

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

**GUILHERME STRINGARI ABREU
JULIANO MENEZES
LUIS GUSTAVO DIAS DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM LOCALIZADOR DE
FALTAS COMERCIAL APLICADO A LINHAS DE
TRANSMISSÃO HÍBRIDAS EM CORRENTE ALTERNADA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2018**

**GUILHERME STRINGARI ABREU
JULIANO MENEZES
LUIS GUSTAVO DIAS DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM LOCALIZADOR DE
FALTAS COMERCIAL APLICADO A LINHAS DE
TRANSMISSÃO HÍBRIDAS EM CORRENTE ALTERNADA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Curitiba, como requisito de aprovação desta disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Chemin Netto

**CURITIBA
2018**

Guilherme Stringari Abreu
Juliano Menezes
Luis Gustavo Dias de Souza

Avaliação do Desempenho de um Localizador de Falhas Comercial Aplicado à Linhas de Transmissão Híbridas em Corrente Alternada

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 06 de dezembro de 2018.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Ulisses Chemin Netto, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Ulisses Chemin Netto, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fabiano Magrin, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cicero Fritzen, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

AGRADECIMENTOS

A Equipe agradece a universidade, professores, técnicos administrativos e todos os colegas de graduação, pela estrutura, pelo ambiente benéfico e aberto ao debate científico e por todo auxílio dado durante essa graduação. Aos professores, que sem a criteriosidade e a ponderação com a qual os métodos foram apresentados e ensinados este trabalho não seria possível. Aos colegas, agradecemos por todos esses anos de convívio, momentos e amizades que levaremos por toda vida.

As nossas famílias e amigos pelo apoio e atenção dedicadas ao longo da trajetória. Sem o incentivo, encorajamento e paciência a execução deste projeto seria muito mais exaustivo.

Ao professor Dr. Ulisses Chemin Netto, pela orientação e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

A Egberto de Arruda Moreira e a Schneider Electric Brasil Ltda, por proporcionar a estrutura e apoio para a realização dos testes.

Eu, Luis Gustavo Dias de Souza, agradeço à toda minha família, em especial aos meus pais, Heraldo J. L. de Souza e Denise Dias de Souza, meus irmãos Luis Guilherme Dias de Souza e Francine L. Dias de Souza pela dedicação, amor, motivação e apoio em toda minha jornada acadêmica.

Eu, Juliano Menezes, agradeço aos meus pais Lincolm N. Menezes e Rosângela M. do Nascimento, meus irmãos Leonardo H. Menezes, Rafael N. Menezes e Vivian C. Menezes, e minha companheira Arabelle M. Knesebeck pelo amor, carinho, dedicação e inspiração para superar tantos desafios que enfrentei durante minha jornada.

Eu, Guilherme Stringari Abreu, agradeço à meus familiares, em especial aos meus pais, Lincolm M. N. Abreu e Jenice S. Abreu, pelo amor, apoio, educação e incentivo, sem os quais não seria possível seguir durante minha trajetória.

RESUMO

ABREU, Guilherme S.; MENEZES, Juliano; SOUZA, Luis G. D. Avaliação do desempenho de um localizador de faltas comercial aplicado a linhas de transmissão híbridas em corrente alternada. 2018, 59 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

A utilização de linhas de transmissão contendo trechos aéreos e subterrâneos pode constituir uma boa solução no que diz respeito à adaptação de sistemas de transmissão e distribuição, sobretudo em ambientes urbanos. Porém, esta topologia traz problemas referentes à estimação da localização de faltas por meio de equipamentos de proteção, uma vez que a descontinuidade da impedância provocada pelas características de cada segmento da linha pode levar a erros nos cálculos desenvolvidos para fornecer a distância entre o ponto de falta e o terminal de medição, acarretando em maiores custos e tempo de manutenção. Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho do algoritmo de localização de faltas empregado em um relé de proteção comercial, apresentando o erro gerado através da aplicação de sinais de tensão e corrente resultantes da modelagem de uma linha de transmissão híbrida no aplicativo ATPDraw. Os testes realizados retornaram uma taxa de erro que supera a máxima garantida pelo fabricante do dispositivo, levando a conclusão de que o algoritmo de localização de faltas adotado é inadequado e necessita de melhorias para operar corretamente de acordo com a impedância descontínua proposta pelo sistema simulado.

Palavras-Chave: Linhas de transmissão. Linha de transmissão híbrida. Localização de faltas. Relé de proteção.

ABSTRACT

ABREU, Guilherme S.; MENEZES, Juliano; SOUZA, Luis G. D. Performance evaluation of a commercial fault locator applied to hybrid AC transmission lines. 2018, 59 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The use of power transmission lines containing overhead and underground sections can be a good solution for the adaptation of transmission and distribution systems especially in urban environments. However, this topology causes problems regarding the fault location algorithm of protection devices, once the discontinuity of the impedance caused by the characteristics of each line segment can lead to errors in the calculation to locate the fault point, leading to additional costs and maintenance time. This final paper aimed to evaluate the fault location algorithm performance that is used in a commercial protection relay, presenting the measurement error when current and voltage signals generated by a model with hybrid power transmission lines developed on ATPDraw *software* were applied. The results of the tests showed a greater rate error than the rates guaranteed by the manufacturer, leading to the conclusion that the fault location algorithm is inappropriate and it needs improvement to work with the discontinuity of impedance of the proposed system.

Keywords: Power transmission lines. Hybrid power transmission lines. Fault location. Protective relay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha de Transmissão e representação da falta.	20
Figura 2 – Rede de pré falta.....	21
Figura 3 - Rede representando a falta isolada.	21
Figura 4 - Circuito Equivalente do Sistema em Falta.	24
Figura 5 - Fluxograma do Localizador de Falta.	25
Figura 6 - Amostragem dos sinais de tensão e corrente no localizador de falta.	26
Figura 7 - Janela móvel de dados amostrais.....	27
Figura 8 - Classificação de diferentes tipos de falta em uma LT.	29
Figura 9 - Organograma para execução da pesquisa.	30
Figura 10 – Aparato experimental proposto.	31
Figura 11 – Fluxo de Informações da pesquisa.....	32
Figura 12 – Diagrama representativo do sistema elétrico utilizado.	33
Figura 13 – Parâmetros construtivos da torre de transmissão.	36
Figura 14 – Parâmetros construtivos do poste.	38
Figura 15 – Parâmetros construtivos do trecho subterrâneo.....	39
Figura 16 – Tensões em regime permanente medidas no barramento emissor.	42
Figura 17 – Correntes em regime permanente no circuito 2 medidas no barramento emissor.....	43
Figura 18 – Sinais de tensão medidos no barramento emissor para um curto-circuito fase-terra envolvendo a fase A do circuito 2.	43
Figura 19 - Sinais de corrente medidos no barramento emissor para um curto-circuito fase-terra envolvendo a fase A do circuito 2.	44
Figura 20 – Curva de Impedância da LT.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comprimentos das linhas de transmissão.....	33
Tabela 2 – Características do cabo CAA 477 Hawk.....	34
Tabela 3 – Características do cabo para-raios.....	34
Tabela 4 - Características do cabo CAA 636 Grosbeak.....	37
Tabela 5 - Características do cabo para-raios.....	37
Tabela 6 – Características dos cabos subterrâneos.	39
Tabela 7 – Valores de sequência positiva para a impedância série da linha híbrida ($l = 7,5 \text{ km}$).....	40
Tabela 8 – Valores de sequência positiva para a admitância paralela da linha híbrida ($l = 7,5 \text{ km}$).....	40
Tabela 9 – Valores de sequência zero para a impedância série da linha híbrida ($l = 7,5 \text{ km}$).....	40
Tabela 10 – Valores de sequência zero para a admitância paralela da linha híbrida ($l = 7,5 \text{ km}$).....	40
Tabela 11 - Valores de impedância de sequências positiva e zero.....	41
Tabela 12 - Parâmetros ajustados no relé.	45
Tabela 13- Resultados do sistema homogêneo.	47
Tabela 14 – Estimativa de falta para curtos-circuitos monofásicos.....	48
Tabela 15 - Estimativa de falta para curtos-circuitos bifásicos.....	49
Tabela 16 - Estimativa de falta para curtos-circuitos bifásicos a terra.....	50
Tabela 17 - Estimativa de falta para curtos-circuitos trifásicos.....	50
Tabela 18 - Estimativa de falta para curtos-circuitos trifásicos a terra.	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CA	Corrente Alternada
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
COMTRADE	<i>Common format for Transient Data Exchange for power systems</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IA	Inteligência Artificial
IACS	International Annealed Copper Standard
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LF	Localizador de Falta
LT	Linha de Transmissão
MVS	Máquina de Vetores de Suporte
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RNA	Rede Neural Artificial
RNAR	Rede Neural Auto-Regressiva
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TDF	Transformada Discreta de <i>Fourier</i>
TP	Transformador de Potencial
TW	Transformada <i>Wavelet</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	TEMA	11
1.1.1	Delimitação do Tema	12
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS.....	12
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	JUSTIFICATIVA	14
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
1.6	COMENTÁRIOS FINAIS.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	16
2.2	MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA BASEADOS NOS COMPONENTES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL COM DADOS DE UM TERMINAL	17
2.3	LOCALIZADOR DE FALTAS COMERCIAL	23
2.4	CARACTERIZAÇÃO GENÉRICA DO MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DO RELÉ	25
2.4.1	Obtenção dos sinais de tensão e corrente	26
2.4.2	Detecção da Falta	26
2.4.3	Filtragem Digital	28
2.4.4	Classificação da Falta	28
2.4.5	Cálculo da Impedância Aparente	29
2.4.6	Considerações Finais.....	29
3	MÉTODOLOGIA	30
3.1	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	30
3.2	SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO	32
3.3	PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DA TORRE DE TRANSMISSÃO	33
3.4	PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO POSTE	36
3.5	PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO TRECHO SUBTERRÂNEO	38
3.6	DADOS EQUIVALENTES DA LINHA DE TRANSMISSÃO HÍBRIDA	40
3.7	DADOS DO EQUIVALENTE DA FONTE	41
3.8	DADOS DO EQUIVALENTE DA CARGA	41
3.9	GERAÇÃO DO BANCO DE DADOS PARA OS ENSAIOS.....	42

3.10	MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCALIZADOR.....	46
4.2	RESULTADOS PARA AS ESTIMATIVAS DE FALTAS	47
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A energia elétrica é um recurso necessário para garantir o bom desenvolvimento econômico de um país e assim possibilitar o bem-estar de sua sociedade. Por isso, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são organizados de forma a assegurar que a rede elétrica irá operar adequadamente e que a energia elétrica fornecida terá um alto grau de confiabilidade, continuidade e qualidade do produto e serviço. Porém, situações faltosas não são raras nos diversos componentes de um SEP, entre eles vale o destaque para as linhas de transmissão (LTs), as quais são mais susceptíveis a falhas devido às suas grandes dimensões físicas, complexidade operacional e por serem as partes mais expostas do SEP às condições climáticas e ambientais (SILVA, 2005). Conforme ANEEL, 2017, dos 3771 desligamentos forçados que ocorreram no Sistema Interligado Nacional (SIN), 76,1% ocorreram em Linhas de Transmissão. Assim as LTs são um dos componentes de mais difícil manutenção e controle.

A crescente e contínua demanda de energia elétrica aliada a interligação do sistema de transmissão provocou um aumento em complexidade dos SEP, sendo preciso aperfeiçoar os equipamentos de controle, proteção, localização de faltas, além do monitoramento e operação utilizados. Essa melhora nos dispositivos visa a manter o SEP operando em condição normal e segura, minimizar a influência de um defeito local sobre o restante do sistema e buscar tempos de interrupção no fornecimento de energia elétrica tão pequenos quanto possível, garantindo, por fim, que a operação do SEP, tanto em condições normais de operação quanto em contingência, será confiável e econômica (SILVA, 2005).

As LTs em corrente alternada (CA) podem ser aéreas ou subterrâneas. As linhas de transmissão aéreas são as mais utilizadas, pois sua construção possui um custo entre 15% a 60% do que é gasto na construção de linhas subterrâneas equivalentes sendo, portanto, uma solução mais econômica, conforme Gönen (2015). Os sistemas de "transmissão híbridos" são preferidos quando surgem problemas relacionados ao direito de acesso e a dificuldade junto às prefeituras para o licenciamento de novas linhas aéreas, além de oferecerem uma melhor confiabilidade, pois não estarão totalmente susceptíveis às condições climáticas e

urbanas que podem levar a condições de falta. Além disso, os cabos subterrâneos também são usados para conectar parques eólicos *off-shore* à rede elétrica existente. No entanto, a complexidade do problema de localização de falta aumenta com a proliferação de uma topologia tão incomum. Os dois tipos de linhas de transmissão possuem parâmetros elétricos diferentes e isso pode afetar o desempenho do sistema de localização para detectar uma falta, o que acaba sendo prejudicial ao SEP (KLOMJIT, 2017); (LEE, 2011); (KUMAR, 2014).

Um localizador digital de faltas tem a função de estimar o ponto de ocorrência de uma falta em uma linha de transmissão com a melhor precisão possível, pois isso contribuirá para a diminuição do tempo de restauração da operação normal do SEP, após a ocorrência de uma falta permanente, bem como com a diminuição nos serviços de manutenção, sendo importante para a continuidade de fornecimento de energia (COURY, 2011). Por isso se mostra necessário avaliar o desempenho de localizadores comerciais de falta em linhas de transmissão híbridas, uma vez que os algoritmos padrões implementados nesta função não consideram a combinação das características elétricas de ambos os tipos de linhas de transmissão em corrente alternada, o que por si só pode levar a erros consideráveis na estimativa da distância da falta.

1.1.1 Delimitação do Tema

O tema escolhido para a condução desta pesquisa é a localização de faltas em linhas de transmissão híbridas, parte aérea e parte subterrânea, em corrente alternada com dois terminais. Particularmente, a análise do desempenho de um localizador de faltas comercial será o foco da pesquisa.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O aumento de demanda de energia elétrica das grandes cidades provoca uma necessidade de ampliação e aprimoramento do sistema elétrico de potência. Devido à falta de espaço nos centros urbanos e a relativa dificuldade do licenciamento de novas linhas de transmissão aéreas, se mostra necessária a implementação de linhas de transmissão híbridas. A estimativa da distância de falta nesse tipo de linha de transmissão necessita ter uma boa precisão, pois uma falta permanente no trecho

subterrâneo da linha irá exigir que uma grande extensão seja escavada para corrigir o defeito e tornar possível sua recomposição. Por isso é preciso avaliar os localizadores de falta em linhas híbridas. Os algoritmos convencionais para localização de falta são desenvolvidos considerando que a linha é homogênea; toda aérea ou toda subterrânea. Assim para esse caso em especial, onde a linha é parte aérea e parte subterrânea, qual será a resposta desses algoritmos comerciais, disponíveis, por exemplo, em Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) de proteção?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o erro na estimação da distância de falta de um localizador comercial, que utiliza dados de tensão e corrente de um único terminal da linha, quando aplicado a uma linha de transmissão híbrida em corrente alternada.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a temática de localização de faltas em linhas de transmissão e simulação de sistemas elétricos de potência em condição de falta;
- Representar computacionalmente um sistema de transmissão híbrido em corrente alternada pelo uso do aplicativo *Alternative Transients Program* (ATP);
- Elaborar um conjunto de situações de falta e operação sobre o sistema de transmissão simulado para estudar o erro na estimação da distância de falta associado a localizadores de falta que utilizam dados de um único terminal da linha de transmissão;
- Aplicar os sinais de tensão e corrente, em formato *.pl4 do ATP, ao localizador de falta estudado dispondo de um dispositivo para ensaio em relés de proteção e, com isso, obter os valores de localização de falta simulados.

- Comparar os valores da localização de falta simulados com os valores estimados pelo localizador comercial através de uma métrica pré-estabelecida, conforme será apresentado no capítulo 3;

1.4 JUSTIFICATIVA

Os localizadores de falta tem seus algoritmos voltados para a detecção de faltas em linhas homogêneas. Portanto, a localização de faltas em linhas híbridas poderá sofrer uma imprecisão devido a descontinuidade da impedância de cada trecho da linha.

Caso o localizador de falta estime erroneamente o ponto da linha sob falta, isso gerará uma série de problemas, tendo em vista que algumas linhas subterrâneas podem não ter fácil acesso por serem construídas com um envelope de concreto ao seu redor, ou mesmo linhas áreas de difícil acesso como em regiões montanhosas ou florestais. Conseqüentemente, a atividade de manutenção da linha terá custos associados maiores e, caso a estimativa do localizador não seja adequada, esse custo será ainda maior, haverá maior tempo de indisponibilidade, acarretando em degradação dos índices de continuidade, além de potenciais prejuízos financeiros, tanto para a concessionária, quanto para os consumidores dela dependente.

Com o estudo desenvolvido é possível avaliar o nível de imprecisão do algoritmo para faltas em linhas híbridas. Essa informação é necessária para poder identificar em quais casos ainda é viável a aplicação do algoritmo de um localizador que utiliza dados de um único terminal da linha.

Em alguns casos pode ser necessário adotar alguma técnica de compensação de parâmetros, ou ainda, utilizar uma abordagem específica para esse caso de instalação, de modo a obter uma maior precisão na estimativa da distância da falta. Entretanto, esse desenvolvimento não faz parte desta pesquisa.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 introduz o contexto em que esta pesquisa se insere, os objetivos definidos, o planejamento da pesquisa, bem como a organização deste documento.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica a respeito da temática de localização de faltas em linhas de transmissão.

O capítulo 3 descreve em detalhes a simulação computacional da linha de transmissão híbrida em corrente alternada, realizada com o uso do *software* ATP.

O capítulo 4 exhibe os detalhes associados a especificação, montagem e configuração do aparato experimental, os resultados e sua discussão.

O capítulo 5 discute as conclusões, fechamento da pesquisa e trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

1.6 COMENTÁRIOS FINAIS

Definidos os objetivos e a motivação da pesquisa, foi desenvolvida a fundamentação teórica envolvendo os temas de localização de falta em linhas de transmissão e simulação de Sistemas Elétricos de Potência em condições de falta, tendo por objetivo uma familiarização com o problema de pesquisa apresentado, bem como a metodologia de procedimento descrita anteriormente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Localizadores digitais de faltas têm por objetivo determinar o ponto de ocorrência de uma falta em uma LT da forma mais precisa possível, implicando em uma operação mais econômica e confiável do SEP. Além de garantir que um menor tempo será gasto nos serviços de manutenção e reparo, ou seja, permite uma rápida restauração da operação normal e segura do SEP (SILVA, 2005).

Para o problema de localização de faltas, diversas tecnologias digitais já foram propostas e implementadas com diferentes princípios aplicados em linhas de transmissão. Métodos mais elaborados utilizam Inteligência Artificial (IA) para detecção, classificação e localização da falta em uma LT. Máquina de Vetores de Suporte (MVS), Rede Neural Auto-regressiva (RNAR) e Redes Neurais Artificiais (RNA) são algumas técnicas baseadas em IA (MISHRA, 2016).

Geralmente as técnicas convencionais usam as tensões e correntes dos barramentos como dados de entrada. As tensões e correntes são utilizadas para se calcular a impedância até o ponto de falta, a qual pode ajudar a indicar a localização da falta na LT. Os distintos métodos são diferenciados na maneira em que se obtêm os dados, podem ser provenientes de um único terminal ou de múltiplos terminais de uma LT (COURY, 2011).

Os métodos mais comuns para localização de faltas são dois; um baseado na medição da impedância da linha com algoritmos que utilizam fasores das componentes fundamentais dos sinais medidos e, o segundo, métodos baseados em ondas viajantes, que são normalmente muito mais precisos. Nesses dois métodos os dados podem ser provenientes de um ou mais terminais (POPOV, 2013).

O método por ondas viajantes baseia-se na teoria da Transformada *Wavelet* (TW), com esta técnica é possível detectar com precisão o início de uma descontinuidade no sinal quando presente, referenciando-o ao domínio do tempo. Esse método também permite que as características de corrente dessa descontinuidade sejam mostradas (BARBOSA, 2010).

Conforme Xu (2015), os algoritmos por componentes fundamentais que lançam mão de dados provenientes de um único terminal da LT são os mais utilizados, devido a simplicidade de implementação, não comprometendo a

capacidade de processamento dos equipamentos, além de dispensar a necessidade de canais de comunicação entre terminais e a análise da topologia do sistema, fornecendo a localização do defeito com uma precisão aceitável. Porém é necessário ressaltar que há também limitações, devido justamente à simplicidade do método, sobretudo na questão da modelagem da linha que é assumida sempre como homogênea, bem como a utilização de diversas simplificações nos equacionamentos que acabam por aumentar a imprecisão dos resultados.

A seguir será abordado de maneira mais profunda o método de localização por componentes fundamentais com dados de um único terminal, que é o método utilizado pelo localizador comercial de falta estudado.

2.2 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA BASEADOS NOS COMPONENTES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL COM DADOS DE UM TERMINAL

Os algoritmos baseados nos componentes de frequência fundamental com dados disponíveis em apenas um terminal da linha utilizam a impedância aparente e as correntes de pré-falta para calcular a localização da falta. Porém, as correntes provenientes dos alimentadores remotos, a impedância de falta, o carregamento da linha e parâmetros da fonte podem gerar erros na estimativa fornecida¹ (COURY, 2011). Apesar das desvantagens mencionadas, o algoritmo de um terminal tem como

¹ Para melhorar a precisão da localização de faltas em LTs são utilizadas informações de dados e parâmetros observados nos dois terminais da linha. Esse método traz a necessidade que se tenha um meio de comunicação entre os terminais, além de uma técnica confiável para determinar os ângulos de fase das tensões e das correntes, em relação a um eixo de referência. Com tudo isso, as medições em ambos os lados necessitam de extrema precisão para que sejam sincronizadas e assim se possa obter a localização com exatidão da falta (COURY, 2011). Comparando-se os dois tipos de obtenção dos dados, utilizar dois terminais faz com que o cálculo da falta seja independente da impedância de falta e de mudanças na configuração das fontes do sistema de potência. Um localizador de faltas considerando dados de dois terminais baseia-se na utilização dos fasores fundamentais trifásicos de corrente e tensão de ambos os lados. Um mecanismo de comunicação de dados junto com a utilização de um processador garante a sincronização dos dados medidos (COURY, 2011).

vantagem sua simplicidade e medições mínimas necessárias, resultando em uma redução de custo com dispositivos instalados, conforme Threevithayanon (2013).

De acordo com o guia IEEE Std.C37.114 (2014), os localizadores de faltas a partir de um terminal se utilizam da impedância aparente vista pelo ponto de medição para calcular a distância até a região faltosa. Para localizar todos os tipos de faltas, fase-fase, fase-terra, fase-fase-terra e fase-fase-fase, é necessário que as tensões e correntes monofásicas sejam medidas.

Um dos algoritmos citados no guia IEEE Std.C37.114 (2014) é o método de reatância simples, o dispositivo mede a impedância aparente e com isso determina a relação da reatância medida à reatância total da linha. Essa técnica assume que a corrente através da resistência de falta está em fase com a corrente no ponto de medição. Esse algoritmo compensa a resistência de falta medindo apenas a parte imaginária da impedância da linha aparente. A distância até a falta é mostrada na Equação (2.1):

$$m = \frac{\text{Im}(V_G/I_G)}{\text{Im}(Z_L)} \quad (2.1)$$

Onde V_G é a tensão de um terminal G, I_G é a corrente de linha do terminal G e Z_L é a impedância de linha entre os terminais G e H.

Se a falta for fase-terra, o cálculo da distância é feito de acordo com a Equação (2.2):

$$m = \frac{\text{Im} \left[\frac{V_{Ga}}{I_{Ga} + k_0 I_R} \right]}{\text{Im}(Z_{1L})} \quad (2.2)$$

Onde

$$k_0 = \frac{(Z_{0L} - Z_{1L})}{3Z_{1L}} \text{ e } I_R = 3I_0$$

Onde V_{Ga} é a tensão entre o terminal G e a terra, I_{Ga} é a corrente de linha no terminal G com uma falta fase-terra, I_R a corrente residual que equivale a três vezes

a corrente de sequência zero, Z_{1L} a impedância de sequência positiva da linha e Z_{0L} a impedância de sequência zero da linha.

Esse método é muito bom em sistemas radiais, onde as correntes de cada terminal estão em fase, quando a resistência de falta é zero esse método também apresenta boa precisão. Se o valor da resistência de falta for muito alto, então o erro considerando este algoritmo terá um valor considerável.

Outro fator que interfere na localização da falta é a presença da impedância mútua entre os circuitos da linha de transmissão, as fases são magneticamente acopladas entre si, fazendo com que uma fase seja perturbada quando há ocorrência de defeitos em outras fases. Isso modifica o valor do cálculo da impedância aparente vista pelo localizador, fazendo com que o algoritmo calcule incorretamente a localização da falta (DALCASTAGNÉ et al, 2007).

O método descrito por Erikson et al. (1985) calcula a localização da falta com uma compensação quando houver uma resistência de falta, eliminando os erros inerentes no caso do método de reatância simples. Esse algoritmo usa um fator de distribuição de corrente (K_p) para conseguir representar a queda de tensão através da resistência de falta (R_F). Assim, essa técnica determina o ângulo da tensão no ponto da falta e a sua distância. O equacionamento do método é mostrado na Equação (2.3):

$$V_S = I_S p Z_L + \left(\frac{I_{SF}}{K_p} \right) R_F \quad (2.3)$$

Onde I_{SF} representa a mudança na corrente produzida pela falta, p a distância da falta, Z_L a impedância da linha, I_S a corrente de linha do terminal S e V_S é a tensão de um terminal S. O fator de distribuição de corrente é uma função entre a localização da falta, os parâmetros de sequência positiva da linha (Z_L) e a impedância das fontes (Z_S e Z_R):

$$K_p = \frac{(1-p)Z_L + Z_S}{Z_R + Z_L + Z_S} = |p| e^{j\beta} \quad (2.4)$$

Onde β representa a fase do fator de distribuição de corrente. Substituindo a Equação (2.4) na Equação (2.3):

$$p^2 - pK_1 + K_2 - K_3R_F = 0 \quad (2.5)$$

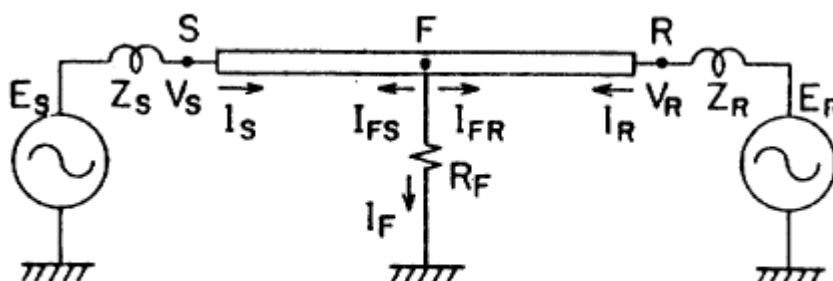
Em que:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{V_S}{I_S Z_L} + 1 + \frac{Z_R}{Z_L} \\ K_2 &= \frac{V_S}{I_S Z_L} \left(\frac{Z_R}{Z_L} + 1 \right) \\ K_3 &= \frac{I_{SF}}{I_S Z_L} \left(\frac{Z_S + Z_R}{Z_L} + 1 \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Separando a Equação (2.5) em uma parte real e uma parte complexa, desconsiderando a resistência de falta que é desconhecida, obtém-se uma expressão resultante onde é possível calcular a distância (p) estimada da falta.

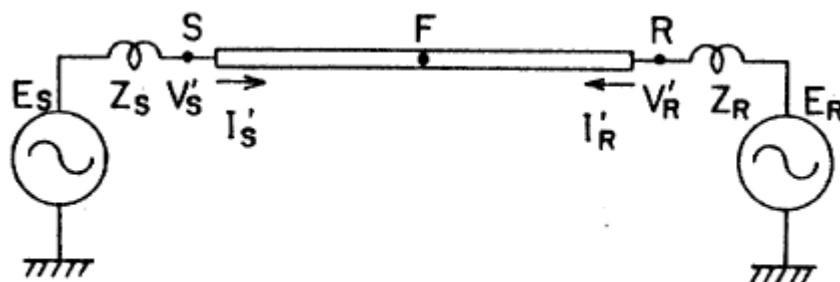
O método descrito por Takagi et al. (1981) é baseado na superposição da corrente, isso garante que a mudança na corrente da linha causada pela falta seja verificada. Esse algoritmo utiliza os sinais de tensão e corrente que são filtrados através da Transformada Discreta de Fourier (TDF), de forma a se obter os fasores de corrente e tensão em regime permanente da linha. Por meio da superposição das componentes de tensão e corrente, o sistema trifásico pode ser tratado como três circuitos monofásicos independentes. As figuras a seguir mostram as representações de uma rede com uma falta, uma rede pré-falta e uma rede onde a falta foi isolada.

Figura 1 – Linha de Transmissão e representação da falta.



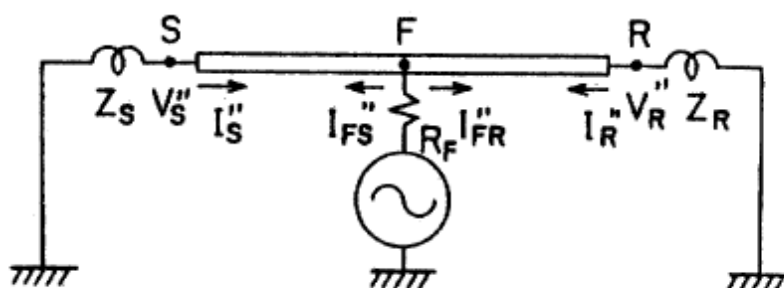
(Fonte: Takagi et al., 1981)

Figura 2 – Rede de pré falta.



(Fonte: Takagi et al., 1981)

Figura 3 - Rede representando a falta isolada.



(Fonte: Takagi et al., 1981)

Separando a rede faltosa em duas redes derivadas, sendo uma de pré-falta e uma onde a falta foi isolada, é possível fazer o equacionamento visto na Equação (2.7), V_F é o vetor de tensão no ponto da falta, I_F o vetor de corrente e R_F a resistência na rede faltosa:

$$\begin{aligned} V_F &= R_F I_F \\ V_F &= -R_F (I''_{FS} + I''_{FR}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

As correntes de linha no ponto da falta até cada terminal da linha são representados com as aspas duplas. A variável que relaciona essas duas correntes é mostrada na Equação (2.8), essa variável está em função da distância da falta:

$$K(d) \cong \frac{I''_{FR}}{I''_{FS}} \quad (2.8)$$

A tensão no ponto da falta e a corrente do ponto da falta até o terminal S podem ser representados através da teoria de quadripólos:

$$V_F = A(d)V_S - B(d)I_S \quad (2.9)$$

$$I''_{FS} = C(d)V''_S - D(d)I''_S \quad (2.10)$$

Onde $A(d)$, $B(d)$, $C(d)$ e $D(d)$ são as quatro constantes do quadripólo representativo da LT, λ é a constante de propagação e Z_C a impedância característica da linha:

$$\begin{aligned} A(d) &= D(d) = \cosh(\lambda d) \\ B(d) &= Z_C \sinh(\lambda d) \\ C(d) &= \frac{\sinh(\lambda d)}{Z_C} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Sabendo que a resistência de falta é puramente resistiva e considerando que as impedâncias das fontes nos terminais sejam puramente indutivas, fazendo as devidas substituições, é possível encontrar uma equação básica para a localização da falta, utilizando as constantes do quadripólo representativo que são funções dependentes da distância de falta:

$$\text{Imag} \left[\frac{A(d)V_S - B(d)I_S}{C(d)V''_S - D(d)I''_S} \right] = 0 \quad (2.12)$$

A Equação (2.12) representa a parte imaginária de uma variável complexa. Por ser uma função não linear, é utilizado o método iterativo de Newton-Raphson para encontrar a solução d referente a distância do ponto da falta ao terminal local.

Outro método, descrito por Takagi et al. (1982b), propõe utilizar a corrente de sequência zero (I_0) e o ângulo de fase do fator de corrente (β) para o cálculo da distância da falta. Dessa forma, a distância da falta é mostrada na Equação (2.13):

$$d = \frac{\text{Im}(V_S I_0^* e^{-j\beta})}{\text{Im}(Z_L I_S I_0^* e^{-j\beta})} \quad (2.13)$$

Este método melhora a estimativa da falta por reduzir o erro do efeito de reatância, porém, o ângulo do fator de corrente torna a localização da falta precisa apenas em um ponto da linha, uma vez que β varia de acordo com a localização da falta.

2.3 LOCALIZADOR DE FALTAS COMERCIAL

O relé digital utilizado para realização dos testes envolvendo a aplicação dos sinais de tensão e corrente obtidos nas rotinas de simulação consiste em um equipamento voltado para proteção de linhas de transmissão. De acordo com o manual do fabricante, este IED dispõe de funções de proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada (50/51), direcional (67), diferencial (87), distância (21), entre outras; entradas digitais para aquisição de sinais de estado de equipamentos (posição, alarmes); saídas digitais para realização de comandos remotos de abertura, fechamento e *trip*; e entradas analógicas para leitura de sinais de tensão e corrente provenientes de transformadores de corrente (TC) e potencial (TP).

Além disso, o relé dispõe da função de localização de falta que faz uso das informações das entradas de tensão e corrente em conjunto com parâmetros previamente configurados da linha para fornecer uma distância entre o terminal e o ponto da falta. Não são fornecidos detalhes profundos do algoritmo de localização de faltas do equipamento, porém é indicado que este se baseia no método de componentes fundamentais obtidas a partir de um único terminal.

Segundo o fabricante, o algoritmo interno de localização de falta realiza a amostragem dos sinais de tensão e corrente provenientes das entradas analógicas, armazenando os dados em um *buffer* cíclico interno, realizando 48 amostragens por ciclo, num total de 12 ciclos de capacidade. Quando é detectada uma falta, um gatilho interno dispara, fazendo com que a amostragem no *buffer* seja interrompida de forma a conter informações referentes aos 6 últimos ciclos de pré-falta e os 6 primeiros ciclos do pós falta, podendo armazenar dados de até 4 faltas.

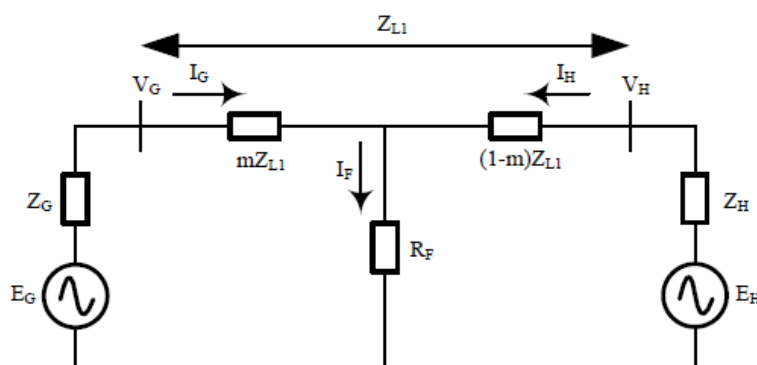
Uma vez obtidos os dados de tensão e corrente, é realizado então o cálculo da posição da falta, com garantia de precisão de 2% para faltas sólidas na linha de transmissão (sem resistência de falta). No *software* de parametrização do relé é possível inserir as características de comprimento, impedância e ângulo de sequência positiva da linha, além de fatores de compensação residual (para faltas

entre fases e terra) e de indutância mútua (em caso de linhas de transmissão paralelas).

Assim sendo, o equipamento não possibilita a parametrização de uma linha de transmissão híbrida, considerando apenas os parâmetros de maneira homogênea, totalmente subterrânea ou aérea.

Para o cálculo da distância de falta é indicado no manual do relé o uso das equações descritas pelo circuito equivalente apresentado na Figura 4. Trata-se do circuito equivalente do sistema em falta, onde E_G, E_H, Z_G e Z_H representam os parâmetros concentrados referentes à cada terminal da linha, V_G, V_H, I_G e I_H são as tensões e correntes provenientes do terminal G e H da linha; o valor das tensões e das correntes dependem do tipo da falta; Z_{L1} é a impedância de sequência positiva da linha; m é a distância do terminal G até a falta; R_F é a resistência de falta e I_F a corrente faltosa.

Figura 4 - Circuito Equivalente do Sistema em Falta.



(Fonte: XU, 2015)

Do esquema elétrico descrito acima, a localização “m” da falta pode ser encontrada através da estimação do valor da corrente de falta (I_F) e resolvendo-se a equação de localização de falta conforme descrito pela norma IEEE Std C37.114 (2014):

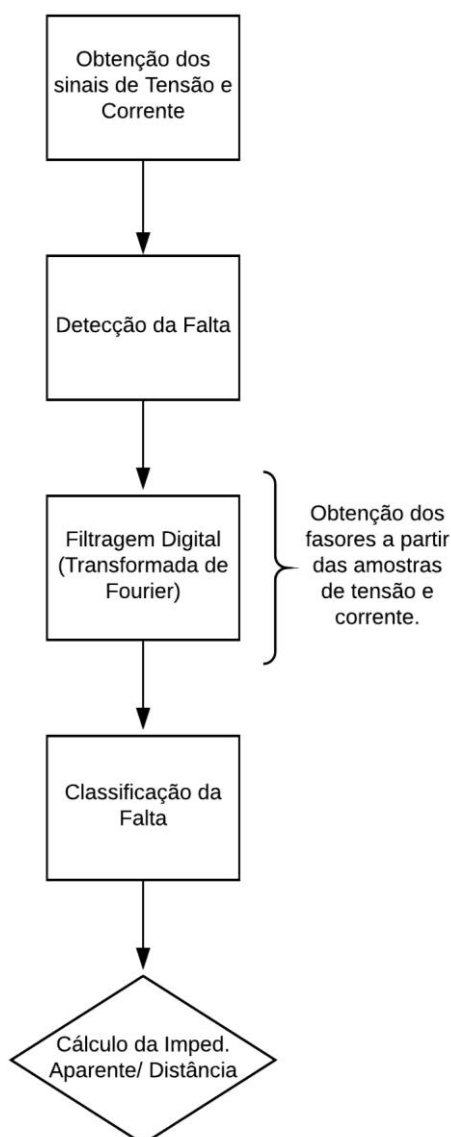
$$V_G = m \cdot Z_{L1} \cdot I_G + R_F \cdot I_F \quad (2.14)$$

Uma vez que o manual do fabricante apenas indica o método e o equacionamento básico que o equipamento utiliza, serão descritas a seguir, de maneira genérica, as etapas necessárias para o cálculo da localização de falta por meio do método de componentes fundamentais a partir de um único terminal.

2.4 CARACTERIZAÇÃO GENÉRICA DO MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DO RELÉ

O fluxograma da Figura 5, adaptada de Coury (2011), apresenta de maneira genérica as principais etapas do algoritmo de localização de faltas adotado pelo relé. Conforme já exposto anteriormente, as informações disponibilizadas pelo fabricante permitem afirmar apenas que o método utilizado lança mão das componentes fundamentais dos sinais de tensão e correntes obtidos a partir do terminal monitorado, utilizando-se da transformada de Fourier (TDF) para obtenção dos fasores. Cada etapa será descrita de maneira mais aprofundada a seguir.

Figura 5 - Fluxograma do Localizador de Faltas.

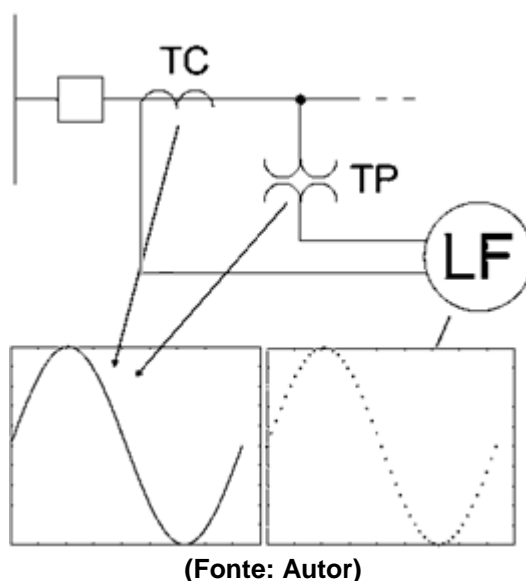


(Fonte: Adaptado de COURY, 2011)

2.4.1 Obtenção dos sinais de tensão e corrente

Conforme já descrito na seção 2.3, o relé de proteção dispõe de entradas analógicas, que fazem a leitura dos sinais de tensão e corrente da linha que são escalonados (reduzidos através de uma determinada relação de transformação) pelos transformadores de corrente (TC) e potencial (TP) e amostrados pelo IED localizador de falta (LF), conforme a Figura 6.

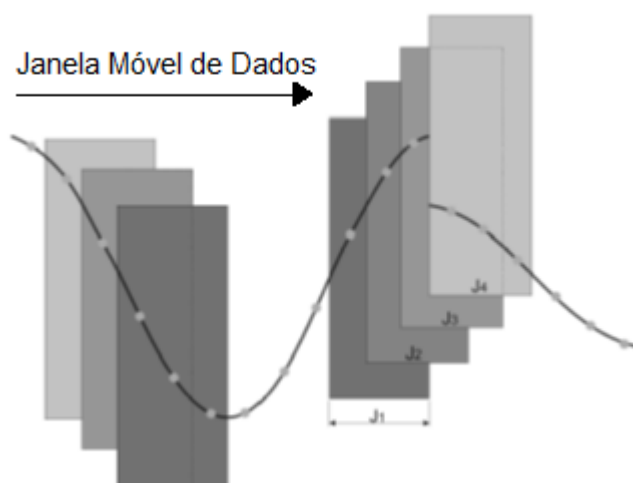
Figura 6 - Amostragem dos sinais de tensão e corrente no localizador de falta.



2.4.2 Detecção da Falta

De acordo com Coury (2011), os métodos de localização de falta descritos na seção 2.1 necessitam da aquisição em tempo real dos dados de tensão e corrente, associados à um sistema decisório para iniciar a execução do algoritmo. Como pode ser visto na Figura 7, os sinais de tensão e corrente são alocados de maneira dinâmica ao longo do tempo, de maneira que um determinado número de amostras mais recentes esteja a disposição para tornar possível a tomada de decisão e a consequente inicialização do localizador de falta.

Figura 7 - Janela móvel de dados amostrais.



(Fonte: COURY, 2011)

A Figura 7 apresenta janelas móveis de dados hipotéticas em uma forma de onda de tensão capturada à 12 amostras por ciclo. As janelas se “movem” ao longo do tempo, de forma a armazenar sempre 3 amostras, descartando a mais antiga quando um novo valor é disponibilizado. Segundo Phadke et al. (1988), o processador do localizador de falta deve realizar todos os cálculos necessários no intervalo de tempo entre duas amostras, uma vez que o sistema decisório deve ser executado toda vez que um novo valor for adquirido.

A ocorrência de uma falta é caracterizada por um afundamento de tensão, como pode ser visto entre as janelas J_3 e J_4 , sendo a função do algoritmo interno do relé atuar a função de proteção adequada e executar a ordem de *trip*, com consequente inicialização do algoritmo de localização de falta. Neste momento a amostragem é interrompida, fazendo com que as janelas J_1 e J_4 contenham apenas dados de pré e pós falta, respectivamente, ao passo que J_2 e J_3 possuem nas suas amostras valores referentes aos dois períodos.

Os métodos de localização de falta baseados na estimação de componentes fundamentais lançam mão de técnicas como a Transformada de Fourier para obtenção de tais expressões, sendo necessários dados exclusivamente de pré e pós falta para que seja possível o ajuste à uma senóide pura. Dessa forma, é mandatório um sistema decisório para detectar as janelas de dados onde houve o transitório faltoso (J_2 e J_3), descartando tais valores. Estes mecanismos de decisão consistem basicamente na comparação entre valores da amostra atual com uma ou mais amostras contidas em ciclos anteriores (COURY, 2011).

2.4.3 Filtragem Digital

Uma vez detectada a falta e realizada a seleção das janelas de dados apropriadas, realiza-se uma filtragem digital para determinação de magnitude e ângulo de fase dos fasores fundamentais de tensão e corrente. Dentre as variadas técnicas disponíveis, a Transformada de Fourier é a empregada no localizador de falta comercial escolhido para os ensaios. A Equação (2.15) apresenta a forma retangular de um sinal de tensão (o mesmo cálculo é realizado para a corrente) amostrado n vezes por ciclo:

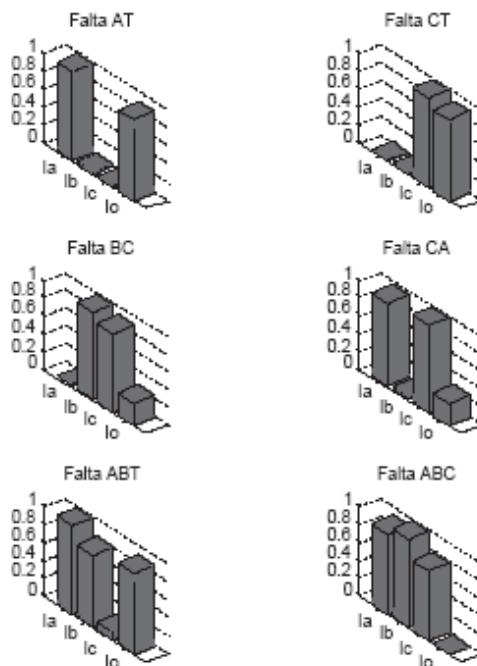
$$V = \frac{\sqrt{2}}{N} \cdot \sum_{k=1}^n V_l \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot k\right) - j \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot k\right) \right] \quad (2.15)$$

Onde V é a representação fasorial de frequência fundamental da tensão amostrada, l é o número da amostra e N é o total de amostras armazenadas. Dessa forma é possível, através da conversão para a forma polar, obter o módulo e o ângulo de fase da forma de onda da tensão (HOROWITZ, 2014).

2.4.4 Classificação da Falta

Além da constatação da falta, também é necessário identificar a sua natureza, uma vez que isto irá influenciar nos cálculos que serão feitos pelo algoritmo de localização. Conforme descrito por Silva (2005), a rotina de classificação da falta é realizada através de comparação entre os fasores de corrente superpostos e de sequência zero fundamental, sendo o processo de discriminação das faltas apresentado na Figura 8. Havendo um aumento no valor da componente de uma fase (por exemplo I_A) em relação as demais, além do surgimento da componente de sequência zero (I_0) detecta-se a ocorrência de falta monofásica em relação a terra (no caso falta AT). Quando ocorre elevação de duas ou mais fases sem alteração de I_0 , é constatada a falta entre fases sem a presença da terra (falta CA ou ABC).

Figura 8 - Classificação de diferentes tipos de falta em uma LT.



(Fonte: COURY, 2011)

2.4.5 Cálculo da Impedância Aparente

Após detectar e classificar o tipo de falta ocorrida, o algoritmo de localização de falta procede para o cálculo da impedância aparente vista pelo equipamento. Para tal, lança-se de métodos iterativos para resolução da equação 2.14, adotando $R_F = 0$, uma vez que não são consideradas resistências de falta nos cálculos, conforme citado na seção 2.3. Vale ressaltar que o procedimento descrito no fluxograma da Figura 5 é também utilizado pela função de proteção de distância (21), sendo que após o cálculo da impedância aparente, esta é comparada a valores pré-estabelecidos, podendo levar a decisão de abertura do disjuntor por parte do relé digital (COURY, 2011).

2.4.6 Considerações Finais

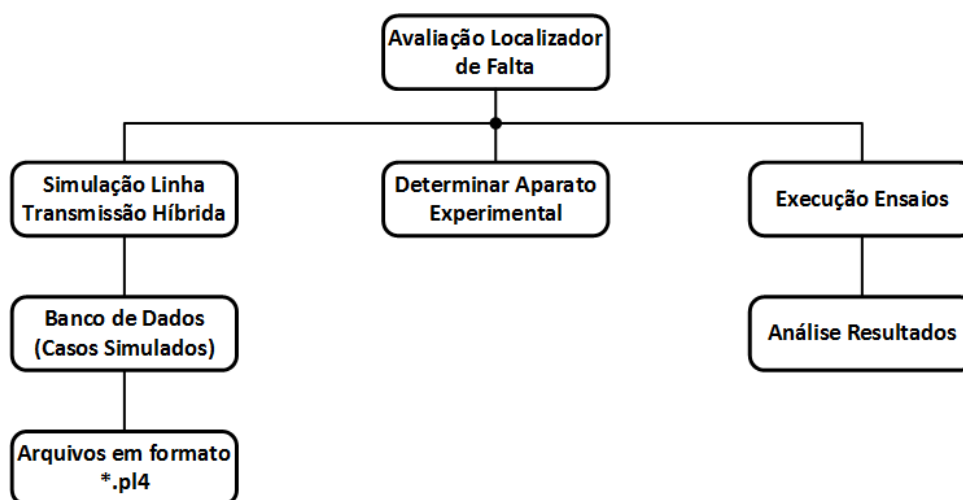
Definido o método no qual o relé de proteção se baseia para localização de faltas, é apresentada a seguir a metodologia adotada para os ensaios envolvendo a linha de transmissão híbrida modelada em *software* computacional, os parâmetros envolvidos na modelagem e configuração do IED, além da métrica utilizada para determinar o erro da distância fornecida pelo localizador de faltas.

3 MÉTODOLOGIA

3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

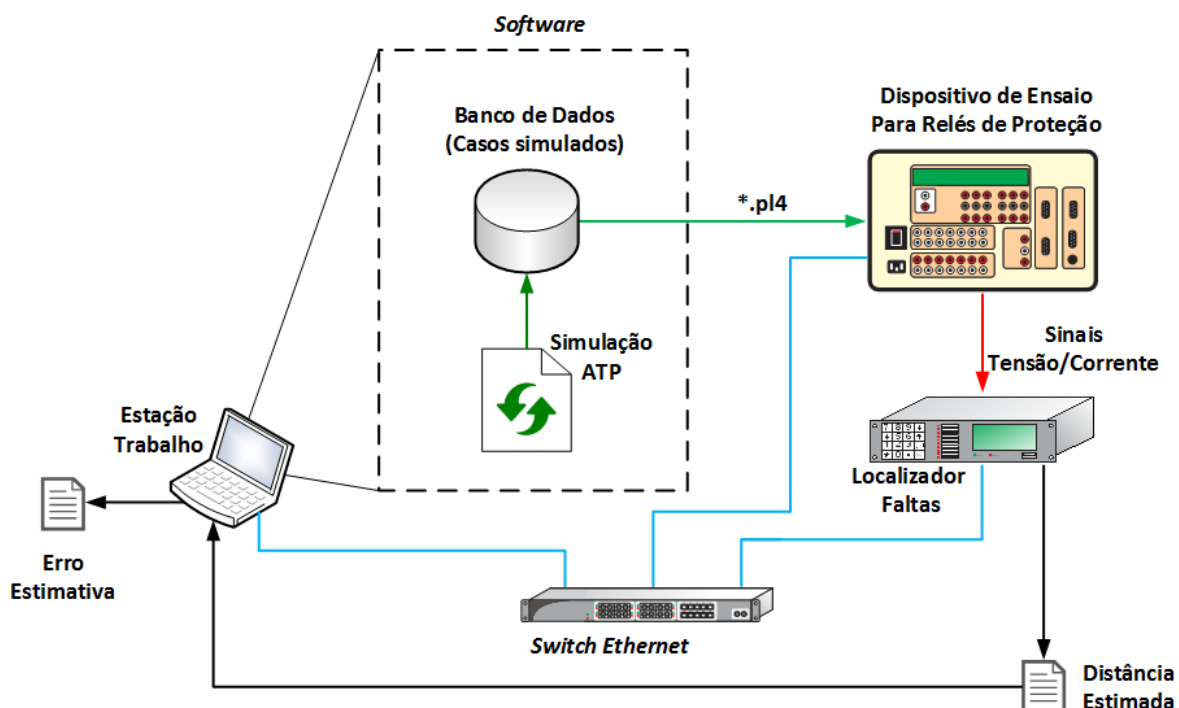
Para que o objetivo proposto seja atingido, esta pesquisa foi dividida em três grandes etapas, de acordo com a Figura 9: Simulação computacional da linha de transmissão híbrida em corrente alternada considerando variações no ponto de aplicação da falta, tipo de falta, resistência de falta e ângulo de incidência da falta; Especificação, montagem e configuração do aparato experimental, de acordo com a Figura 10; Execução dos ensaios, do tratamento da resposta do localizador de falta e apresentação e discussão dos resultados. O fluxo das informações necessário para a execução da pesquisa é mostrado na Figura 11.

Figura 9 - Organograma para execução da pesquisa.



(Fonte: Autor)

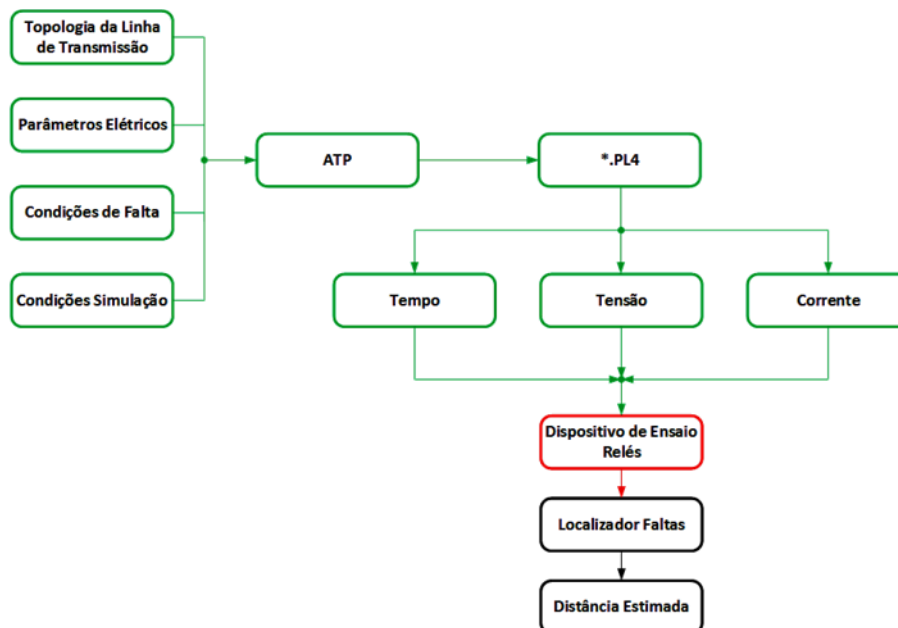
Figura 10 – Aparato experimental proposto.



(Fonte: Autor)

O aparato experimental foi montado com a utilização de um *notebook* (estação de trabalho) que através do *software* ATP realizou as simulações para geração do banco de dados com os casos simulados. Os arquivos foram gerados em extensão *.pl4 para que pudessem ser importados para o dispositivo de ensaio para relés de proteção, possibilitando que os sinais de tensão e corrente fossem injetados no relé de proteção, de forma que o algoritmo de localização de faltas fosse iniciado, fornecendo as estimativas para cada situação de falta proposta no banco de dados estabelecido.

Figura 11 – Fluxo de Informações da pesquisa.



(Fonte: Autor)

O desempenho do localizador de falta estudado será avaliado segundo a métrica apresentada na equação (3.1), conforme Coury (2011):

$$E_{\%} = \frac{|Distância_{Estimada} - Distância_{Real}|}{Comprimento_Linha} \times 100\% \quad (3.1)$$

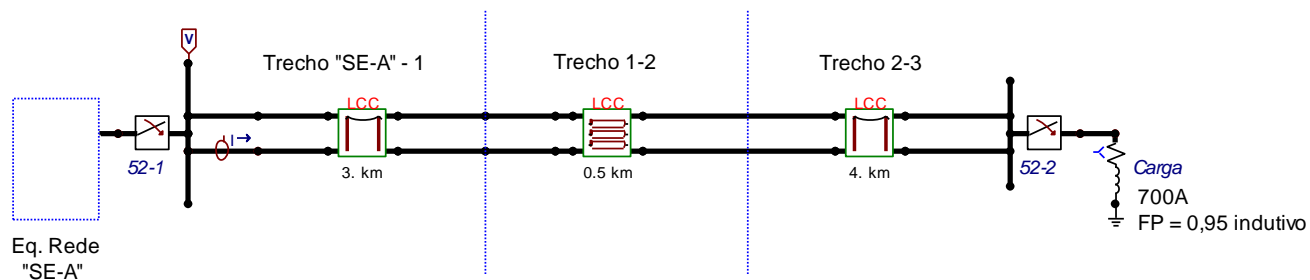
Para a qual: $E_{\%}$ é o erro percentual na estimativa da localização de falta; $Distância_{Estimada}$ é a distância da falta determinada pelo localizador estudado; $Distância_{Real}$ é a distância da falta caracterizada no ATP e $Comprimento_Linha$ é o comprimento total da linha considerada.

3.2 SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

O sistema elétrico simulado é apresentado na Figura 12. Ela representa uma linha de transmissão hipotética em 69kV inspirada em padrões construtivos encontrados em concessionárias de energia. Percebe-se que o trecho de linha que vai da SE-A até o ponto 1 e o trecho que vai do ponto 2 até o ponto 3 são linhas aéreas e o trecho do ponto 1 ao ponto 2 é uma linha subterrânea e que, portanto, trata-se de um sistema híbrido.

O modelo de linha de transmissão aérea utilizado nas simulações foi o Bergeron, um método simples, de frequência constante, fundamentado na teoria de ondas viajantes (WATSON, 2013). O motivo dessa escolha é o fato do estudo utilizado não levar em conta transitórios de alta frequência, apenas as componentes fundamentais, que tem valor conhecido.

Figura 12 – Diagrama representativo do sistema elétrico utilizado.



(Fonte: Autor)

Os comprimentos de cada trecho do sistema são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Comprimentos das linhas de transmissão.

Trecho	Comprimento (km)
"SE-A"-1	3
1-2	0.5
2-3	4

3.3 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DA TORRE DE TRANSMISSÃO

A torre de transmissão aplicada ao trecho "SE-A"-1 apresenta o perfil visto na Figura 13. Ela é composta por dois circuitos, sendo que cada um deles possui um condutor por fase, um cabo para-raios, não há transposição de fases, o efeito pelicular não foi considerado e sua temperatura de operação foi considerada igual a 60°C.

O cabo fase utilizado no trecho "SE-A" – 1 é do tipo CAA (cabo de alumínio com alma de aço) 477 Hawk, com as características mostradas na Tabela 2. Já o condutor utilizado como para-raios é uma cordoalha de aço galvanizado de 3/8" e tem seus dados informados na Tabela 3.

Tabela 2 – Características do cabo CAA 477 Hawk.

Código	Hawk
Tamanho	477 MCM
Tipo	CAA
Formação	26/7
Diâmetro interno	8,04mm
Diâmetro externo	21,80mm
Resistência CC a 20°C	0,1195 ohm/km
Resistência CC Corrigida ² para 60°C	0,1388 ohm/km
Peso total do cabo	976,4 kg/km
Tração Máxima ruptura	8878 kgf
Coeficiente de variação com a temperatura	0,00403 °C ⁻¹ para 61% IACS

Tabela 3 – Características do cabo para-raios.

Tamanho	3/8"
Tipo	Aço Galvanizado com carga de ruptura HS
Formação	7 fios
Diâmetro interno	Não aplicável
Diâmetro externo	9,525 mm
Resistência CC a 20°C	3,18 ohm/km
Peso total do cabo	407 kg/km

A distância de segurança³ para a linha de transmissão em estudo foi calculada de acordo com a ABNT NBR 5422/85 , levando em consideração que a linha poderia estar acessível a ruas, avenidas e rodovias, e apresenta valor igual a 8,5 m.

A distância de 8,5 m, segundo a mesma norma, deve ser calculada para as condições mais desfavoráveis de aproximação do condutor ao obstáculo. Porém, para o estudo em questão, é suficiente considerar que a única condição desfavorável seja a aproximação dos condutores ao solo em função da dilatação dos mesmos quando operando na temperatura de trabalho da linha. Uma análise mais

² Conforme apresentado em FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC; 1979. 588 p. ISBN 85-216-0082-8

³ Este parâmetro é relevante para o preenchimento do campo V_{mid} na rotina *line constants* do ATP.

aprofundada levaria em consideração, também, o balanço dos condutores em função do vento.

Para a determinação da flecha dos condutores foi considerado um vão típico nivelado igual a 400 m. O valor do vão é modificado em função das condições locais de instalação da linha de transmissão, como, por exemplo, com o tipo de cabo utilizado, alinhamento e tipo das estruturas, vento, tipo de fundações, etc. O valor apresentado é, portanto, uma generalização e está em uma média para o tipo de trecho aéreo utilizado.

A flecha foi determinada de acordo com as prescrições da ABNT NBR 5422/85 e o procedimento de cálculo apresentado em Labegaline et.al. (1992), considerando que na condição de trabalho de maior duração os condutores estão submetidos a uma temperatura média, na região de Curitiba, de 21°C, sem a presença de vento e com tração de ruptura igual a 20% do valor de Tração Máxima Ruptura apresentado na Tabela 2.

O valor calculado é igual a 11 m, contudo a flecha deve ser determinada para a temperatura de operação da linha, ou seja, a 60°C. Para tanto, é necessário encontrar o novo valor de tração de ruptura para a temperatura de trabalho. Essa é determinada pela equação de mudança de estado apresentada em Labegaline et.al. (1992), e, para as condições caracterizadas neste estudo igual a 1547 kgf. De posse desse valor, então, é possível determinar o novo valor da flecha, sendo esse igual a 12,61 m.

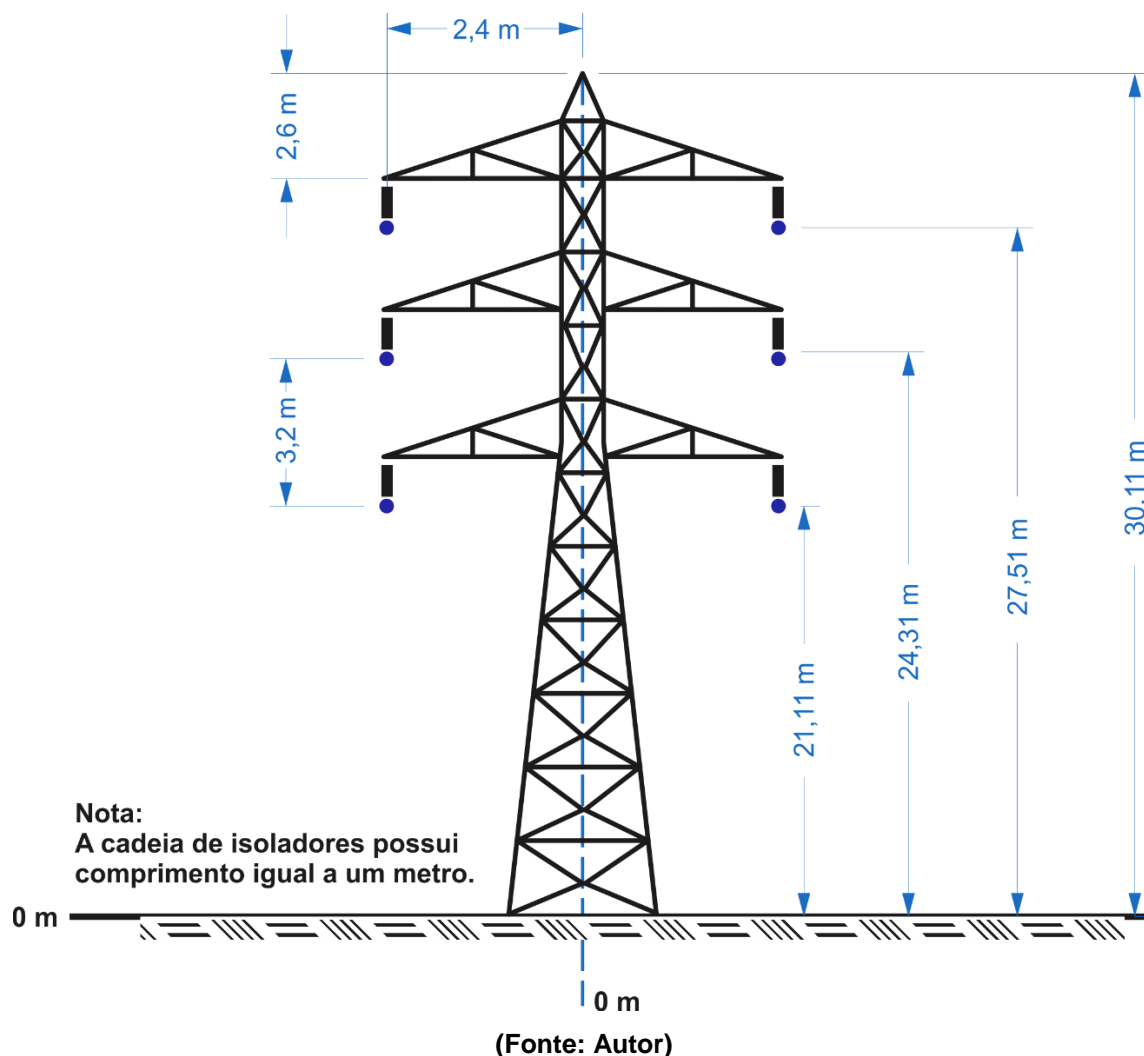
Para o cabo para-raios, conforme a ABNT NBR 5422/85, adota-se o critério de igualdade da flecha deste em relação a flecha dos condutores fase na condição de trabalho de maior duração, ou seja, 11 m, pois, o cabo para-raios não altera a sua temperatura quando a linha está operando.

Os valores das flechas em conjunto com a distância de segurança são determinantes para a definição da posição (altura em relação ao solo) dos condutores e cabo para-raios na estrutura considerada. Os valores obtidos podem ser vistos na Figura 13, considerando a silhueta de torre utilizada.

O solo da cidade de Curitiba, de acordo com Talamini Neto (2001) está dividido nas seguintes porções: 20% de solos aluviais, formados por areias e argilas orgânicas, 35% por argilas fissuradas e os 45% restantes por solos residuais - formados pela alteração da rocha que se encontra abaixo deles. De posse dessas informações e consultando a ABNT NBR 7117/12 foi escolhido o valor de 500 Ω .m

para a resistividade do solo. Esse valor será utilizado na rotina *Line Constants* do ATP para obtenção dos parâmetros elétricos da linha de transmissão.

Figura 13 – Parâmetros construtivos da torre de transmissão.



3.4 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO POSTE

O trecho 2-3, conforme a Figura 14, da linha caracterizada utiliza uma estrutura de suporte aos condutores em forma de poste, contendo dois circuitos, com um condutor por fase, dois cabos para-raios, dois condutores auxiliares, não há transposição de fases, o efeito pelicular não foi considerado e sua temperatura de operação é igual a 60°C.

O cabo fase utilizado no trecho 2-3 é do tipo CAA (cabo de alumínio com alma de aço) 636 Grosbeak, com as características mostradas na Tabela 4. Já o condutor utilizado como para-raios e auxiliar foi o Penguin 4/0, sendo seus dados informados na Tabela 5.

Tabela 4 - Características do cabo CAA 636 Grosbeak.

Código	Grosbeak
Tamanho	636 MCM
Tipo	CAA
Formação	26/7
Diâmetro interno	9,27 mm
Diâmetro externo	25,15 mm
Resistência CC a 20°C	0,0897 ohm/km
Resistência CC Corrigida ⁴ para 60°C	0,1042 ohm/km
Peso total do cabo	1301,72 kg/km
Tração Máxima ruptura	11427 kgf
Coeficiente de variação com a temperatura	0,00403 °C ⁻¹ para 61% IACS

Tabela 5 - Características do cabo para-raios.

Tamanho	4/0
Tipo	CAA
Formação	6/1
Diâmetro interno	Não aplicável
Diâmetro externo	9,525 mm
Resistência CC a 20°C	3,18 ohm/km
Peso total do cabo	407 kg/km

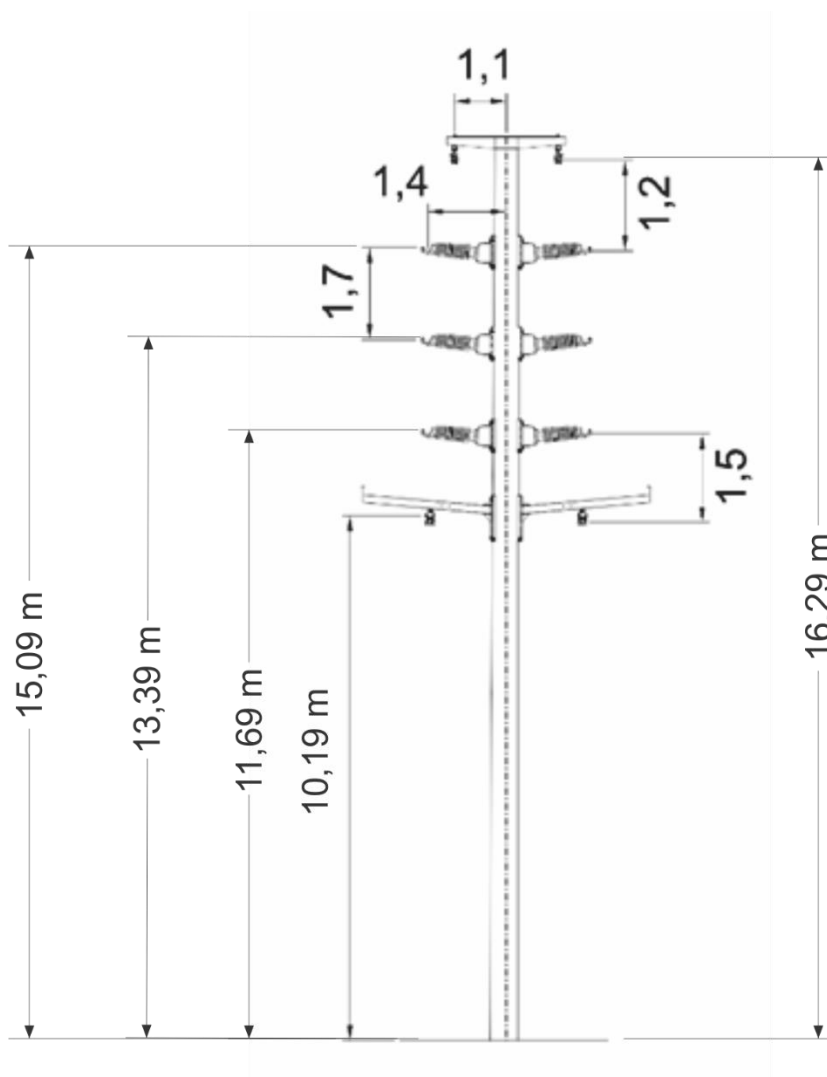
A distância de segurança para este trecho é a mesma determinada para o trecho “SE-A” – 1. A obtenção da flecha é ligeiramente diferente, pois há restrições com relação a resistência mecânica do poste, que é bem menor do que aquela da torre utilizada no trecho “SE-A” – 1. Dessa forma, como critério foi adotado o valor máximo de 500 daN de tração no cabo condutor, e não 20% da tração máxima ruptura, na condição de temperatura mínima⁵, sendo zero graus para Curitiba. O vão

⁴ Conforme apresentado em FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica:** linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC; 1979. 588 p. ISBN 85-216-0082-8

⁵ Esta condição, para vãos curtos, implica na máxima tração que o condutor pode receber.

considerado para o tipo de estrutura utilizada tem valor médio de 80m para limitar o balanço dos condutores na estrutura. Considerando os valores mencionados e a equação de mudança de estado apresentada em Labegalini et. al. 1992, levando em conta a temperatura final de 21°C, o valor da flecha encontrada para os condutores das fases é igual a 1,69 m. O critério de igualdade da flecha é novamente aplicado para o cabo para-raios. De posse desses valores foi possível determinar a altura dos condutores na estrutura, conforme a Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros construtivos do poste.

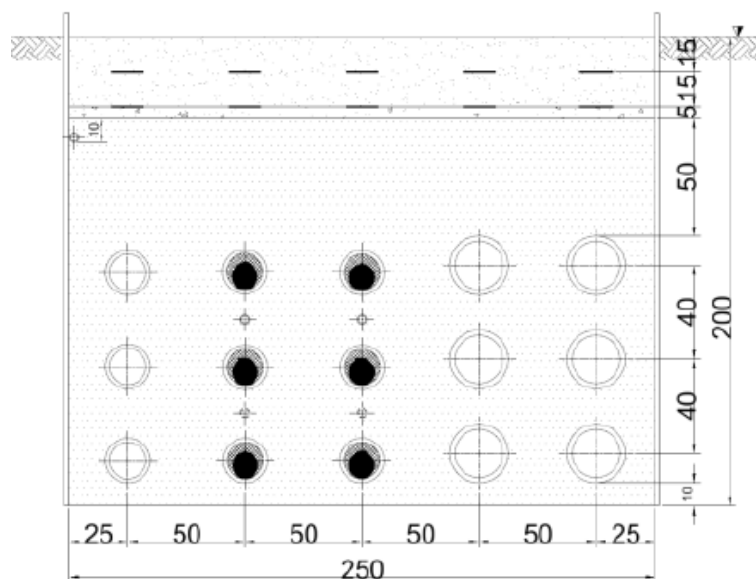


(Fonte: Autor)

3.5 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO TRECHO SUBTERRÂNEO

Para o trecho 1-2, existem dois circuitos com um condutor por fase dispostos conforme a Figura 15, sendo suas características apresentadas na Tabela 6.

Figura 15 – Parâmetros construtivos do trecho subterrâneo.



(Fonte: Autor)

Tabela 6 – Características dos cabos subterrâneos.

Material condutor	Alumínio H-19
Isolação	XLPE
Blindagem	Alumínio Corrugado
Capa Externa	HDPE
Área de seção transversal	630mm ²
Diâmetro externo	103mm
Máxima resistência elétrica a 20°C (Ohm/km)	0,0469
Resistividade	2,9547E-8 Ohm.m
Permeabilidade relativa do condutor/blindagem	1
Permeabilidade relativa do isolante externo ao condutor/blindagem	1
Permissividade relativa do material isolante externo ao condutor	2,72
Raio interno blindagem	0,03792 m
Raio externo blindagem	0.03992
Resistividade	2,83E-8 Ohm.m
Permissividade relativa do material isolante externo a blindagem	4

3.6 DADOS EQUIVALENTES DA LINHA DE TRANSMISSÃO HÍBRIDA

Com o conjunto de informações dos condutores e estruturas foi possível, a partir da rotina *Line Constants* do ATP obter as impedâncias de sequência positiva, negativa, zero e mútua para cada trecho da linha, considerando a frequência de 60 Hz e 69 kV. Essas são apresentadas após a execução do comando *Line Check* do ATP, conforme as Tabela 7 a 9.

Tabela 7 – Valores de sequência positiva para a impedância série da linha híbrida ($l = 7,5 \text{ km}$)

Circuito	Fase A (ohm/km)	Fase B (ohm/km)	Fase C (ohm/km)
Circuito 1	$0,4391 \angle 68,395^\circ$	$0,408 \angle 73,462^\circ$	$0,4139 \angle 78,497^\circ$
Circuito 2	$0,4391 \angle 68,395^\circ$	$0,408 \angle 73,462^\circ$	$0,4139 \angle 78,497^\circ$

Tabela 8 – Valores de sequência positiva para a admitância paralela da linha híbrida ($l = 7,5 \text{ km}$)

Circuito	Fase A ($\mu\text{F}/\text{km}$)	Fase B ($\mu\text{F} / \text{km}$)	Fase C ($\mu\text{F} / \text{km}$)
Circuito 1	$0,0204 \angle 92,448^\circ$	$0,0211 \angle 89,88^\circ$	$0,0206 \angle 87,702^\circ$
Circuito 2	$0,0204 \angle 92,448^\circ$	$0,0211 \angle 89,88^\circ$	$0,0206 \angle 87,702^\circ$

Tabela 9 – Valores de sequência zero para a impedância série da linha híbrida ($l = 7,5 \text{ km}$)

Circuito	Fase A (ohm/km)	Fase B (ohm /km)	Fase C (ohm /km)
Circuito 1	$1,1499 \angle 73,98^\circ$	$1,1949 \angle 74,158^\circ$	$1,1319 \angle 73,652^\circ$
Circuito 2	$1,1499 \angle 73,98^\circ$	$1,1949 \angle 74,158^\circ$	$1,1319 \angle 73,652^\circ$

Tabela 10 – Valores de sequência zero para a admitância paralela da linha híbrida ($l = 7,5 \text{ km}$)

Circuito	Fase A ($\mu\text{F}/\text{km}$)	Fase B ($\mu\text{F} / \text{km}$)	Fase C ($\mu\text{F} / \text{km}$)
Circuito 1	$0,0169 \angle 89,999^\circ$	$0,0161 \angle 89,999^\circ$	$0,0172 \angle 89,999^\circ$
Circuito 2	$0,0169 \angle 89,999^\circ$	$0,0161 \angle 89,999^\circ$	$0,0172 \angle 89,999^\circ$

O valor de impedância mútua de sequência positiva é igual a $0,4192\angle 73,35^\circ$ ohm/km enquanto que para a mútua de sequência zero é igual a $1,1589\angle 73,935^\circ$ ohm/km. Ambos determinados para a distância total da linha híbrida.

3.7 DADOS DO EQUIVALENTE DA FONTE

Os valores de impedância de sequência positiva e de sequência zero foram retirados do trabalho proposto por Das et al (2014) e estão apresentados na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 - Valores de impedância de seqüências positiva e zero.

Impedância de sequência positiva	Impedância de sequência zero
$3,75\angle 71^\circ$	$11,25\angle 65^\circ$

A fonte de tensão, atrás do equivalente da rede, foi modelada como uma fonte trifásica senoidal com valor de pico fase-fase de 69 kV sendo que a tensão ajustada no ATP foi de 1,05 pu, valor recomendado para a tensão de 69 kV (PRODIST, 2018).

3.8 DADOS DO EQUIVALENTE DA CARGA

A linha de transmissão híbrida possui uma topologia radial com uma carga conectada em estrela ao barramento receptor. Definiu-se um limite de corrente de 700 A, carga média para o tipo de linha caracterizada, com fator de potência 0,95 indutivo (Submódulo 3.6 ONS, 2010). Considerando que a tensão sobre a carga é igual a 69 kV, pode-se encontrar a impedância equivalente da carga através da equação 3.2.

$$Z_c = \frac{69kV}{\sqrt{3} * \left(\frac{700\angle 18,18^\circ A}{\sqrt{2}} \right)} = 76,44 - j25,12 \Omega \quad (3.2)$$

O fator $\sqrt{2}$ foi inserido para que os parâmetros de resistência e indutância que caracterizam a carga sejam obtidos com o valor eficaz da corrente definida, caso contrário, e por padrão do ATP, os valores de corrente associados a carga seriam apresentados como valores de pico. Portanto, a partir da equação 3.2 os valores da

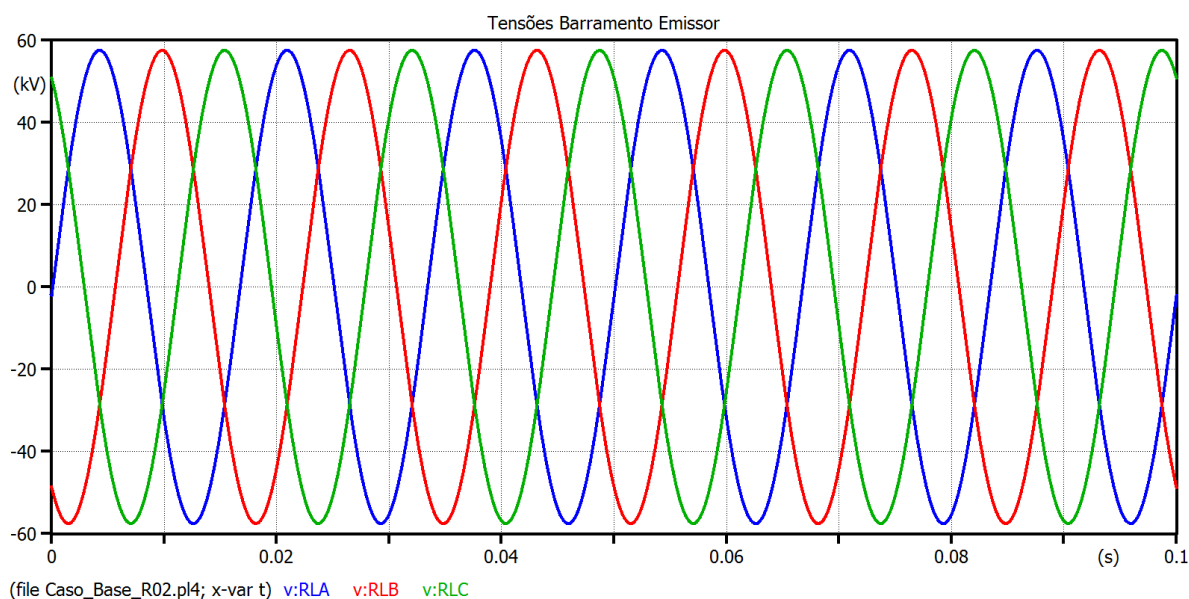
carga inseridos no modelo RLCY3 do ATP foram $R = 76,44 \text{ ohm}$ e $L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 66,6 \text{ mH}$.

3.9 GERAÇÃO DO BANCO DE DADOS PARA OS ENSAIOS

Após a inserção dos dados descritos anteriormente, obteve-se a linha de transmissão híbrida, sendo possível gerar no ambiente de simulação os casos de interesse para composição do banco de dados. As situações de falta foram simuladas, gerando um arquivo *.pl4 para cada tipo de falta proposta, que posteriormente foram importados no dispositivo de ensaio, que aplicou os sinais de tensão e corrente no relé de proteção. Algumas das formas de onda obtidas das simulações são mostradas a seguir.

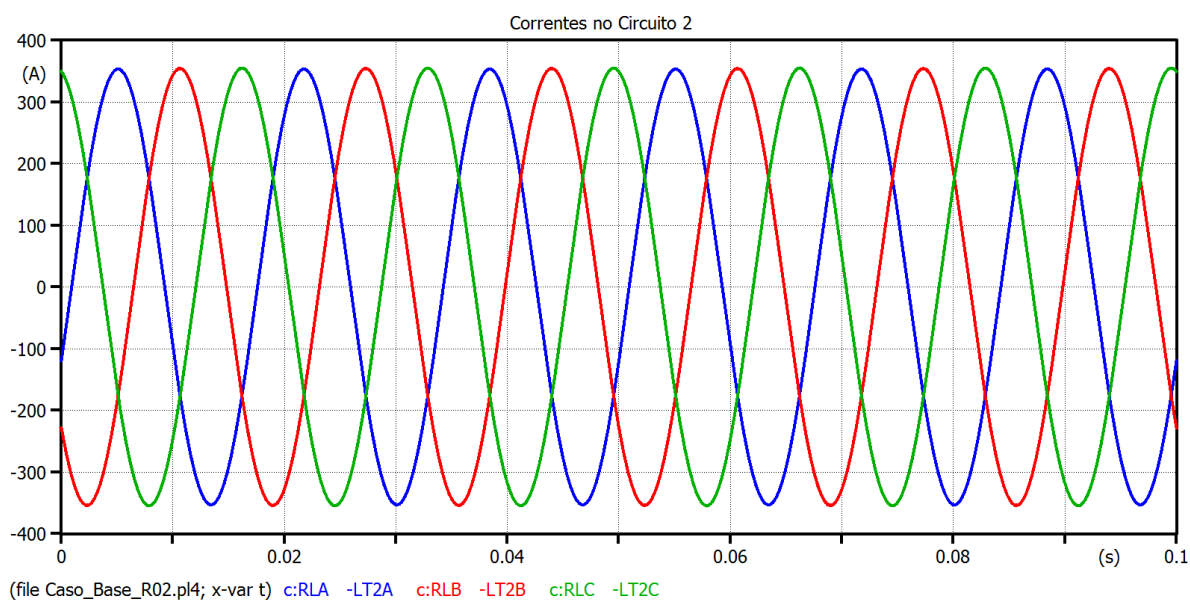
A Figura 16 representa as tensões em regime permanente medidas no barramento emissor, a Figura 17 representa as correntes em regime permanente medidas no circuito 2 próxima ao barramento emissor. A Figura 18 e a Figura 19 representam os sinais de tensão e corrente quando da ocorrência de um curto-circuito fase-terra envolvendo a fase A, com ângulo de falta de 90° , distância de 1 km do barramento emissor e resistência de falta de 20Ω . Nota-se que ocorre um afundamento de tensão e uma sobrecorrente na fase A e um desequilíbrio de tensão nas fases B e C.

Figura 16 – Tensões em regime permanente medidas no barramento emissor.



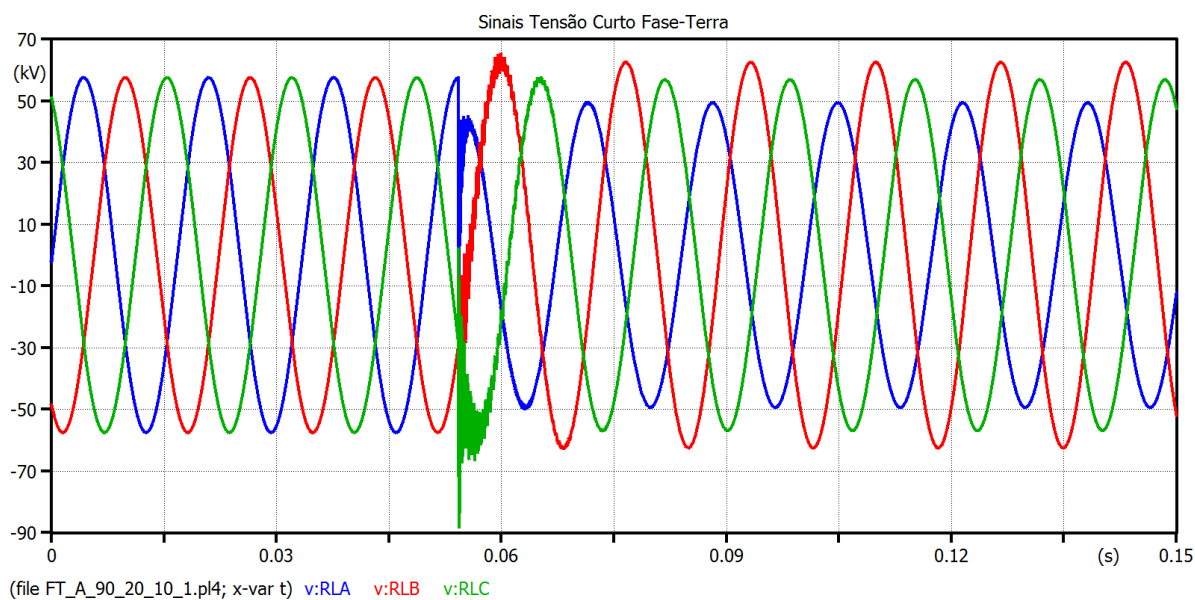
(Fonte: Autor)

Figura 17 – Correntes em regime permanente no circuito 2 medidas no barramento emissor.



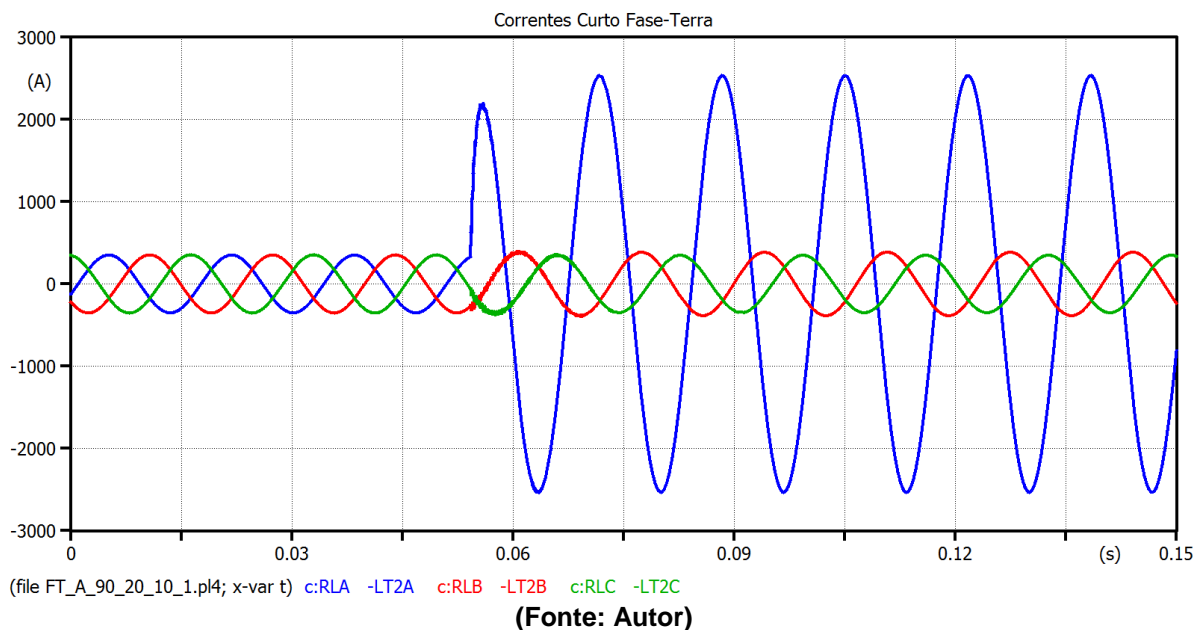
(Fonte: Autor)

Figura 18 – Sinais de tensão medidos no barramento emissor para um curto-circuito fase-terra envolvendo a fase A do circuito 2.



(Fonte: Autor)

Figura 19 - Sinais de corrente medidos no barramento emissor para um curto-circuito fase-terra envolvendo a fase A do circuito 2.



Além dos casos mostrados, o banco de dados gerado contemplou os casos citados a seguir, e que serão abordados novamente no capítulo 4.

Testes de validação envolvendo uma linha homogênea:

- Fases envolvidas: FT (A);
- Distâncias de falta: 1km e 6,5km do terminal emissor;
- Ângulo de falta: 0° e 90° ;
- Resistência de falta: 0,001 e 20 ohms;
- Total: 6 casos.

Ensaio envolvendo a linha híbrida simulada:

- Fases envolvidas: FT, FF, FFT, FFF, FFFT;
- Distância de falta: 1km (início do trecho aéreo “SE-A – 1”) 3,5km (na metade do trecho subterrâneo “1-2”) e 6,5km (na porção final do segundo trecho aéreo “2-3”);
- Ângulo de falta: 0° e 90° (chave controlada);
- Resistência de falta: 0,001 e 20 ohms;
- Total: 132 Casos;

3.10 MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL

A montagem do aparato experimental proposto seguiu o método apresentado na Figura 10. O relé de proteção utilizado foi ajustado conforme a Tabela 12 a seguir. Por se tratar de um ambiente de simulação controlado foi habilitada apenas uma função de proteção de sobrecorrente instantânea (50) tendo em vista apenas o disparo da oscilografia interna do IED, e conseqüente inicialização do algoritmo de localização de faltas no mesmo instante da ocorrência da falta modelada no ATP. A impedância de sequência positiva equivalente da linha foi obtida através do comando “verify” no ATP.

Tabela 12 - Parâmetros ajustados no relé.

PARÂMETRO	AJUSTE
Frequência	60Hz
Relação de TC	300:1
Relação de TP	600:1
Unidade de Distância	Quilômetros
Unidade de Localização de Falta	Distância
Comprimento da linha	7500m
Impedância da linha	3,140 ohms
Ângulo da linha	73°
Fator de compensação residual	0,590
Ângulo de compensação residual	1°
Fator de compensação mútua	0,520
Ângulo de compensação mútua	-1°
Ajuste da função de Sobrecorrente (50)	999A

Com relação a mala de testes, foi necessário apenas importar os arquivos *.pl4 gerados pelo ATP, ajustando as relações de TC e TP para as mesmas inseridas no relé, selecionando o modo de operação das fontes para “3 tensões e 3 correntes transitórias”. As fontes foram conectadas em estrela diretamente às entradas analógicas do relé.

Com o aparato experimental, os procedimentos e os parâmetros definidos foi possível prosseguir para a etapa de testes, onde o relé foi ensaiado nas condições de falta propostas, conforme será explicado no capítulo a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a montagem da linha híbrida no ATPDraw, foi gerado um banco de faltas contendo as situações apresentadas na seção 3.9: variação do tipo de falta, distância de falta, ângulo de incidência e resistência de falta. A escolha dos casos se baseou na tese de Santos (2014).

As faltas foram criadas no ambiente de simulação pelo uso de uma chave controlada por tempo. De forma tal, que é necessário correlacionar o instante de fechamento da chave ao ângulo de incidência da falta desejado. Isso pode ser feito a partir da equação 4.1, conforme Velasco et.al (2013).

$$t = k + \frac{\theta * \frac{\pi}{180^\circ}}{2\pi f} \quad (4.1)$$

Para a qual t é o tempo de fechamento da chave em segundos, k é o valor de ciclos pré-falta considerados, θ é o ângulo de incidência da falta em graus e f a frequência fundamental do sinal. Para todos os casos foram considerados 10 ciclos de pré-falta.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCALIZADOR

Antes de iniciar os testes envolvendo a linha modelada e o localizador em estudo, realizou-se um teste de validação, onde um sistema homogêneo com as mesmas características do trecho “SE-A - 1” porém recalculado com o mesmo comprimento da linha híbrida (7,5km), foi ensaiado em situações de falta semelhantes às da linha híbrida, porém agora com o objetivo de comprovar a precisão garantida pelo fabricante do relé de proteção. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13- Resultados do sistema homogêneo.

N° Ensaio	Trecho	Tipo Falta	Fase	Ângulo	Resistência	Distância	Distância	Trecho da Localização da Falta	Erro (%)
				Falta (°)	Falta (Ohm)	Real (km)	Calculada (km)		
1	SEA-1	FT	A	0	0.001	1	1,036	SEA-1	0,48
2		FT	A	0	20		1,522	SEA-1	6,96
3		FT	A	90	0.001		1,089	SEA-1	1,19
4		FT	A	90	20		1,564	SEA-1	7,52
5	2-3	FT	A	0	0.001	6,5	10,97	Após 2-3	59,60
6		FT	A	0	20		10,89	Após 2-3	58,53
7		FT	A	90	0.001		10,93	Após 2-3	59,07
8		FT	A	90	20		12,91	Após 2-3	85,47

Observa-se que o erro do localizador está de acordo com o limite do manual para os ensaios 1 e 3, ou seja, para um curto-circuito franco. Porém, quando há resistência de falta, ensaios 2 e 4, a estimativa da distância de falta extrapola o limite de erro de 2%, sendo esse, um resultado esperado conforme Coury et. al. (2007) e Das et al(2014). Para os ensaios de 5 a 8 o erro na estimativa da distância de falta ficou acima de 50% para todos os casos ensaiados, tal resultado é explicado pela presença da impedância mútua entre os circuitos da linha de transmissão, pois, o seu valor modifica o cálculo da impedância aparente vista pelo localizador e, para o caso de linhas paralelas por toda a sua extensão, implicando em sobrestimar a localização da falta, conforme Das et al(2014). Como conclusão, se observa que o localizador utilizado estava funcionando corretamente e apresentou resultados coerentes para o método de localização em estudo, sendo, portanto, possível aplicá-lo ao objetivo desta pesquisa.

Com o aparato experimental e o banco de faltas preparados, e o sistema para validação ensaiado, foram elaboradas as Tabelas 14 à 18 contendo os resultados dos testes envolvendo a injeção dos sinais de tensão e corrente do banco de faltas no relé. A estimativa fornecida pelo localizador de faltas foi confrontada com a distância real proposta na simulação, sendo aplicada a métrica proposta na equação 3.1 para cada situação faltosa.

4.2 RESULTADOS PARA AS ESTIMATIVAS DE FALTAS

As Tabelas 14 a 18 apresentam os resultados consolidados, para os curtos-circuitos caracterizados sobre o sistema teste, da estimativa da distância de falta

apresentada pelo localizador em estudo. Observa-se que para o trecho 1-2 não foram aplicados curtos-circuitos bifásicos, bifásicos a terra, trifásicos e trifásicos a terra, pois, essas não seriam situações verossímeis para cabos subterrâneos.

Tabela 14 – Estimativa de falta para curtos-circuitos monofásicos.

N° Ensaio	Trecho	Tipo Falta	Fase	Ângulo Falta (°)	Resistência Falta (Ohm)	Distância Real (km)	Distância Calculada (km)	Trecho da Localização da Falta	Erro (%)
1		FT	A	0	0.001		1,427	SEA-1	5,69
2		FT	A	0	20		2,127	SEA-1	15,03
3		FT	A	90	0.001		1,412	SEA-1	5,49
4		FT	A	90	20		2,134	SEA-1	15,12
5		FT	B	0	0.001		1,394	SEA-1	5,25
6	SEA-1	FT	B	0	20	1	2,315	SEA-1	17,53
7		FT	B	90	0.001		1,408	SEA-1	5,44
8		FT	B	90	20		2,32	SEA-1	17,60
9		FT	C	0	0.001		1,401	SEA-1	5,35
10		FT	C	0	20		2,122	SEA-1	14,96
11		FT	C	90	0.001		1,408	SEA-1	5,44
12		FT	C	90	20		2,128	SEA-1	15,04
13		FT	A	0	0.001		4,707	2-3	19,43
14		FT	A	0	20		5,434	2-3	29,12
15		FT	A	90	0.001		4,621	2-3	18,28
16		FT	A	90	20		5,465	2-3	29,53
17		FT	B	0	0.001		4,611	2-3	18,15
18	1-2	FT	B	0	20	3,25	5,692	2-3	32,56
19		FT	B	90	0.001		4,635	2-3	18,47
20		FT	B	90	20		5,675	2-3	32,33
21		FT	C	0	0.001		4,606	2-3	18,08
22		FT	C	0	20		5,557	2-3	30,76
23		FT	C	90	0.001		4,648	2-3	18,64
24		FT	C	90	20		5,536	2-3	30,48
25		FT	A	0	0.001		8,497	Após 2-3	26,63
26		FT	A	0	20		10,37	Após 2-3	51,60
27		FT	A	90	0.001		8,365	Após 2-3	24,87
28		FT	A	90	20		10,37	Após 2-3	51,60
29		FT	B	0	0.001		8,315	Após 2-3	24,20
30	2-3	FT	B	0	20	6,5	10,74	Após 2-3	56,53
31		FT	B	90	0.001		8,38	Após 2-3	25,07
32		FT	B	90	20		10,33	Após 2-3	51,07
33		FT	C	0	0.001		8,153	Após 2-3	22,04
34		FT	C	0	20		10,21	Após 2-3	49,47
35		FT	C	90	0.001		8,185	Após 2-3	22,47
36		FT	C	90	20		10,19	Após 2-3	49,20

Tabela 15 - Estimativa de falta para curtos-circuitos bifásicos.

N° Ensaio	Trecho	Tipo Falta	Fase	Ângulo Falta (°)	Resistência Falta (Ohm)	Distância Real (km)	Distância Calculada (km)	Trecho da Localização da Falta	Erro (%)
1		FF	AB	0	0.001		1,125	SEA-1	1,67
7		FF	AB	0	20		2,225	SEA-1	16,33
4		FF	AB	90	0.001		1,112	SEA-1	1,49
10		FF	AB	90	20		2,236	SEA-1	16,48
2	SEA-1	FF	BC	0	0.001	1	1,101	SEA-1	1,35
8		FF	BC	0	20		2,303	SEA-1	17,37
5		FF	BC	90	0.001		1,12	SEA-1	1,60
11		FF	BC	90	20		2,328	SEA-1	17,71
3		FF	CA	0	0.001		1,255	SEA-1	3,40
9		FF	CA	0	20		2,402	SEA-1	18,69
6		FF	CA	90	0.001		1,247	SEA-1	3,29
12		FF	CA	90	20		2,358	SEA-1	18,11
13		FF	AB	0	0.001		6,536	2-3	0,48
14		FF	AB	0	20		9,463	Após 2-3	39,51
15		FF	AB	90	0.001		6,494	2-3	0,08
16		FF	AB	90	20		9,516	Após 2-3	40,21
17		FF	BC	0	0.001		6,375	2-3	1,67
18	2-3	FF	BC	0	20	6,5	9,508	Após 2-3	40,11
19		FF	BC	90	0.001		6,475	2-3	0,33
20		FF	BC	90	20		9,747	Após 2-3	43,29
21		FF	CA	0	0.001		7,396	2-3	11,95
22		FF	CA	0	20		10,66	Após 2-3	55,47
23		FF	CA	90	0.001		7,339	2-3	11,19
24		FF	CA	90	20		10,6	Após 2-3	54,67

Tabela 16 - Estimativa de falta para curtos-circuitos bifásicos a terra.

N° Ensaio	Trecho	Tipo Falta	Fase	Ângulo Falta (°)	Resistência Falta (Ohm)	Distância Real (km)	Distância Calculada (km)	Trecho da Localização da Falta	Erro (%)
1		FFT	ABT	0	0.001		1,124	SEA-1	1,65
7		FFT	ABT	0	20		2,261	SEA-1	16,81
4		FFT	ABT	90	0.001		1,12	SEA-1	1,60
10		FFT	ABT	90	20		2,238	SEA-1	16,51
2	SEA-1	FFT	BCT	0	0.001	1	1,096	SEA-1	1,28
8		FFT	BCT	0	20		2,379	SEA-1	18,39
5		FFT	BCT	90	0.001		1,114	SEA-1	1,52
11		FFT	BCT	90	20		2,315	SEA-1	17,53
3		FFT	CAT	0	0.001		1,254	SEA-1	3,39
9		FFT	CAT	0	20		2,455	SEA-1	19,40
6		FFT	CAT	90	0.001		1,246	SEA-1	3,28
12		FFT	CAT	90	20		2,336	SEA-1	17,81
13		FFT	ABT	0	0.001		6,551	2-3	0,68
14		FFT	ABT	0	20		9,607	Após 2-3	41,43
15		FFT	ABT	90	0.001		6,504	2-3	0,05
16		FFT	ABT	90	20		9,682	Após 2-3	42,43
17		FFT	BCT	0	0.001		6,361	2-3	1,85
18	2-3	FFT	BCT	0	20	6,5	9,65	Após 2-3	42,00
19		FFT	BCT	90	0.001		6,46	2-3	0,53
20		FFT	BCT	90	20		9,778	Após 2-3	43,71
21		FFT	CAT	0	0.001		7,392	2-3	11,89
22		FFT	CAT	0	20		10,48	Após 2-3	53,07
23		FFT	CAT	90	0.001		7,333	2-3	11,11
24		FFT	CAT	90	20		10,76	Após 2-3	56,80

Tabela 17 - Estimativa de falta para curtos-circuitos trifásicos.

N° Ensaio	Trecho	Tipo Falta	Fase	Ângulo Falta (°)	Resistência Falta (Ohm)	Distância Real (km)	Distância Calculada (km)	Trecho da Localização da Falta	Erro (%)
1		FFF	ABC	0	0.001		1,098	SEA-1	1,31
2	SEA-1	FFF	ABC	0	20	1	2,229	SEA-1	16,39
3		FFF	ABC	90	0.001		1,110	SEA-1	1,47
4		FFF	ABC	90	20		2,269	SEA-1	16,92
5		FFF	ABC	0	0.001		6,395	2-3	1,40
6	2-3	FFF	ABC	0	20	6,5	9,517	Após 2-3	40,23
7		FFF	ABC	90	0.001		6,410	2-3	1,20
8		FFF	ABC	90	20		9,556	Após 2-3	40,75

Tabela 18 - Estimativa de falta para curtos-circuitos trifásicos a terra.

N° Ensaio	Trecho	Tipo Falta	Fase	Ângulo Falta (°)	Resistência Falta (Ohm)	Distância Real (km)	Distância Calculada (km)	Trecho da Localização da Falta	Erro (%)
1	SEA-1	FFFT	ABCT	0	0.001	1	1,1	SEA-1	1,33
2		FFFT	ABCT	0	20		2,251	SEA-1	16,68
3		FFFT	ABCT	90	0.001		1,111	SEA-1	1,48
4		FFFT	ABCT	90	20		2,265	SEA-1	16,87
5	2-3	FFFT	ABCT	0	0.001	6,5	6,397	2-3	1,37
6		FFFT	ABCT	0	20		9,517	Após 2-3	40,23
7		FFFT	ABCT	90	0.001		6,408	2-3	1,23
8		FFFT	ABCT	90	20		9,538	Após 2-3	40,51

Inicialmente, é possível descartar os resultados das localizações de falta envolvendo resistência de falta igual a 20 ohms, uma vez que a precisão de 2% garantida pelo fabricante se refere apenas à faltas sólidas ($R_F = 0$), conforme exposto no seção 2.3. Percebe-se que para estes casos, tanto para o sistema de validação quanto para a linha híbrida, os erros foram consideráveis.

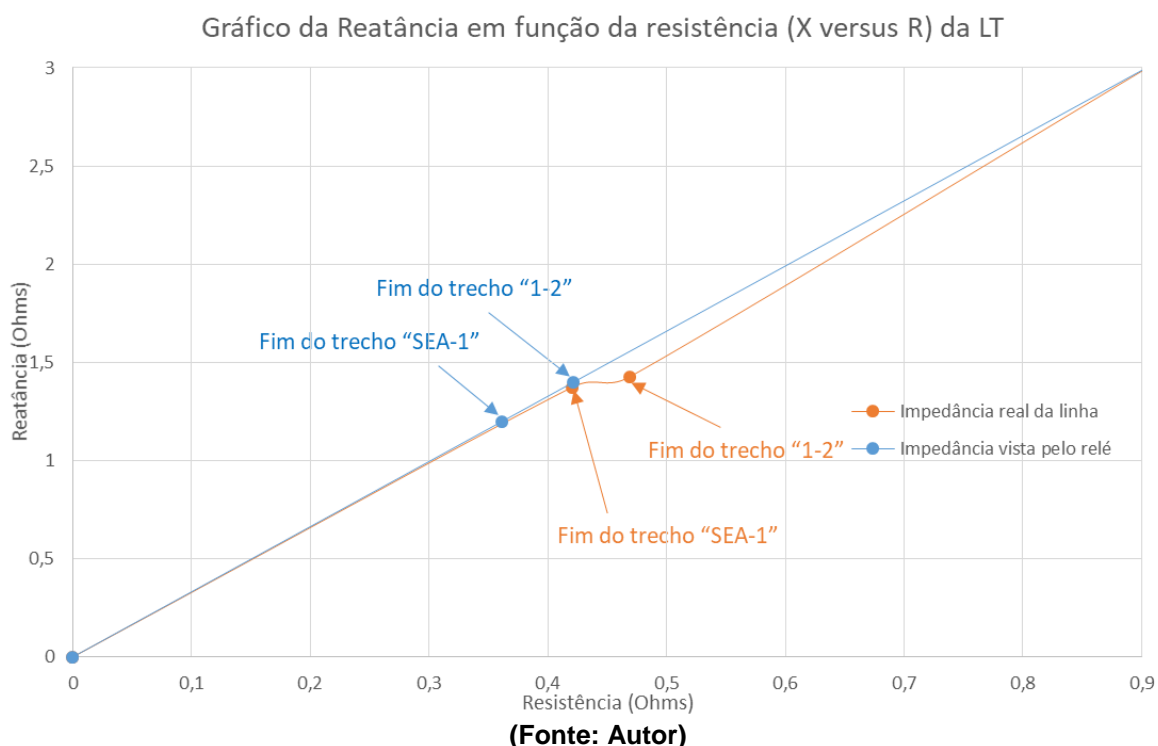
Com relação aos demais resultados, vale notar que a falta monofásica é o tipo de falta que apresenta o maior erro percentual médio e, na medida que a falta ocorre em um maior trecho da linha, mais alto é o erro envolvido no cálculo. A descontinuidade da impedância de cada trecho da linha, juntamente com a impedância mútua dos circuitos 1 e 2 (visto que a linha não possui transposição de fases) proporcionam o alto erro encontrado, chegando a mais de 25% no valor da distância calculada em relação a real, representado um imprecisão próxima a 2km do ponto real onde a falta ocorreu.

A parte mais crítica envolve o trecho 1-2, que é o trecho subterrâneo da linha, um erro considerável que envolva esse trecho pode provocar um grande empecilho na localização da falta. De acordo com a Tabela 14, a falta ocorre no trecho subterrâneo, mas o método de cálculo do relé indica erroneamente que a falta ocorreu no segundo trecho aéreo da linha, chegando a alcançar quase 20% de erro para as faltas FT. O erro na localização da falta faz com que o trecho subterrâneo seja escavado em uma extensão maior do que a necessária e que seja envolvida uma equipe de manutenção maior do que é preciso, pois o relé indicará uma falta no trecho aéreo e na verdade ela ocorre no trecho subterrâneo.

O baixo erro encontrado em alguns dos ensaios se comparados com a precisão garantida pelo fabricante do relé podem ser atribuídos ao fato de que a

descontinuidade de impedância proporcionada pelo trecho subterrâneo representa apenas 6,67% (500m) do comprimento total da linha (7,5km). Traçando o gráfico da reatância em função da resistência da linha (Figura 20), onde as impedâncias de cada trecho calculadas pela rotina “verify” do ATP foram associadas em série, formando a característica de impedância real da linha (traço vermelho), enquanto que o relé tem como informação parametrizada apenas a impedância equivalente da linha (traço azul), é possível perceber que a reta parametrizada no IED se aproxima muito do comportamento real da linha, fazendo com que os valores enxergados pelo localizador de falta se aproximem do ponto de falta. Dessa maneira, trechos subterrâneos mais longos poderiam ter um impacto maior sobre o erro produzido, uma vez que haveria alteração nos trechos do gráfico onde a impedância tem seu ângulo alterado.

Figura 20 – Curva de Impedância da LT.



Observando a curva de impedância, percebe-se que a inclinação da reta se altera quando a linha de transmissão atinge o trecho subterrâneo (trecho 1-2) e também quando retoma o trecho aéreo (trecho 2-3). Como é parametrizada apenas a impedância total da linha, o relé acaba por enxergar apenas uma reta, fazendo com que o algoritmo associe a cada impedância de falta encontrada um ponto na

reta que lhe foi configurada que pode não coincidir com a característica real da LT. Para uma falta localizada no meio do trecho subterrâneo, por exemplo, a impedância de falta será maior que o valor corresponde à metade do comprimento da linha enxergado pelo relé. Isto justifica o sobrealcance na localização de todas as faltas ensaiadas.

Com os resultados obtidos, é possível concluir que o localizador de faltas estudado se mostrou inadequado para atuar em linhas de transmissão híbridas, visto que a característica de impedância dessa topologia faz com que o IED enxergue valores diferentes do real. A solução para tal problema envolveria a inclusão de mais informações referentes à cada trecho, discriminando-os conforme a sua impedância e comprimento total. Tais alterações implicariam em uma otimização do algoritmo que é utilizado no relé, algo que apesar de não estar no escopo dessa pesquisa, configura uma boa sugestão de trabalho futuro.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs simular um sistema elétrico hipotético de uma linha híbrida de 69kV em diversas situações faltosas e aplicá-lo com auxílio de um dispositivo de ensaio em um relé de proteção que realiza a função de localizador de faltas com o objetivo de avaliar o seu desempenho.

Foi proposto um aparato experimental envolvendo basicamente uma mala de testes para injeção de sinais de tensão e corrente, um dispositivo comercial contendo a função de localizador de falta para ser ensaiado, um computador para gerenciamento dos softwares de modelagem da linha e parametrização dos dispositivos e um switch ethernet para integração destes equipamentos em uma rede única. A linha de transmissão foi modelada e simulada em diversas situações de falta, sendo os sinais de tensão e corrente convertidos para reprodução na mala de testes e injeção no localizador de faltas.

Inicialmente foi ensaiado um sistema de validação, envolvendo uma linha de transmissão heterogênea, tendo por objetivo consistir as informações fornecidas pelo fabricante do relé. Foram obtidos resultados coerentes, que deram sustentação ao propósito da pesquisa e aos ensaios realizados em seguida, já envolvendo a linha híbrida.

Sendo assim foram simulados 132 casos com variações em ângulo de incidência da falta, resistência de falta, tipo de falta, fase de falta e local da falta. Os resultados mostraram que o algoritmo de localização de falta não é indicado para estimação de qualquer tipo de curto-circuito com resistência de falta envolvida, sendo a sua precisão garantida apenas para faltas sólidas. Já neste tipo de faltas, o IED apresentou resultados com um erro médio de 5,3%, considerando todos os tipos de falta ensaiados, algo que para uma linha de 7,5 km pode representar uma imprecisão de aproximadamente 400 metros. Um erro dessa magnitude pode gerar altíssimos custos para a concessionária em termos de manutenção, deslocamento de equipe, além da eliminação da falta propriamente dita.

Assim sendo, com a análise dos casos, pode-se dizer que, de uma maneira geral, o algoritmo utilizado pelo relé de proteção ensaiado não é adequado para a localização de faltas em linhas híbridas. Logo, faz-se necessário investir em uma otimização do algoritmo implementado, proporcionando uma quantidade maior de

parâmetros de entrada, possibilitando uma discriminação de cada trecho da linha em termos de impedância e comprimento.

Para otimizar o desempenho de localizadores de falta em linhas de transmissão híbridas, sugere-se como trabalho futuro a implementação de um algoritmo de compensação de parâmetros para correção do erro gerado pelo localizador de faltas, semelhante ao trabalho desenvolvido por Lee (2001). Também se faz relevante a reprodução dos testes realizados nesta pesquisa, porém envolvendo mais de um dispositivo comercial, tendo em vista a comparação do desempenho de diferentes fabricantes, além de confrontar os diferentes métodos de localização de falta presentes nestes equipamentos.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 7117:2012. Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Relatório de Análise: desligamentos forçados do Sistema de Transmissão**. – Brasília: ANEEL, 2017.

BARBOSA, Daniel. **Sistema híbrido inteligente para o monitoramento e proteção de transformadores de potência**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Corea Araujo, Javier & González-Molina, F & A Martínez-Velasco, J & Barrado, José Antonio & Guasch-Pesquer, Luis. (2013). **An EMTP-based analysis of the switching shift angle effect during energization/de-energization in the final ferroresonance state** in: proceedings of International Conference on Power System Transients (IPST), At Vancouver, Canada.

COURY, Denis Vinicius; OLESKOVICZ, Mário; GIOVANINI, Renan. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. São Carlos, SP: Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

DALCASTAGNÉ, André Luís et al. **Método iterativo para localização de faltas em linhas de transmissão a partir de fasores não-sincronizados**. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

DAS, Swagata et al. **Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application**. IEEE Access, v. 2, p. 537-557, 2014.

DE REDE-SUBMÓDULO, Procedimentos. 3.6-Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. **Operador Nacional do Sistema (ONS)**, Setembro, 2010.

DOS SANTOS, Ricardo C. **ALGORITMO BASEADO EM REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS PARA A PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**. Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC; 1979. 588 p. ISBN 85-216-0082-8

GÖNEN, Turan. ***Electric power transmission system engineering: analysis and design***. 3rd. ed. New York, NY: CRC Press, 2015.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines**. IEEE Std C37.114. 2014.

HOROWITZ, Stanley H.; PHADKE, Arun G., **Power System Relaying**. John Wiley and Sons Ltd., 2014.

J. B. Lee, C. W. Ha and C. H. Jung, ***Development of digital distance relaying algorithm in combined transmission lines with underground power cables***, 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262), Vancouver, BC, Canada, 2001, pp. 611-616 vol.1.

J. Klomjit and A. Ngaopitakkul, ***Fault classification on the hybrid transmission line system between overhead line and underground cable***, 2017 Joint 17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (IFSA-SCIS), Otsu, 2017, pp. 1-6.

KUMAR, K. Prasanna; PRASAD, K. Durga Syam; SRAVANTHI, K. ***Wavelet-Based Fault Location and Distance Protection Method for Transmission Lines***. Int. Journal of Engineering Research and applications, p. 05-1, 2014.

LABEGALINI, Paulo Roberto et al. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2. ed. São Paulo: E. Blucher, 1992. 528 p. ISBN 9788521201878.

L. Eriksson, M. M. Saha and G. D. Rockefeller, "An Accurate Fault Locator With Compensation For Apparent Reactance In The Fault Resistance Resulting From Remote-End Infeed" in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 2, pp. 423-436, Feb. 1985.

MAGNAGO, Fernando H.; ABUR, Ali. **Fault location using wavelets**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 13, n. 4, p. 1475-1480, 1998.

MISHRA, Debari Prasad; RAY, Papia. Fault detection, location and classification of a transmission line. **Neural Computing and Applications**, p. 1-48.

PHADKE, Arun. G., THORP, James S., **Computer Relaying for Power Systems**. Research Studies Press Ltd., 1988.

POPOV, Marjan et al. **An efficient algorithm for fault location on mixed line-cable transmission corridors**. In: IPST 2013: International Conference on Power System Transients, Vancouver, Canada, 18-20 July 2013. 2013.

PRODIST, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional da ANEEL**. Brasília, 2018. Disponível no site: www.aneel.gov.br.

Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica – NBR5422. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 1985.

SILVA, Murilo da; OLESKOVICZ, Mário; COURY, Denis V. **Uma nova ferramenta baseada na transformada *Wavelet* para localização digital de faltas**. SBA – Sociedade Brasileira de Automática, 2005.

SILVA, Murilo da. **Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada wavelet**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVA, Raphael Philipe Mendes. **Localizador de faltas para linhas de transmissão-Estudo, simulação e implementação embarcada**. 2009. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.

TALAMINI NETO, Edmundo. **Caracterização geotécnica do subsolo de Curitiba para o planejamento de ocupação do espaço subterrâneo**. 2001. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. doi:10.11606/D.18.2002.tde-06102006-083510. Acesso em: 2018-12-02.

THREEVITHAYANON, Wutthikorn; HOONCHAREON, Naebboon. Accurate one-terminal fault location algorithm based on the principle of short-circuit calculation. **IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, v. 8, n. 1, p. 28-32, 2013.

T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura and T. Sakaguchi, "**A New Alogorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I - Fourier Transformation Method**" in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 3, pp. 1316-1323, March 1981.

T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow and T. Matsushima, "**Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and**

Current Data," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892-2898, Aug. 1982.

XU, Zhihan; ZHANG, Zhiying. ***What Accuracy Can We Expect from de Single-Ended Fault Locator?***, 2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Texas, Estados Unidos, March 30 2015-April 2 2015. 2015.

WATSON, N.; ARRILLAGA, J. **Power Systems Electromagnetic Transients Simulation**. 1st ed. London: Institution of Engineering and Technology, 2003.