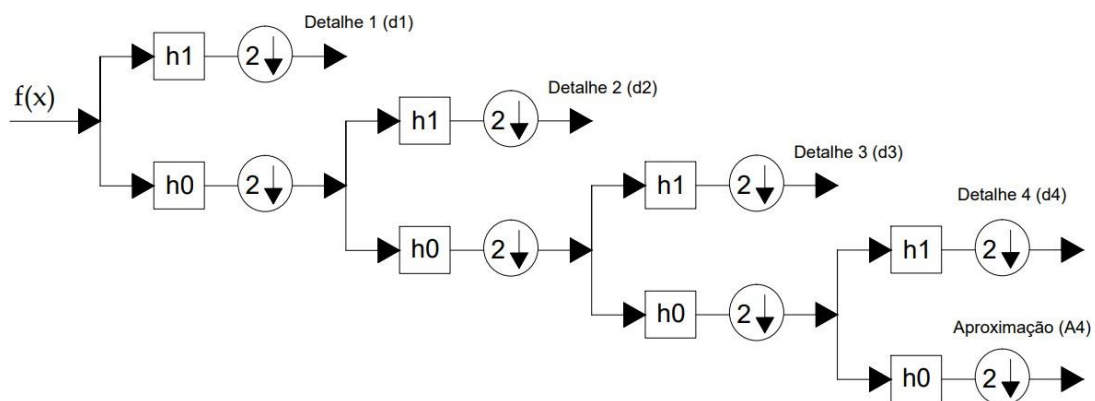


Figura 3 – Decomposição wavelet em quatro níveis.

A decimação por um fator de dois, indicada como $2 \downarrow$ nas saídas dos filtros, reduz o número de amostras do sinal para o processamento subsequente. Para este estudo, filtros Wavelet Daubechies de 4^a ordem (Db4) foram empregados para o primeiro nível de decomposição, demonstrando eficácia na detecção de informações relevantes para localização de faltas (NASCIMENTO et al., 2021b).

2.4 Localização de Faltas

A proposta para localização de faltas dada por (LOPES et al., 2017), vem por meio da aplicação clássica de um terminal em cada extremidade da linha. O método considera o diagrama espaço-tempo, conforme Figura 2, cuja análise abrange as primeiras ondas incidentes e suas reflexões subsequentes. As distâncias d e $l - d$ podem ser obtidas:

$$d = 0.5(t_{a2} - t_{a1}) \cdot v \quad (2)$$

$$l - d = 0.5(t_{b2} - t_{b1}) \cdot v \quad (3)$$

Ao analisar (2) e (3) ao comprimento estimado da linha, determinou:

$$\hat{l} = d + (l - d) = 0.5[(t_{a2} - t_{a1}) + (t_{b2} - t_{b1})] \cdot v \quad (4)$$

Como estimativa para distância da falta em valores por unidade (d_{pu}) pode ser obtida dividindo (2) por (4), para tanto, uma alternativa para a localização da falta é representada pela seguinte equação:

$$d_{pu} = \left(\frac{t_{a2} - t_{a1}}{t_{a2} - t_{a1} + t_{b2} - t_{b1}} \right) \quad (5)$$

A equação (5) possui como principais vantagens:

- Os períodos de tempo ($t_{a2} - t_{a1}$ e $t_{b2} - t_{b1}$) são calculados separadamente para cada linha, dessa forma é descartada a necessidade de sincronização de dados.
- A velocidade v não é utilizada na equação, logo o equacionamento é independente dos parâmetros da linha elétrica.
- A estimativa da distância de falta por unidade (d_{pu}) não é afetada por imprecisões no comprimento da linha.

2.5 ATPDraw

O ATPDraw é um pré-processador gráfico e gratuito que possibilita modelar adequadamente os sistemas elétricos. O *software* é de grande importância pela flexibilidade na realização de estudos de regime transitório ou permanente (NASCIMENTO, 2023). Visto que, permite uma representação visual intuitiva dos elementos das LT's, transformadores e dispositivos de proteção, facilitando a criação e visualização dos modelos. Logo, possui recursos suficientes para simular as LT's e gerar sinais decorrentes da aplicação de faltas.

2.6 MATLAB

O MATLAB possui uma biblioteca de funções e ferramentas que facilitam a implementação e a análise de algoritmos, incluindo funções específicas para processamento de sinais e análise de dados elétricos. Neste trabalho, o MATLAB foi utilizado para a análise dos dados obtidos a partir do modelo da linha de transmissão no ATPDraw. A transformada wavelet foi aplicada aos sinais elétricos no MATLAB, permitindo uma análise mais específica e a identificação de padrões característicos das faltas na LT.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, aprofundou-se o conhecimento teórico sobre o tema escolhido. Por meio da pesquisa, foi possível compreender os conceitos e teorias fundamentais relacionados ao tema, bem como identificar os desafios e as soluções existentes na literatura científica.

Lopes et al. (2017) apresentam uma formulação inovadora de localização de faltas baseada na TOV de dois terminais. Depende apenas da diferença de tempo entre o primeiro instante incidente da onda viajante e a reflexão sucessiva do ponto de falta, em ambas as extremidades da linha. Assim, a formulação proposta não requer sincronização de dados e parâmetros de linha, visto que são fontes de erro e geralmente afetam os esquemas de localização de faltas baseados em ondas viajantes. Várias faltas em uma linha de 500 kV foram simuladas para comparar o desempenho da formulação proposta com o de uma abordagem clássica de duas extremidades. Os resultados obtidos atestam que a formulação proposta é capaz de localizar com precisão faltas em LT's, mesmo quando existem erros de sincronismo de dados e incertezas nos parâmetros da linha monitorada.

Akmaz et al. (2018) abordaram uma nova proposta para determinar a localização de faltas em LT's. Frequências de ondas viajantes e uma máquina de aprendizado extremo foram usadas para determinar a localização da falha. Os sinais transitórios no domínio do tempo foram transformados no domínio da frequência usando a *Fast Fourier Transform* (FFT) e as frequências de ondas viajantes foram detectadas a partir do espectro de frequência transitória. A fim de detectar a localização da falta, a frequência da onda viajante foi usada inicialmente para prever a localização da falta. A previsão desta localização de falta foi testada para muitas condições de falta diferentes e foi afetada adversamente apenas pelo valor da indutância da fonte. Os resultados da simulação mostram que o método proposto é muito bem sucedido, conta com muitas variáveis, como; dife-

rentes resistências de falta, indutâncias da fonte, características da linha de transmissão, comprimentos da LT.

Rosa (2018) avaliou um método para detecção e localização de faltas de alta resistência baseada na TOV de dois terminais utilizando dados sincronizados para grandes áreas do SEP. Foi implementado um novo algoritmo de detecção de transitórios e aplicado um método de localização de faltas a partir do conceito de dois terminais baseado na TOV aplicável a grandes áreas do SEP, o qual requer a utilização das unidades de medições fasoriais para obter a sincronização das medições enviadas pelas subestações monitoradas. A avaliação do método proposto é realizada por meio de simulações digitais de faltas reproduzidas em um programa dedicado a estudos de transitórios eletromagnéticos.

Santos (2019) propôs o uso do filtro de Savitzky-Golay para localização de faltas em LT's utilizando o conceito de ondas viajantes e apresenta resultados da comparação de seu desempenho contra a TWD para sinais ruidosos. Os erros em relação aos filtros são obtidos e comparados. O filtro Savitzky-Golay mostrou ser uma ferramenta simples, porém poderosa para manusear sinais ruidosos. Assim, pode-se concluir que o objetivo principal do presente trabalho foi alcançado, ao apresentar um método de localização de faltas em LT's utilizando o Filtro de Savitzky-Golay capaz de extrair características em sinais ruidosos mais eficiente em relação a um método utilizando a TWD.

Magalhães (2019) propôs um método de localização de faltas baseado na TOV de um terminal para linhas paralelas que possam ser consideradas transpostas e desacopladas. Este método detecta a primeira onda lançada pela falta, utilizando um limiar de detecção previamente estabelecido, e se aproveita da topologia do sistema para detectar e classificar de maneira segura uma segunda onda vinda da direção da falta, utilizando um elemento direcional e um limiar adaptativo, a partir da qual a localização da falta é estimada. Um dos modelos desenvolvidos previu com precisão a origem e propagação de ondas viajantes devido a faltas em linhas de transmissão trifásicas, mesmo em condições de faltas assimétricas, sendo um avanço científico na área.

Arroyo, García-Gracia e Montañés (2019) apresentaram um método preciso baseado na TWD para localização de faltas em sistemas de potência. O método wavelet proposto consiste na análise do sinal transitório medido em uma única extremidade da LT. A distância da falta é calculada usando a diferença entre o tempo em que um sinal semi-senoidal de 100 kHz é enviado e o tempo em que o sinal derivativo é recebido. O algoritmo foi testado considerando distorção harmônica e variando a resistência de falta, resistividade de terra, localização e ângulo de início. A alta precisão do algoritmo proposto foi obtida mesmo para faltas próximas à barra e baixos ângulos de início. Foi verificado considerando a distorção harmônica e variando a resistência de falta, resistividade de terra, localização e ângulo de início. De acordo com esses resultados, a localização da distância pode ser determinada com uma precisão inferior a 150 m em todos os casos.

Ferreira, Souza e Nascimento (2020) apresentaram um algoritmo para detecção de faltas baseado em TWD, cálculo de pontos de extremo e TOV. Para geração do sinal elétrico, foi utilizado o *software* ATPDraw foi simulado uma LT de 128 km que conecta as cidades de Pelotas e Candiota, ambas no estado do Rio Grande do Sul. Faltas fase-terra para diferentes comprimentos de LT, ângulos de incidência e resistências de falta foram analisadas. Os resultados mostraram a eficiência desse tipo de algoritmo, apresentando baixos erros relativos, principalmente para ângulos de incidência diferentes de zero.

Naidu e Pradhan (2020) apresentam um método preciso de localização de faltas baseado em ondas viajantes de terminação única, proposto para LT's com as entradas como os três primeiros tempos de chegada de frentes de onda de ondas viajantes e velocidade de onda da linha. O desempenho do método é avaliado para diferentes locais de falha, ângulos de início de falha e resistências de falha. Os resultados do teste obtidos pelo método proposto são comparados com um método baseado em comunicação de dois terminais praticamente comprovado e são considerados precisos.

Ferreira (2020) apresenta um algoritmo híbrido para localização de faltas baseado na TOV e TWD. Para detecção do ponto de falta, o sinal originalmente descrito no domínio do tempo, foi decomposto através da TWD. Para os ensaios, o circuito e os sinais elétricos foram simulados com o *software* ATPDraw e o algoritmo para detecção de faltas foi implementado em linguagem Matlab. Os parâmetros utilizados na montagem do circuito elétrico foram extraídos a partir de dados reais de uma LT de 128 km, acoplada a um Transformador de Potencial Capacitivo (TPC), que liga as cidades de Candiota e Pelotas, ambas situadas no estado do Rio Grande do Sul. Durante os testes, foram realizadas faltas do tipo fase-terra, com variações da distância do ponto de falta até o relé de proteção, impedância e ângulo de incidência de falta, ambos descritos na literatura como principais fontes de erro na modelagem com ondas viajantes.

Nascimento et al. (2021a) apresentam uma metodologia baseada em ondas viajantes para a estimação de faltas em LT's utilizando a TWD, os filtros de Savitzky-Golay e *Least Mean Squares* (LMS). Os erros obtidos com a aplicação das técnicas de processamento digital de sinais são comparados para a averiguação de qual técnica e a mais efetiva na estimação da distância de falta na presença de ruído. Uma LT real de 500kV foi simulada no *software* ATPDraw. A adição de ruído e aplicação das técnicas de processamento digital de sinais foram executadas no software Matlab. Os resultados apontam que os algoritmos baseados nos filtros LMS mostraram-se mais robustos e vantajosos, com potencial para o uso em localizadores de falta em LT's por sua acurácia e desempenho na estimação das faltas na presença de ruídos.

O Quadro 1 apresenta a síntese da revisão bibliográfica.

Quadro 1 – Síntese bibliográfica.

Autor	Métodos	Limitações ou Vantagens
LOPES et al. (2017)	TOV de dois terminais	Não leva em conta a velocidade de propagação das ondas viajantes.
AKMAZ et al. (2018)	Utiliza frequências de ondas viajantes e uma máquina de aprendizado extremo	O método é afetado negativamente pela indutância da fonte
ROSA (2018)	TOV e unidade de mediação de fador	Pouca pesquisa sobre aplicação da teoria
SANTOS (2019)	Filtro de Savitzky-Golay	Desconsidera a capacidade de curto-circuito entre as fontes envolvidas
MAGALHÃES (2019)	TOV em linhas paralelas	Classificação prévia do tipo de falta
ARROYO et al. (2019)	TW	Frequência de amostragem limitada
FERREIRA et al. (2020)	TOV e TW	Dispersão na velocidade das ondas refletidas
NAIDU e PRADHAN (2020)	TOV de ponta única	Cenário específico de uma LT
FERREIRA (2020)	TOV e TW	Simulação apenas em faltas monofásicas
NASCIMENTO et al. (2021)	TOV, TW e Filtro Savitzky-Golay e LMS	Evidencia a precisão dos filtros LMS especialmente em condições de ruído

SISTEMA TESTE

4.1 Modelagem

O sistema de teste utilizado foi o de IEEE 9 Barras, conforme a Figura 4. Esse sistema foi modelado no software ATPDraw, no qual os principais parâmetros elétricos para a LT incluem a tensão de 500kV, com comprimento de 200km e frequência de 60 Hz. Foi realizado um estudo em uma parte do sistema, particularmente no trecho entre os barramentos 7 e 5. Essa linha foi escolhida arbitrariamente para simulação de faltas.

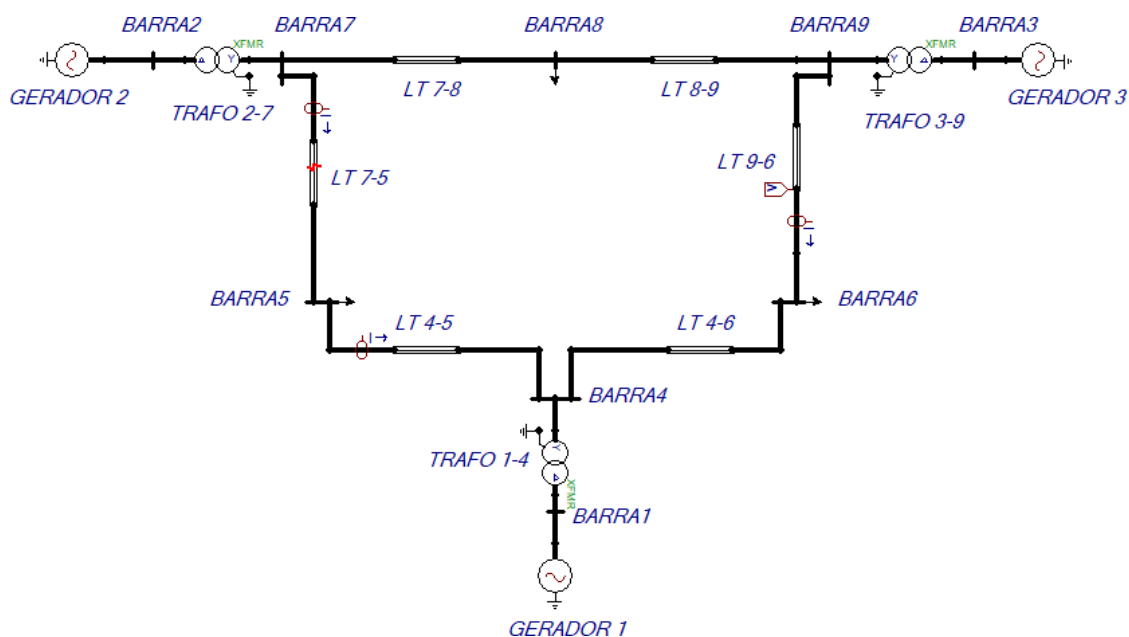


Figura 4 – Sistema Teste IEEE 9 barras.

O modelo PI equivalente foi empregado na representação da LT 7-5 que possui parâmetros distribuídos. Para a coleta de dados, foram utilizados Transformadores de Corrente (TC's) posicionados nas extremidades da LT. Esses dispositivos são comumente empregados para medir correntes elétricas em sistemas de potência. Eles funcionam transformando uma corrente de alta magnitude em uma corrente de magnitude menor, que pode ser medida de forma segura e precisa por instrumentos de medição.

Os parâmetros da LT 7-5, referentes à sequência positiva e sequência zero, estão detalhados na Tabela 1, em conformidade aos estudos apresentados por (FERREIRA; SOUZA; NASCIMENTO, 2020). Cada gerador foi modelado como uma fonte de tensão, com suas principais características descritas na Tabela 2. É importante ressaltar que os três transformadores utilizados nesse contexto possuem potência aparente de 100MVA.

Tabela 1 – Parâmetros da Linha de Transmissão.

Sequência	Unidade	Valor
R+	(W/km)	0,0568
L+	(mH/km)	1,275
C+	(μ F/km)	0,009
R0	(W/km)	0,4109
L0	(mH/km)	4,161
C0	(μ F/km)	0,0054

Tabela 2 – Características dos Geradores

Gerador	Tensão (kv)	Ângulo de fase (°)
1	17,16	0
2	18	9,3507
3	14,145	5,142

4.1.1 Processamento de Sinais com o *Toolbox Wavelet Analyzer* - *MATLAB*

Após a simulação do sistema elétrico de potência e a aquisição dos sinais de falta no ATPDraw, os dados foram transferidos para o MATLAB para uma análise mais detalhada utilizando o *Toolbox Wavelet Analyzer*. Este processo é importante para identificar e localizar o ponto de falta na LT, baseando-se na transformação dos sinais utilizando a TWD.

4.1.2 Seleção da Wavelet Mãe

O *Wavelet Analyzer Toolbox* do MATLAB fornece um ambiente interativo para a análise de sinais usando a transformada wavelet. Este toolbox facilita a seleção da wavelet mãe e dos parâmetros necessários para a análise.

Foi utilizado a Wavelet Daubechies de ordem 4 (DB4). A escolha da wavelet mãe é baseada em suas propriedades de ortogonalidade e boa resolução temporal, que são essenciais para a detecção de transientes rápidos, como os associados a faltas em linhas de transmissão. No Wavelet Analyzer, seleciona-se a wavelet DB4 a partir de uma lista predefinida de wavelets disponíveis.

4.1.3 Definição dos Níveis de Decomposição

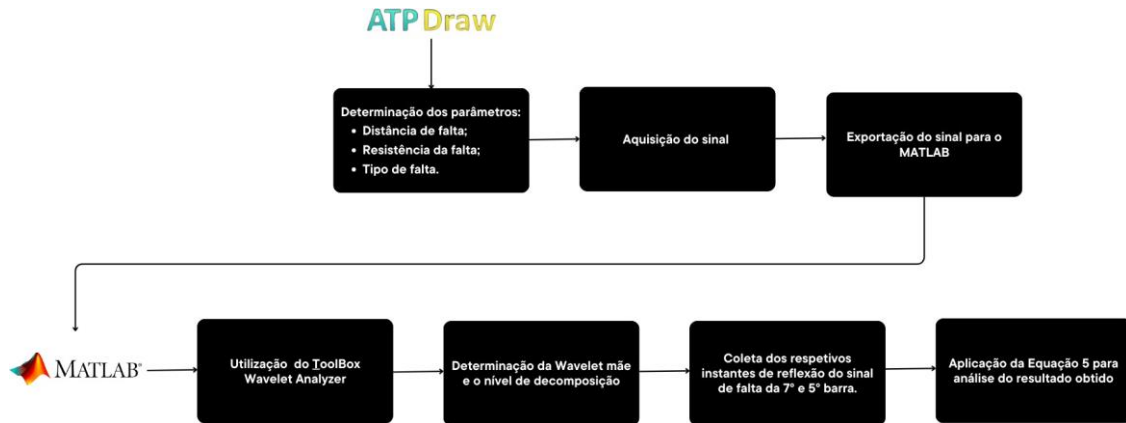
Os níveis de decomposição são selecionados com base na complexidade dos sinais e na necessidade de resolução em diferentes escalas. Para esta análise, foi utilizado o nível 1 de decomposição da TWD. Este nível de decomposição é suficiente para capturar as características principais dos transientes e identificar padrões relevantes para a localização das faltas. A decomposição em nível 1 permite a análise da alta e baixa frequência dos sinais, facilitando a identificação dos eventos transientes associados às faltas.

4.2 Processo de Cálculo

Após a análise dos coeficientes da TWD, os instantes de reflexão da falta foram identificados em dois barramentos. Estes instantes são usados para calcular a distância da falta com base na equação para ondas viajantes que foi utilizada para determinar o tempo de propagação dos sinais refletidos e, conseqüentemente, localizar o ponto de falta na LT.

A equação para ondas viajantes é utilizada para relacionar os tempos de reflexão com a posição da falta. A fórmula não leva em consideração a velocidade de propagação das ondas na linha de transmissão, apenas o tempo decorrido desde a emissão do sinal até a recepção das ondas refletidas.

O fluxograma apresentado por meio da Figura 5 o fluxo de trabalho e as interações entre essas etapas, fornecendo uma visão geral do processo de localização de faltas em linhas de transmissão.

Figura 5 – Fluxograma.

Fonte: Autoria própria

4.3 Características intrínsecas ao sistema teste

- Foi atribuída uma LT simétrica com parâmetros iguais para todas as fases, dessa forma a transposição da linha é uma característica da ferramenta adotada para a modelagem do sistema teste.
- O sinal possui duração de 1000ms, enquanto a falta foi iniciada no instante 100ms e finalizada no instante 600ms. Logo, a falta permaneceu durante o intervalo de 500ms segundos.
- Apenas as amostras de corrente são usadas para detectar transitórios e todas as três fases são monitoradas.
- A frequência de amostragem foi de 1 MHz.

RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do algoritmo proposto para a localização de faltas. Os resultados foram obtidos por meio da modelagem da LT no *software* ATPDraw e da análise dos dados no MATLAB, utilizando a TWD e a TOV.

5.1 Análise de erro

Para validar os resultados obtidos, foram aplicadas faltas em diferentes pontos, com alteração nos valores da impedância da LT. Esses testes consistiram na introdução controlada de faltas em locais específicos da linha e na análise dos sinais resultantes. Para calcular o erro do algoritmo na localização de faltas foi considerada a equação (6):

$$E = \frac{d_{estimada} - d_{exata}}{l} \times 100 \quad (6)$$

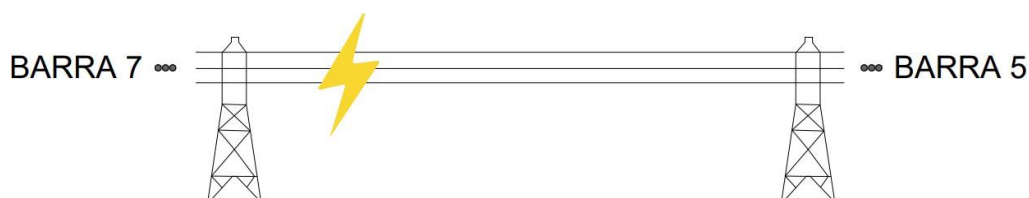
Em que:

- *destimada* é a distância de falta estimada, em km, obtida pelo algoritmo proposto até a barra 2.
- *dexata* é a distância exata da barra 2 até o ponto de falta e *l* é o comprimento total da LT.

5.2 Validação dos Resultados

As faltas foram aplicadas próximas ao barramento 7 conectado ao transformador de 100MVA, que representa uma subestação de energia. A distância arbitrariamente selecionada para a primeira parte da análise, foi de 15% da LT, assim como apresentado pela Figura 6 que corresponde a 30km da barra 7. Como método de análise do comportamento, diante do cenário apresentado, foram alterados os tipo de falta e as Resistências de Falta (RF). As Tabelas 3, 4, 5 e 6, apresentam os resultados obtidos e os erros encontrados em relação ao ponto da ocorrência das faltas.

Figura 6 – Falta aplicada a 15% da linha de 200km - Barra 7 como referência.



Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Localização da falta para $RF = 0.1\Omega$

Tipo de Falta	Distância Encontrada (Km)	Erro (%)
ABCT	29,851	0,075
ABC	29,851	0,075
ABT	29,851	0,075
ACT	29,851	0,075
BCT	32,000	1,000
AB	29,851	0,075
AC	29,851	0,075
BC	29,851	0,075
AT	32,000	1,000
BT	32,000	1,000
CT	32,000	1,000

A segunda etapa da análise teve por finalidade analisar o erro referente ao método proposto quando as faltas ocorrem no meio da LT. Portanto, a distância selecionada foi de 50% da LT que corresponde a 100km da barra 7, assim como apresentado pela Figura 7. A Tabela 7 exhibe os resultados obtidos e os erros encontrados em comparação ao ponto da ocorrência da falta.

Neste cenário, a variação das resistências de falta, apresentaram valores equivalentes de erro. Logo, a Tabela 7 demonstra os dados referentes as variações de resistências representadas por meio das Tabelas 3, 4, 5 e 6.

Tabela 4 – Localização da falta para $RF = 1\Omega$

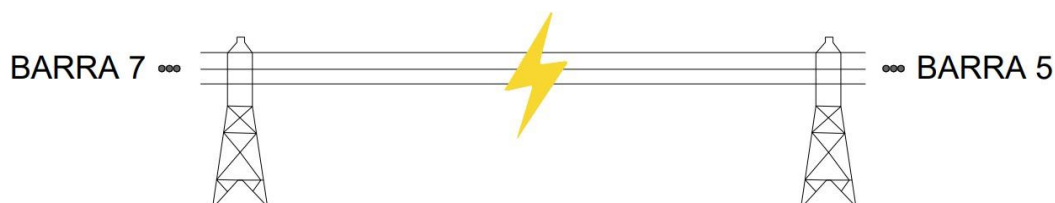
Tipo de Falta	Distância Encontrada (Km)	Erro (%)
ABCT	29,851	0,075
ABC	29,851	0,075
ABT	29,851	0,075
ACT	29,851	0,075
BCT	32,000	1,000
AB	29,851	0,075
AC	29,851	0,075
BC	29,851	0,075
AT	32,000	1,000
BT	32,000	1,000
CT	32,000	1,000

Tabela 5 – Localização da falta para $RF = 10\Omega$

Tipo de Falta	Distância Encontrada (Km)	Erro (%)
ABCT	29,851	0,075
ABC	29,851	0,075
ABT	32,000	1,000
ACT	29,851	0,075
BCT	32,000	1,000
AB	29,851	0,075
AC	29,851	0,075
BC	29,851	0,075
AT	32,000	1,000
BT	32,000	1,000
CT	32,000	1,000

Tabela 6 – Localização da falta para $RF = 100\Omega$

Tipo de Falta	Distância Encontrada (Km)	Erro (%)
ABCT	29,851	0,075
ABC	29,851	0,075
ABT	32,000	1,000
ACT	29,851	0,075
BCT	32,000	1,000
AB	29,851	0,075
AC	29,851	0,075
BC	29,851	0,075
AT	32,000	1,000
BT	32,000	1,000
CT	32,000	1,000

Figura 7 – Falta aplicada a 50% da linha de 200km - Barra 7 como referência.

Fonte: Autoria própria

Tabela 7 – Localização da falta em 50%

Tipo de Falta	Distância Encontrada (Km)	Erro (%)
ABCT	99,259	0,370
ABC	99,259	0,370
ABT	103,704	1,852
ACT	99,259	0,370
BCT	103,704	1,852
AB	99,259	0,370
AC	99,259	0,370
BC	99,259	0,370
AT	103,704	1,852
BT	103,704	1,852
CT	103,704	1,852

Durante a terceira parte foi analisado os erro referentes ao método proposto quando as faltas ocorrem próximas das unidades consumidoras. Portanto, a distância selecionada foi de 90% da LT que corresponde a 180km da barra 7, assim como apresentado pela Figura 8. As Tabelas 8, 9, 10, 8 exibem os resultados obtidos e os erros encontrados em comparação ao ponto da ocorrência da falta.

Figura 8 – Falta aplicada a 90% da linha de 200km - Barra 7 como referência.

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Localização da falta em 90% para $RF = 0.1 \Omega$

Tipo de Falta	Distância Encontrada (Km)	Erro (%)
ABCT	179,412	0,294
ABC	179,412	0,294
ABT	179,412	0,294
ACT	179,412	0,294
BCT	173,333	3,333
AB	179,412	0,294
AC	180,597	0,299
BC	180,597	0,299
AT	173,333	3,333
BT	173,333	3,333
CT	173,333	3,333

Tabela 9 – Localização da falta em 90% para $RF = 1 \Omega$

Tipo de Falta	Distância Encontrada (Km)	Erro (%)
ABCT	180,597	0,299
ABC	180,597	0,299
ABT	179,412	0,294
ACT	173,333	3,333
BCT	173,333	3,333
AB	180,597	0,299
AC	180,597	0,299
BC	180,597	0,299
AT	173,333	3,333
BT	173,333	3,333
CT	173,333	3,333

Tabela 10 – Localização da falta em 90% para $RF = 10 \Omega$

Tipo de Falta	Distância Encontrada (Km)	Erro (%)
ABCT	180,597	0,299
ABC	180,597	0,299
ABT	179,412	0,294
ACT	173,333	3,333
BCT	173,333	3,333
AB	180,597	0,299
AC	180,597	0,299
BC	180,597	0,299
AT	173,333	3,333
BT	173,333	3,333
CT	173,333	3,333

Tabela 11 – Localização da falta em 90% para $R_F = 100 \Omega$

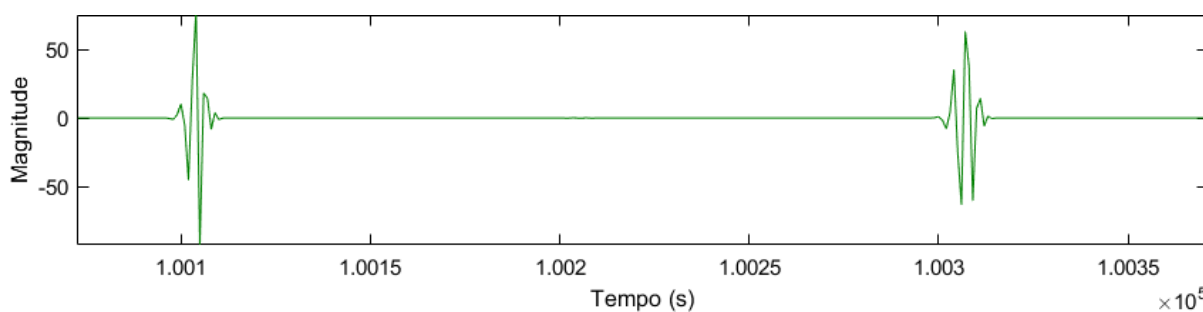
Tipo de Falta	Distância Encontrada (Km)	Erro (%)
ABCT	180,597	0,299
ABC	180,597	0,299
ABT	179,412	0,294
ACT	173,333	3,333
BCT	173,333	3,333
AB	180,597	0,299
AC	180,597	0,299
BC	180,597	0,299
AT	173,333	3,333
BT	173,333	3,333
CT	173,333	3,333

5.2.1 Estudo de caso para falta bifásica

Para uma compreensão mais abrangente de todas as etapas envolvidas no método de localização de faltas proposto neste estudo, este segmento detalhará os procedimentos aplicados para analisar a falta bifásica resultante do contato entre os cabos das fases A e C em uma LT, simulada a 15% da extensão total, o que equivale a 30 km a partir do primeiro terminal monitorado. A resistência de falta foi de 10Ω .

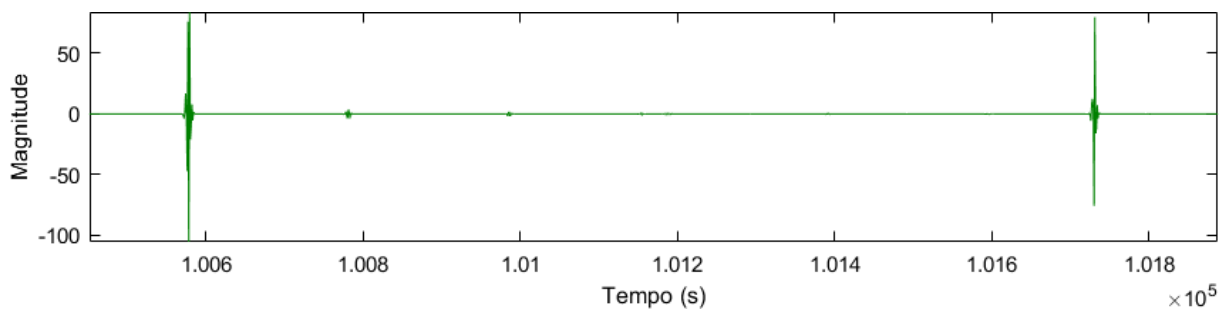
Inicialmente, a falta foi simulada no software ATPDraw, e os dados de corrente, exportados para o ambiente de programação MATLAB.

Com o toolbox Wavelet Analyzer 5.2, foi possível aplicar o filtro Wavelet Daubechies de 4ª ordem (Db4) e realizar a primeira decomposição de nível, conforme Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Instantes de tempo referente a 1ª e 2ª reflexão na barra 7.

Fonte: Autoria própria

Nessa etapa, os tempos de chegada das primeiras e segundas reflexões na barra 7, foram registrados. O mesmo procedimento foi adotado para a coleta das reflexões na barra 5. Os dados referentes as reflexões 1ª e 2ª barra estão contidas respectivamente nas Tabelas 12 e 13,

Figura 10 – Instantes de tempo referente a 1ª e 2ª reflexão na barra 5.

Fonte: Autoria própria

Tabela 12 – Reflexões na 1ª Barra (Barra 7)

Ta1 (1ª reflexão)	Ta2 (2ª reflexão)
0,10010	0,10030

Tabela 13 – Reflexões na 2ª Barra (Barra 5)

Tb1 (1ª reflexão)	Tb2 (2ª reflexão)
0,10058	0,10172

Logo, a distância estimada para a falta é dada em $d_{p.u.}$ por meio da Equação 5 e assim é possível obter um erro aproximado de 0,07% referente a distância da barra 7 ao ponto de ocorrência.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado uma metodologia alternativa para localização de faltas baseada em ondas viajantes em dois terminais. Por meio de simulações e análise, é possível observar que os dados obtidos demonstraram eficiência diante das vantagens mencionadas. Visto que, é eliminada a dependência não somente do sincronismo dos dados entre duas extremidades, como também da velocidade de propagação das ondas viajantes.

Logo, a diferença de tempo entre a primeira onda viajante e a reflexão sucessiva do ponto de falta, é calculado em cada extremidade da LT de maneira individual. Desta forma, exclui a dependência de uma referência de tempo comum e elimina a variável velocidade de propagação, o que na equação proposta da onda viajante surge como consequência da falta.

Assim, a metodologia proposta foi aplicada na localização de faltas no ambiente do ATPDraw para modelar o sistema IEEE de 9 barras. Para cada caso de falta, foram simulados diferentes cenários, nos quais foram levados em consideração os tipos de faltas, distâncias e impedâncias, cujos resultados demonstraram que a formulação proposta é vantajosa em relação à abordagem clássica de dois terminais, especialmente quando existem incertezas significativas nos parâmetros da linha elétrica e no sincronismo de dados.

Esses resultados sustentam a confiabilidade e precisão da formulação proposta para LT's, mesmo quando não há uma referência de tempo comum disponível ou parâmetros exatos da LT.

Para avançar e aprofundar a pesquisa realizada, é essencial destacar duas direções principais para trabalhos futuros. Primeiramente, a simulação do SEP real. A aplicação do algoritmo em um sistema real possibilitará testes e análises de performance em um

ambiente mais complexo e variado, refletindo diferentes cargas, perfis de consumo e eventos dinâmicos que não foram totalmente representados nas simulações anteriores. Este passo ajudará a identificar possíveis ajustes e melhorias necessários para a implementação prática do método.

Além disso, a simulação de outros modelos de LT's é uma etapa importante para avaliar a robustez e a adaptabilidade do algoritmo em diferentes configurações. Esse trabalho é fundamental para assegurar que o método seja eficaz em diferentes cenários e possa ser otimizado para uma gama mais ampla de condições.

Esses esforços não apenas validarão a aplicabilidade do método em contextos mais diversos, mas também contribuirão para o aprimoramento contínuo da metodologia, aumentando sua precisão e eficácia em situações reais e variadas.

Referências Bibliográficas

AKMAZ, D. et al. Transmission line fault location using traveling wave frequencies and extreme learning machine. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 155, p. 1–7, 2018.

ARROYO, S. M.; GARCÍA-GRACIA, M.; MONTAÑÉS, A. The half-sine method: A new accurate location method based on wavelet transform for transmission-line protection from single-ended measurements. *Energies*, MDPI, v. 12, n. 17, p. 3293, 2019.

BARROS, B. F. d.; BORELLI, R.; GEDRA, R. L. *Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica*. 1st. ed. São Paulo: Érica, 2014. ISBN 978-85-365-1808-4.

BEWLEY, L. V. *Traveling waves on transmission systems*. [S.l.]: Dover, 1963. v. 1104.

FERREIRA, L. F. *Sistema de detecção de faltas em linhas de transmissão de alta tensão: uma abordagem a partir da teoria das ondas viajantes e da transformada de Wavelet*. 59 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Católica de Pelotas, Pelotas, 2020. Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação.

FERREIRA, L. F.; SOUZA, E. G.; NASCIMENTO, C. d. D. do. Localização de faltas em linhas de transmissão através de transformada de wavelet contínua, pontos de extremo e teoria de ondas viajantes. *Anais do Computer on the Beach*, v. 11, p. 427–431, 2020.

FRAZÃO, R. J. A. *Proteção do sistema elétrico de potência*. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019. 200 p. Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP). ISBN 978-85-522-1435-9.

GRAINGER, J. J.; JR, W. D. S. *Power system analysis*. [S.l.]: McGraw-Hill series in electrical and computer engineering, 1994.

GRILO, C. et al. Localização de faltas em sistemas radiais de distribuição: Análise comparativa para distintas estratégias de medição de ondas viajantes. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2022. v. 3, n. 1.

LOPES, F. V. et al. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 33, n. 2, p. 873–880, 2017.

MAGALHÃES, F. M. d. M. J. Localização de faltas em linhas paralelas baseada na teoria de ondas viajantes utilizando dados de um terminal. *Nome do Periódico*, Editora do Periódico, XX, n. X, p. XX–XX, 2019.

- MAGNUSSON, P. C. et al. *Transmission lines and wave propagation*. [S.l.]: CRC press, 2017.
- MEHER, S. K.; PRADHAN, A. K. Fuzzy classifiers for power quality events analysis. *Electric power systems Research*, Elsevier, v. 80, n. 1, p. 71–76, 2010.
- NAIDU, O.; PRADHAN, A. K. Precise traveling wave-based transmission line fault location method using single-ended data. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 17, n. 8, p. 5197–5207, 2020.
- NASCIMENTO, H. M. A. do. Tutorial de simulação no software atpdraw tm do sistema de distribuição ieee 34 barras. In: *Anais da XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2023.
- NASCIMENTO, R. G. D. et al. Localização de faltas em linha de transmissão por ondas viajantes: Uma abordagem usando a transformada wavelet, filtro savitzky-golay e lms. In: IEEE. *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. [S.l.], 2021. p. 61–68.
- NASCIMENTO, R. G. D. et al. Localizaçãoo de faltas em linha de transmissão por ondas viajantes-uma abordagem usando a transformada wavelet, filtro savitzky-golay e lms. In: IEEE. *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. [S.l.], 2021. p. 61–68.
- PINTO, M. O. Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados. *Rio de Janeiro: LTC*, 2014.
- RODRIGUES, R. O.; SILVA, S. O.; FERREIRA, S. A. Modelagem do sistema ieee de 9 barramentos no atpdraw. *Anais do Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, 2022.
- ROSA, T. A. d. O. Detecção e localização de falhas de alta resistência por ondas viajantes. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J. J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault location on power networks*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- SANCHEZ, V. H. G. et al. Bewley's lattice diagram implementation by using atp/emtp. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 17, n. 09, p. 1458–1465, 2019.
- SANTOS, M. C. d. C. Localização de faltas em linhas de transmissão por ondas viajantes utilizando o filtro de savitzky-golay. *IESTI Journal of Engineering*, IESTI - Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação, v. 10, n. 2, p. 45–56, 2019.
- SATO, F.; FREITAS, W. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica. *Rio de Janeiro: Elsevier*, 2015.
- VASCONCELOS, F. M. d. *Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica*. 1st. ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional SA, 2017. ISBN 978-85-522-0179-3.



MODELAGEM DO SISTEMA IEEE DE 9 BARRAMENTOS NO ATPDRAW

Resumo: A Pandemia por Covid-19, ocasionada pelo agente etiológico SARS-CoV-2, impactou diversas esferas, dentre elas os métodos convencionais de ensino. Uma das consequências foi a busca por alternativas para suprir a ausência de práticas e estudos presenciais. Nessa conjuntura, as pautas energéticas instigaram pesquisas relacionadas a uma das figuras de mérito da qualidade da energia elétrica, cujo tema é pauta principal e objeto de análise do presente trabalho, uma vez que, a falha desencadeia diversas consequências negativas. Utilizou-se o software livre Alternative Transient Program - ATPDraw para a simulação de uma linha de transmissão modelo IEEE de nove barras, para a implementação de curtos circuitos que foram classificados de acordo a variação de tensão em curtas durações, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Como método para controlar o período de ocorrência da falta e a amplitude dos distúrbios nas linhas de transmissão, elaborou-se circuitos chaveados com resistores por meio das ferramentas disponíveis no ATPDraw. Evidenciou-se o comportamento das tensões e correntes em um determinado ponto da linha de transmissão sem a aplicação de curtos circuitos. Durante uma fração de segundo, identificou a estabilidade da energia fornecida. Dessa forma, os curtos circuitos foram implementados à linha de transmissão e foi observado não só o comportamento das fases, quando apenas uma delas está submetida a uma falta, como também o rápido reestabelecimento dos valores normais de funcionamento do sistema quando era interrompido. Verificou-se a ocorrência nas alterações da amplitude da tensão fornecida no período da falta, à medida que a resistência de curto circuito era modificada. Conclui-se que a amplitude da tensão fornecida, quando submetida a um distúrbio, depende das características elétricas do sistema, como as impedâncias e a localização do ponto de observação.



MODELAGEM DO SISTEMA IEEE DE 9 BARRAMENTOS NO ATPDRAW

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.3875

Renato Oliveira Rodrigues - renato.rodrigues@ufob.edu.br
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Stefânia Oliveira Silva - sosilva4@gmail.com
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Sâmia Arcanja Ferreira - samia.ferreira@ufob.edu.br
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Resumo: *A Pandemia por Covid-19, ocasionada pelo agente etiológico SARS-CoV-2, impactou diversas esferas, dentre elas os métodos convencionais de ensino. Uma das consequências foi a busca por alternativas para suprir a ausência de práticas e estudos presenciais. Nessa conjuntura, as pautas energéticas instigaram pesquisas relacionadas a uma das figuras de mérito da qualidade da energia elétrica, cujo tema é pauta principal e objeto de análise do presente trabalho, uma vez que, a falha desencadeia diversas consequências negativas. Utilizou-se o software livre Alternative Transient Program - ATPDraw para a simulação de uma linha de transmissão modelo IEEE de nove barras, para a implementação de curtos circuitos que foram classificados de acordo a variação de tensão em curtas durações, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Como método para controlar o período de ocorrência da falta e a amplitude dos distúrbios nas linhas de transmissão, elaborou-se circuitos chaveados com resistores por meio das ferramentas disponíveis no ATPDraw. Evidenciou-se o comportamento das tensões e correntes em um determinado ponto da linha de transmissão sem a aplicação de curtos circuitos. Durante uma fração de segundo, identificou a estabilidade da energia fornecida. Dessa forma, os curtos circuitos foram implementados à linha de transmissão e foi observado não só o comportamento das fases, quando apenas uma delas está submetida a uma falta, como também o rápido reestabelecimento dos valores normais de funcionamento do sistema quando era interrompido. Verificou-se a ocorrência nas alterações da amplitude da tensão fornecida no período da falta, à medida que a resistência de curto circuito era modificada. Conclui-se que a amplitude da tensão fornecida, quando submetida a um distúrbio, depende das características elétricas do sistema, como as impedâncias e a localização do ponto de observação.*





Palavras-chave: Afundamento de tensão, ATPDraw, curtos circuitos, linha de transmissão, qualidade da energia elétrica.



MODELAGEM DO SISTEMA IEEE DE 9 BARRAMENTOS NO ATPDRAW

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos da enfermidade epidêmica amplamente disseminada provocado pelo SARS-CoV-2, no qual os métodos de isolamento social vigoraram como forma de contenção, induziu a esforços que intensificaram a busca por formas de satisfazer a ausência de estudos e práticas presenciais em laboratórios mediante o uso de equipamentos, dispositivos e ferramentas. O cenário supracitado impactou drasticamente as estruturas de ensino, impossibilitando a execução de atividades convencionais, logo a melhor alternativa se restringiu aos recursos digitais, visto que, os avanços tecnológicos permitem que haja diversas possibilidades referentes a procura por soluções, especificamente no âmbito da engenharia, busca-se a necessidade de predizer o comportamento de sistemas em determinadas situações.

Assim, os meios virtuais foram amplamente utilizados, como no caso do presente trabalho realizado no *software* ATPDraw, para análises das variações e Qualidade da Energia Elétrica - QEE em curtas durações, por meio da aplicação de faltas em uma Linha de Transmissão - LT de nove barras modelo IEEE. O presente trabalho aborda uma das figuras de mérito da QEE mediante diagnósticos de perturbações, como curtos-circuitos em uma LT, induzindo a distúrbios de curta duração, como afundamento de tensão ("sag"), elevação de tensão ("swell") ou até mesmo a interrupção de tensão (KEMPNER, 2016).

O estudo da QEE está intrinsecamente relacionado ao comportamento adequado do sistema, cuja as tensões e frequências atuam próximas dos valores nominais, desse modo não apresentam perturbações ou oscilações relevantes. Como ferramenta de análise, as simulações e modelagem, por meio de parâmetros pré-definidos, fornecem dados próximos da realidade, no cenário vigente, substituiu momentaneamente as práticas e estudos presenciais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O intenso aprimoramento dos circuitos eletrônicos, bem como a crescente utilização de microprocessadores, fortalece a necessidade de estudos para a melhor compreensão dos efeitos causados pelos diversos distúrbios da QEE, diante da sensibilidade destes equipamentos (HIRT, 2015). Os efeitos negativos também afetam as indústrias, visto que a ausência de energia provoca paradas nos processos produtivos e o aumento de tensão pode queimar os equipamentos. O mesmo pode ocorrer em hospitais e leitos de UTI, visto que coloca em risco a vida das pessoas que são assistidas por equipamentos e necessitam deles para sobreviver. A ausência pode ser fatal mesmo que por alguns instantes.

A importância do tema é proporcional a evolução energética na vida das pessoas, visto a disseminação no lazer, trabalho, estudo, comunicação, dentre tantas outras áreas. Diante disso, surge a necessidade de utilizar recursos que possibilitem estudos no qual objetiva a QEE, dentre tantos, o mais acessível e amplamente utilizado em ambientes de pesquisa, o ATPDraw se destaca, por se tratar de um pré-processador gráfico e gratuito que possibilita modelar adequadamente os sistemas elétricos. O *software* é de grande importância pela flexibilidade na realização de estudos de regime transitório ou permanente, logo possui recursos suficientes para simular as LTs e analisar a QEE (NASCIMENTO;

DILLI; SILVA, 2021). Assim, tornou-se possível o estudo analítico referente a ocorrência de faltas, provocadas para a avaliação do desempenho.

Visto que, todo sistema elétrico está sujeito a faltas, definidas como o fenômeno elétrico que gera perturbações no sistema, podendo-o levar a um estado crítico de operação. O curto circuito representa a principal falta que acomete os sistemas elétricos, este é determinado como a perturbação elétrica causada pela conexão de baixa impedância entre os condutores de um circuito elétrico alimentado por geradores de tensão, cuja consequência é uma corrente extremamente elevada que atravessa os geradores, podendo causar a destruição (FRAZÃO, 2019).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, órgão regulador e fiscalizador no Brasil, por intermédio do anexo VIII da resolução normativa nº 956/2021, descreve as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) como desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a 3 minutos (ANEEL, 2021). Os parâmetros das VTCD são especificados pela Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão (IMT)	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 10%
	Afundamento Momentâneo de Tensão (AMT)	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	De 90% a 10%
	Elevação Momentânea de Tensão (EMT)	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 110%

Fonte: Parcialmente modificada do anexo VIII da resolução normativa nº 956/2021 - PRODIST.

Com tais parâmetros, é possível entender alguns comportamentos de uma LT quando submetida a curtos circuitos. Assim, possibilita o início da construção do modelo IEEE de nove barras, para posteriores análises realizadas com alterações de valores pertinentes em componentes idealizados para a falta, nos quais são capazes de interferir na QEE por meio da VTCD.

3 METODOLOGIA

O curto circuito é o tipo de falta mais comum e também o mais severo que acomete as LTs, provoca perturbações nas quais causam transtornos aos consumidores, logo as análises presente neste trabalho estudam o comportamento destas linhas quando submetidas a esta falta. A busca por compreender fenômenos como este, instiga investigações e análises, cujas quais foram efetuadas de forma virtual e eficiente dentro dos domínios do *software* ATPDraw, de modo que possibilitou a montagem da LT, bem como a aplicação de curtos circuitos no sistema.

3.1 Geração de energia elétrica

Como medida inicial, as fontes de corrente alternada (CA) foram escolhidas para representar simbolicamente as instalações industriais designadas à geração de energia

elétrica. Além disso, algumas características são semelhantes entre as fontes, como por exemplo; a amplitude medida em RMS e a frequência de 60 Hz, a mesma utilizada nas redes que fornecem energia para todo território nacional. As características específicas estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensionamento das fontes de tensão.

Fontes	Amplitude da tensão (KV)	Ângulo de fase
1	17,16	0,0000
2	18	9,3507
3	14,145	5,142

Fonte: Autoria própria.

3.2 Barramentos

Os componentes são ligados por dois tipos de barramento, identificadas como barras *slack* que são conectadas entre os transformadores. As mesmas possuem os valores de tensão referentes aos enrolamentos primários e secundários. Ademais existem as barras PQ, que fornecem a potência ativa (P) e reativa (Q). Os barramentos são utilizados não só para conexões do sistema, como também para portadores de carga fixa, especificando assim o fluxo de potência. As definições dos barramentos são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Barras com carga fixada.

Barras	Tensão (KV)	Potência ativa (P) MW	Potência reativa (Q) MVar
5	132,7905	41.6666	16.6666
6	132,7905	30,0000	10,0000
8	132,7905	33.3333	11.6666

Fonte: Autoria própria.

3.3 Transformadores

Os transformadores de modelo híbrido são os mais adequados, quando comparado a outros modelos disponíveis no software, para estudos de transitórios eletromagnéticos. Além de serem flexível, são os mais qualificados para a inclusão e variação de parâmetros desejáveis nas análises da rede de transmissão. Vale ressaltar, que a ampla capacidade para abrigar a base de dados referentes aos parâmetros e especificações, motivou a escolha de valores típicos de funcionamento dos transformadores para a indutância, resistência, capacitância e núcleo, visto que estes valores satisfazem os ideais estipulados para as simulações. Os dados que modelam os três transformadores conectados nas barras, estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões dos transformadores.

Transformador	Tensão primária (KV)	Tensão secundária (KV)	Potência (MVA)
1-4	17.160	230	100
2-7	18,000	230	100
3-9	14,145	230	100

Fonte: Autoria própria.

3.4 Linhas de transmissão

As LTs são responsáveis por conduzir energia elétrica de uma ou mais usinas geradoras à grandes centros consumidores. Ou seja, o sistema interligado é uma malha de

linhas que suprem a demanda energética de uma determinada região. As linhas de transmissão selecionadas possuem três parâmetros, sendo elas resistência, indutância, capacitância, que influenciam em seu comportamento como componentes de um sistema de potência.

É importante salientar dois tópicos de suma importância à modelagem, o primeiro é referente a condutância entre condutores de uma linha aérea, que pode ser considerada nula, pois a fuga nos seus isoladores é desprezível. E a segunda, trata do modelo utilizado para a simulação cujos parâmetros são concentrados na modelagem trifásica RLC, PI-equivalente. Os atributos utilizados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Atributos das linhas de transmissão.

Linhas	R0 (Ohm/m)	L0 (mH/m)	C0 (μ F/m)	R+ (Ohm/m)	L+ (mH/m)	C+ (μ F/m)	Comprimento (Km)
LT4-5	$3,63 \times 10^{-4}$	$3,51 \times 10^{-3}$	$6,16 \times 10^{-9}$	$3,58 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-3}$	$8,67 \times 10^{-9}$	52,90
LT5-7	$3,63 \times 10^{-4}$	$3,51 \times 10^{-3}$	$6,16 \times 10^{-9}$	$3,58 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-3}$	$8,67 \times 10^{-9}$	74,06
LT4-6	$3,63 \times 10^{-4}$	$3,51 \times 10^{-3}$	$6,16 \times 10^{-9}$	$3,58 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-3}$	$8,67 \times 10^{-9}$	634,80
LT7-8	$3,63 \times 10^{-4}$	$3,51 \times 10^{-3}$	$6,16 \times 10^{-9}$	$3,58 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-3}$	$8,67 \times 10^{-9}$	846,40
LT8-9	$3,63 \times 10^{-4}$	$3,51 \times 10^{-3}$	$6,16 \times 10^{-9}$	$3,58 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-3}$	$8,67 \times 10^{-9}$	952,20
LT6-9	$3,63 \times 10^{-4}$	$3,51 \times 10^{-3}$	$6,16 \times 10^{-9}$	$3,58 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-3}$	$8,67 \times 10^{-9}$	952,20

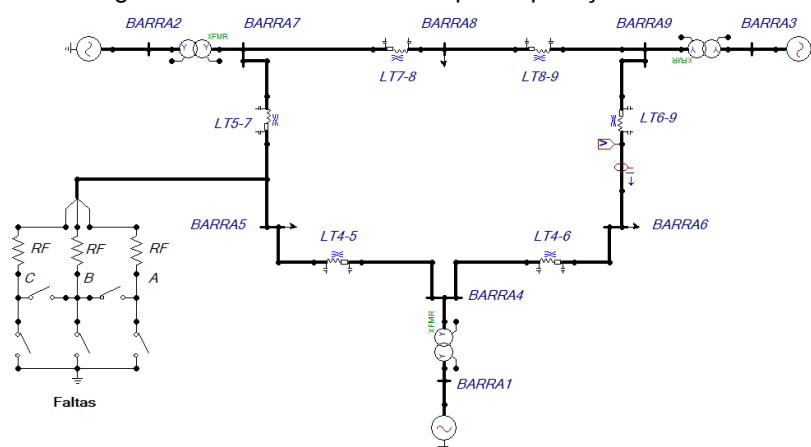
Fonte: Autoria própria.

3.5 Estrutura geral

A estrutura para análise das faltas foi implementada, na barra 5 no trecho da LT5-7. Por meio das conexões entre as chaves e três Resistores de Falta - RF, é possível acionar e controlar o tipo de falta. O sistema possui três fases, nomeadas como A, B e C, e as LTs são referenciadas pela localização dos barramentos. Algumas ferramentas disponíveis no ATPDraw foram necessárias para a aplicação das faltas, como o *Splitter* que transforma um nó trifásico em três nós monofásicos, também o amperímetro e voltímetro para determinar os efeitos provocados pela falta na LT6-9.

Conforme a Figura 01, é apresentado a estrutura do sistema IEEE de nove barras. É possível analisar como os equipamentos e dispositivos virtuais estão devidamente conectados pelas linhas trifásicas.

Figura 01 - LT com a estrutura para aplicação das faltas.

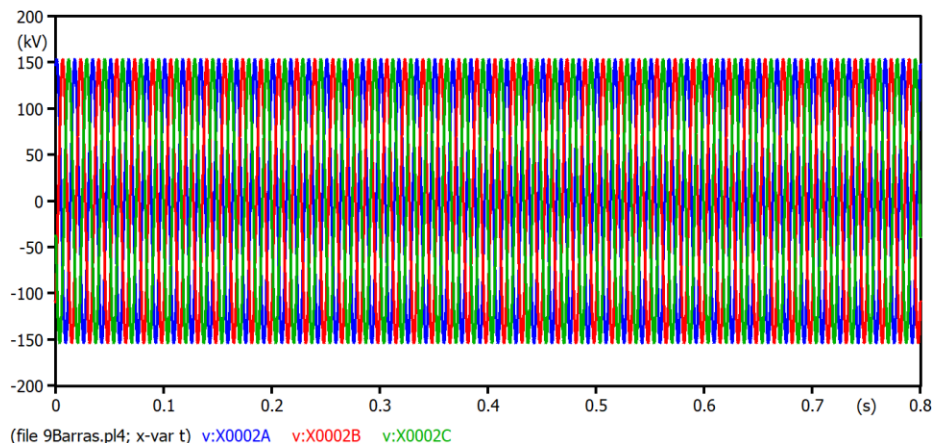


Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS

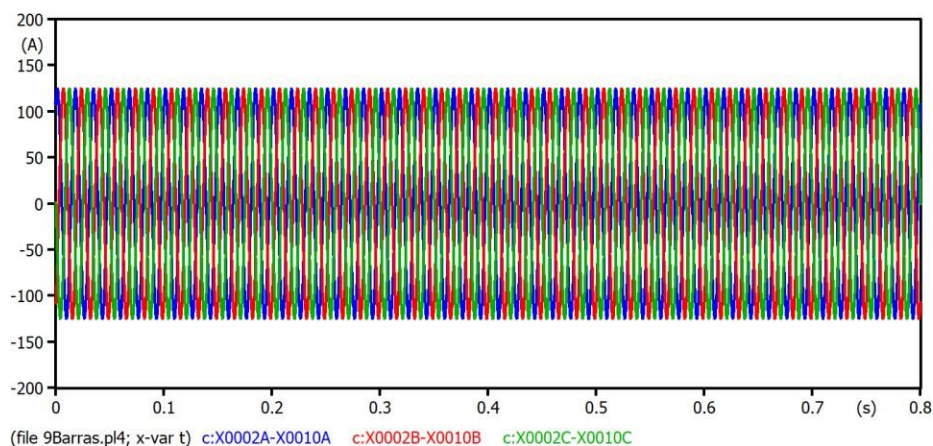
Para análise do sistema teste foi feito o estudo de caso na barra 6 verificando as correntes e a VTCD sem a aplicação de falta, durante 0,8 s é notório a estabilidade da energia fornecida, visto que as amplitudes não apresentaram variações e permaneceram estáveis, como representado pelas Figuras 02 e 03.

Figura 02 - Comportamento eficaz das tensões das fases A, B e C.



Fonte: Autoria própria.

Figura 03 - Comportamento eficaz das correntes A, B e C.



Fonte: Autoria própria.

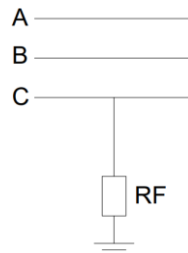
Como forma de avaliar as figuras de mérito de um dos fatores da QEE, verificou-se a amplitude ou magnitude (V_{Mag}) da VTCD, descrita no anexo VIII da resolução normativa nº 956/2021 referente ao Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, corresponde ao valor residual ou remanescente (V_{res}) do valor eficaz da tensão em relação à tensão de referência (V_{ref}). Para caráter exploratório dos valores simulados, a Equação (1) foi normalizada para o Sistema Internacional - SI:

$$V_{Mag} \% = \frac{V_{ref} - V_{res}}{V_{ref}} * 100\% \quad (1)$$

O método implementado assegura as análises, visto que os resultados encontrados são discutidos e avaliados de forma consistente. Dessa forma é possível iniciar a implementação das faltas na LT que seguem os seguintes padrões: 0,1 s após o começo da simulação a chave fecha para que ocorra o distúrbio desejado durante 500 ms e no instante 0,6 s a chave é reaberta até o final da simulação, correspondendo a 0,8 s, tempo suficiente para analisar a VTCD e como as tensões e correntes se reestabelecem.

O curto circuito monofásico envolvendo a fase C com conexão para o terra foi o primeiro a ser analisado, ilustrado pela Figura 04.

Figura 04 - Falta monofásica.



Fonte: Autoria própria.

Ao observar o comportamento das tensões e correntes, principalmente na fase C, é possível analisar matematicamente as amplitudes, conforme a Tabela 6:

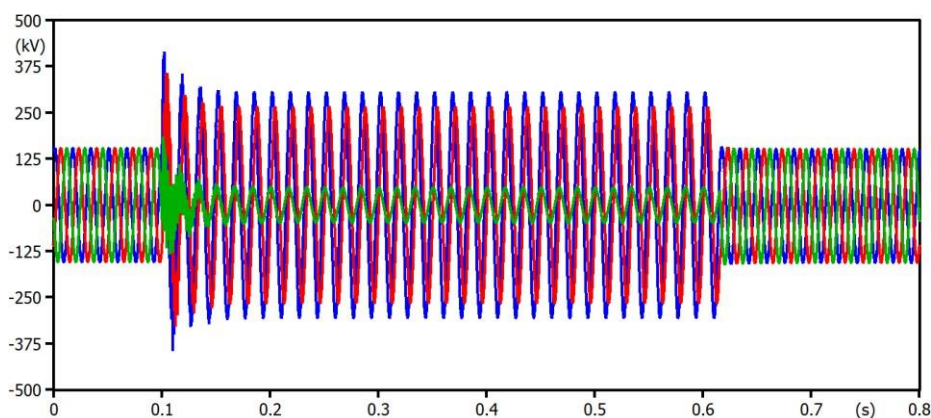
Tabela 6 - Falta monofásica envolvendo a fase C com conexão ao terra (FT).

RF (Ohms)	V _{Mag} (%) - Fase A	V _{Mag} (%) - Fase B	V _{Mag} (%) - Fase C
0,001	-98,88	-73,24	69,18
0,0001	-99,21	-72,78	69,31
0,00001	-99,21	-72,45	69,31

Fonte: Autoria própria.

Como a Equação (1) é realizada para o afundamento de tensão, quando há elevação de tensão, o resultado é dado de forma negativa. Graficamente este comportamento é ilustrado pela Figura 05 que caracteriza a redução repentina da tensão na fase C bem como a elevação das tensões A e B, sentida na LT6-9.

Figura 05 - Comportamento das tensões durante o curto circuito na fase C e com RF igual a 0,001 Ohms.



(file 9Barras.pl4; x-var t) v:X0002A v:X0002B v:X0002C

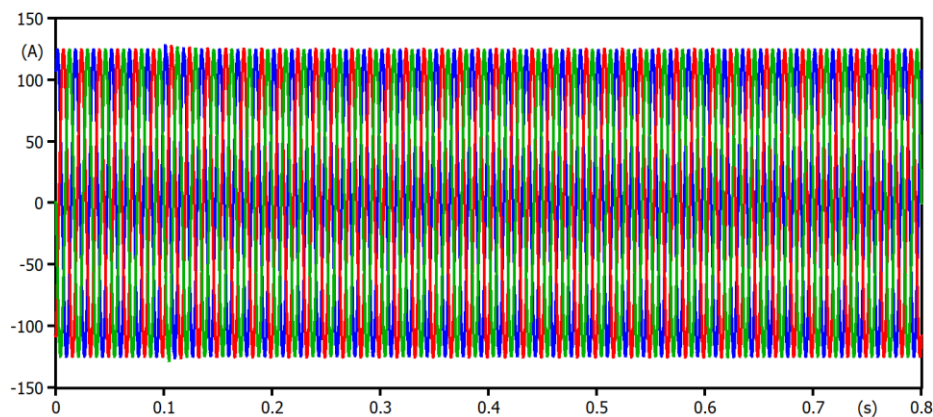
Fonte: Autoria própria.



Quando aplicado o curto circuito na fase C para o terra, identificou-se a elevação de aproximadamente 73,24% da tensão na fase B e praticamente o dobro da tensão eficaz caracterizada por uma elevação de 98,88% da fase A. Logo, os valores obtidos a partir de RF igual a 0,001 Ohms, possibilitam observar não só o comportamento das fases quando apenas uma delas está submetida a uma falta, como também o rápido reestabelecimento dos valores normais de funcionamento do sistema quando o curto circuito é interrompido.

Já as respectivas correntes não apresentaram alterações relevantes, apenas pequenas oscilações decorrentes da resistência das LTs, como apresentado na Figura 06.

Figura 06 - Comportamento das correntes durante o curto circuito na fase C e com RF igual a 0,001 Ohms.

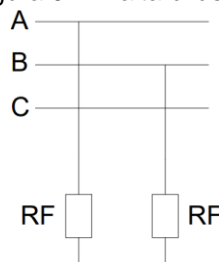


(file 9Barras.pl4; x-var t) c:X0002A-X0010A c:X0002B-X0010B c:X0002C-X0010C

Fonte: Autoria própria.

O segundo curto circuito foi realizado pelo contato das fases A e B com dois RFs de valores iguais, assim como apresentado pelo esquema a baixo, Figura 07.

Figura 07 - Falta bifásica.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida, foi necessário realizar algumas modificações na estrutura para aplicação de faltas bifásicas, de modo que os instantes utilizados para a abertura e fechamento das chaves permanecessem os mesmos, bem como o tempo total de simulação. Os resultados obtidos por análise e uso da Equação (1), estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7- Variação da QEE em uma falta bifásica.

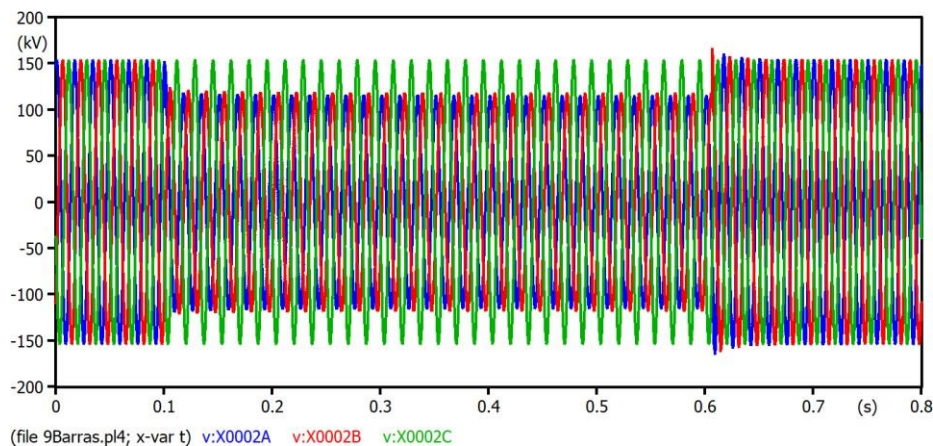
RF (Ohms)	V _{Mag} (%) - Fase A	V _{Mag} (%) - Fase B	V _{Mag} (%) - Fase C
0,1	24,65	22,89	00,00
10	17,10	25,32	00,00
50	2,6	14,47	00,00

Fonte: Autoria própria.

Observou-se que nestas condições não há elevação de tensão, visto que a fase C permanece praticamente a mesma durante todo o período simulado. Já as fases A e B, intermediadoras do curto circuito, apresentaram afundamentos com magnitudes próximas umas das outras quando os RFs possuem valores pequenos.

Assim, como na perturbação aplicada anteriormente, nesta também não apresenta oposição do sistema em retomar ao comportamento ideal de funcionamento da LT. De forma visual, é possível observar a dimensão do afundamento na Figura 08.

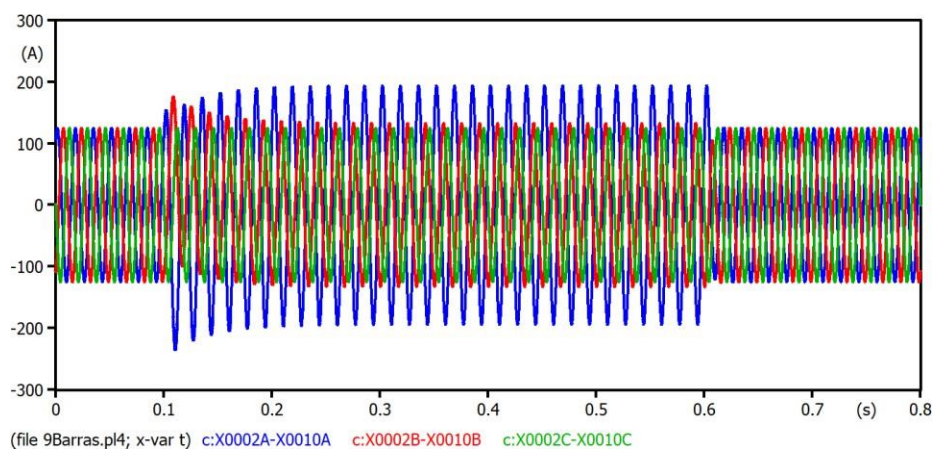
Figura 08 - Comportamento das tensões quando submetidas a uma falta bifásica com RF igual a 0.1 Ohms.



Fonte: Autoria própria.

As alterações crescentes dos RFs, possibilitaram observar a diferença de magnitude no afundamento das fases A e B. Evidenciou-se a crescente disparidade entre as fases que compõem a falta, à proporção que os RFs aumentam. Logo, quando a resistência escolhida é muito pequena não há modificações perceptíveis, mas quando o RF é maior, a diferença de amplitude entre as fases aumenta proporcionalmente. Nesta circunstância, o comportamento das correntes referentes as fases A e B também apresentam distorções relacionadas a amplitude, conforme ilustra a Figura 09.

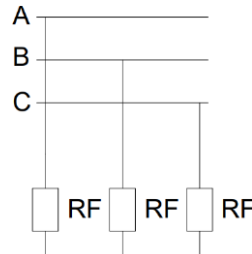
Figura 09 - Comportamento das correntes quando submetidas a uma falta bifásica com RF igual a 0.1 Ohms.



Fonte: Autoria própria.

O terceiro colapso estudado foi a falta trifásica, escolhida para análises da QEE. Este modelo é representado abaixo, pela Figura 10.

Figura 10 - Falta trifásica.



Fonte: Autoria própria.

O contato entre as três fases apresenta um comportamento diferente dos curtos circuitos realizados anteriormente, pois demonstra que cada falta possui suas peculiaridades, como a amplitude das fases após a submissão da falta trifásica, dispostas na Tabela 8.

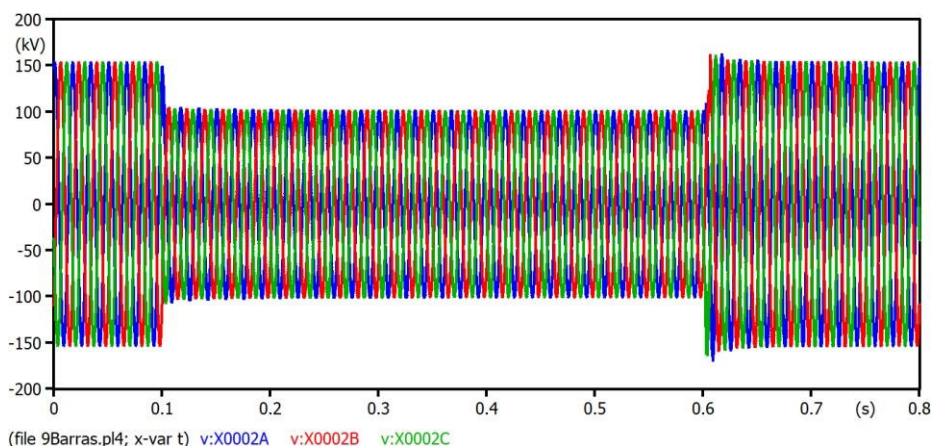
Tabela 8 - Variação da QEE em uma falta trifásica.

RF (Ohms)	V _{Mag} (%) - Fase A	V _{Mag} (%) - Fase B	V _{Mag} (%) - Fase C
0,1	33,88	33,88	33,88
10	29,93	29,93	29,93
60	8,82	8,82	8,82

Fonte: Autoria própria.

Identificou-se que em todas as fases, as magnitudes dos afundamentos de tensão são aproximadamente os mesmos, independentemente da variação dos RFs propostos para a simulação, e como em todos os casos o comportamento do sistema é reestabelecido à normalidade poucos instantes após a finalização do curto circuito. Graficamente, é possível observar estas discussões pela Figura 11.

Figura 11 - Resposta gráfica para as tensões obtida pela falta trifásica com RF igual a 0.1 Ohms.



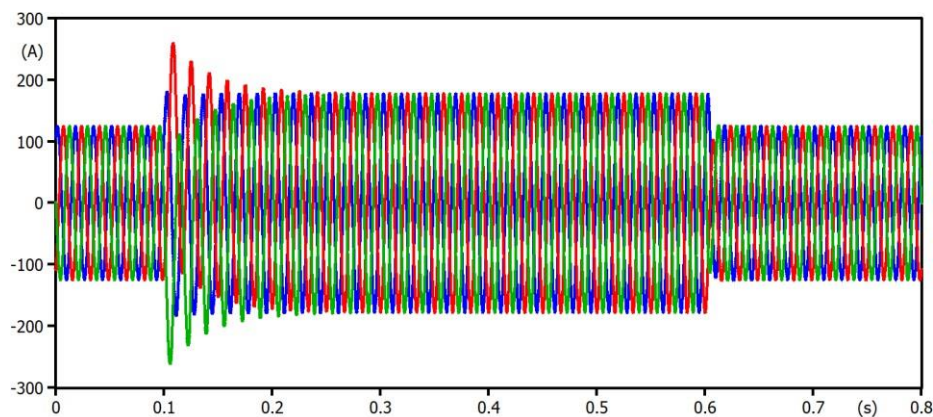
Fonte: Autoria própria.

Quando a resistência dos RFs aumenta, a tensão de referência se aproxima da tensão eficaz à medida que torna pequena a magnitude do afundamento, como no caso do RF com valor igual a 60 Ohms que proporcionou um afundamento de tensão com

magnitude igual a 8,82% e desse modo não possui amplitude mínima para suprir as definições de um AMT apresentadas anteriormente. Em virtude aos testes realizados, compreende-se que quanto maior o RF, menor a interferência do curto circuito na linha de transmissão e assim fornece uma QEE melhor.

Já as respectivas correntes apresentam distorções no início do curto circuito e são estabilizadas com amplitude elevada até o instante em que a chave é reaberta e a falta é interrompida, em seguida as amplitudes das correntes permanecem normais como ilustrado pela Figura 12.

Figura 12 - Resposta gráfica para as correntes obtida pela falta trifásica com RF igual a 0.1 Ohms.



(file 9Barras.pl4; x-var t) c:X0002A-X0010A c:X0002B-X0010B c:X0002C-X0010C

Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que os valores dos RFs foram selecionados com intuito de verificar tais comportamentos, sem que haja influência de relatos reais que assumiram as dimensões impostas. Como o estudo é analítico, prevê comportamentos nos cenários estipulados, visto que cada falta apresentada possui particularidades diferentes.

5 CONCLUSÕES

Em consonância às análises supracitadas, decorrentes do recente cenário pandêmico, necessitou-se compreender alguns comportamentos referentes a transmissão de energia elétrica, diante da importância do tema. Os estudos por intermédio de plataformas digitais possibilitaram diálogos e conseqüentemente a troca de informações, além do uso acessível de recursos tecnológicos como o *software* ATPDraw utilizado para a modelagem. Tais artifícios possibilitaram a aquisição de fontes confiáveis, tanto para sanar questionamentos pertinentes, quanto para instigar novos.

Logo, a precisão e a diversidade de possibilidades presentes no ambiente de modelagem do ATPDraw, asseguraram estudos referentes a QEE em curtas durações, por intermédio das execuções de curto circuito em uma linha de transmissão. O desenvolvimento do trabalho intermediou diversas descobertas, não só pelas aplicações teóricas, como também pelos métodos empíricos, nos quais algumas respostas foram obtidas por tentativas, como por exemplo a resistência da LT. Verificou-se que quanto maior a LT, maior será a sua capacidade de se opor a passagem da corrente elétrica, e conseqüentemente, maior a perda de energia através da dissipação nos fios. Além das observações referentes a variação dos RFs, escolhidos como forma de compreender o comportamento de transitórios, associados a curtos circuitos em sistemas de transmissão,

visto que houve alteração na amplitude da tensão fornecida no período de ocorrência de falta, à medida que o RF era modificado. Verificou-se que a magnitude depende das características elétricas do sistema, como as impedâncias e a localização do ponto de observação.

Compreende-se que o afundamento de tensão no momento de um curto circuito provoca graves transtornos aos consumidores, como exemplo o torque dos motores, visto que este é proporcional ao quadrado da tensão. Logo, no momento de um curto circuito, o funcionamento pode ser seriamente comprometido, assim como os sistemas de iluminação, computacional e de controle em geral que são particularmente sensíveis a estes afundamentos (SATO; FREITAS, 2015).

Percebe-se que tal problema está diretamente relacionado com consideráveis prejuízos econômicos devido ao mau funcionamento ou até mesmo a queima de equipamentos quando ocorrem distúrbios na tensão (HIRT, 2015). Conclui-se que os estudos relacionados a QEE em linhas de transmissão são de extrema valia, visto que, a energia elétrica é um recurso amplamente utilizado por diversos tipos de consumidores, dispositivos e equipamentos que podem sofrer com a má qualidade do fornecimento energético, bem como o comprometimento da segurança das pessoas diante das consequências proporcionadas pelos curtos circuitos. portanto, o presente trabalho, realizado diante do contexto citado, possibilitou a continuação de estudos e análises sobre transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Anexo VIII da resolução normativa nº 956, de 7 de dezembro 2021. **PRODIST Módulo 8: qualidade do fornecimento de energia elétrica.** Brasil, 2021.

FRAZÃO, R. J. A. **Proteção do sistema elétrico de potência.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.

HIRT, Wilson Eduardo Dreissig. **Análise de curto-circuito e afundamentos de tensão em sistemas elétricos de potência: um estudo aplicado à expansão da geração no Rio Grande do Sul.** 2015. Trabalhos de conclusão de curso (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/127658>. Acesso em: 08 abr.2022.

KEMPNER, Thais Regina. **Análise da robustez e da sensibilidade de sistemas de distribuição para a alocação otimizada de medidores frente às variações de tensão de curta duração.** 2016. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-29072016-163831/publico/Thais.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2022.

Manitoba Hydro international Ltda. **IEEE 09 Bus System.** Disponível em: https://www.pscad.com/uploads/knowledge_base/ieee_9_bus_technical_note.pdf. Acesso em: 10 out.2021.

NASCIMENTO, Helder M. A. do; DILLI, Murilo .de. A; SILVA. Jádriel C. da. Tutorial de simulação no software ATPDraw TM do sistema de distribuição IEEE 34 barras. In: Anais Da XIV Conferência Brasileira Sobre Qualidade Da Energia Elétrica, 2021, Online. **Anais eletrônicos**. Campinas, Galoá, 2021. Disponível em: <https://proceedings.science/cbqee-2021/papers/tutorial-de-simulacao-no-software-atpdraw-tm-do-sistema-de-distribuicao-ieee-34-barras>. Acesso em: 13 abr. 2022.

SATO, Fujio; FREITAS, Walmir. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier. 2015.

MODELING THE IEEE 9 BUS SYSTEM IN ATPDRAW

Abstract: *The Covid-19 Pandemic, caused by the etiological agent SARS-CoV-2, impacted several spheres, among them the conventional teaching methods. One of the consequences was the search for alternatives to supply the absence of face-to-face practices and studies. In this conjuncture, the energy agendas have instigated research related to one of the figures of merit of the electric power quality, whose theme is the main agenda and object of analysis of the present work, once the failure triggers several negative consequences. The free software Alternative Transient Program - ATPDraw was used for the simulation of a nine-bar IEEE model transmission line, for the implementation of short circuits that were classified according to the voltage variation in short durations, according to the National Agency of Electric Energy - ANEEL. As a method to control the period of occurrence of the fault and the amplitude of the disturbances in the transmission lines, it was elaborated circuits switched with resistors by means of the tools available in ATPDraw. The behavior of the voltages and currents at a certain point of the transmission line was evidenced without the application of short circuits. During a fraction of a second, the stability of the supplied power was identified. Short circuits were implemented to the transmission line and it was observed not only the behavior of the phases, when only one of them is subjected to a fault, but also the fast reestablishment of the normal operating values of the system when it was interrupted. It was verified the occurrence in the amplitude changes of the supplied voltage in the fault period, as the short circuit resistance was modified. It was concluded that the amplitude of the supplied voltage, when subjected to a disturbance, depends on the electrical characteristics of the system, such as impedances and the location of the observation point.*

Keywords: Voltage sags, ATPDraw, short circuits, transmission line, power quality.