

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
ENGENHARIA ELÉTRICA**

NATHALIA PEREIRA DE SOUZA

**ESTUDO DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO HVDC UTILIZANDO ONDAS VIAJANTES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

CORNÉLIO PROCÓPIO

2020

NATHALIA PEREIRA DE SOUZA

**ESTUDO DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO HVDC UTILIZANDO ONDAS VIAJANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso 2
apresentado como requisito à obtenção do
título de Bacharel, em Engenharia Elétrica,
do Departamento de Elétrica, da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva

CORNÉLIO PROCÓPIO

2020



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nathalia Pereira de Souza

**ESTUDO DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO HVDC UTILIZANDO
ONDAS VIAJANTES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:00hs do dia 20/11/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). María Eugenia Dajer - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Renata Coelho Borges - (Membro)

À minha mãe e ao meu pai, que foram os maiores apoiadores para que esse sonho acontecesse, dando sempre amor, carinho e atenção para que mesmo à distância eu fosse capaz de compreender que eles ali estavam por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me concedido a dádiva de viver essa experiência de aprendizado, mesmo diante de todas as dificuldades enfrentadas, dando-me forças para jamais desistir e seguir firme no objetivo.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram a realizar meus sonhos, mesmo quando pareciam impossíveis aos meus olhos, eles os faziam reais para que eu sempre alcançasse o meu máximo em tudo que faço.

Aos meus amigos de longa caminhada Angelo, Gustavo e Lucas, que mesmo com a distância que nos separou durante todos esses anos, me deram todo o apoio quando me foi necessário, me impulsionando e me fazendo sempre ver o lado bom das coisas, tornando a jornada mais leve.

Ao meu colega de graduação Arthur, que durante vários semestres foi grande companheiro de estudos, me ajudando sempre a entender melhor as questões dadas durante as aulas, e ainda, compartilhando de seu conhecimento em diversas áreas para o melhor desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso.

Ao Prof. Dr. Murilo da Silva pela orientação a esse trabalho, assim como durante todo o curso, sendo sempre generoso e colaborativo. Dando apoio sempre que me foi necessário, e me dando sempre ótimos conselhos profissionais e pessoais que levarei para sempre, durante a jornada nessa profissão.

Aos Profs. Dr. Silvio e Dr. Edson, pelas longas conversas, pelo incentivo e pela capacidade de sempre nos mostrar caminhos e soluções para o alcance de bons resultados, a partir de suas histórias profissionais e, algumas vezes pessoais.

Ao Prof. Me. Marco Antônio, que no início de tudo, estendeu sua mão para me dar auxílio durante o curso, e que me acolheu durante muito tempo em seu laboratório, compartilhando ensinamentos e conhecimento de forma simples e clara, nos permitindo ser parte de sua família dentro da universidade.

Sorria para a vida e ela lhe sorrirá de volta.

RESUMO

PEREIRA DE SOUZA, Nathalia. **Estudo Da Localização de Falhas Em Sistemas De Transmissão HVDC Utilizando Ondas Viajantes**. 2020. Número total de folhas: 56. Trabalho de Conclusão de Curso 2 (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

O crescimento da implementação das linhas de transmissão de energia elétrica *High Voltage Direct Current (HVDC)* vem atraindo estudos para o desenvolvimento de novas ferramentas e equipamentos que auxiliem na proteção, operação e compensação destes sistemas, destacando-se neste cenário, a importância da localização de ocorrências de falhas nas linhas de transmissão de grande extensão. Dado o exposto, este trabalho teve por objetivo estudar a aplicação das ondas viajantes para localização de falhas em linhas de transmissão *High Voltage Direct Current (HVDC)* utilizando dados registrados nos dois terminais do sistema que interliga Porto Velho (RO) a Araraquara (SP) disponível na biblioteca de cases do software ATPDraw. Este trabalho visou a aplicação da Transformada Wavelet (TW) e do Filtro Butterworth para caracterizar e detectar o instante de chegada das ondas de tensão nos terminais do sistema de potência, oriundas de uma situação faltosa e, assim, estimar a distância da ocorrência desta falta. Pelas simulações realizadas neste trabalho e resultados obtidos percebe-se que ambas as técnicas estudadas apresentam bons resultados e possibilidade de aplicação.

Palavras-chave: *High Voltage Direct Current*. Linhas de Transmissão. Localização de Falhas. Transformada Wavelet. Ondas Viajantes.

ABSTRACT

PEREIRA DE SOUZA, Nathalia. **Location Faults Study in HVDC Systems Using Travelling Waves**. 2020. Número total de folhas: 56. Trabalho de Conclusão de Curso 2. (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Federal Technology University - Parana. Cornélio Procópio, 2020.

The growth of the implementation of high voltage direct current (HVDC) electric power transmission lines has been attracting studies for the development of new tools and equipment that assist in the protection, operation and compensation of these systems, highlighting in this scenario the importance of locating occurrences of faults in large transmission lines. Given the above, this work aimed the application of the travelling waves to fault location in HVDC transmission lines using data recorded in the two terminals of the system that interconnects Porto Velho (RO) to Araraquara (SP) available in the case library of the ATPDraw software. This work aimed the application of the Wavelet Transform (WT) and Butterworth Filter to characterize and detect the arrival moment of the voltage waves in the terminals of the power system, arising from a faulty situation and, thus, estimate the distance of occurrence of this fault. By simulations realized in this work and obtained results, it's possible to notice that both techniques present good results and applications possibilities.

Keywords: High Voltage Direct Current. Fault Location. Transmission Lines. Travelling Waves. Wavelet Transform.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama Lattice.....	18
Figura 2 - Exemplo de Processo de Análise Multiresolução.	20
Figura 3 - Circuito HVDC Original.	22
Figura 4 - Circuito HVDC Modificado para Adequação ao Estudo de Falta Pólo-Terra.....	23
Figura 5 - Circuito HVDC Modificado para Adequação ao Estudo de Falta Pólo-Pólo.....	23
Figura 6 - Fluxograma de Implementação do Algoritmo.....	24
Figura 7 – Demonstração da Utilização da Função Diff.	27
Figura 8 – Obtenção do Ponto de Falta no Tempo para uma Falta Pólo-Terra.....	30
Figura 9 – Obtenção do Ponto de Falta no Tempo para uma Falta Pólo-Pólo.....	30
Figura 10 – Comportamento do Algoritmo para diferentes Resistências de Falta em Falta Pólo-Terra e Dados de Tensão (Haar).	33
Figura 11 - Comportamento do Algoritmo para Resistência de Falta 0Ω e Variação do Tipo de Falta entre Pólo-Pólo e Pólo-Terra para Dados de Tensão (Haar).	35
Figura 12 – Comportamento do Algoritmo para diferentes Resistências de Falta em Falta Pólo-Terra e Dados de Tensão (Butterworth).....	37
Figura 13 - Comportamento do Algoritmo para Resistência de Falta 0Ω e Variação do Tipo de Falta entre Pólo-Pólo e Pólo-Terra para Dados de Tensão (Butterworth).	39
Figura 14 – Comportamento do Algoritmo para diferentes Resistências de Falta em Falta Pólo-Terra e Dados de Corrente (Haar).	41
Figura 15 – Comportamento do Algoritmo para Resistência de Falta 0Ω e Variação do Tipo de Falta entre Pólo-Pólo e Pólo-Terra para Dados de Corrente (Haar).....	43
Figura 16 – Comportamento do Algoritmo para diferentes Resistências de Falta em Falta Pólo-Terra e Dados de Corrente (Butterworth).....	45
Figura 17 – Comportamento do Algoritmo para Resistência de Falta 0Ω e Variação do Tipo de Falta entre Pólo-Pólo e Pólo-Terra para Dados de Corrente (Butterworth).	47

Figura 18 – Comparação Erro Médio entre Wavelet Haar e Filtro Butterworth em Faltas Pólo-Terra utilizando dados de Tensão.	48
Figura 19 – Comparação Erro Médio entre Wavelet Haar e Filtro Butterworth em Faltas Pólo-Terra utilizando dados de Corrente.	49
Figura 20 – Comparação Erro Médio entre Wavelet Haar e Filtro Butterworth em Faltas Pólo-Pólo com $R_F=0\Omega$	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Erro Percentual para Falta Pólo-Terra para RF entre 15Ω e 200Ω - Utilização de Dados de Tensão (Haar).	32
Tabela 2 - Erro Percentual para Faltas Pólo-Terra e Pólo-Pólo para RF igual a 0Ω - Utilização de Dados de Tensão (Haar).	34
Tabela 3 - Erro Percentual para Falta Pólo-Terra para RF entre 15Ω e 200Ω - Utilização de Dados de Tensão (Butterworth).	36
Tabela 4 - Erro Percentual para Faltas Pólo-Terra e Pólo-Pólo para RF igual a 0Ω - Utilização de Dados de Tensão (Butterworth).	38
Tabela 5 - Erro Percentual para Falta Pólo-Terra para RF entre 15Ω e 200Ω - Utilização de Dados de Corrente.....	40
Tabela 6 - Erro Percentual para Faltas Pólo-Terra e Pólo-Pólo para RF igual a 0Ω - Utilização de Dados de Corrente (Haar).	42
Tabela 7 - Erro Percentual para Falta Pólo-Terra para RF entre 15Ω e 200Ω - Utilização de Dados de Corrente (Butterworth).	44
Tabela 8 - Erro Percentual para Faltas Pólo-Terra e Pólo-Pólo para RF igual a 0Ω - Utilização de Dados de Corrente (Butterworth).	46
Tabela 9 - Comparação entre Haar e Butterworth do Erro Médio para Faltas Pólo- Terra dada a Utilização de Dados de Tensão.	48
Tabela 10 - Comparação entre Haar e Butterworth do Erro Médio para Faltas Pólo- Terra dada a Utilização de Dados de Corrente.	49
Tabela 11 - Comparação entre Haar e Butterworth do Erro Médio para Faltas Pólo- Pólo com RF=0Ω.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	16
2.1.1 Tipos De Falta Em Linhas De Transmissão HvdC	16
2.2 ONDAS VIAJANTES E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	17
2.3 TRANSFORMADA WAVELET E ANÁLISE MULTIRESOLUÇÃO	19
2.4 FILTROS BUTTERWORTH	20
3 METODOLOGIA	22
3.1 MATERIAIS	22
3.2 PROCEDIMENTOS	24
4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS	29
4.1 DADOS DE TENSÃO (HAAR)	32
4.1.1 Falta Pólo Terra Com R Entre 15Ω E 200Ω (Haar)	32
4.1.2 Falta Pólo-Pólo E Pólo Terra Com R = 0 Ω (Haar)	34
4.2 DADOS DE TENSÃO (BUTTERWORTH)	36
4.2.1 Falta Pólo Terra Com R Entre 15Ω E 200Ω (Butterworth)	36
4.2.2 Falta Pólo-Pólo E Pólo Terra Com R = 0 Ω (Butterworth)	38
4.3 DADOS DE CORRENTE (HAAR)	40
4.3.1 Falta Pólo Terra Com R Entre 15Ω E 200Ω (Haar)	40
4.3.2 Falta Pólo-Pólo E Pólo-Terra Com R = 0 Ω (Haar)	42
4.4 DADOS DE CORRENTE (BUTTERWORTH)	44
4.4.1 Falta Pólo Terra Com R Entre 15Ω E 200Ω (Butterworth)	44

4.4.2 Falta Pólo-Pólo E Pólo-Terra Com $R = 0 \Omega$ (Butterworth)	46
4.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS TRANSFORMADA WAVELET (HAAR) E FILTRO BUTTERWORTH	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
6 TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

No mundo, o sistema de transmissão de energia elétrica é responsável por interligar as diversas formas de geração de energia e os centros de consumo, de forma econômica, confiável e dentro de padrões de qualidade. No Brasil, por exemplo, o sistema de transmissão interligado é composto por aproximadamente 141.388 km de linhas transmissão, sendo aproximadamente 87% de linhas de transmissão em corrente alternada (CA) e 13% de linhas em corrente contínua (CC) (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, 2017).

Apesar de a porcentagem de linhas de transmissão CC ainda ser consideravelmente baixa no país, devido ao fato das usinas de geração de energia se encontrarem a uma distância longa das cargas, torna-se necessário um meio de transmissão de energia que seja eficiente diante a distância e, para isso, podem ser usadas as linhas de transmissão HVDC, dado o fato de que quando a energia é transmitida em alta tensão – entre 600 e 800kV – e corrente contínua, as perdas serem reduzidas em comparação às linhas de transmissões em CA.

Além disso, quando se trata de longas distâncias – acima de 800km – o custo para implementação de um sistema CA passa a ser mais elevado em comparação a um sistema CC. Estes custos estão atrelados à equipamentos utilizados para a construção não só das linhas em si, como das subestações de retificação e conversão da energia e de compensadores para longas distâncias (SOUZA; BASSO; SILVA, 2018). O custo inicial de um sistema HVDC é alto devido aos conversores, porém, as torres e as linhas são mais baratas em relação à transmissão CA para uma mesma potência, pois se utilizam menos condutores, demandando uma torre com área de servidão menor (SILVA, 2017).

Atualmente no Brasil, segundo informações disponíveis no SINDAT – Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN (2019), existem quatro sistemas HVDC em funcionamento, sendo esses:

- o sistema HVDC que interliga Usina Hidrelétrica Itaipu Binacional em Foz do Iguaçu – PR a Ibiúna – SP, com tensão de $\pm 600\text{kV}$, potência de 6300MW, perfazendo uma distância de aproximadamente 800km,
- o sistema HVDC que interliga o complexo Rio Madeira em Porto Velho – RO a Araraquara – SP, com potência de 6450MW à $\pm 600\text{kV}$ e extensão de aproximadamente 2386km e,

- os sistemas HVDC $\pm 800\text{kV}$ que escoam a energia elétrica produzida pela Usina Hidrelétrica de Belo Monte conectando a estação Xingu – PA as estações de Estreito – MG e Terminal Rio – RJ, com extensão de 2518km e 2081km, respectivamente.

O crescimento da implementação das linhas HVDC tem impulsionado os estudos para desenvolvimento de novas ferramentas e equipamentos para garantir uma operação confiável destes sistemas. Com isso, destaca-se a importância da localização de faltas nos sistemas de transmissão HVDC devido à grande extensão das linhas e o ambiente em que estão inseridas. Identificar faltas permanentes é importante para o rápido restabelecimento do sistema de potência.

Atualmente existem diversas propostas para localização de faltas em linhas de transmissão HVDC como, por exemplo, nos seguintes artigos publicados: por Al Hassan e Grainger (2016) que utilizou uma modelagem do comportamento das ondas viajantes aplicadas a cabos aéreos e subterrâneos; por Ünal e Ekici (2017) onde, aplica-se a aprendizagem de máquinas e a Transformada Wavelet (TW); por Vasanth, Yeap e Ukil (2016) que é aplicada a TW e redes neurais artificiais; por Hossam-Eldin, Lofty, Elgamal e Ebeed (2016) que utiliza-se das ondas viajantes e fuzzy e por Shukr, Thomas e Zanchetta (2012) onde, determina-se a impedância a partir da Transformada Rápida de Fourier (FFT) para estimar a localização da falta. O estudo do tema tem bastante relevância devido ao crescimento da utilização de sistemas HVDC e busca contínua pela melhoria das metodologias já propostas.

Os métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes oferecem precisão da ordem de um a dois vãos de torre, independentemente do comprimento da linha. Esta precisão torna a localização de isoladores danificados comparativamente menos desafiadora e menos demorada do que usando métodos alternativos como os métodos baseados em impedância. Quando as equipes de linha localizam e substituem os isoladores danificados, as recorrências de faltas transitórias nos mesmos locais são eliminadas, resultando na melhoria da confiabilidade do sistema de potência (SCHWEITZER, 2016).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho propõe utilizar a alta capacidade da Transformada Wavelet (TW) de detecção de descontinuidades presentes em um sinal, para caracterizar no tempo o instante da chegada das ondas de tensão ou corrente provenientes de uma situação faltosa ocorrida em um ponto da linha de transmissão HVDC. Sendo assim, será apresentado um estudo e análise de uma metodologia de localização de faltas utilizando ondas viajantes, TW e filtro Butterworth aplicado a um modelo de sistema HVDC que interliga Porto Velho a Araraquara. Nesta análise serão utilizados dados de corrente e tensão obtidos em ambos os terminais da linha de transmissão.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Implementar do algoritmo utilizando a TW
- Implementar do algoritmo utilizando o Filtro Butterworth
- Discutir e analisar dos resultados

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A ocorrência de uma falta em uma linha de transmissão, gera ondas viajantes que se propagam a partir do ponto de falta para os terminais da linha com uma velocidade de propagação dependente da indutância e da capacitância da linha.

Essas faltas podem ser classificadas a partir de diversos fatores, como por exemplo o tipo de transmissão adotada – por cabos aéreos, submarinos ou subterrâneos, assim como se HVDC ou corrente alternada; – pelo tempo de duração da falta – temporária ou permanente; - ou pela natureza da falta – bifásica, monofásica, trifásica, pólo-terra ou pólo-pólo.

Em sistemas de transmissão HVDC, as faltas do tipo pólo-pólo e pólo-terra são os tipos mais comuns e, essas falhas podem ser do tipo permanentes ou temporárias, dependendo da razão da ocorrência da mesma e, dado essa classificação, o reparo da linha de transmissão pode demandar um tempo mais elevado, fazendo com que não haja continuidade no sistema. Assim, quando feita a detecção das falhas, o funcionamento do conversor deve ser interrompido imediatamente, para garantir o funcionamento do equipamento (KHAIRNAR; SHAH, 2016)

2.1.1 Tipos De Falta Em Linhas De Transmissão HVDC

Falta Pólo-Terra

Uma falta pólo-terra é causada quando da ocorrência da queda do condutor CC ao solo, ou ainda, do contato entre o condutor e algo que esteja diretamente conectado a terra e, esse tipo de falta é classificada como temporária.

O sistema, quando da ocorrência desse tipo de falta, passa por três estágios diferentes, sendo eles:

- Estágio de descarga de capacitores do lado CC
- Estágio de alimentação do sistema
- Recuperação da tensão do sistema

Falta Pólo-Pólo

Uma falta pólo-pólo ocorre, dado o contato direto ou a quebra do isolamento entre os condutores positivo e negativo. Esse tipo de falta não é muito comum, mas pode resultar em efeitos severos ao sistema, assim como a desativação e quebra de chaves e interruptores. Quando a falta é detectada, as chaves de potência devem ser bloqueadas e o lado do sistema em que a falta ocorreu, estar isolado do restante do circuito a partir da utilização de disjuntores de corrente alternada e, só assim o sistema pode ser restaurado após a eliminação da falta (DESSOUKY; FAWZI; IBRAHIM; IBRAHIM, 2018)

O sistema, quando da ocorrência desse tipo de falta, passa por três estágios diferentes, sendo eles:

- Estágio de descarga de capacitores
- Estágio do diodo de roda livre
- Estágio de recarga dos capacitores

2.2 ONDAS VIAJANTES E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A localização de faltas baseada em ondas viajantes fornece mais precisão quando comparada aos métodos que usam impedâncias. Esses métodos, podem ser baseados em um terminal (Tipo 1) e dois terminais (Tipo 2), onde esses consistem nos dois métodos computacionais mais comuns de localização de faltas usando ondas viajantes (STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957).

O método Tipo 1 usa a diferença de tempo entre o instante de chegada da primeira onda e as reflexões sucessivas provenientes da localização da falta para calcular a localização da falta. Este método é atrativo porque só depende de informações locais; portanto, ele não requer um canal de comunicação.

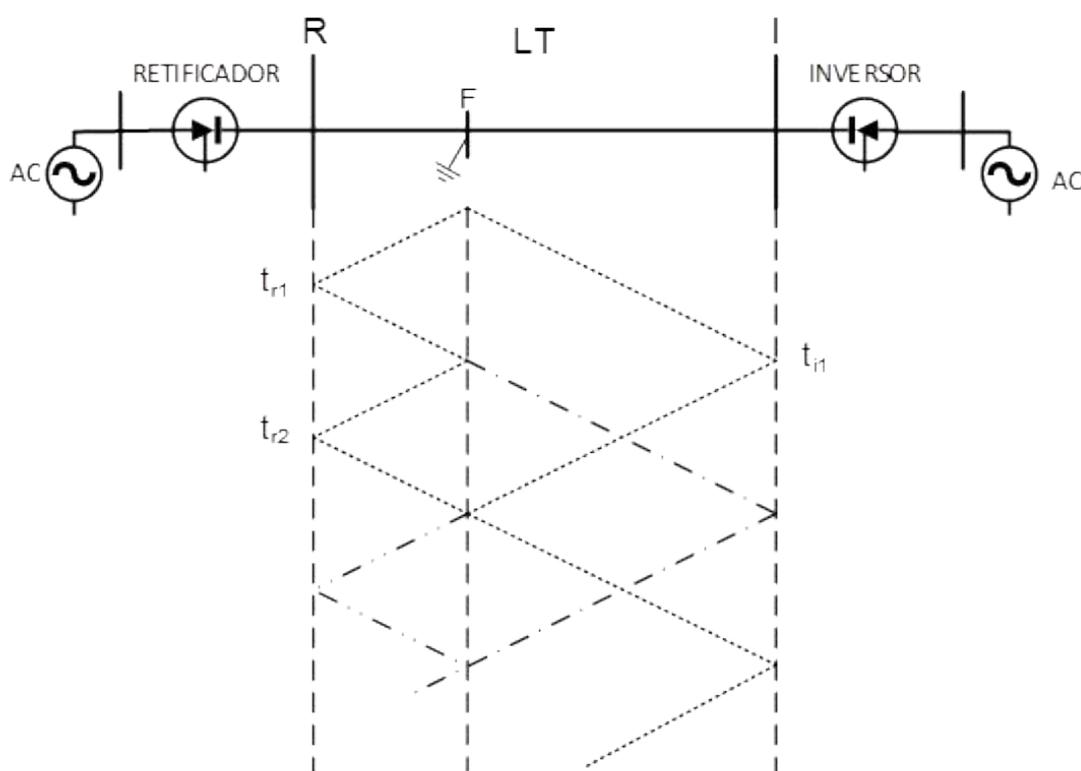
Contudo, identificar as reflexões é um grande desafio. As reflexões podem ser provenientes da localização da falta, do terminal remoto ou de um ponto atrás do terminal local. Identificar com precisão a reflexão a partir da localização da falta representa um desafio para a localização da falta baseada em ondas viajantes em um terminal, especialmente em linhas de transmissão em CA.

O método baseado em dois terminais supera o desafio de identificação das reflexões da falta, mas exige as informações de ondas viajantes do terminal remoto. Este método Tipo 2 usa a diferença de tempo entre o instante de chegada das

primeiras ondas viajantes capturadas em ambos os terminais juntamente com o comprimento da linha e velocidade de propagação da onda para calcular a localização da falta (MARX; JOHNDON; GÚZMAN; SKENDZIC; MYNAM, 2013).

Quando uma falta ocorre, componentes de tensão e corrente injetados no sistema podem ser expressos em termos de uma onda viajante direta e uma onda viajante reversa (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011). Esse fenômeno pode ser representado graficamente pelo diagrama Lattice (BEWLEY, 1963) conforme Figura 1. A distância entre os extremos da linha é representada por uma linha horizontal e o tempo representado por duas linhas verticais. A linha em zigzag representa como a onda viaja entre os extremos e descontinuidades. O declive da linha em zigzag fornece os tempos – sendo, t_r o tempo de chegada da onda no terminal R e t_i o tempo de chegada da onda no terminal I – correspondentes para as distâncias viajadas. A tensão, em um dado ponto no tempo e a uma determinada distância é encontrada pela adição de todos os termos que estão diretamente acima daquele ponto (BOVOLATO, 2009).

Figura 1 - Diagrama Lattice.



Fonte: Autoria Própria (2020)

2.3 TRANSFORMADA WAVELET E ANÁLISE MULTIRESOLUÇÃO

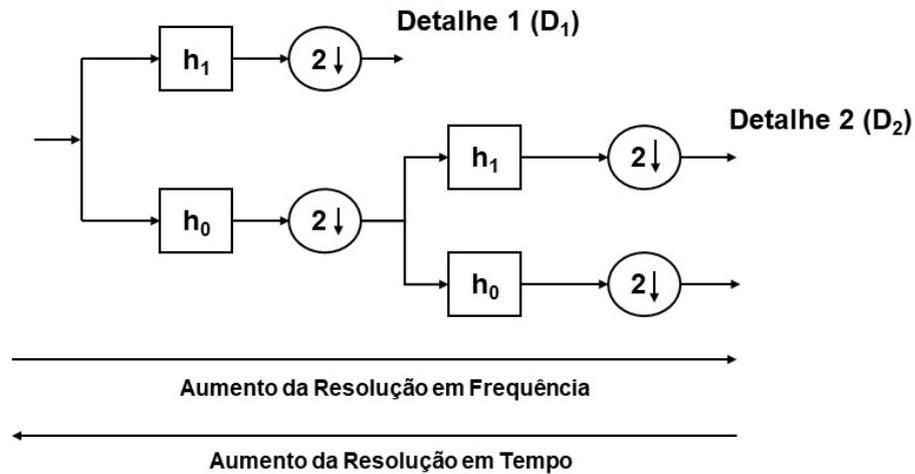
A Transformada Wavelet (TW) é uma ferramenta matemática que decompõe um dado sinal em diferentes escalas com distintos níveis de resolução utilizando funções Wavelet. Dentre suas características a TW permite a representação local de um sinal tanto no domínio do tempo como da frequência (SILVA; OLESKOVICZ; CURY, 2006).

A TW é muito bem aceita para uma ampla faixa de sinais que não são periódicos e que podem conter ambos os componentes senoidais e de impulso, como é típico nos transitórios dos sistemas de potência. Em particular, a habilidade da Wavelet em se concentrar em pequenos intervalos de tempo para componentes de alta frequência, e em longos intervalos de tempo para componentes de baixa frequência, melhora a análise de impulsos e oscilações localizadas, particularmente na presença da componente fundamental e dos componentes harmônicos de baixa ordem (HWAN; AGGARWAL. 2000).

Geralmente o emprego da TW consiste no sucessivo agrupamento de pares de filtros passa baixa e passa alta, em cada estágio de escala da TW. Isto pode ser interpretado como sucessivas aproximações da mesma função, onde cada aproximação ressalta importantes informações relativas a uma dada escala (faixa de frequência). Este processo de filtragem é melhor representado pela técnica da Análise Multiresolução (AMR) demonstrado na Figura 2.

Tal processo se baseia na filtragem de um sinal a ser analisado através de bancos de filtros passa alta e passa baixa e na dizimação em cada escala, de modo a fornecer versões do sinal original relativas aos sinais de aproximação e detalhe. A aproximação compreende as baixas frequências do sinal original, enquanto o detalhe engloba o conteúdo de alta frequência. Dessa forma, o sinal original é dividido em diferentes escalas de resolução, especificamente em diferentes faixas de frequências de modo que cada uma das sub-bandas pode ser tratada individualmente de acordo com o problema estudado.

Figura 2 - Exemplo de Processo de Análise Multiresolução.



Fonte: Autoria Própria (2019)

2.4 FILTROS BUTTERWORTH

Os filtros *Butterworth* são chamados de filtros maximamente planos pois, para uma determinada ordem, eles têm o *roll-off* (queda suave da resposta para zero em qualquer extremidade da faixa de frequência) mais nítido possível, sem induzir picos no gráfico de Bode. Esses filtros são comumente usados em sistemas de controle por não possuírem pico. O requisito de eliminar todos os picos de um filtro é conservador e permitir algum pico pode ser benéfico porque permite uma atenuação equivalente com menos defasagem de fase nas frequências mais baixas. Ainda assim, esse tipo de filtro tem uma seleção natural para organizar os muitos pólos dos filtros de ordem superior usados em sistemas de controle (ELLIS, 2012).

Esse filtro é o melhor meio-termo entre a atenuação e a resposta de fase, ele não tem ondulação na banda de passagem ou na banda de parada e, por causa disso, atinge seu nivelamento às custas de uma região de transição relativamente ampla de banda de passagem para banda de parada, com características transitórias médias (JUNG, 2005).

À medida que a ordem do filtro aumenta, a nitidez da característica de atenuação na banda de transição aumenta. Por exemplo, a 10 rad/s, um filtro de oitava

ordem tem uma atenuação de cerca de 160 dB, enquanto os filtros de ordem inferior têm menos atenuação. Com relação à resposta ao degrau, o *overshoot* e atraso através do filtro aumentam conforme a ordem do filtro aumenta (THOMPSON, 2014).

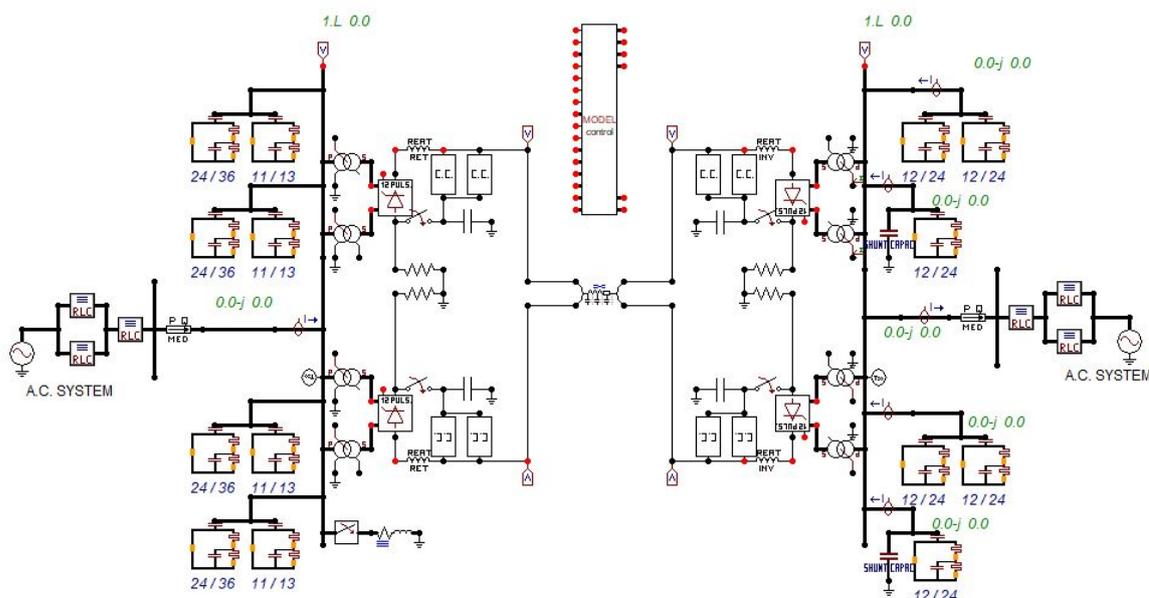
3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

- **DADOS**

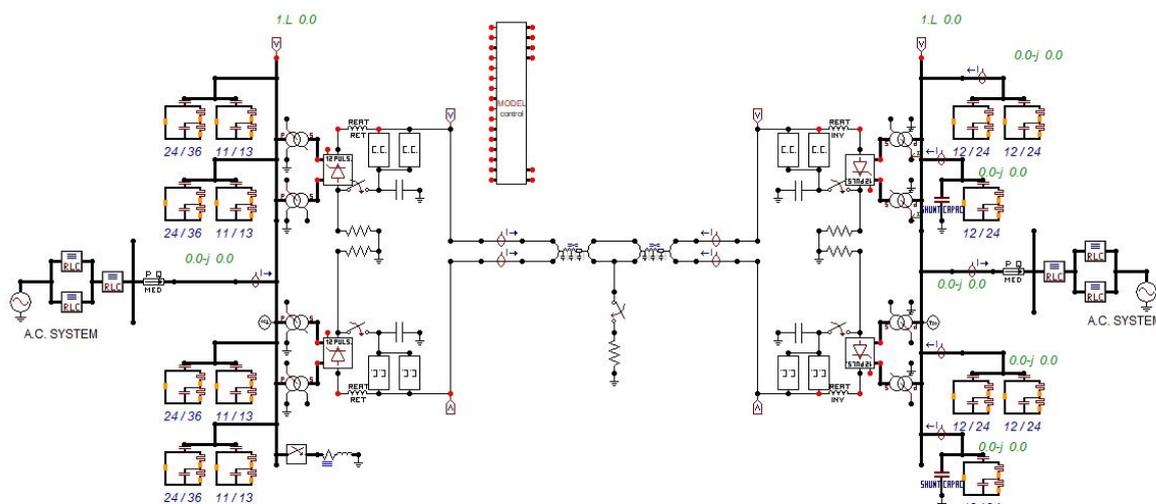
Para a primeira etapa, serão utilizados dados retirados de um modelo pré-desenvolvido pelo Eng. Guilherme Sarcinelli Luz, cujo documento encontra-se disponibilizado na biblioteca de cases (R2_MAD_NEW4D) do software de simulação de circuitos ATPDraw. O modelo segue as configurações de um projeto desenvolvido no Brasil, não citado especificamente. As Figuras 3-5 mostram o circuito original, o circuito modificado para faltas pólo-terra e o circuito modificado para faltas pólo-pólo, respectivamente.

Figura 3 - Circuito HVDC Original.



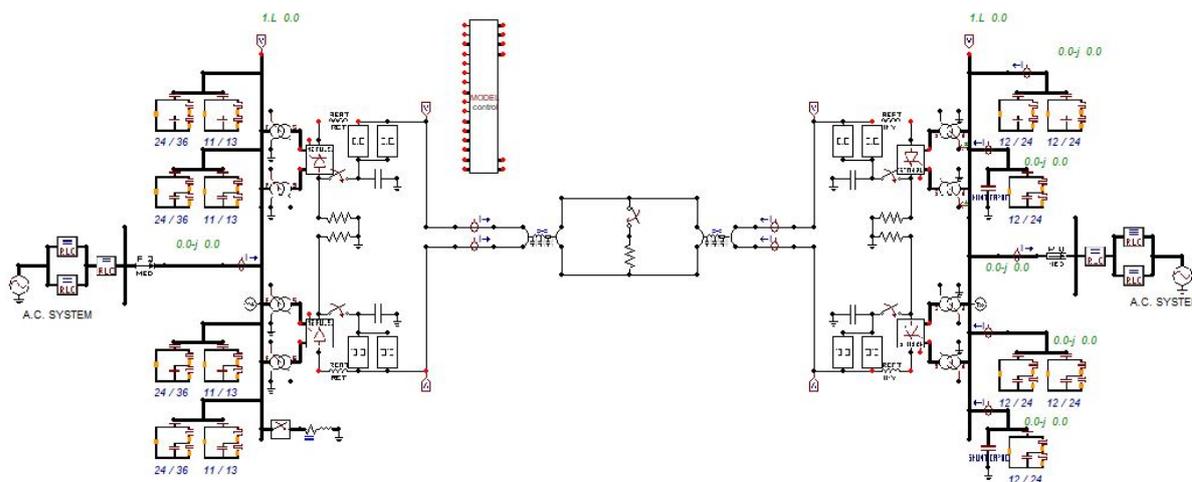
Fonte: Biblioteca de Cases ATPDraw (2020) feito por Guilherme Sarcinelli Luz

Figura 4 - Circuito HVDC Modificado para Adequação ao Estudo de Falta Pólo-Terra.



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 5 - Circuito HVDC Modificado para Adequação ao Estudo de Falta Pólo-Pólo.



Fonte: Autoria Própria (2020)

• FERRAMENTAS

Como o circuito a ser simulado foi desenvolvido para o software ATPDraw, então uma das ferramentas utilizadas será essa, para que possa ser feita a obtenção dos dados de corrente e tensão necessários.

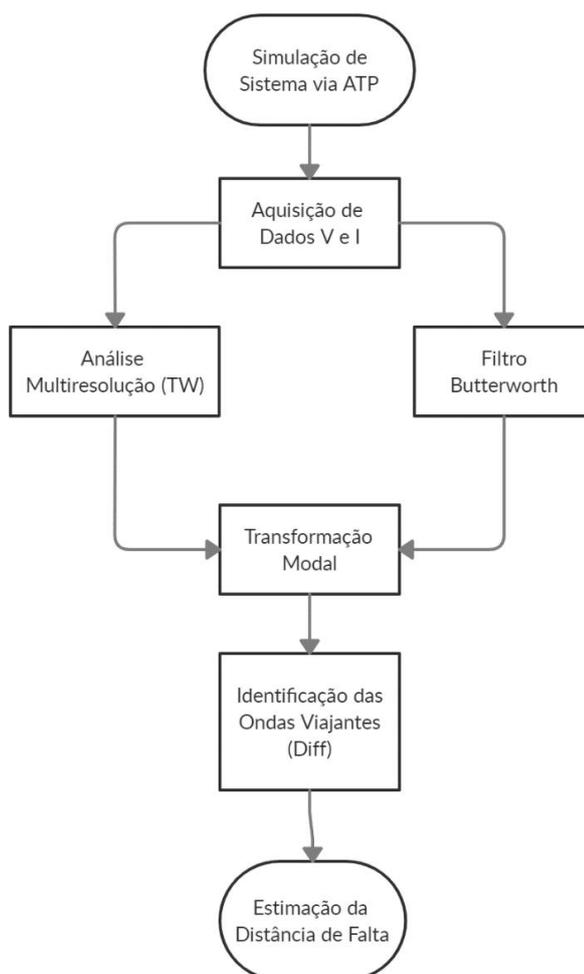
Além disso, os dados obtidos anteriormente serão processados no software Matlab para o desenvolvimento e simulação do algoritmo.

3.2 PROCEDIMENTOS

A metodologia a ser utilizada seguirá uma linha de desenvolvimento, apresentada na Figura 6, onde é possível observar o fluxograma que representa as etapas do algoritmo. Esse fluxograma passa a ser automático à partir da etapa de Análise Multiresolução e Filtro Butterworth, visto que até essas, é necessário alimentar o algoritmo com os dados necessários, após isso então, o próprio algoritmo será capaz de identificar um novo dado a ser analisado e ao final, todos os resultados serão mostrados em conjunto, de forma a facilitar a análise do problema.

Para este trabalho, serão utilizados como referência principal os trabalhos de (SILVA, W., 2017) e (AL HASSAN e GRAINGER, 2016), livros acadêmicos de proteção de sistemas e curto circuito, entre outros.

Figura 6 - Fluxograma de Implementação do Algoritmo.



Fonte: Autoria Própria (2020)

Simulação de Sistema Via ATPdraw

Essa etapa consiste em, utilizando um sistema HVDC, simular o sistema com diferentes valores de resistência de faltas para diferentes tipos de falta, sendo essas: pólo-terra e pólo-pólo. Os valores da resistência de falta serão escolhidos de maneira que estejam condizentes com os valores reais, para que a aplicação do algoritmo seja abrangente.

Aquisição de Dados V e I

Feita a simulação do sistema, obtém-se os valores de corrente (I) e tensão (V) nas linhas de transmissão em situação de falta.

Análise Multiresolução

Nesta etapa utiliza-se uma ferramenta da TW conhecida como análise multiresolução. Essa ferramenta tem como objetivo decompor o sinal de corrente e/ou tensão em múltiplos sinais, cada um deles com frequências diferentes. Com isso, o sinal passa por múltiplos filtros, sendo decomposto em sinais de detalhe com alta frequência e, sinais de aproximação com baixa frequência. Assim, a utilização da TW se faz necessária, dado o fato de que ela permite a representação local de um sinal tanto no domínio do tempo como da frequência.

Filtro Butterworth

Aqui, faz-se da utilização do Filtro Butterworth com frequência de corte de 12kHz e filtro de 6ª ordem, sendo esse um filtro passa-baixa RC, para as simulações dos dados de Corrente e Tensão.

Transformação Modal

Com a transformação modal, os dados de corrente e tensão serão desacoplados e simplificados, devido ao fato de o sistema utilizado possuir múltiplas fases. Esses sinais modais são utilizados para identificar as faltas, visto que cada modo tem uma velocidade de propagação distinta.

Um sistema HVDC que é constituído por dois pólos, um positivo e um negativo, pode ser tratado como um sistema bifásico e os sinais de corrente e tensão podem ser transformados em sinais modais aéreos e terra. O equacionamento que caracteriza essa transformação é:

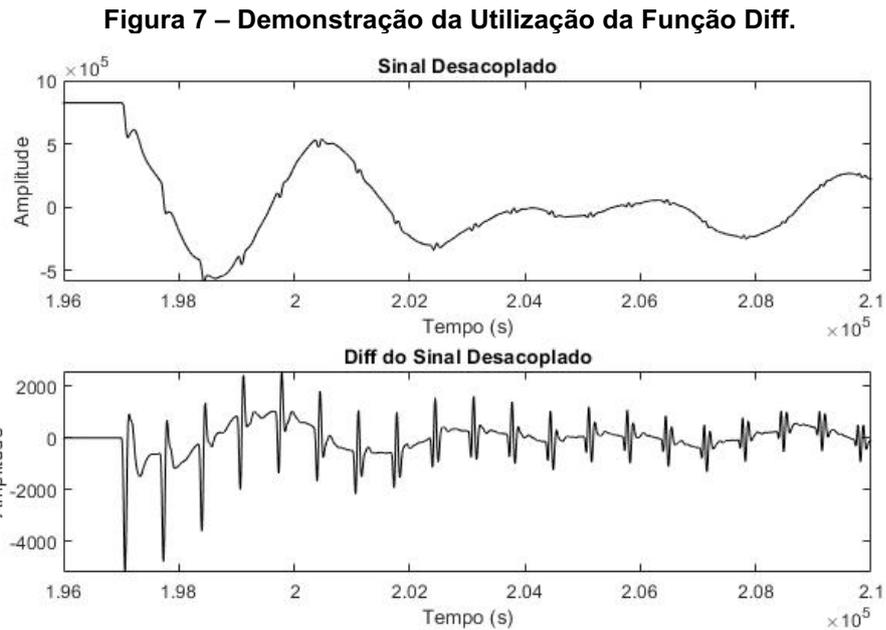
$$\begin{bmatrix} V_{m0} \\ V_{m1} \end{bmatrix} = T * \begin{bmatrix} V_P \\ V_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

tal que, V_P é a tensão medida no pólo positivo e V_N é a tensão medida no pólo negativo. V_{m0} denota o modo 0 da tensão, V_{m1} denota o modo 1 da tensão e T é a matriz de transformação ortogonal (AL HASSAN; GRAINGER, 2016) definida por:

$$T = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Identificação das Ondas Viajantes (Diff)

Para a localização precisa do ponto de falta, foi necessário definir um limiar de forma empírica, de modo que todas as simulações se enquadrassem neste valor. Esse limiar foi aplicado na utilização da função *diff* do MATLAB, que tem como objetivo realizar a diferença entre os elementos adjacentes de uma matriz X , retornando uma matriz $(p-1)$ cujos elementos dão as diferenças entre as linhas. Com isso, possibilita que o sinal desacoplado seja deslocado para um referencial zero, como mostra a Figura 7.



Fonte: Autoria Própria (2020)

Estimação da Distância de Falta

Por último, o algoritmo faz os cálculos necessários para que se obtenha uma estimativa do valor em quilômetros da distância em que a falta ocorreu na linha de transmissão. Esse valor precisa ser o mais próximo possível do real, com erros baixos para a validação do algoritmo.

Para o cálculo da distância de falta são necessários os dados da linha de transmissão na qual será feita a análise, sendo esses, os valores de indutância (L) e capacitância (C). Assim, com esses dados pode-se calcular a velocidade de propagação da onda (v):

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

A partir disso, é necessário que sejam detectados os tempos de chegada das ondas nos terminais do sistema, sendo esses tempos denominados t_{r1} e t_{i1} , ou seja, tempo de chegada da onda no terminal A e B, respectivamente. Logo, calcula-se o tempo de chegada (t_d):

$$t_d = t_{i1} - t_{r1} \quad (4)$$

Por fim, estima-se então o valor da distância da falta (d):

$$d = \frac{l - (v * t_d)}{2} \quad (5)$$

em que l é o comprimento da linha; v a velocidade de propagação no modo 1 e t_d a diferença do tempo de chegada das primeiras ondas em ambos os terminais.

4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Na primeira etapa, a simulação foi realizada a partir do software ATPDraw, disponível na biblioteca de cases o sistema HVDC que simula o sistema de transmissão que escoar energia de Porto Velho a Araraquara.

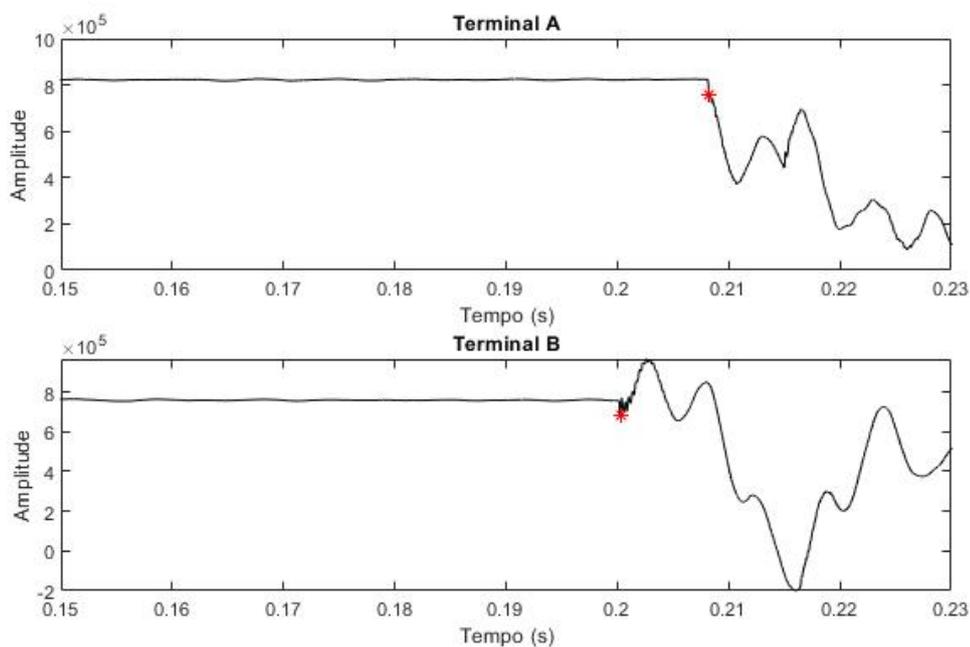
A partir desse sistema foram feitas simulações em toda a extensão da LT – variando o intervalo de distância a cada 100km – cuja extensão é de 2400km aproximadamente e, ainda foram colocados medidores de tensão e corrente em ambos os terminais, para que fossem coletados dados de ambas as grandezas. Além da variação da distância, também foram variadas as resistências de falta (RF), sendo os valores definidos para essa simulação foram: 0Ω, 15Ω, 50Ω, 100Ω e 200Ω.

Após colhidos todos esses dados, a simulação passa a ter uma nova etapa que foi realizada no software MATLAB, onde foi desenvolvido um código para identificar nos dados obtidos via ATPDraw os pontos onde as faltas ocorreram na linha de transmissão e calcular então o valor da distância estimada da falta com relação aos dois terminais do sistema. Para isso essa etapa foi separada em 2 fases, sendo essas:

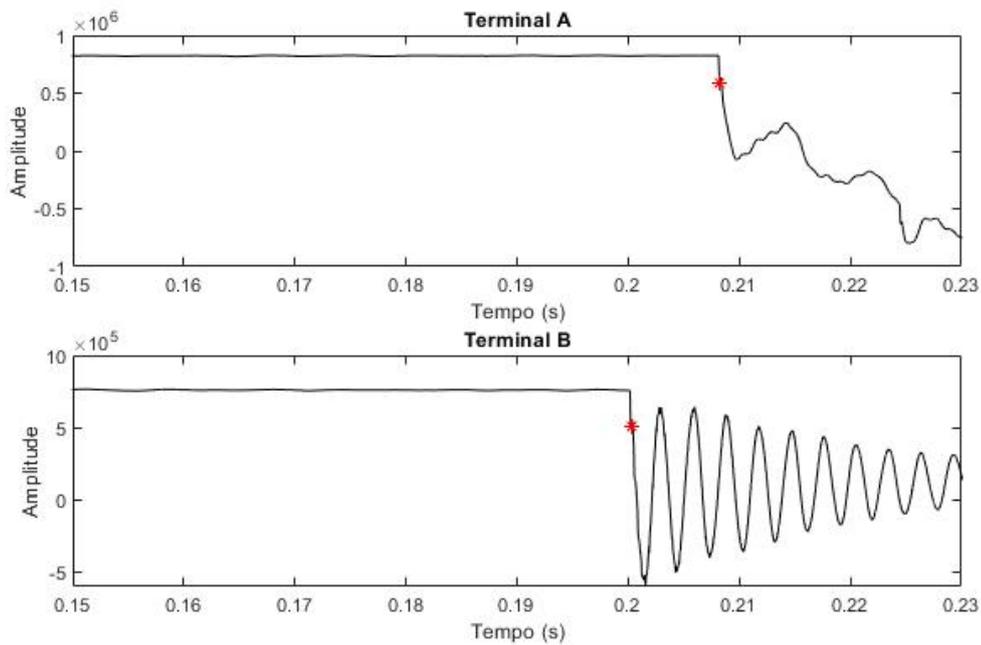
- Simulação utilizando Transformada Wavelet;
- Simulação utilizando filtro Butterworth;

Para a simulação utilizando TW optou-se pela wavelet mãe Haar com sinal de Aproximação no segundo nível. Após realizada a segunda fase da simulação utilizando o filtro Butterworth, por fim, faz-se uma comparação entre ambos os algoritmos.

Um exemplo gráfico da obtenção do ponto da ocorrência da falta utilizando a TW, é mostrado nas Figuras 8 e 9. Onde, na primeira o exemplo demonstra uma falta pólo-terra e na segunda uma falta pólo-pólo, ambas com sinais de tensão, distância de falta igual a 2400km e RF=0Ω.

Figura 8 – Obtenção do Ponto de Falta no Tempo para uma Falta Pólo-Terra.

Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 9 – Obtenção do Ponto de Falta no Tempo para uma Falta Pólo-Pólo.

Fonte: Autoria Própria (2020)

Obtidas as distâncias estimadas pelo algoritmo, faz-se uma comparação com os valores reais, para se ter uma noção do percentual de erro do algoritmo desenvolvido, onde os erros calculados foram:

- Erro Absoluto, dado em quilômetros:

$$\epsilon_{abs} = |d_{estimado} - d_{real}| \quad (6)$$

onde $d_{estimado}$ é a distância estimada pelo algoritmo e d_{real} a distância real da ocorrência da falta.

- Erro Relativo, dado em porcentagem:

$$\epsilon_{rel} (\%) = \left| \frac{\epsilon_{abs}}{l_{LT}} \right| \times 100 \quad (7)$$

onde l_{LT} é o comprimento total da linha de transmissão.

- Erro Médio, dado em porcentagem:

$$\epsilon_{méd} = \frac{\sum_{1}^N \epsilon_{rel} (\%)}{N}, \quad N = 1, 2, \dots, 24 \quad (8)$$

Dado que a distância média entre as torres de transmissão é de 300m, os erros podem ser considerados ótimos quando dentro desse valor.

4.1 DADOS DE TENSÃO (HAAR)

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos a partir da simulação feita para um sinal de tensão utilizando a TW Haar, com a variação das RF de 15Ω a 200Ω para faltas pólo-terra e, também para RF de 0Ω para faltas pólo-pólo e pólo-terra, em toda a extensão da linha de transmissão.

4.1.1 Falta Pólo Terra com R entre 15Ω e 200Ω (Haar)

A Tabela 1 mostra o erro percentual dada a distância real da linha de transmissão, ainda, a comparação do erro percentual dada a modificação da resistência de falta entre 15Ω e 200Ω para dados de tensão em faltas pólo-terra.

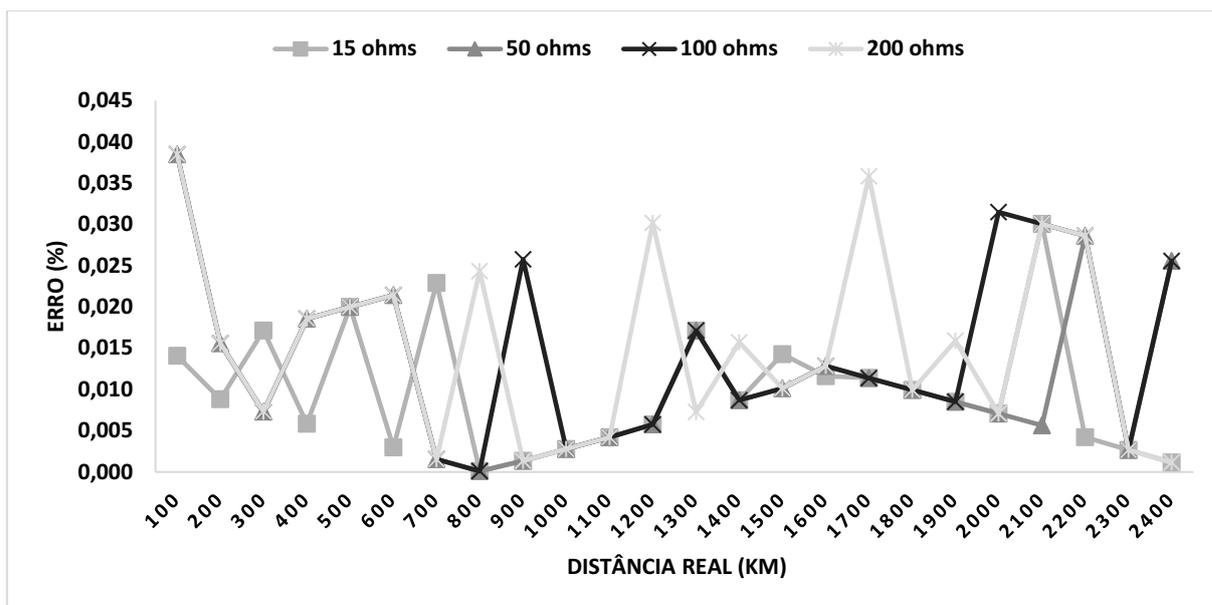
Tabela 1 - Erro Percentual para Falta Pólo-Terra para RF entre 15Ω e 200Ω - Utilização de Dados de Tensão (Haar).

Distância Real (km)	Erro (%)			
	RF = 15Ω	RF = 50Ω	RF = 100Ω	RF = 200Ω
100	0,014	0,039	0,039	0,039
200	0,009	0,016	0,016	0,016
300	0,017	0,007	0,007	0,007
400	0,006	0,019	0,019	0,019
500	0,020	0,020	0,020	0,020
600	0,003	0,021	0,021	0,021
700	0,023	0,002	0,002	0,002
800	0,000	0,000	0,000	0,024
900	0,001	0,001	0,026	0,001
1000	0,003	0,003	0,003	0,003
1100	0,004	0,004	0,004	0,004
1200	0,006	0,006	0,006	0,030
1300	0,017	0,017	0,017	0,007
1400	0,009	0,009	0,009	0,016
1500	0,014	0,010	0,010	0,010
1600	0,012	0,013	0,013	0,013
1700	0,011	0,011	0,011	0,036
1800	0,010	0,010	0,010	0,010
1900	0,009	0,009	0,009	0,016
2000	0,007	0,007	0,032	0,007
2100	0,030	0,006	0,030	0,030
2200	0,004	0,029	0,029	0,029
2300	0,003	0,003	0,003	0,003
2400	0,001	0,026	0,026	0,001

Fonte: Aatoria Própria (2020)

Graficamente, pode-se observar na Figura 10 que há uma diferença nos resultados quando se faz a mudança da resistência de falta para faltas pólo-terra, porém essa diferença é muito pequena se feita uma análise percentual, visto que o erro varia de 0,001% a 0,039% o que equivale a 0,024km e 0,936km, respectivamente.

Figura 10 – Comportamento do Algoritmo para diferentes Resistências de Falta em Faltas Pólo-Terra e Dados de Tensão (Haar).



Fonte: Autoria Própria (2020)

4.1.2 Falta Pólo-Pólo e Pólo Terra com $R = 0 \Omega$ (Haar)

A Tabela 2 mostra o erro percentual dada a distância real da linha de transmissão, assim como, a comparação do erro percentual dada a modificação do tipo de falta, entre pólo-pólo e pólo-terra para a mesma resistência de falta 0Ω para dados de tensão.

Tabela 2 - Erro Percentual para Faltas Pólo-Terra e Pólo-Pólo para RF igual a 0Ω - Utilização de Dados de Tensão (Haar).

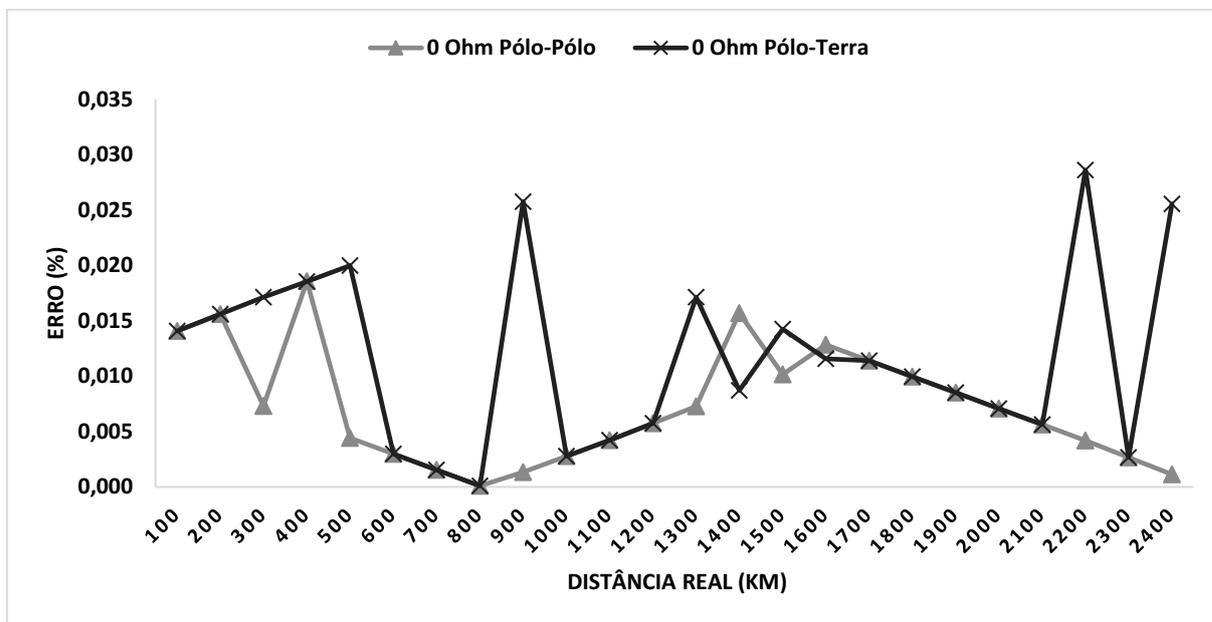
Distância Real (km)	Erro (%)	
	Pólo-Pólo	Pólo-Terra
100	0,014	0,014
200	0,016	0,016
300	0,007	0,017
400	0,019	0,019
500	0,004	0,020
600	0,003	0,003
700	0,002	0,002
800	0,000	0,000
900	0,001	0,026
1000	0,003	0,003
1100	0,004	0,004
1200	0,006	0,006
1300	0,007	0,017
1400	0,016	0,009
1500	0,010	0,014
1600	0,013	0,012
1700	0,011	0,011
1800	0,010	0,010
1900	0,009	0,009
2000	0,007	0,007
2100	0,006	0,006
2200	0,004	0,029
2300	0,003	0,003
2400	0,001	0,026

Fonte: Autoria Própria (2020)

Para a Figura 11, faz-se uma comparação quando a RF é igual a zero ohms, porém agora, com a variação do tipo de falta, sendo essas as faltas pólo-terra e pólo-pólo. Neste caso é possível observar que não há diferença alguma entre as linhas do gráfico, estando ambas sobrepostas. Mas quando se trata da variação da porcentagem com relação a distância do ponto de falta, têm-se, assim como no caso onde se variou também a RF, uma diferença que pode ser considerada pequena se

feita uma análise percentual, onde o erro varia de 0,001% a 0,029% o que equivale a 0,024km e 0,696km, respectivamente.

Figura 11 - Comportamento do Algoritmo para Resistência de Falta 0Ω e Variação do Tipo de Falta entre Pólo-Pólo e Pólo-Terra para Dados de Tensão (Haar).



Fonte: Autoria Própria (2020)

4.2 DADOS DE TENSÃO (BUTTERWORTH)

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos a partir da simulação feita para um sinal de tensão utilizando o filtro Butterworth, com a variação das RF de 15Ω a 200Ω para faltas pólo-terra e, também para RF de 0Ω para faltas pólo-pólo e pólo-terra, em toda a extensão da linha de transmissão.

4.2.1 Falta Pólo Terra com R entre 15Ω e 200Ω (Butterworth)

A Tabela 3 mostra o erro percentual dada a distância real da linha de transmissão, ainda, a comparação do erro percentual dada a modificação da resistência de falta entre 15Ω e 200Ω para dados de tensão em faltas pólo-terra.

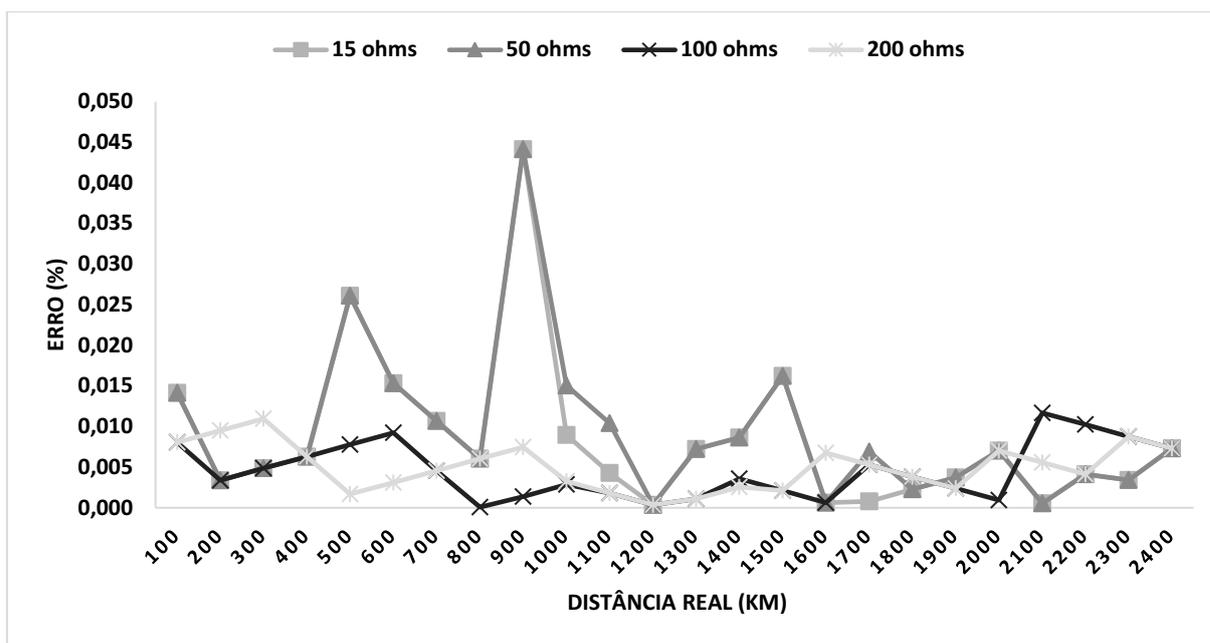
Tabela 3 - Erro Percentual para Falta Pólo-Terra para RF entre 15Ω e 200Ω - Utilização de Dados de Tensão (Butterworth).

Distância Real (km)	Erro (%)			
	RF = 15Ω	RF = 50Ω	RF = 100Ω	RF = 200Ω
100	0,014	0,014	0,008	0,008
200	0,003	0,003	0,003	0,010
300	0,005	0,005	0,005	0,011
400	0,006	0,006	0,006	0,006
500	0,026	0,026	0,008	0,002
600	0,015	0,015	0,009	0,003
700	0,011	0,011	0,005	0,005
800	0,006	0,006	0,000	0,006
900	0,044	0,044	0,001	0,007
1000	0,009	0,015	0,003	0,003
1100	0,004	0,010	0,002	0,002
1200	0,000	0,000	0,000	0,000
1300	0,007	0,007	0,001	0,001
1400	0,009	0,009	0,004	0,003
1500	0,016	0,016	0,002	0,002
1600	0,001	0,001	0,001	0,007
1700	0,001	0,007	0,005	0,005
1800	0,002	0,002	0,004	0,004
1900	0,004	0,004	0,002	0,002
2000	0,007	0,007	0,001	0,007
2100	0,001	0,001	0,012	0,006
2200	0,004	0,004	0,010	0,004
2300	0,003	0,003	0,009	0,009
2400	0,007	0,007	0,007	0,007

Fonte: Autoria Própria (2020)

Graficamente, pode-se observar na Figura 12 que há uma diferença nos resultados considerando resistências de falta baixas (15 e 50 ohms) e altas (200 e 100 ohms), que para alguns valores de distância se torna uma diferença grande, chegando em 0,044% para RF baixa e ficando entre 0,001% e 0,007% para RF alta, o que equivale a 1,06km, 0,024km e 0,168km, respectivamente.

Figura 12 – Comportamento do Algoritmo para diferentes Resistências de Falta em Falta Pólo-Terra e Dados de Tensão (Butterworth).



Fonte: Autoria Própria (2020)

4.2.2 Falta Pólo-Pólo e Pólo Terra com $R = 0 \Omega$ (Butterworth)

A Tabela 4 mostra o erro percentual dada a distância real da linha de transmissão, assim como, a comparação do erro percentual dada a modificação do tipo de falta, entre pólo-pólo e pólo-terra para a mesma resistência de falta 0Ω para dados de tensão.

Tabela 4 - Erro Percentual para Faltas Pólo-Terra e Pólo-Pólo para RF igual a 0Ω - Utilização de Dados de Tensão (Butterworth).

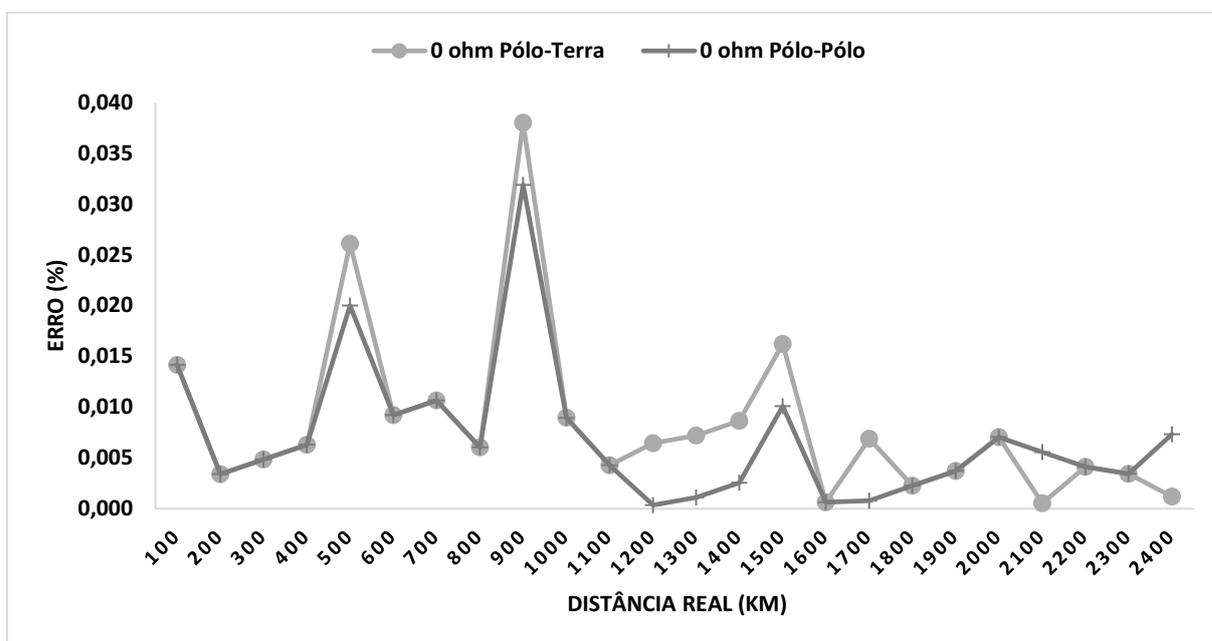
Distância Real (km)	Erro (%)	
	Pólo-Pólo	Pólo-Terra
100	0,014	0,014
200	0,003	0,003
300	0,005	0,005
400	0,006	0,006
500	0,020	0,026
600	0,009	0,009
700	0,011	0,011
800	0,006	0,006
900	0,032	0,038
1000	0,009	0,009
1100	0,004	0,004
1200	0,000	0,006
1300	0,001	0,007
1400	0,003	0,009
1500	0,010	0,016
1600	0,001	0,001
1700	0,001	0,007
1800	0,002	0,002
1900	0,004	0,004
2000	0,007	0,007
2100	0,006	0,001
2200	0,004	0,004
2300	0,003	0,003
2400	0,007	0,001

Fonte: Autoria Própria (2020)

Para a Figura 13, faz-se uma comparação quando a RF é igual a zero ohms, porém agora, com a variação do tipo de falta, sendo essas as faltas pólo-terra e pólo-pólo. Neste caso é possível observar que há uma diferença mínima entre as linhas do gráfico, estando ambas quase que sobrepostas. Diferença essa, que quando se trata da variação da porcentagem com relação a distância do ponto de falta, pode ser

considerada ao fazer uma análise percentual, onde o erro varia de 0,032% a 0,038% o que equivale a 0,768km e 0,912km, respectivamente.

Figura 13 - Comportamento do Algoritmo para Resistência de Falta 0Ω e Variação do Tipo de Falta entre Pólo-Pólo e Pólo-Terra para Dados de Tensão (Butterworth).



Fonte: Autoria Própria (2020)

4.3 DADOS DE CORRENTE (HAAR)

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos a partir da simulação feita para um sinal de corrente utilizando a TW Haar, com a variação das RF de 15Ω a 200Ω para faltas pólo-terra e, também para RF de 0Ω para faltas pólo-pólo e pólo-terra, em toda a extensão da linha de transmissão.

4.3.1 Falta Pólo Terra Com R Entre 15Ω E 200Ω (Haar)

A Tabela 5 mostra o erro percentual dada a distância real da linha de transmissão, ainda, a comparação do erro percentual dada a modificação da resistência de falta entre 15Ω e 200Ω para dados de corrente em faltas pólo-terra.

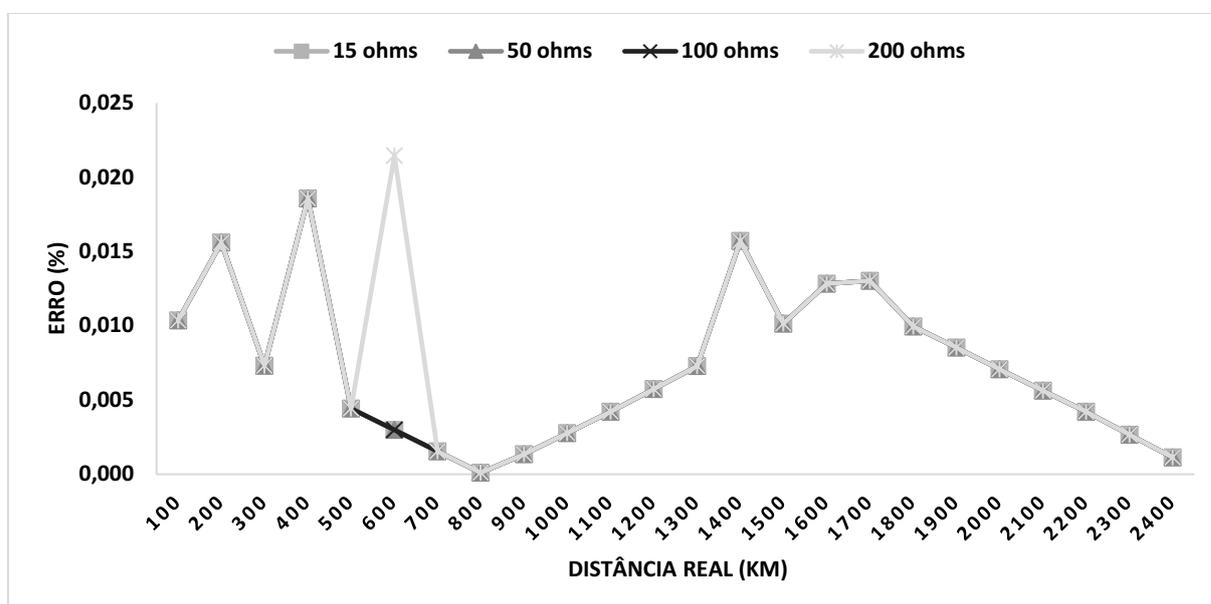
Tabela 5 - Erro Percentual para Falta Pólo-Terra para RF entre 15Ω e 200Ω - Utilização de Dados de Corrente (Haar).

Distância Real (km)	Erro (%)			
	<i>RF = 15Ω</i>	<i>RF = 50Ω</i>	<i>RF = 100Ω</i>	<i>RF = 200Ω</i>
100	0,010	0,010	0,010	0,010
200	0,016	0,016	0,016	0,016
300	0,007	0,007	0,007	0,007
400	0,019	0,019	0,019	0,019
500	0,004	0,004	0,004	0,004
600	0,003	0,003	0,003	0,021
700	0,002	0,002	0,002	0,002
800	0,000	0,000	0,000	0,000
900	0,001	0,001	0,001	0,001
1000	0,003	0,003	0,003	0,003
1100	0,004	0,004	0,004	0,004
1200	0,006	0,006	0,006	0,006
1300	0,007	0,007	0,007	0,007
1400	0,016	0,016	0,016	0,016
1500	0,010	0,010	0,010	0,010
1600	0,013	0,013	0,013	0,013
1700	0,013	0,013	0,013	0,013
1800	0,010	0,010	0,010	0,010
1900	0,009	0,009	0,009	0,009
2000	0,007	0,007	0,007	0,007
2100	0,006	0,006	0,006	0,006
2200	0,004	0,004	0,004	0,004
2300	0,003	0,003	0,003	0,003
2400	0,001	0,001	0,001	0,001

Fonte: Aatoria Própria (2020)

Observando a Figura 14, vê-se que há uma diferença razoável quando se faz a mudança da resistência de falta, no entanto essa diferença se dá em apenas um ponto do gráfico, que ao olhar na Tabela 5 vê-se que é um valor diferente para a RF igual a 200 ohms. Para todos os outros pontos, os gráficos se sobrepõem, não havendo assim, diferença com relação a variação da RF, no entanto com relação a variação da distância existe uma pequena variação que a partir da análise percentual, nota-se que o erro varia de 0,001% a 0,021% o que equivale a 0,024km e 0,504km, respectivamente.

Figura 14 – Comportamento do Algoritmo para diferentes Resistências de Falta em Falta Pólo-Terra e Dados de Corrente (Haar).



Fonte: Autoria Própria (2020)

4.3.2 Falta Pólo-Pólo e Pólo-Terra com $R = 0 \Omega$ (Haar)

A Tabela 6 mostra o erro percentual dada a distância real da linha de transmissão, assim como, a comparação do erro percentual dada a modificação do tipo de falta, entre pólo-pólo e pólo-terra para a mesma resistência de falta 0Ω para dados de corrente.

Tabela 6 - Erro Percentual para Faltas Pólo-Terra e Pólo-Pólo para RF igual a 0Ω - Utilização de Dados de Corrente (Haar).

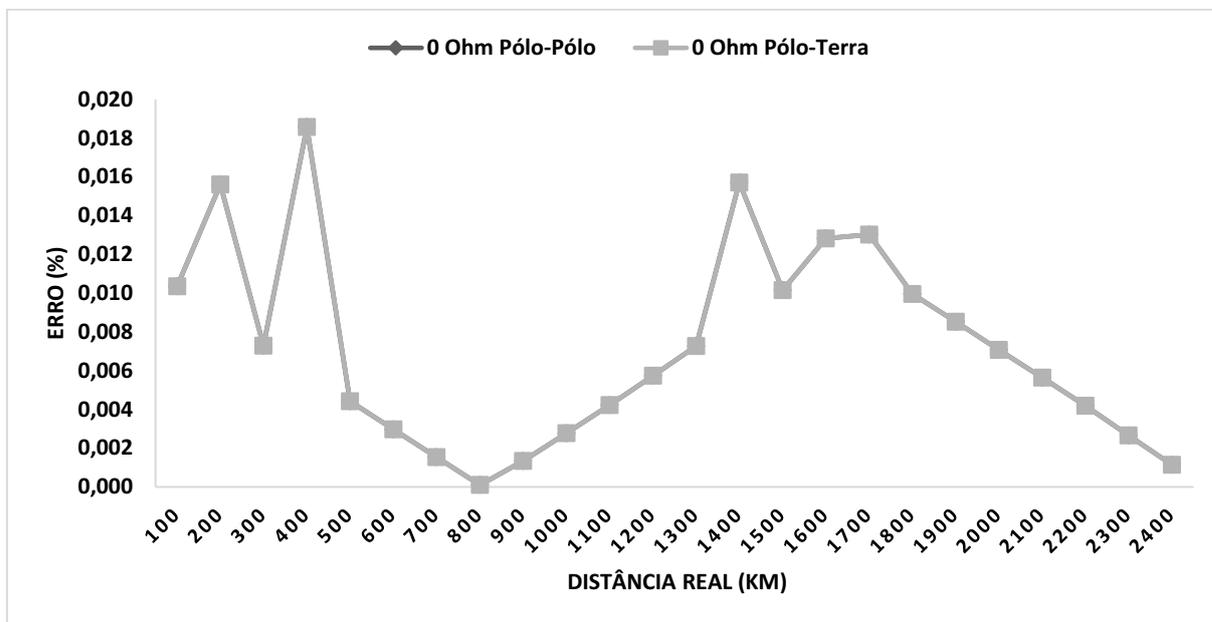
Distância Real (km)	Erro (%)	
	Pólo-Pólo	Pólo-Terra
100	0,010	0,010
200	0,016	0,016
300	0,007	0,007
400	0,019	0,019
500	0,004	0,004
600	0,003	0,003
700	0,002	0,002
800	0,000	0,000
900	0,001	0,001
1000	0,003	0,003
1100	0,004	0,004
1200	0,006	0,006
1300	0,007	0,007
1400	0,016	0,016
1500	0,010	0,010
1600	0,013	0,013
1700	0,013	0,013
1800	0,010	0,010
1900	0,009	0,009
2000	0,007	0,007
2100	0,006	0,006
2200	0,004	0,004
2300	0,003	0,003
2400	0,001	0,001

Fonte: Aatoria Própria (2020)

Para a Figura 15, faz-se uma comparação quando a RF é igual a zero ohms, porém, com a variação do tipo de falta, sendo essas as faltas pólo-terra e pólo-pólo. Neste caso, assim como para quando se faz a análise para dados de tensão, é possível observar que não há diferença alguma entre as linhas do gráfico, estando ambas sobrepostas, porém quando se trata da variação da porcentagem com relação a distância do ponto de falta, têm-se também, uma diferença que pode ser

considerada pequena dada a análise percentual, onde o erro varia de 0,001% a 0,019% o que equivale a 0,024km e 0,456km, respectivamente.

Figura 15 – Comportamento do Algoritmo para Resistência de Falta 0Ω e Variação do Tipo de Falta entre Pólo-Pólo e Pólo-Terra para Dados de Corrente (Haar).



Fonte: Autoria Própria (2020)

4.4 DADOS DE CORRENTE (BUTTERWORTH)

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos a partir da simulação feita para um sinal de corrente utilizando o filtro Butterworth, com a variação das RF de 15Ω a 200Ω para faltas pólo-terra e, também para RF de 0Ω para faltas pólo-pólo e pólo-terra, em toda a extensão da linha de transmissão.

4.4.1 Falta Pólo Terra Com R Entre 15Ω E 200Ω (Butterworth)

A Tabela 7 mostra o erro percentual dada a distância real da linha de transmissão, ainda, a comparação do erro percentual dada a modificação da resistência de falta entre 15Ω e 200Ω para dados de corrente em faltas pólo-terra.

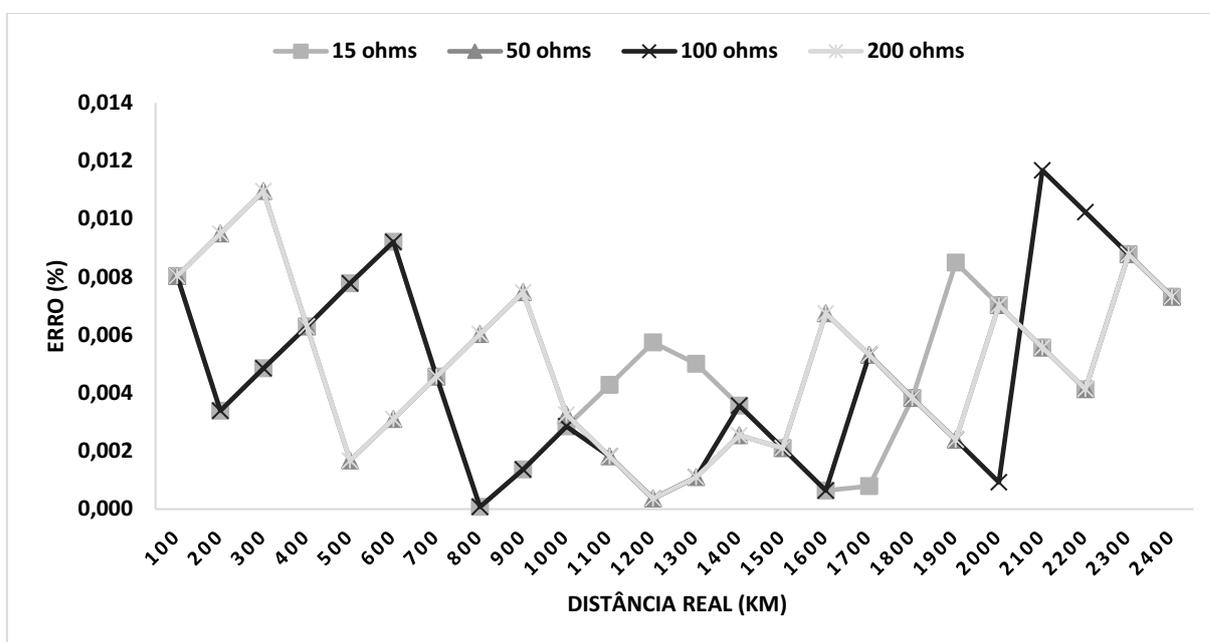
Tabela 7 - Erro Percentual para Falta Pólo-Terra para RF entre 15Ω e 200Ω - Utilização de Dados de Corrente (Butterworth).

Distância Real (km)	Erro (%)			
	<i>RF = 15Ω</i>	<i>RF = 50Ω</i>	<i>RF = 100Ω</i>	<i>RF = 200Ω</i>
100	0,008	0,008	0,008	0,008
200	0,003	0,010	0,003	0,010
300	0,005	0,011	0,005	0,011
400	0,006	0,006	0,006	0,006
500	0,008	0,002	0,008	0,002
600	0,009	0,003	0,009	0,003
700	0,005	0,005	0,005	0,005
800	0,000	0,006	0,000	0,006
900	0,001	0,007	0,001	0,007
1000	0,003	0,003	0,003	0,003
1100	0,004	0,002	0,002	0,002
1200	0,006	0,000	0,000	0,000
1300	0,005	0,001	0,001	0,001
1400	0,004	0,003	0,004	0,003
1500	0,002	0,002	0,002	0,002
1600	0,001	0,007	0,001	0,007
1700	0,001	0,005	0,005	0,005
1800	0,004	0,004	0,004	0,004
1900	0,008	0,002	0,002	0,002
2000	0,007	0,007	0,001	0,007
2100	0,006	0,006	0,012	0,006
2200	0,004	0,004	0,010	0,004
2300	0,009	0,009	0,009	0,009
2400	0,007	0,007	0,007	0,007

Fonte: Aatoria Própria (2020)

Observando a Figura 16, vê-se que há grande variação dos valores, o que gera uma diferença considerável quando se faz a mudança da resistência de falta. Ao observar na Tabela 7 vê-se que são valores diferentes para as RF igual a 200 e 100 ohms. Para a grande maioria dos outros pontos, os gráficos se sobrepõem, não havendo assim, tamanha diferença com relação a variação da RF, no entanto com relação a variação da distância existe uma pequena variação que a partir da análise percentual, nota-se que o erro varia de 0,010% a 0,012% o que equivale a 0,24km e 0,288km, respectivamente.

Figura 16 – Comportamento do Algoritmo para diferentes Resistências de Falta em Falta Pólo-Terra e Dados de Corrente (Butterworth).



Fonte: Autoria Própria (2020)

4.4.2 Falta Pólo-Pólo e Pólo-Terra com $R = 0 \Omega$ (Butterworth)

A Tabela 8 mostra o erro percentual dada a distância real da linha de transmissão, assim como, a comparação do erro percentual dada a modificação do tipo de falta, entre pólo-pólo e pólo-terra para a mesma resistência de falta 0Ω para dados de corrente.

Tabela 8 - Erro Percentual para Faltas Pólo-Terra e Pólo-Pólo para RF igual a 0Ω - Utilização de Dados de Corrente (Butterworth).

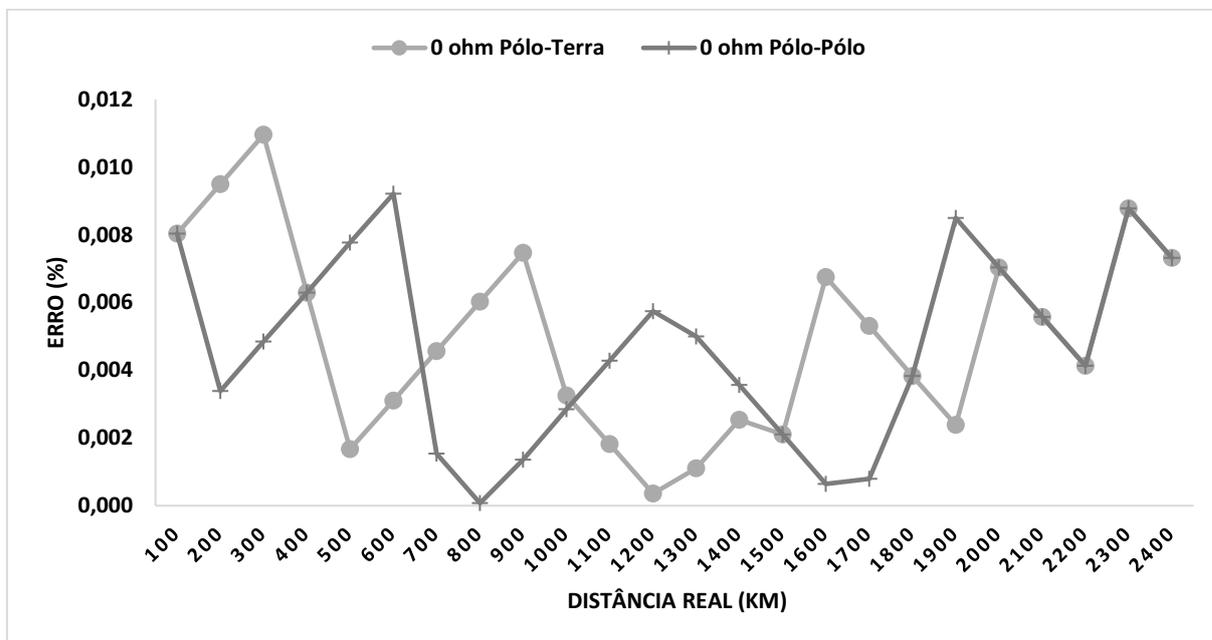
Distância Real (km)	Erro (%)	
	Pólo-Pólo	Pólo-Terra
100	0,008	0,008
200	0,003	0,009
300	0,005	0,011
400	0,006	0,006
500	0,008	0,002
600	0,009	0,003
700	0,002	0,005
800	0,000	0,006
900	0,001	0,007
1000	0,003	0,003
1100	0,004	0,002
1200	0,006	0,000
1300	0,005	0,001
1400	0,004	0,003
1500	0,002	0,002
1600	0,001	0,007
1700	0,001	0,005
1800	0,004	0,004
1900	0,008	0,002
2000	0,007	0,007
2100	0,006	0,006
2200	0,004	0,004
2300	0,009	0,009
2400	0,007	0,007

Fonte: Autoria Própria (2020)

Para a Figura 17, faz-se uma comparação quando a RF é igual a zero ohms, porém, com a variação do tipo de falta, sendo essas as faltas pólo-terra e pólo-pólo. Neste caso, assim como para quando se faz a análise para dados de tensão, é possível observar que há uma diferença entre as linhas do gráfico, assim quando se trata da variação da porcentagem com relação a distância do ponto de falta, têm-se

uma diferença considerável dada a análise percentual, onde a diferença entre os erros chega a 0,005% em alguns casos, o que equivale a 0,12km.

Figura 17 – Comportamento do Algoritmo para Resistência de Falta 0Ω e Variação do Tipo de Falta entre Pólo-Pólo e Pólo-Terra para Dados de Corrente (Butterworth).



Fonte: Autoria Própria (2020)

4.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS TRANSFORMADA WAVELET (HAAR) E FILTRO BUTTERWORTH

Nesta seção, será apresentada uma comparação utilizando o filtro Butterworth (passa-baixa) e a Transformada Wavelet aplicados ao problema de localização de faltas em linhas HVDC. Todos os dados utilizados para a simulação da TW foram também simulados para o filtro Butterworth de forma a mostrar a comparação entre os erros médios das simulações.

A Tabela 9, mostra a comparação com relação a falta pólo-terra e utilização de dados de tensão:

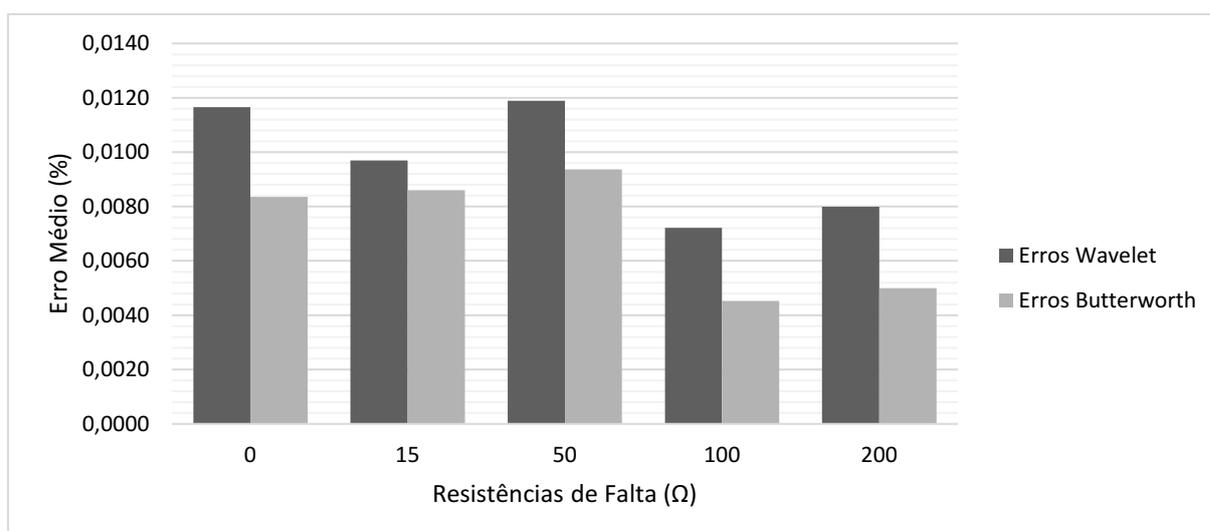
Tabela 9 - Comparação entre Haar e Butterworth do Erro Médio para Faltas Pólo-Terra dada a Utilização de Dados de Tensão.

RF (Ω)	Erro Médio (%)	
	Wavelet	Butterworth
0	0,0117	0,0084
15	0,0097	0,0086
50	0,0119	0,0094
100	0,0072	0,0045
200	0,0080	0,0050

Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 18, mostra graficamente essa comparação dada a variação das resistências utilizando dados de tensão em faltas pólo-terra.

Figura 18 – Comparação Erro Médio entre Wavelet Haar e Filtro Butterworth em Faltas Pólo-Terra utilizando dados de Tensão.



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Tabela 10, mostra a comparação com relação a falta pólo-terra e utilização de dados de corrente:

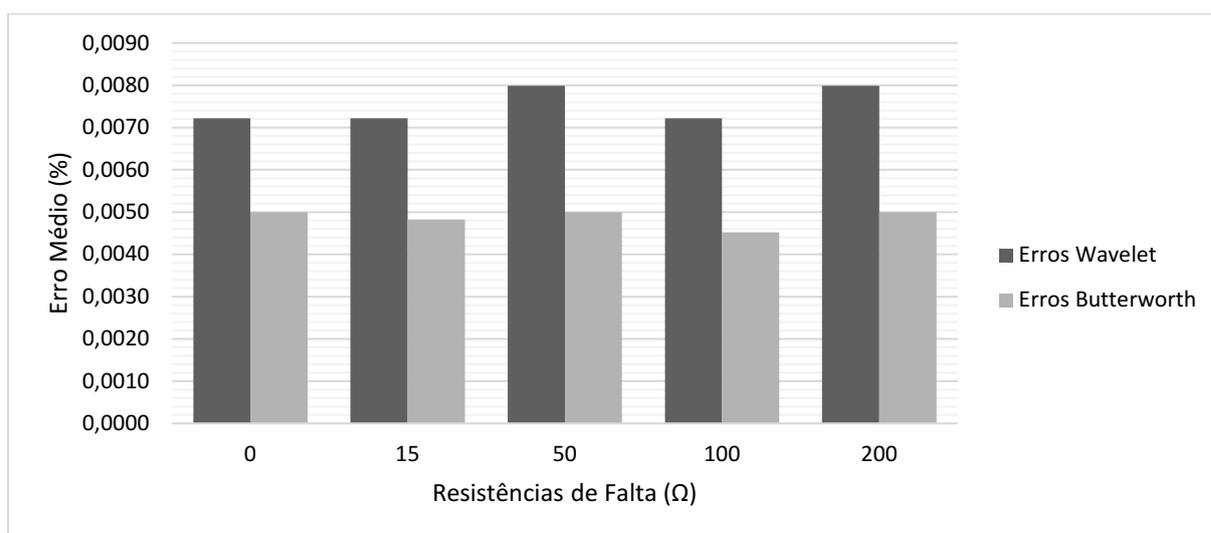
Tabela 10 - Comparação entre Haar e Butterworth do Erro Médio para Faltas Pólo-Terra dada a Utilização de Dados de Corrente.

RF (Ω)	Erro Médio (%)	
	Wavelet	Butterworth
0	0,0072	0,0050
15	0,0072	0,0048
50	0,0080	0,0050
100	0,0072	0,0045
200	0,0080	0,0050

Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 19, mostra graficamente essa comparação dada a variação das resistências utilizando dados de corrente em faltas pólo-terra.

Figura 19 – Comparação Erro Médio entre Wavelet Haar e Filtro Butterworth em Faltas Pólo-Terra utilizando dados de Corrente.



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Tabela 11, mostra a comparação com relação a falta pólo-terra e utilização de dados de tensão:

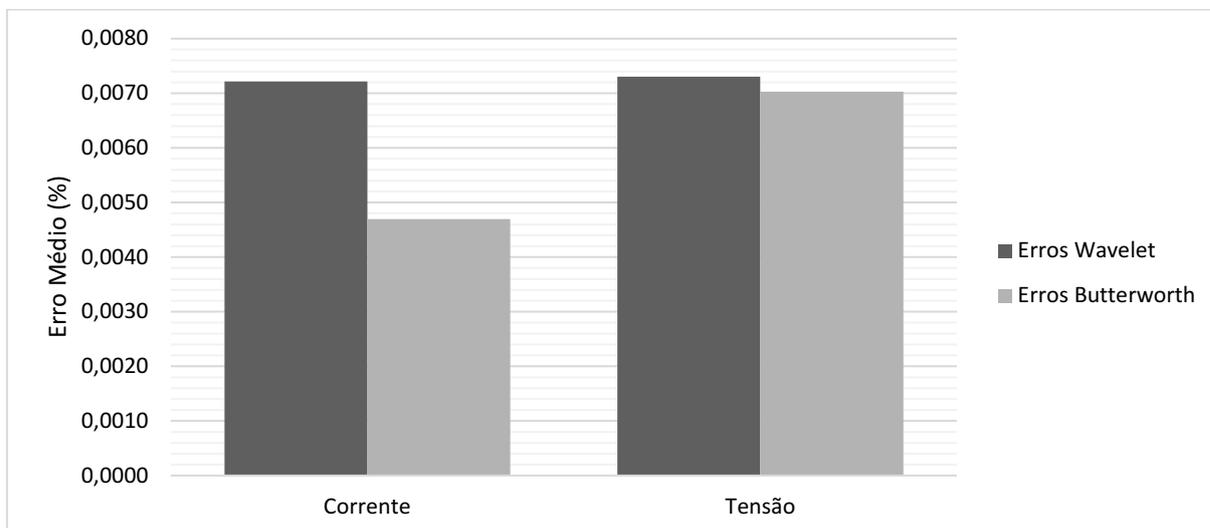
Tabela 11 - Comparação entre Haar e Butterworth do Erro Médio para Faltas Pólo-Pólo com RF=0 Ω .

Dados	Erro Médio (%)	
	Wavelet	Butterworth
Tensão	0,0073	0,0070
Corrente	0,0072	0,0047

Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 20, mostra graficamente essa comparação com faltas pólo-pólo e $RF=0\Omega$.

Figura 20 – Comparação Erro Médio entre Wavelet Haar e Filtro Butterworth em Faltas Pólo-Pólo com $RF=0\Omega$.



Fonte: Autoria Própria (2020)

É possível observar pelos dados apresentados acima, que existe uma diferença pouco notável no desempenho dos algoritmos, dados os erros médios. Porém, apesar da pouca diferença, quando dá aplicação em campo, é preciso analisar diversos outros fatores, como custo de implementação, processamento, memória, o que torna a ser mais dispendioso a aplicação da TW se comparado ao filtro Butterworth.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo da localização de faltas em sistemas de transmissão HVDC utilizando ondas viajantes e técnicas diferentes de filtragem como a TW baseado nas aplicações de (SILVA, W., 2017) e (AL HASSAN e GRAINGER, 2016) e filtro Butterworth passa-baixa. Assim como, a utilização da fundamentação teórica das ondas viajantes para localização de faltas em linhas de transmissão HVDC.

Os valores apresentados utilizando a Wavelet Haar, mostram que para distâncias centralizadas entre 1400km e 1800km, na maioria dos casos há um aumento no erro, onde esse erro tem valor de aproximadamente 0,01%, chegando até a 0,03% para faltas com RF muito altas, enquanto que para os demais pontos da linha, esses erros se mantêm abaixo, chegando a 0,001%, o que em quilômetros, considerando a linha de 2400km, seria de 240m, 720m e 24m respectivamente. Utilizando o Filtro Butterworth isso não ocorre, mantendo a porcentagem dos erros em no máximo 0,01% considerando faltas com RF nula. Dado a grande extensão da LT estudada, os valores podem ser considerados bons, visto que a área a ser analisada ao invés de ser o total da linha, é então reduzida a uma área muito menor.

Verificou-se neste trabalho que ambas as técnicas, TW e filtro Butterworth, mostraram-se adequadas a situação estudada quando aplicadas ao problema de localização de faltas em sistemas HVDC utilizando-se o princípio de ondas viajantes, visto que os valores dos erros chegam a aproximadamente 3 vãos de torre, ou seja, 1km.

6 TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se como continuidade da pesquisa estudos relativos a:

- Localização de faltas em sistemas HVDC a partir de um terminal
- Utilização de outras técnicas de localização de faltas
- Utilização de outras técnicas de filtragem de sinal

REFERÊNCIAS

AL HASSAN, H.A.; GRAINGER, B.M. **Fault Location Identification of a Hybrid HVDC-VSC System Containing Cable and Overhead Line Segments Using Transient Data**. 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), pp.1-5.

BEWLEY, L. V. **Traveling waves on transmission systems**. John Wiley & Sons, New York, USA, 1963.

BOVOLATO, L. F.; BOVOLATO, M. C. **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. 2009.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, E R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. Ed. Escola de Engenharia de São Carlos, 2011, p. 79.

DESSOUKY, S. S.; FAWZI, M.; IBRAHIM, H. A.; IBRAHIM, N.F. **DC Pole to Pole Short Circuit Fault Analysis in VSC-HVDC Transmission System**. 20th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo University, Egypt, 2018.

ELLIS, G. **Control System Design Guide**. Butterworth-Heinemann, 4th ed, chapter 9, 2012.

HOSSAM-ELDIN, A.; LOTFY, A.; ELGAMAL, M.; EBEEED, M. **Combined traveling wave and fuzzy logic based fault location in multi-terminal HVDC systems**. In: IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 1-6, 2016.

HWAN, K. C.; AGGARWAL, R. **Wavelet Transform in Power Systems: Part 1 General Introduction to the Wavelet Transform**. IEEE - Power Engineering Journal, Vol. 14, No. 2, April, 2000.

JUNG, W. **Op Amp Applications Handbook**. Newnes, chapter 5, 2005.

KHAIRNAR, A. K.; SHAH, P.J. **Study of Various Types of Faults in HVDC Transmission System**. International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication, 2016.

MARX, S.; JOHNDON, B. K.; GUZMÁN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. V. **Localização de Falhas em Relés de Proteção Baseada no Princípio das Ondas Viajantes: Projeto, Testes e Resultados**. 16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, Atlanta, Georgia, EUA, 2013.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O Sistema em Números**. 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: Agosto 2019.

SCHWEITZER, E. O. III; GUZMÁN, A.; MYNAM, M.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B. **Estimação Precisa da Localização da Falta e do Comprimento da Linha Baseada em um Terminal Usando Ondas Viajantes**. 2016. Disponível em: <https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6732_AccurateSingle_AG_20160205_Web_pt-BR.pdf?v=20190903-230856>. Acesso em: Setembro 2019.

SHUKR, M.; THOMAS, D.W.P.; ZANCHETTA, P. **VSC-HVDC Transmission Line Faults Location Using Active Line Impedance Estimation**. 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), pp. 244-248.

SILVA, M. da.; OLESKOVICZ, M.; COURRY, D. V. **Localização de Falhas em Linhas de Transmissão com Três Terminais Baseada na Aplicação da Transformada Wavelet Estacionária para Extração dos Componentes de Frequência Fundamental**. Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2006.

SILVA, W. E. P. **Localização de Falhas em Sistemas de Transmissão de Alta Tensão em Corrente Contínua**, USP-São Carlos, 2017. p. 14.

SINDAT – Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN. 2019. Disponível em:

<http://www.ons.org.br/PublishingImages/paginas/Setembro2019_Mapa%20Sistema%20de%20Transmissao.jpg>. Acesso em: Agosto 2019.

SOUZA, N. P.; BASSO, V.; SILVA, M. da. **Proposta para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão HVDC Utilizando Dados de Dois Terminais, Ondas Viajantes e Transformada Wavelet.** In: XIV SEPOPE – Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning. 2018, Recife-PE.

STRINGFIELD, T. W.; MARIHART, D. J.; STEVENS, R. F. **Fault Location Methods for Overhead Lines.** Transactions of the American Institute of Electrical Engineers – Part III: Power Apparatus and Systems, Vol. 76, Issue 3, April 1957, pp. 518–530.

THOMPSON, M. T. **Intuitive Analog Circuit Design.** Newnes, 2nd edition, 2014.

ÜNAL, F.; EKICI, S. **A fault location technique for HVDC transmission lines using extreme learning machines.** In: 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG) IEEE Conferences, pp. 125 – 129, 2017.

VASANTH, S.; YEAP, Y. M.; UKIL, A. **Fault location estimation for VSC-HVDC system using Artificial Neural Network.** In: IEEE Region 10 Conference (TENCON), pp. 501-504, 2016.