

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS DE PAULA

**CARACTERIZAÇÃO DE FALTAS USANDO ONDAS VIAJANTES E DIAGRAMA
DE LATTICE BEWLEY**

MEDIANEIRA

2022

LUCAS DE PAULA

**CARACTERIZAÇÃO DE FALTAS USANDO ONDAS VIAJANTES E DIAGRAMA
DE LATTICE BEWLEY**

Description of faults using traveling waves and Lattice's Bewley diagram

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Hugo Andres Ruiz Florez.

Coorientador: Evandro Andre Konopatzki.

MEDIANEIRA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUCAS DE PAULA

**CARACTERIZAÇÃO DE FALTAS USANDO ONDAS VIAJANTES E DIAGRAMA
DE LATTICE BEWLEY**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 22/novembro/2022

Hugo Andres Ruiz Florez
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Evandro Andre Konopatzki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Naufal Santelo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cristiane Lionço de Oliveira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2022

Dedico este trabalho à Deus, minha família, e amigos próximos pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Hugo Andres Ruiz Florez, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Evandro André Konopatzki pelo conhecimento e dedicação em que me auxiliou nesta etapa.

Agradeço ao meu pai Edson Fontão de Paula por acreditar em mim e manter focado em meus objetivos.

Agradeço aos meus colegas de graduação Caesar Thiago Furlanetto e Matheus Luan Nandi Domenegatto que me deram suporte em momentos difíceis.

Por fim, agradeço à Deus por me iluminar e dar saúde para concluir esta etapa.

Esteja sempre pensando em como você pode
fazer melhor.
(MUSK; ELON, 2020).

RESUMO

Faltas em linhas de transmissão podem ocasionar apagões de energia, sobretensões e sobrecorrentes para o sistema elétrico de potência, determinar rapidamente e precisamente a localização de uma falta é essencial para uma intervenção rápida, permitindo isolar o trecho de falta e reestabelecer – mesmo que parcialmente – o sistema a fim de garantir a integridade e a confiabilidade de energia elétrica. O objetivo deste projeto foi simular diversas faltas do tipo fase-terra usando o método das ondas viajantes, representado pelo diagrama de Lattice Bewley, utilizando dados hipotéticos de uma linha de transmissão de 100 km de comprimento, operando em 220 kV / 50 Hz. A metodologia consistiu na caracterização dos parâmetros elétricos e identificação da constante de velocidade de propagação da onda na linha de transmissão escolhida como estudo de caso, por meio do software PS Simul. Um algoritmo foi desenvolvido no software Matlab para lançamento dos pontos de falta. Posteriormente foram construídos 5 cenários de falta na linha de transmissão, sendo eles: 10%, 20%, 50%, 80% e 90% do comprimento total da linha. Nos resultados foram discutidas as reflexões e refrações apresentadas no diagrama de Lattice Bewley desenvolvido pelo algoritmo e validadas com o software PS Simul. Como conclusão foi possível estimar o tempo de localização de uma falta com medição de ondas viajantes em um terminal. Como proposta de trabalhos futuros sugere-se que as simulações no algoritmo de baixo custo computacional sejam expandidas para outras tipologias de linhas de transmissão visando sua implementação em relés dedicados à detecção de faltas.

Palavras-chave: sistemas de energia elétrica; sistemas de energia elétrica - proteção; circuitos elétricos - análise; inteligência computacional.

ABSTRACT

Faults in transmission lines can cause power outage, overvoltages and overcurrents for the electrical power system, quickly and precisely determining the location of a fault is essential for a fast intervention, allowing to isolate the fault section and restore – even partially – the system in order to guarantee the integrity and reliability of electrical power. The objective of this project was to simulate several phase-to-earth faults using the traveling wave method, represented by the Lattice Bewley diagram, using hypothetical data from a 100 km long transmission line, operating at 220 kV / 50 Hz. The methodology consisted of characterizing the electrical parameters and identifying the wave propagation velocity constant on the transmission line chosen as a case study, using the PS Simul software. An algorithm was developed in Matlab software to launch the fault points. Posteriorly, 5 transmission line fault scenarios were built, namely: 10%, 20%, 50%, 80% and 90% of the total line length. In the results, the reflections and refractions presented in the Lattice Bewley diagram developed by the algorithm and validated with the PS Simul software were discussed. As a conclusion, it was possible to estimate the fault location time by measuring traveling waves at a terminal. As a proposal for future work, it is suggested that the simulations in the low computational cost algorithm be expanded to other types of transmission lines, aiming at their implementation in relays dedicated to fault detection.

Keywords: electric power systems; electric power systems protection; electric circuits analysis; computational intelligence.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação da amplitude (A), do comprimento de onda (λ) e período (T) da onda senoidal.....	16
Figura 2 - Representação da reflexão e da refração do raio em fronteiras de meios	17
Figura 3 - Diagrama de Lattice Bewley	17
Figura 4 - Caracterização da pré-falta	18
Figura 5 - Exemplos de cadeias de isoladores com marcas de defeito	19
Figura 6 - Representação da transformada de Wavelet.....	21
Figura 7 - Representação do relé digital SEL, modelo 851	24
Figura 8 - Diagrama unifilar de uma LT e representação da proteção.....	24
Figura 9 - Diagrama de Lattice	25
Figura 10 - Oscilografia com exemplo de falta na linha de transmissão	26
Figura 11 - Fluxograma da pesquisa	29
Figura 12 - Arranjo dos condutores da LT	30
Figura 13 - Diâmetro dos condutores da LT usada na pesquisa	31
Figura 14 - Posição e flexa da LT usada na pesquisa.....	31
Figura 15 - Tipo de torre 3 L1 usada na pesquisa.....	32
Figura 16 - Oscilografia da falta simulada na LT	32
Figura 17 - Representação em blocos de um algoritmo genérico.....	33
Figura 18 - Diagrama de Lattice Bewley gerado para uma falta simulada a 10% do Terminal A.....	37
Figura 19 - Diagrama de Lattice Bewley gerado para uma falta simulada a 20% do Terminal A.....	38
Figura 20 - Diagrama de Lattice Bewley gerado para uma falta simulada a 50% do Terminal A.....	38
Figura 21 - Diagrama de Lattice Bewley gerado para uma falta simulada a 80% do Terminal A.....	39
Figura 22 - Diagrama de Lattice Bewley gerado para uma falta simulada a 20% do Terminal A.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da simulação - PS Simul.....	27
Tabela 2 - Características da LT	30
Tabela 3 - Características da onda viajante e localização da falta.....	34
Tabela 4 - Parâmetros escolhidos	35
Tabela 5 - Características da onda viajante e localização da falta.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Ondas viajantes.....	15
2.2	Transformadas de wavelet.....	19
2.3	Relés de proteção.....	22
2.4	Software ps simul da Conprove.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	Caracterização dos parâmetros elétricos da linha de transmissão.....	29
3.2	Falta simulada.....	32
3.3	Desenvolvimento do algoritmo para cálculo do tempo de propagação do impulso viajante.....	33
3.4	Definição dos cenários de falta-terra.....	33
3.5	Cálculo dos tempos de propagações da onda viajante.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1	Algoritmo para cálculo do tempo de propagação do impulso viajante...35	
4.2	Coeficiente de propagação e tempos de propagação das ondas viajantes.....	36
4.3	Validação do algoritmo usando o ps simul.....	37
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	40
	REFERÊNCIAS.....	42
	ANEXO A - Trechos do algoritmo desenvolvido no matlab.....	44

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência é um conjunto de equipamentos e instalações elétricas, composto por geração, transmissão e distribuição. Ele é composto por sistemas, componentes e equipamentos. A sua principal função é garantir e comprometer-se ao fornecimento da energia elétrica ao consumidor final sem ou com o mínimo possível de interrupções ou falhas. (Bichels, 2017).

A geração tem por finalidade converter alguma forma de energia (eólica, solar, hidrelétrica, nuclear, dentre outras formas) em energia elétrica. A transmissão é o principal elo entre a geração e a distribuição, com o intuito de transportar a energia entre os centros de geração e de consumo, também tem o papel de elevar a tensão elétrica para reduzir perdas por dissipações. A distribuição é composta por vários equipamentos, reduzindo a tensão elétrica a níveis de uso comercial, industrial ou residencial para o consumidor final. (Chapman, 2013)

Uma falta pode afetar uma série de equipamentos e circuitos elétricos. Com a função de evitar problemas graves, como sobrecorrentes, atingindo valores que ultrapassem uma quantidade limite de corrente elétrica que são calculados no dimensionamento da proteção. Os sistemas de proteção devem ser bem dimensionados e projetados para que operem de maneira rápida e eficaz, isolando a falta com alta precisão. As duas funções principais do sistema de proteção é isolar ou desconectar um trecho ou todo circuito elétrico submetido a uma irregularidade e fornecer informações para identificar falhas e efetuar devidas correções (Mamede; João Filho 2020).

Os quatro subsistemas do Brasil (Sul, Sudeste/Centro-oeste, Nordeste e Norte) que compõem o SIN (Sistema Interligado Nacional) tem a função de interligar o sistema elétrico de potência, permitindo mais flexibilidade operacional devido as interconexões e permitindo também a diminuição dos riscos de falta de energia elétrica disponível em um subsistema qualquer. Entretanto, com a interligação do sistema elétrico, os problemas ocasionados por curtos-circuitos ou faltas podem afetar o sistema de maneira global, prejudicando toda cadeia do sistema elétrico de potência. Para resolver esta problemática de curtos-circuitos, há necessidade de dimensionar, parametrizar e configurar o sistema elétrico proteção para evitar danos ao SEP (Guarini, 2009).

Os sistemas de proteção são formados por três partes principais, sendo elas, os relés, os sistemas de comunicação e os serviços auxiliares. Os relés são capazes de isolar determinada parte do sistema elétrico, coletar e enviar informações para análise da falta.

Os primeiros relés desenvolvidos para os sistemas de proteção foram os eletromecânicos, no ano de 1901. Os quais surgiram apenas com a finalidade de proteger a rede elétrica abrindo o contato de forma primitiva sem monitorar a rede constantemente e de maneira analítica, por meio dos valores de tensão e corrente (Caminha, 2021).

Atualmente, com o avanço da tecnologia, nesta área são largamente utilizados os relés digitais que possuem microprocessadores que calculam parâmetros de tensão, corrente e tempo de duração do curto-circuito e atuam na falta de modo eficiente (Iberê C. Oliveira, 2021). Este projeto centralizou os estudos em técnicas para localização de faltas utilizadas nos relés digitais, especialmente com o uso de ondas viajantes.

O método baseado em altas frequências, é mais utilizado em relés digitais, abordando a diferença entre o tempo de propagação da onda viajante na linha de transmissão na ocorrência de uma falta, utilizando as equações da velocidade da luz. Podendo gerar uma estimativa mais precisa da localização da falta, com menores erros causados por fatores externos, pois este método é menos afetado por fatores externos que possam prejudicar a estimativa da localização de falta. (Da Silveira; Marcio, 2001)

As linhas de transmissão são redes e circuitos elétricos que ligam a geração de energia até grandes centros consumidores. Logo, determinar uma falta ou curto-circuito em um ponto de uma linha de transmissão pode se tornar um grande desafio, caso não haja uma boa técnica para estimar com precisão uma determinada falta em uma linha de transmissão.

Sob a hipótese de que é possível caracterizar as faltas em linhas de transmissão usando ondas viajantes e diagrama de lattice bewley de forma rápida e segura este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo geral: Simular diversos cenários de faltas fase e terra utilizando dados hipotéticos de uma linha de transmissão por meio do método das ondas viajantes através do software em versão gratuita PS SIMUL® da empresa Conprove.

A sua validação foi feita por meio do desenvolvimento de um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão trifásica por meio do software MATLAB® , em versão de estudante disponível pela UTFPR, utilizando o método da impedância da LT. Dessa forma os objetivos específicos foram:

- Caracterizar os parâmetros elétricos da linha de transmissão com características hipotéticas: linha trifásica com frequência 50 Hz, estruturas do tipo autoportante 3L1 e condutores singelos de alumínio com diâmetro externo de 24,21 mm. Condutores fase distantes horizontalmente 10 (cada), com flexa máxima de 17,0 m e impedância total de 105,1 m Ω /km;
- Desenvolver algoritmo para cálculo do tempo de propagação do impulso viajante e das impedâncias de falta usando o software MatLab;
- Definir os 5 cenários de falta-terra (10%, 20%, 50%, 80% e 90% da LT) para simulação, caracterizando o coeficiente de propagação da onda viajante por meio do software PS Simul;
- Calcular os tempos de propagações da onda viajantes para cada falta simulada, apresentando os resultados por meio do diagrama de Lattice Bewley.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo descreve uma revisão da literatura referente aos conceitos mais expressivos e relevantes para a pesquisa. Localização de faltas em linha de transmissão, tipos de faltas, estudos de oscilografia para proteção no sistema elétrico de potência e ondas viajantes.

O futuro dos sistemas elétricos de transmissão deve ser baseado nos estudos passados, considerando os sucessos e falhas, nos conhecimentos de ponta dos sistemas existentes e todos os componentes compreendidos das últimas tecnologias e possíveis aplicações.

Os sistemas elétricos de potência e em particular os sistemas de transmissão e conexão com os de distribuição é uma parte vital e importante para integrar a sociedade (Duncan, 2012).

Ao ocorrer uma falta, as empresas concessionárias de distribuição buscam uma sistemática que seja possível isolar, com agilidade e precisão, as partes do sistema que esteja com defeito e garantir o reestabelecimento de forma a atender a demanda de carga necessária. Isso tem como efeito a redução de custos e a diminuição de riscos em colapsar o sistema, garantindo maior confiabilidade e satisfação ao consumidor (Gonzaga, 2007).

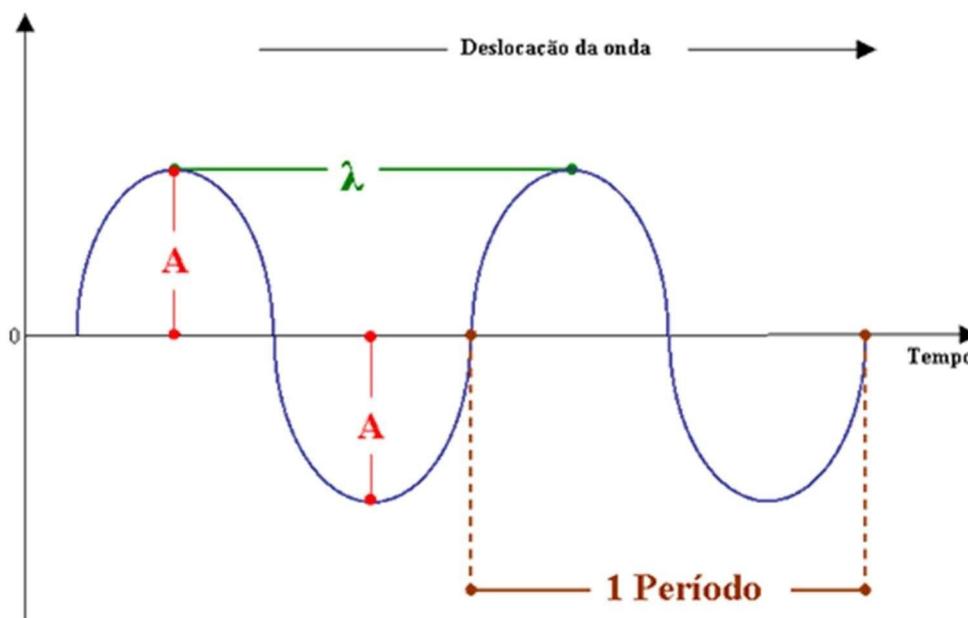
A localização de faltas auxilia os operadores do sistema elétrico de potência, reduzindo a ocorrência no distúrbio de tensão e corrente e também contribuindo na continuidade e no fornecimento de energia elétrica (Costa, 2012).

As faltas em linhas de transmissão podem bloquear o fornecimento de eletricidade em um determinado circuito ou região de uma cidade. Embora, possam por alguma ocorrência não bloquearem, devido a redundância do sistema que pode encontrar caminhos alternativos para energia em outras LTs, a confiabilidade do sistema é afetada, podendo até mesmo gerar sobrecargas nos sistemas de operação (Alves, 2017).

2.1 Ondas viajantes

A Figura 1, mostra uma onda qualquer sendo propagada em um meio físico. Algumas informações podem ser extraídas de uma simples onda, como comprimento da onda (λ), amplitude (A) e o deslocamento.

Figura 1 - Representação da amplitude (A), do comprimento de onda (λ) e período (T) da onda senoidal



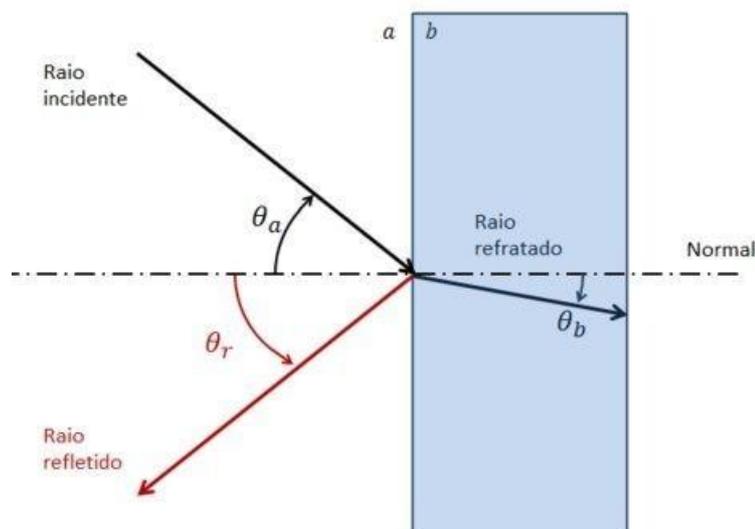
Fonte: Gouveia (2020)

Uma onda viajante ou do inglês conhecida por “Traveling wave” é originada por qualquer distúrbio em uma linha de transmissão que se propaguem na direção da extremidade da linha, sendo causada por um curto circuito ou uma descarga atmosférica, existem dois fenômenos físicos que afetam as ondas viajantes que são a reflexão e a refração (Valins, 2005).

Após ocorrer a formação de uma onda viajante, a partir de uma perturbação qualquer na linha de transmissão, dois fenômenos físicos muito importantes, contecem até que a onda viajante alcance os terminais de detecção, podendo ser um relé digital ou uma remota (Conprove; Engenharia, 2021).

A Figura 2 mostra os procedimentos de reflexão e refração de uma onda qualquer e também de uma onda eletromagnética.

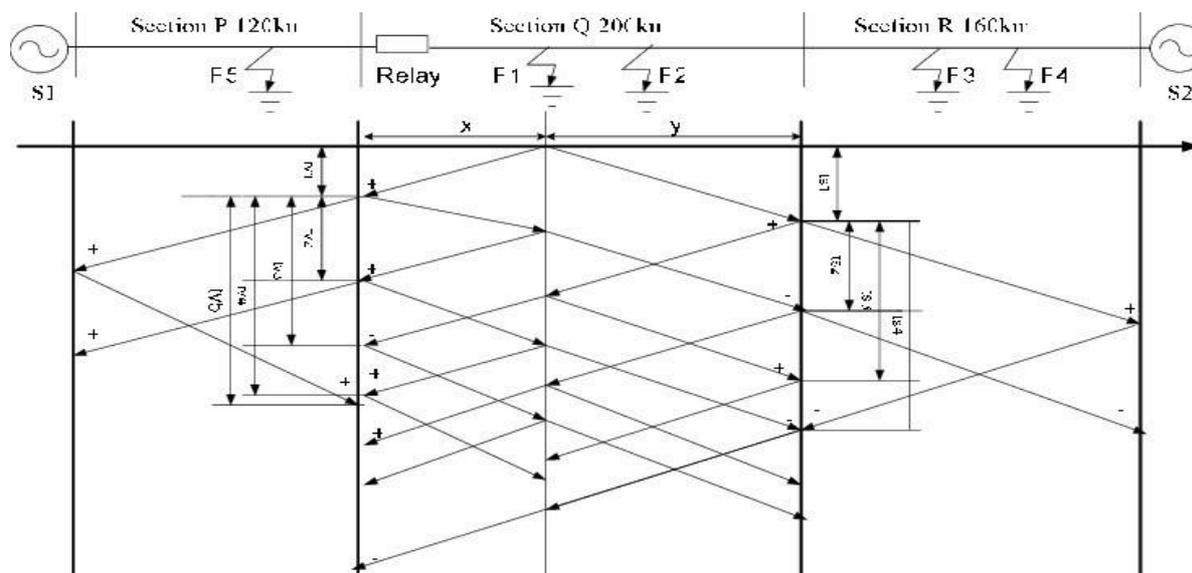
Figura 2 - Representação da reflexão e da refração do raio em fronteiras de meios



Fonte: Halliday (2008)

Uma boa técnica para estudar ondas viajantes, seguindo um padrão de escalas e determinar a localização de uma falta, perante uma oscilografia de relés de proteção é o chamado diagrama Lattice Bewley. A Figura 3 mostra um diagrama de Lattice Bewley, no qual os dois principais fenômenos ocorrem que são a reflexão e a refração.

Figura 3 - Diagrama de Lattice Bewley

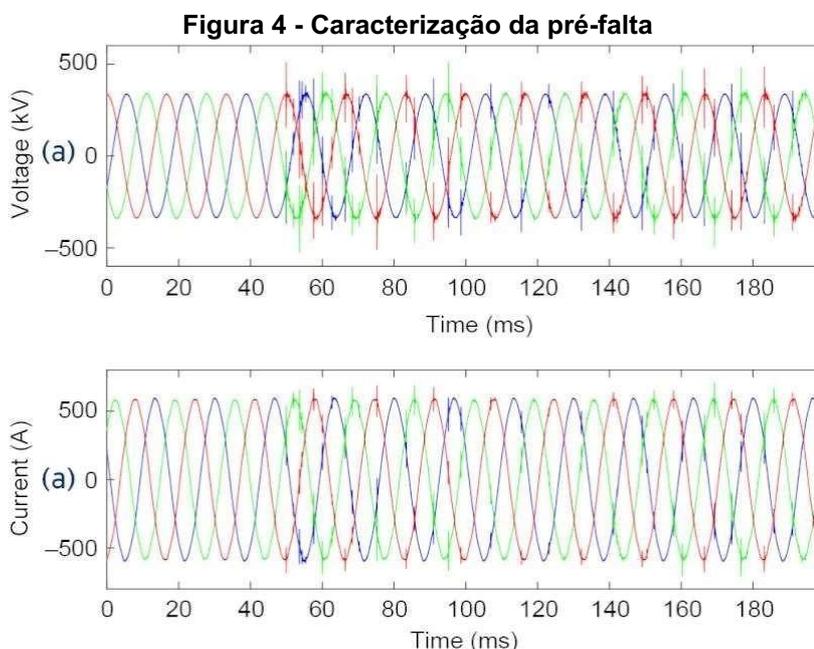


Fonte: IEEE (2019)

Devido à alta taxa de amostragem que alguns relés possuem, principalmente os mais modernos é possível detectar ondas viajantes com uma grande rapidez e precisão. A alta taxa de amostragem na ordem de Mega-hertz (MHz) permite que uma falta seja detectada até mesmo antes de ocorrer a falta, chamada de análise pré-falta.

Como exemplos de aplicação da alta taxa de amostragem, registrados em uma oscilografia são distúrbios de corrente e tensão ocasionados por sujeira em isoladores nas linhas de transmissão. Esses acúmulos de sujeira provocam deformações nos formatos de onda senoidais de tensão das fases A, B e C. Essas deformações podem ser sinais de anomalias na rede e um princípio de falta futuramente, pois se caracteriza como a necessidade de manutenção preditiva. Permitindo que as equipes de manutenção corrijam o problema antes de ocorrer a falta, evitando possíveis danos a rede gerados por um curto circuito.

A Figura 4 mostra uma oscilografia que apresenta distúrbios de corrente e tensão permitindo que uma análise pré-falta seja feita, evitando custos de manutenção corretiva (SEL, 2019).



Fonte: SEL (2019)

A Figura 5 mostra alguns isoladores com sinais de desgastes, quais já sofreram processos de curto-circuitos ou descargas elétricas, sendo necessário efetuar sua troca. Essa cadeia de isoladores com problemas e mostrando sinais de

troca dos equipamentos pode ser visualizada, antes mesmo que ocorra uma falta, através de uma análise de oscilografia, esse estudo é chamado de análise pré-falta, característico de um ou mais equipamentos que já apresenta sinais de manutenção, sendo emitidos informações pela oscilografia, através de ondas viajantes. Os isoladores da figura 6 podem estar com sujeira, microfissuras, trincas ou desgastes que futuramente podem gerar problemas para linhas de transmissão, sendo todos esses problemas, visualizados pela oscilografia, utilizando o método das ondas viajantes.

Figura 5 - Exemplos de cadeias de isoladores com marcas de defeito



Fonte: SEL (2019)

Outro problema, muito comum nas ocorrências de falta em um sistema de potência são galhos, árvores ou aves que possam se aproximar das LTs, ocasionando faltas. Através do método das ondas viajantes, é possível detectar um galho que supostamente se aproximaria das LTs, sendo percebido por distúrbios na oscilografia, ocasionados por alterações no campo elétrico e magnético que envolvem os condutores de linhas de transmissão.

2.2 Transformadas de wavelet

A palavra Wavelet tem origem na palavra francesa “Ondalette” que tem o significado de pequena onda. As transformadas de Wavelet, possuem muitas aplicações, como análise de dados sísmicos, mercado financeiro, cálculo, controle e instrumentação, engenharia nuclear, análise de imagens, engenharia elétrica, redes neurais e dentre outras (Oliveira; USP, 2015).

As transformadas de Wavelet geraram uma nova base de conhecimento na área matemática para análise de sinais, entretanto os estudos nessa área se originaram com as transformadas de Fourier no ano de 1807, logo as transformadas de Wavelet são basicamente uma técnica mais aprimorada ou avançada das transformadas de Fourier, dependendo do emprego dessas transformadas podem resultar em excelentes análises de sinais promovendo previsões de eventos. (Hoffman, 2019).

Para fazer uma análise de um sinal é interessante estudar as ondas e perturbações que possam ocorrer no domínio da frequência. As transformadas de Fourier é uma função integrativa que divide o sinal em componentes no domínio da frequência, ou seja, ela transforma um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência. Como uma forma de representar as componentes de um sinal na frequência utiliza-se um termo quando se refere ao domínio da frequência, chamado de espectro de frequência. (Ribeiro, 2014).

Muitas vezes, as informações que precisam ser analisadas não estão claras no eixo do tempo, assim é importante visualizar no eixo da frequência, logo a transformada de Fourier é importante para fazer esta transformação, pois muitas vezes a informação está oculta, analisando apenas no domínio do tempo, porém se apresenta facilmente quando transformada para a frequência. (Doering, 2005).

As transformadas de Fourier são aplicáveis em sinais periódicos com duração infinita e ondas estacionárias (as componentes de frequência não mudam com o tempo). As transformadas de Fourier, servem para determinar apenas as componentes da frequência, sem determinar o instante do evento ou tempo exato das componentes. Entretanto, para uma análise é importante determinar o intervalo de tempo das componentes.

Já com as transformadas de Wavelet é possível determinar de forma precisa o instante de tempo das componentes em frequência de um sinal não estacionário, característico de uma falta em LTs (Metello, 2012).

Como pode ser observado na Figura 6 As transformadas de Wavelet possuem características únicas, fazendo com que se tornem uma técnica extremamente útil para séries temporais, mostrando informações que podem variar tanto no domínio do tempo quanto na frequência.

Figura 6 - Representação da transformada de Wavelet



Fonte: PUC (2018)

A Figura 6, mostra que as transformadas de Wavelet, permitem representar um sinal em diferentes escalas de tempo, podendo trabalhar o sinal com melhores resoluções. Em síntese, as Wavelets permitem comprimir o estudo de um sinal de onda em uma pequena escala de tempo localizada, ou seja, permite focar o estudo de um sinal em uma pequena escala de tempo, sintetizando as informações de forma matemática. As Wavelets são ondas em pequenos espaços de tempo com energia fixas, resolvidas em um espaço de um quadrado integrável (Graps, 1995).

Para que uma função de Wavelet possua a garantia de ser uma função de onda deve preencher o requisito matemático de resultar a função integral em zero, este é chamado critério da admissibilidade, conforme a equação (1):

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

A transformada de Wavelet separa o sinal em diferentes resoluções e escalas, permitindo uma melhor análise do sinal. A transformada de Wavelet genérica de um sinal é definida pela função $\psi_{ab}(t)$, é descrita pela equação (2).

Sendo que os parâmetros a e b da equação (2) servem para alterar o escalamento, permitindo expansão ou contração do sinal. Para uma análise computacional deve-se haver a discretização do sinal. Em uma análise de sistemas de potência essas informações são obtidas em oscilografia, a partir de taxas de amostragem em alta frequência em um período de regime transitório.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \text{ sendo } a \text{ e } b \in \mathbb{R} \text{ e } a \neq 0. \quad (2)$$

A transformada de wavelet é uma ferramenta, capaz de trabalhar com janelas de tempo e espaço variáveis.

Ou seja, na transformada de wavelet, destaca-se a escala que pode ser ajustável, conforme o estudo que se deseja ser feito. Como exemplo se for estudado um sinal, por meio de uma grande escala, poderiam ser observadas perturbações mais avantajadas, porém se for alterada para uma pequena escala, as perturbações poderiam ser analisadas de forma mais sutil, permitindo um estudo mais aprimorado.

Na transformada de Fourier, é construído o estudo do sinal em um novo domínio da frequência, decompondo em funções senos e cossenos. A base para utilizar as transformadas de wavelet em um novo domínio da frequência, são as chamadas wavelet mãe que é um estudo mais elaborado se comparado as transformadas de Fourier.

2.3 Relés de proteção

Os relés de proteção são dispositivos que devem ser instalados em linhas de transmissão e possuem o objetivo de acionar disjuntores. Nos casos de valores de corrente, tensão ou frequência acima do normal devem enviar um comando para abertura dos contatos de um ou mais disjuntores, visando proteger o circuito elétrico. Os relés também possuem a função de fornecer dados de operação do sistema e informações em casos de distúrbios de tensão, corrente, frequência ou demais problemas (Pronext, 2021).

Com o passar do tempo, novas pesquisas e desenvolvimentos (P&D), inovações e melhorias, implementações e soluções, vem ocorrendo nas novas gerações dos relés de proteção.

Os primeiros relés de proteção foram os relés eletromecânicos que se inseriram no mercado de energia elétrica, no ano de 1904 e permanecem em algumas instalações até os dias atuais. Existem dois principais tipos diferentes de relés eletromecânicos: relés os de indução eletromagnético e os relés de atração eletromagnética. (Coutinho, 2015)

Os relés de indução eletromagnética são baseados no princípio da lei de indução de Faraday, na qual afirma que havendo uma variação de fluxo magnético, ocorrerá uma força induzida perpendicular ao campo magnético.

Ao passar uma corrente induzida na bobina do relé acima da corrente máxima, irá ser aplicada uma força que irá rotacionar o disco devido ao torque aplicado, assim com o deslocamento do disco haverá abertura do contato. Os relés de atração magnética não possuem um disco metálico como os de indução eletromagnética. Esses relés são mais simples, pois sofrem abertura de seus contatos diretamente pela conversão de tensão ou corrente elétrica no movimento de seus contatos.

Com o avanço da tecnologia, se consolidou no mercado em sistemas de proteção os atuais relés digitais, nos quais possuem microprocessadores, sendo análogos aos computadores, pois processam informações de corrente e tensão, possuem memória e são capazes de converterem arquivos (Merlin, 2019).

Os relés digitais possuem inúmeras vantagens em comparação com os demais relés antecedentes. Sendo algumas delas, melhor confiabilidade em sua operação, pois abrangem maior quantidade de componentes internos.

Possuem formas de comunicação através de cabos de fibra ótica com informações em tempo real, análises de oscilografia, contendo informações de determinados eventos como faltas, sobretensões e sobrecorrentes. Mais facilidade em ajustes de trip (comando de acionamento de abertura de disjuntores via comando do relé de proteção), ajustes das funções de proteção.

Melhor estabilidade em sua vida útil, pois alguns problemas podem ser corrigidos via software e também são pouco afetados devido ao envelhecimento do equipamento. Possuem maior velocidade de atuação, sendo efetivo na eliminação de faltas que possam comprometer a linha de transmissão (Penariol, 2012).

Os relés digitais começaram a ser desenvolvidos na década de 1960 com a introdução dos computadores nas análises de sistemas elétricos de potência. Na época os computadores possuíam um custo elevado, logo a ideia inicial dos relés digitais era centralizar as análises dos vários relés de uma subestação em apenas um computador.

A partir da década de 1970, com a queda no custo e aumento na velocidade de processamento dos computadores, fez com que os relés digitais se tornassem a melhor opção e tornou-os majoritários no mercado de sistemas de proteção, devido também as inúmeras vantagens destacadas anteriormente (Gondim, 2010).

A Figura 7 mostra um relé digital, empregado em linhas de transmissão, podendo utilizar o método apresentado de ondas viajantes para determinar a localização de faltas.

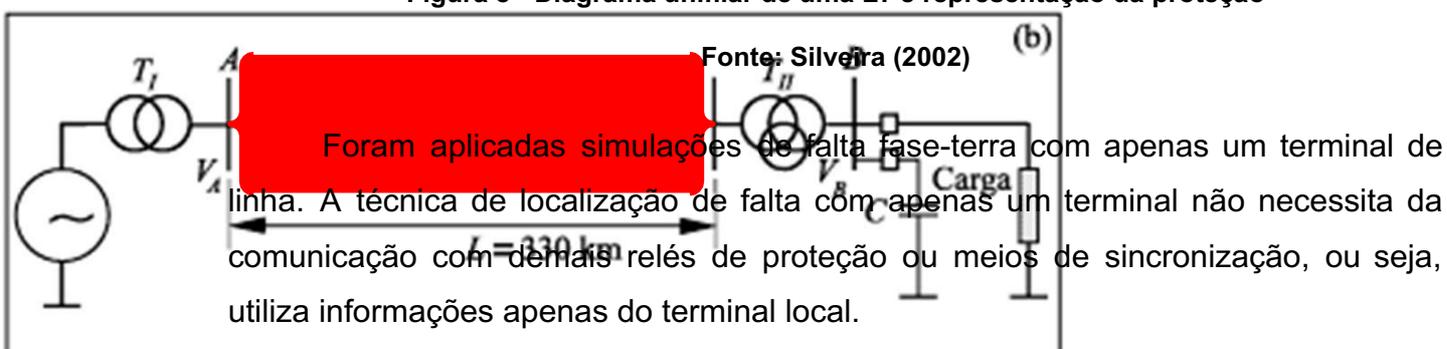
Figura 7 - Representação do relé digital SEL, modelo 851



Fonte: SEL (2022)

A Figura 8 mostra uma linha de transmissão, com um relé de proteção instalado em um determinado ponto da linha. A partir das características de impedância da linha e o tempo que a onda viajante leva para chegar ao relé é possível estimar a localização da falta.

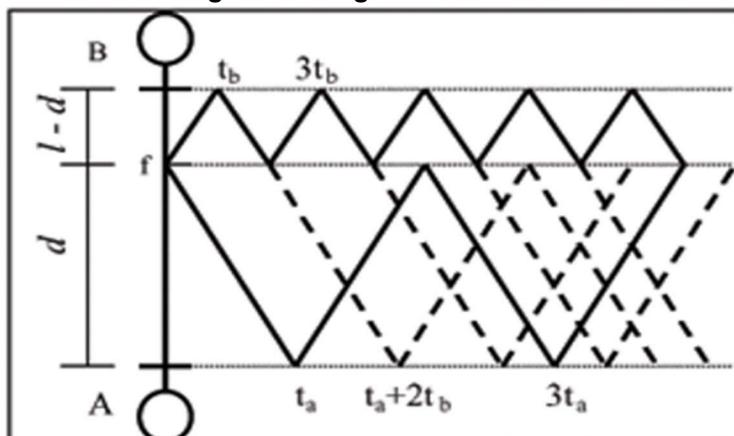
Figura 8 - Diagrama unifilar de uma LT e representação da proteção



Para determinar a localização da falta, utilizando o método das ondas viajantes é fundamental conhecer as características da linha de transmissão, como comprimento da LT, impedância, tensão e corrente de operação.

A Figura 9 mostra um diagrama de Lattice, no qual indica o ponto da localização da falta, sendo matematicamente definida pela distância total da linha (l) subtraído pelo ponto da falta (d).

Figura 9 - Diagrama de Lattice



Fonte: Scielo (2018)

A expressão matemática do ponto A para o ponto B é dada pela Equação 3:

$$d = l - d \quad (3)$$

Para determinar o ponto da falta é necessário saber o tempo de propagação da onda viajante até o terminal da linha, pois pela equação da velocidade, representada pela equação (4). Onde (Δx) é a distância percorrida, Δt é o intervalo de tempo da distância percorrida.

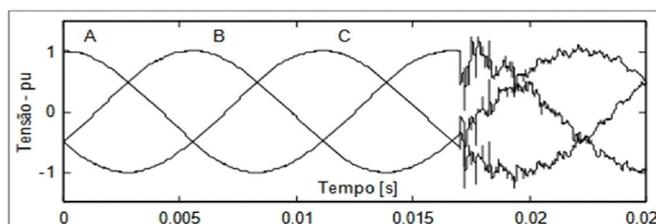
$$V = \Delta X / \Delta t \quad (4)$$

Para determinação da localização da falta é utilizada a equação (5), na qual (L) é o comprimento total da LT em km, (d) é a distância do local da falta, ($t_l - t_r$) é a diferença de detecção de tempo entre a onda viajante que foi refletida e a onda refratada pelo receptor, pertencente ao relé de proteção.

$$d = \frac{L - (t_2 - t_1) * V}{2} \quad (5)$$

A Figura 10 mostra uma oscilografia, do momento de ocorrência de uma falta, sendo representada por distúrbios nos gráficos de tensão em amplitude, representada em p.u. (por unidade).

Figura 10 - Oscilografia com exemplo de falta na linha de transmissão
 Figura 11: Exemplo de oscilografia apresentando uma falta na onda senoidal de tensão elétrica



Fonte: Silveira, 2001

Fonte: Silveira (2001)

2.4 Software Ps Simul da Conprove

O software PS Simul, possui diversos elementos elétricos em sua biblioteca de dados, como resistores, indutores, transformadores, relés digitais para serem conectados em circuitos elétricos em simulações. O software abrange as áreas de sistemas elétricos de potência, controle, microcontroladores e demais áreas na versão gratuita. Para o presente trabalho foram utilizados comandos relacionados as modelagens linha de transmissão, sistemas de proteção, plotagem gráfica das tensões e correntes elétricas.

O software PS Simul, possui blocos que representam os elementos que se desejam montar o circuito nas apresentações, como exemplos: resistores, indutores e capacitores. Os principais blocos utilizados neste presente trabalho são: as impedâncias da linha transmissão, indutâncias, capacitâncias, impedâncias de sequência positiva, impedâncias de sequência negativa e impedâncias de sequência zero da linha de transmissão.

Também o fator de propagação da onda viajante na linha de transmissão, diagrama de Lattice-Bewley, gráficos de corrente e gráficos de tensão para o caso simulado. As características da linha de transmissão para o caso simulado, foram extraídas do software PS Simul. Para o presente caso simulado, no software foi habilitado o sistema de falta, e o sistema de SIR (system impedance ratio).

Na entrada de dados foi escolhido o método de geometria, utilizando em 50 Hz de frequência, habilitou-se o efeito pelicular na linha de transmissão, escolheu-se pela transposição da LT, optou-se por não ter o terra segmentado, habilitou-se os parâmetros distribuídos, o modelo de calculo utilizado foi o de Wedepohl / Wilcox aproximado, o modo de visualização do fasor escolhido foi o de módulo e ângulo. A

resistividade do solo aplicada foi de 1,0 k Ω .m, o modelo de condutores aéreos é o aproximado Deri-Semlyen. A Tabela 1 resume os principais dados da simulação no software PS Simul.

Parâmetro	Função
Sistema de falta	Habilitado
Transposição da LT	Habilitado
Terra segmentado	Desabilitado
Parâmetros distribuídos	Habilitado
Modelo de cálculo	Wedepohl / Wilcox
Modo de visualização (fasor)	Modo e ângulo
Resistividade do Solo	1,0 k Ω .m
Modelo de condutor	Aéreo Deri-Semlyen
Método	Geometria
Frequência	50 Hz

Fonte: Autoria própria (2022)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a verificação de falta na linha de transmissão foi estabelecido que valores que ultrapapassem três vezes o modulo da corrente nominal, seriam definidos como uma falta. Com a finalidade de trabalhar e expressar números de forma mais simplificada, utilizou-se o sistema em p.u.

Este sistema, consiste em operar com valores base para as grandezas de tensão, corrente, impedância, potência e afins. Seguindo, da substituição das grandezas expressas pelo Sistema Internacional de Unidades para os seus respectivos valores base definidos. (Manuel, 2003)

A seguir, serão descritos a sequência de passos para ilustrar como foi elaborado o algoritmo para localização de falta por impedância no Matlab.

O primeiro passo é inserir os dados de entrada no software, sendo eles a corrente nominal das fases: A, B e C.

O Segundo passo, é realizar a transformação dos valores da unidade em Ampéres para seu respectivo valor em p.u., ou seja, dividir o pela corrente base.

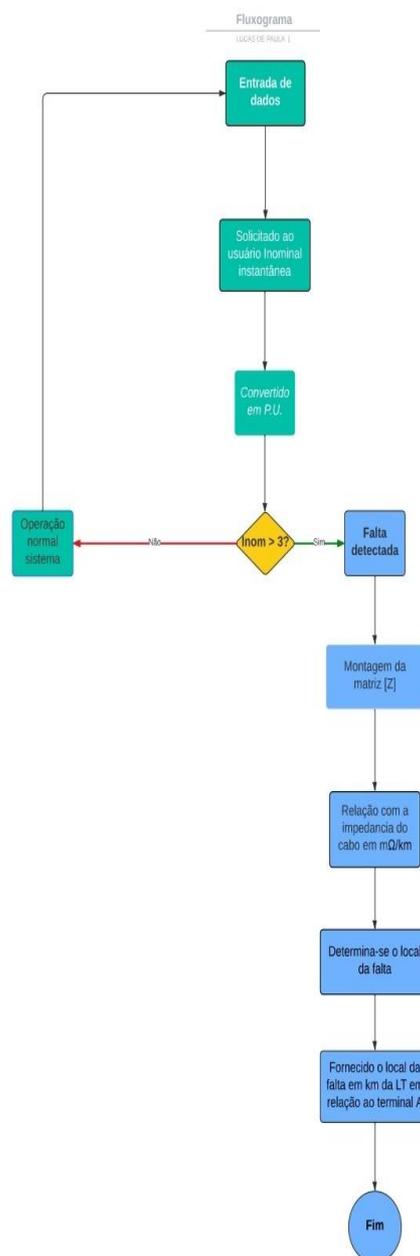
Terceiro passo, para detectar se houve uma falta o valor de corrente deve ser superior a três vezes a corrente nominal em modulo, caso seja superior a lógica de comando if – else irá imprimir uma mensagem escrita como “fault detected”.

Em quarto passo, será inserida e montada uma matriz de impedâncias da linha de transmissão expressa em $m\Omega/km$.

O quinto passo, será feita a operação de obter a corrente de curto circuito para calcular a localização da falta, através da operação de matrizes: $[I] = [V]*[Z]^{-1}$.

Os passos apresentados são mostrados na Figura 11. Com isso, é possível determinar a localização de uma falta, através do método das impedâncias.

Figura 11- Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2022)

3.1 Caracterização dos parâmetros elétricos da linha de transmissão

Para aplicar o método de ondas viajantes existem apenas três modelos que são possíveis de realizar método das ondas viajantes que são: Bergeron, frequência

modal e frequência de fases, os demais modelos como o modelo Pi não é possível de aplicar o método de ondas viajantes.

A modelagem da linha de transmissão escolhido para representar a circuito simulado foi o de Bergeron. A Tabela 2, mostra como foram distribuídos os condutores na linha de transmissão para o caso simulado. Onde P_o são os cabos na LT, X_t é a posição do cabo na LT posicionado horizontalmente, Y_t é a posição do cabo na LT posicionado verticalmente, D_{ext} é o diametro externo do condutor, R_{MG} é o raio médio geometrico, R_{Dc} é a impedância do condutor em miliohms por kilometro, U_r é a tensão no terminal receptor em pu, $Dist$ é a distância em milímetros da parte interna do condutor até a sua parte periférico e Ang é o ângulo entre os campos magnéticos resultantes dos condutores na LT :

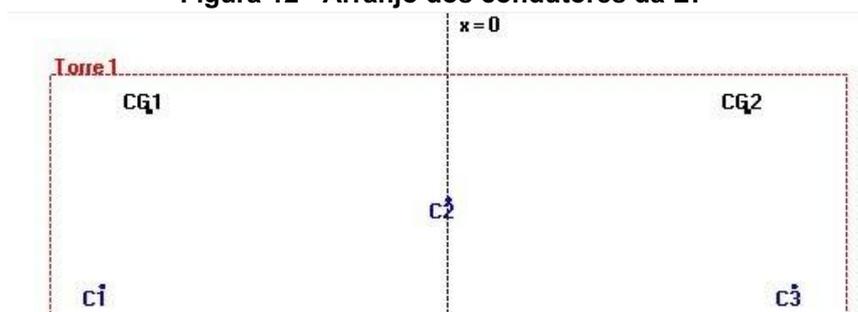
Tabela 2 - Características da LT

P_o	X_t (m)	Y_t (m)	Y_{min} (m)	D_{ext} (mm)	R_{MG} (m)	R_{Dc} (mΩ/km)	U_r	$Dist$ (mm)	Ang (°)
1	-10,0	34,5	17,5	24,21	0	105,1	1	457,0	45,0°
2	0	39,4	22,4	24,21	0	105,1	1	457,0	45,0°
3	10,0	34,5	17,5	24,21	0	105,1	1	457,0	45,0°
4	-8,65	44,4	27,4	24,21	0	105,1	1	457,0	45,0°
5	8,65	44,4	27,4	24,21	0	105,1	1	457,0	45,0°

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 12 ilustra como foram distribuídos os condutores e o espaçamento entre os mesmos na LT.

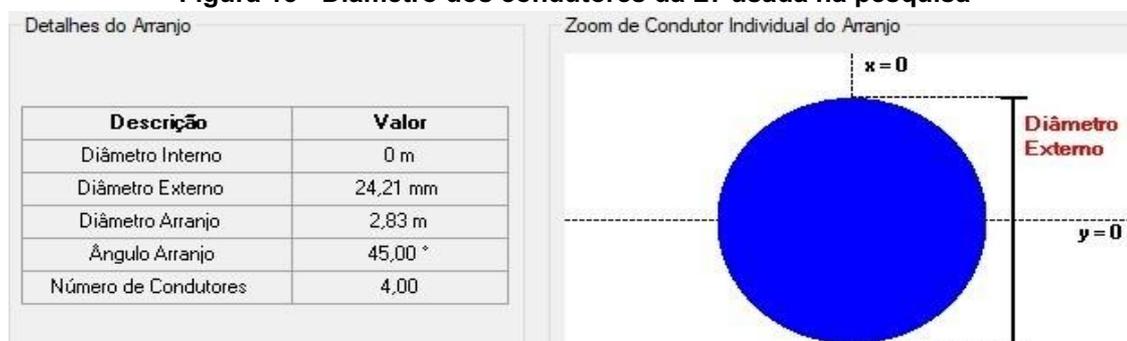
Figura 12 - Arranjo dos condutores da LT



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 13 mostra os tamanhos e os arranjos dos condutores para o caso simulado:

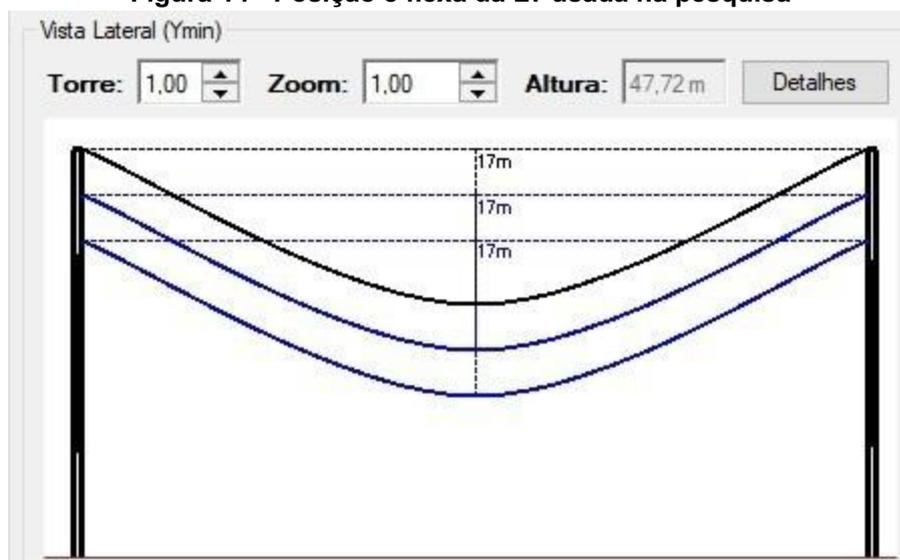
Figura 13 - Diâmetro dos condutores da LT usada na pesquisa



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 14 mostra como ficaram os arranjos de condutores para a linha de transmissão e a deformação em flexa para o espaçamento entre as torres:

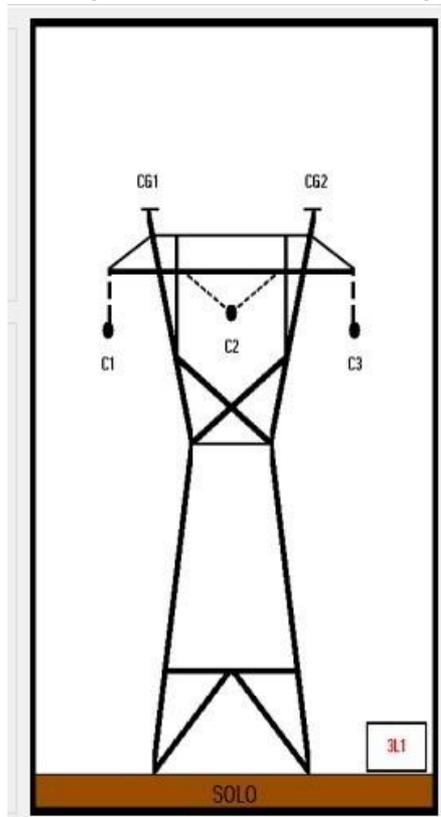
Figura 14 - Posição e flexa da LT usada na pesquisa



Fonte: Autoria própria (2022)

O tipo de torre escolhida para simular o caso foi a 3 L1, conforme mostra a Figura 15, disponibilizada pelo software, no comando “importar geometria”.

Figura 15 - Tipo de torre 3 L1 usada na pesquisa



Fonte: Autoria própria (2022)

3.2 Falta simulada

Em que analisa-se deformações nos formatos de onda senoidais, obtidos através do gráfico, representado pela Figura 16.

Figura 16 - Oscilografia da falta simulada na LT



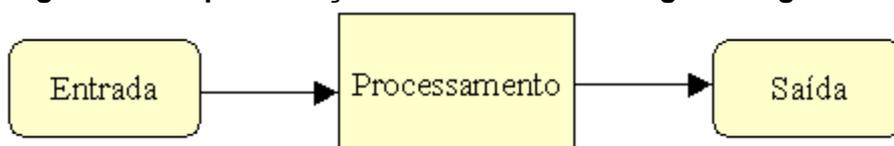
Fonte: Autoria própria

3.3 Desenvolvimento do algoritmo para cálculo do tempo de propagação do impulso viajante

Um algoritmo computacional é uma sequência lógica de comandos escritas em linguagem de computador por meio de um software que segue uma sequência finita, bem definida de instruções para resolver um determinado problema. Um algoritmo é uma estratégia para solução de um problema. Ou seja, ao desenvolver um algoritmo é necessário descrever ações precisas em que partindo de uma entrada inicial de dados vise a um resultado final (Siqueira, 2012).

Um algoritmo é uma sequência de ideias montadas a partir de um planejamento. Em destaque, a principal essência do algoritmo é o objetivo específico que ele deve ser pensado e construído. Ou seja, o ponto de partida do algoritmo é traçar um resultado final que é almejado. Logo, um algoritmo possui principalmente uma entrada (input) de dados que segue uma sequência de passos definida, resultando em um resultado como saída (output). A Figura 17 ilustra um diagrama de blocos que resume o escopo de resolução de um algoritmo genérico:

Figura 17 - Representação em blocos de um algoritmo genérico



Fonte: UNB - Universidade de Brasília (2013).

Para obter a validação dos dados construiu-se um algoritmo no MATLAB para detectar a localização de faltas, através do método de impedância da linha de transmissão com os dados já conhecidos do software PS Simul. Na figura 23, foi elaborado um fluxograma para ilustrar e organizar a forma de construção do algoritmo, desenvolvido.

3.4 Definição dos cenários de falta-terra

Foram desenvolvidos 5 diferentes cenários para simulações de falta, sendo elas nos cenários: 10%, 20%, 50%, 80% e 90% do comprimento total da linha de transmissão em relação ao terminal A.

A Tabela 3 mostra os 5 cenários simulados, em que o tempo inicial é o início da simulação no software. O tempo final é quando termina a simulação no software. Os tempos de 1º pulso são os tempos que levam para as ondas viajantes, se propagarem até os terminais da LT. O número de viagens de ondas principais são os números de ondas viajantes no sistema simulado.

Tabela 3 - Características da onda viajante e localização da falta

Cenários	1	2	3	4	5
Tempo inicial (ms)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Tempo final (ms)	2	2	2	2	2
Tempo 1º pulso (ms)	1	1	1	1	1
Número de viagens ondas principais	5	5	5	5	5
Local da falta em A (km):	10	20	50	80	90
Local da falta em B (km):	90	80	50	20	10

Fonte: Autoria própria (2022)

O fator de propagação é a razão entre a velocidade da onda viajante na LT pela velocidade da luz no vácuo. O tempo de propagação em A é o tempo que a onda viajante leva para sair do local da falta e chegar até o terminal A.

A localização da falta em A é a distância da falta até o terminal A. A localização da falta em B é a distância da falta até o terminal B.

3.5 Cálculo dos tempos de propagações da onda viajante

O softwares empregados para desenvolver as simulações e análises de elementos, utilizados em sistemas elétricos de potência é o Power System Simulator – PS SIMUL® da Conprove versão gratuita e o software MATLAB versão estudante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As subseções seguintes, mostram como foi construído o algoritmo e os valores extraídos das simulações e os tempos de propagações das ondas viajantes.

4.1 Algoritmo para cálculo do tempo de propagação do impulso viajante

O primeiro passo, é solicitado ao usuário para que informe a corrente nominal (I_n) e a tensão nominal (V_n) da linha de transmissão. Posteriormente, são solicitados ao usuário as correntes instantâneas das fases A, B e C. No segundo passo, do algoritmo é efetuada uma operação para converter os valores de corrente nominal de amperes para P.U. e os valores de tensão de operação de Volts para P.U., dividindo pelos seus respectivos valores base.

Após isso o algoritmo, informa se houve a ocorrência de uma falta, inserindo uma mensagem “fault detected”, caso não seja caracterizado como uma falta será inserido a mensagem “normally operation”.

Em seguida, foi fornecida as matrizes de admitância LT e o valor da impedância nesse trecho da linha em Ohms foi de 0.628520 Ω .

No cenário 02, em 20% da LT a impedância encontrada nesse trecho da linha em Ohms foi de 1.257040 Ω . No cenário 03, em 50% da LT a impedância encontrada nesse trecho da linha em Ohms foi de 3.142599 Ω .

No cenário 04, em 80% da LT a impedância encontrada nesse trecho da linha em Ohms foi de 4.287456 Ω . No cenário 05, em 90% da LT a impedância encontrada nesse trecho da linha em Ohms foi de 5.028159 Ω . No apêndice da seção 6, foram inseridas imagens de trechos do algoritmo.

Na Tabela 4 são demonstrados os valores utilizados em todos os cenários da simulação e validados pelo algoritmo Matlab. As principais características utilizadas da LT definidas, foram o comprimento total da linha de 100 km, a tensão de operação 220 kV, a corrente nominal de 1300 A, o fator de propagação que é a razão entre a velocidade de propagação da luz no condutor pela velocidade da luz no vácuo e o tipo de condutor utilizado, no estudo de caso.

Tabela 4 - parâmetros escolhidos

Comprimento da LT	Tensão de operação	Corrente nominal	Fator de propagação	Tipo de Condutor
100 km	220 kV	1300 A	0.984	Eagle

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir desses parâmetros apresentados na tabela 5, é possível estimar os tempos de propagações dos terminais A e B. Por meio da localização de falta, isto é a partir do método de impedância para encontrar a localização da falta desenvolvido pelo algoritmo no Matlab, torna-se capaz de estimar o tempo que uma onda viajante levaria do ponto de localização da falta até o terminal A e partir das informações da linha de transmissão calcular também o tempo referente ao terminal B.

O cálculo desenvolvido no Matlab para estimar os tempos de propagações de uma onda viajante, consiste em converter o fator de propagação no condutor escolhido para simulação, em velocidade da onda viajante no condutor. A partir da localização da falta, encontrado pelo método da impedância no Matlab, e com a velocidade da luz no condutor já convertida a partir do fator propagação. O algoritmo calcula uma estimativa do tempo de propagação entre o terminal A e o local da falta. Com o tempo de propagação no terminal A o algoritmo efetua um calculo matemático, utilizando o comprimento total da linha de transmissão e estima também o tempo de propagação para o terminal B.

4.2 Coeficiente de propagação e tempos de propagação das ondas viajantes

Na Tabela 5 são apresentados os fatores e o tempo de propagação da onda calculados do ponto da falta até o terminal A.

Tabela 5 - Características da onda viajante e localização da falta

Cenários	1	2	3	4	5
Fator de propagação	0,9844	0,9844	0,9844	0,9844	0,9844
Tempo de propag em A (μ S):	33,861	67,770	169,307	271,100	304,754

Fonte: Autoria própria (2022)

Esses parâmetros da tabela foram fornecidos pelo software PS Simul. No cenário 1, foi o resultado obtido no software PS Simul. Tempo de viagem do impulso até chegar no terminal A foi de 33,861 μ S, essa onda refletiu até o ponto da falta e retornou ao terminal B em 305,0 μ S.

Isto significa que uma onda viajante se propagou do local da falta até o ponto A e posteriormente no ponto B.

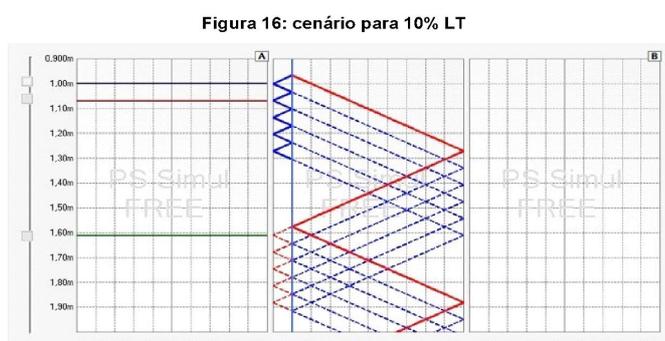
Logo, os tempos estão corretamente calculados, pois para o caso simulado em 90% do comprimento total da linha de transmissão o tempo de propagação do

local da falta até o ponto A foi de 305,0 μS e o tempo do local da falta até o ponto B foi de 33,89 μS , isto é estão simetricamente sincronizados.

4.3 Validação do algoritmo usando o ps simul

A Figura 18 ilustra o diagrama de Lattice Bewley que foram simuladas as condições para 10% do comprimento total da linha de transmissão em relação ao terminal A, representado por meio do diagrama de Bewley.

Figura 18 - Diagrama de Lattice Bewley gerado para uma falta simulada a 10% do Terminal A



Fonte: software PS Simul

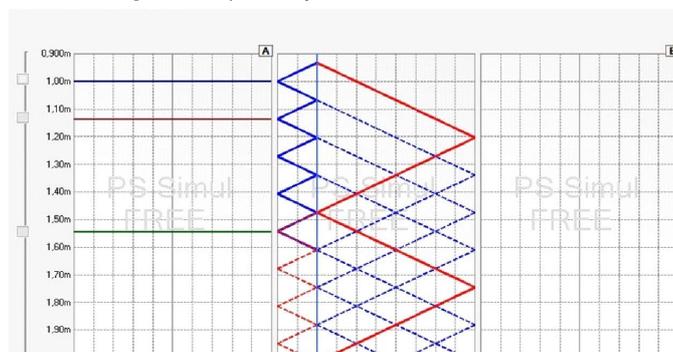
Fonte: Autoria própria (2022)

No caso simulado, analisando o diagrama de Bewley, nota-se que ocorrem sucessivas reflexões, conforme é representado na linha em vermelho. Já para linha em azul são representadas as sucessivas refrações da onda viajante na presente linha de transmissão. Assim, nesse caso simulado houve um tempo de propagação no terminal A de 33,89 μS , já para o terminal B foi de 305,0 μS .

Na figura 19 foi simulado o caso para 20% da linha de transmissão, analisando o diagrama de Bewley, observa-se que houve também sucessivas reflexões e refrações, indicadas pelas linhas em azul e em vermelho. Porém, para esse caso as linhas estão mais espaçadas em relação ao primeiro caso, pois a distância do local da falta foi maior em relação ao ponto A do que para 10% da linha de transmissão.

Figura 19 - Diagrama de Lattice Bewley gerado para uma falta simulada a 20% do Terminal A

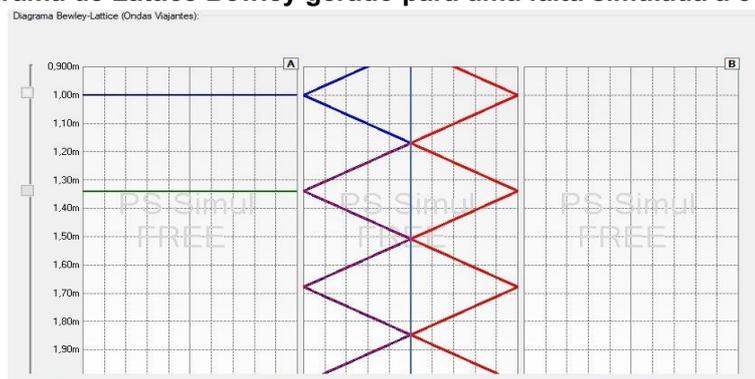
Figura 17: Representação de falta a 20% do terminal A



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 20 representa a simulação de uma falta na condição de 50% do comprimento total da LT:

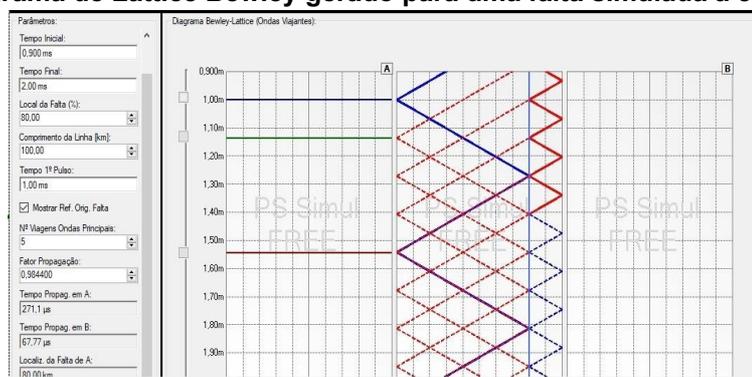
Figura 20 - Diagrama de Lattice Bewley gerado para uma falta simulada a 50% do Terminal A



Fonte: Autoria própria (2022)

Na figura 21 para o caso simulado em 80% da LT, observa-se que a distância entre as linhas azul e vermelha estão mais distanciadas do que nos demais casos, pois a falta estaria ocorrendo mais longe em relação ao terminal A. Outra observação é que as distâncias entre a falta simulada em 20% da LT são equidistantes, em relação ao ponto B.

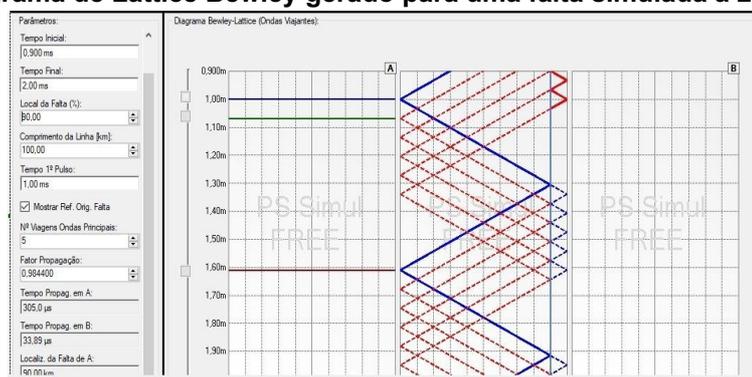
Figura 21 - Diagrama de Lattice Bewley gerado para uma falta simulada a 80% do Terminal A



Fonte: Software PS Simul (2022)

Na Figura 22, para o caso simulado em 90% da LT, verifica-se que as linhas traçadas em azul e vermelho, nas quais representam as refrações e reflexões das ondas viajantes estão mais distanciadas do que todos os outros casos anteriores. Desse modo, percebe-se que houve um tempo maior para que a onda se propague desde o terminal A até o ponto localizado da falta. Outra observação é que a falta, simulada em 90% da LT é equidistante em relação ao caso simulado em 10% da LT, em relação ao ponto B.

Figura 22 - Diagrama de Lattice Bewley gerado para uma falta simulada a 20% do Terminal A



Fonte: Autoria própria (2022)

No caso mais distante da falta, representado pelo cenário em 90% do comprimento total da linha de transmissão, os efeitos da falta nas amplitudes de corrente, puderam ser visualizados.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Foram realizados diversos cenários de simulações de faltas. O método de ondas viajantes desenvolvido no presente trabalho, mostrou ser uma boa técnica para localizar faltas em linhas de transmissão. Com o avanço dos relés digitais e a operação destes dispositivos em altas taxas de resolução em MHz, é possível empregar este método para melhorar o desempenho das LTs, quando forem sujeitas a faltas (curto circuitos), estimando com melhor e mais agilidade o local da falta.

O presente trabalho demonstrou que o método das ondas viajantes pode servir como uma ótima ferramenta para análise de falta, já que ele permite localizar uma falta na linha de transmissão sem sofrer a influência de interferências. Diferentemente do que pode ocorrer com os demais métodos, como o método da impedância que serviu para validação das ondas viajantes. O método da impedância pode alterar o resultado de localização de falta, facilmente, como exemplo em curtos circuitos bifásicos temporários que ocorram alteração de impedância no local da falta (contato com galhos, aves, presença de umidade, chuva, deposição de neve, etc). Essa mudança de impedância altera o resultado final de localização de faltas. Ao aplicar este método de impedância, provocando prejuízos a sociedade em geral que utiliza a rede elétrica, aumentando o tempo de interrupção no fornecimento de energia, devido a aplicação de um método falho.

Já o método de ondas viajantes, se torna imune a influências de interferências bifásicas com mudanças de impedância, diferentemente dos demais métodos. Permitindo maior agilidade na manutenção da linha de transmissão e maior rapidez na normalidade do fornecimento de energia elétrica, conduzido pelas linhas de transmissão.

O desenvolvimento deste projeto permitiu uma melhor compreensão dos fenômenos que são necessários para aplicar o método das ondas viajantes, simulando diversos cenários em porcentagens do comprimento total da linha de transmissão, extraindo tempos de propagação e sendo validado por meio do software Matlab. Esta técnica pode ser empregada em casos reais, melhorando a eficiência do sistema elétrico de potência, evitando grandes períodos de interrupções na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para o consumidor final.

Como trabalhos futuros recomenda-se:

- Inserir diversos pontos de amplitudes em tensões e corrente de forma que seja possível plotar no Matlab um gráfico de tensão e corrente.
- A partir da corrente nominal fornecida pelo usuário encontrar a impedância de linha (zlinha), caso haja troca de cabo.
- A partir do gráfico traçado aplicar a transformada de Wavelet para representar no domínio da frequência as propagações das ondas viajantes.
- Aplicar filtros passa alta e passa baixa e representar mais detalhes de tensão e corrente no diagrama de Bewley no software PS Simul.
- Expandir para outras tipologias de linhas de transmissão visando sua implementação em relés dedicados à detecção de faltas

REFERÊNCIAS

AGUIAR, R. A. **Métodos de localização de faltas em linhas de transmissão baseados em fasores**: análise de sensibilidade e melhoria de desempenho.

Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

DIAS, M. A. **Impacto das inovações tecnológicas para detecção e localização de faltas a partir das subestações.**

trabalho de conclusão de curso 2 (graduação em Engenharia elétrica) – Bacharel em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SILVA, M. V. C. **Uma nova ferramenta baseada na transformada wavelet para localização digital de faltas.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade São Carlos, São Carlos 2017.

GONZAGA, E. S. **Localização de faltas em linhas de transmissão: desenvolvimento de novos algoritmos e implementação de sistema computacional para aplicações.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

LORENZO, H. **O setor elétrico brasileiro: passado e futuro. o setor elétrico brasileiro: passado e futuro.** Araraquara: FGV, 2001.

MAMEDE, J. F. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Rio de Janeiro: GEN, 2020.

MOREIRA, D. S. **Localização de faltas em linha de transmissão de energia pela Análise da Função de autocorrelação.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense São Paulo, Campinas, 2022.

SEL (Schweitzer Engineering Laboratories). O Novo Relé de Proteção do Alimentador SEL-851. **Visão geral.** 27 mai. 2022.

Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/851>. Acesso em: 27 maio 2022.

SCHWEITZER, E. O. Performance of time-Domain line protection elements on real-world faults. **IEEE**, College station, abr. 2016.

SEL (Schweitzer Engineering Laboratories). O Novo Relé de Proteção do Alimentador SEL-851. **Visão geral.** 27 mai. 2022.

Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/851>. Acesso em: 27 maio 2022.

SILVEIRA, A. Você sabe o que é o Sistema Interligado Nacional? **Visão geral**. 22 abr. 2022.

Disponível em: <https://www.focusenergia.com.br/voce-sabe-o-que-e-o-sistema-interligado-nacional>. Acesso em: 22 abr. 2022.

ZIMERMANN, K. Determining the faulted phase. determining the faulted phase. Annual Conference v. Único, n. 1^a, p. 1-21, 1 dez. 2015.

anexo A - **TRECHOS DO ALGORITMO DESENVOLVIDO NO MATLAB**

Trecho inicial do algoritmo desenvolvido

```

1 %% Escrever um algoritmo para detectar se houve a falta a partir de um valor de corrente: utilizando a função while, if, else e imprimir que ocorreu a falta%%
2 %% Escrever um algoritmo para detectar o local da falta pela equação da onda viajante %%
3 %% Todas as formas passar para PU, escolher um valor de potencia base %%
4 %% Passar para o valor base de corrente S= 180 MVA Ibase = 1300A
5
6 % informar a corrente nominal da LT
7 In = input ('\n informe a corrente nominal da LT:\n')
8 Vop = input ('\n informe em kV a tensão de operação da LT:\n')
9
10 Ia = input ('\n Digite um valor para corrente elétrica instantânea na fase A:\n')
11 Ib = input ('\n Digite um valor para corrente elétrica instantânea na fase B:\n')
12 Ic = input ('\n Digite um valor para corrente elétrica instantânea na fase C:\n')
13 % Passando para corrente elétrica em PU
14
15 Ia_pu = Ia/1300
16 Ib_pu = Ib/1300
17 Ic_pu = Ic/1300
18
19 fprintf ('\no valor em pu de A é %f \n', Ia_pu)
20 fprintf ('\no valor em pu de B é %f \n', Ib_pu)
21 fprintf ('\no valor em pu de C é %f \n', Ic_pu)
22

```

Trecho do algoritmo que aborda o lançamento da corrente instantânea e a caracterização de falta

```

24     if Ia_pu > 3 | Ib_pu > 3 | Ic_pu > 3
25         fprintf ('fault detected \n')
26     else
27         fprintf ('normally operation \n')
28
29     % Escrever as impedâncias da LT e efetuar a inversa da MATRIZ
30
31     end
32     format long
33     R = [0.062851985428697 0.035542001660159 0.035542001660159; 0.035542001660159 0.062851985428697 0.035542001660159; 0.035542001660159 0.035542001660159 0.062851985428697]
34     Ri = inv (R)
35
36     % Obter a corrente de curto circuito por Icc = V * (inv [Z])
37
38     V = 10^3*[Vop Vop Vop; Vop Vop Vop; Vop Vop Vop]
39     I = [V]*[Ri]
40
41     % Através da zcc encontrar o local da falta
42
43
44     % passar de % para impedancia da LT, converter % em ohm/km*ohm
45     % x = 0.062851985428697 * (F)
46

```

Trecho do algoritmo com cálculo da impedância da LT

```

44 % passar de % para impedancia da LT, converter % em ohm/km*ohm
45 % x = 0.062851985428697 * (F)
46
47 Ztotal = Vop*1000/In
48 fprintf ('\nA impedância total da linha é, em Ohm: %f', Ztotal)
49 Xa = Vop*1000/Ia
50 fprintf ('\nA impedância da fase A da linha é, em Ohm: %f', Xa)
51 Xb = Vop*1000/Ib
52 fprintf ('\nA impedância da fase B da linha é, em Ohm: %f', Xb)
53 Xc = Vop*1000/Ic
54 fprintf ('\nA impedância da fase C da linha é, em Ohm: %f', Xc)
55
56 Zeta = [Xa Xb Xc]
57 W = min(Zeta)
58 fprintf ('\nA impedância da falta é, em Ohms: %f \n', W)
59
60 y = W*100/Ztotal
61 fprintf ('\nO local da falta em relação ao terminal A é em km: %f\n', y)
62

```

Trecho do algoritmo com cálculo do tempo de viagem aos terminais da LT

```

63 % Encontrar os tempos de propagação da onda na LT terminal A
64 % primeiro é necessário o fator de propagação da TW
65 fp = 0.984
66 % Segundo o algoritmo converte o Fp em velocidade de propagação da tw
67 % na LT em km/s
68 format long
69 VLT = fp*(2997924.58)
70 % Com a velocidade da LT obter o tempo do local da falta.
71
72 ta = y/VLT
73
74 fprintf ('\n O tempo de propagação da LT no local da falta até o terminal A é %f s\n', ta)
75
76 % A partir do tempo de propagação no terminal A. Obter o tempo de
77 % propagação no terminal B, relacionando com tT que é o tempo total
78 % de propagação da tw na LT.
79
80 tt = 100/VLT
81
82 tb = (tt - ta)
83
84 fprintf ('\n O tempo de propagação da TW no local da falta até no terminal B é %f s\n', tb)

```