

JOSE ANTONIO PANINI JUNIOR

LOCALIZADOR DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Guaratinguetá - SP

2016

JOSE ANTONIO PANINI JUNIOR

**LOCALIZADOR DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**


Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli.

Guaratinguetá

2016

P192l	<p>Panini Junior, Jose Antonio Localizador de faltas por ondas viajantes em linhas de transmissão / Jose Antonio Panini Junior – Guaratinguetá, 2015. 50 f : il. Bibliografia: f. 47-48</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli</p> <p>1. Linhas elétricas 2. Energia elétrica - Falhas 3. Impedancia (Eletricidade) I. Título</p> <p>CDU 621.315.1</p>
-------	---

unesp  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

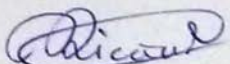
Jose Antonio Panini Junior

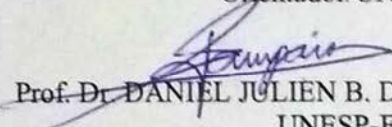
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

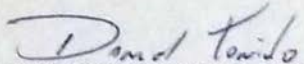
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. DURVAL LUIZ SILVA RICCIULLI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. DANIEL JULIEN B. DA S. SAMPAIO
UNESP-FEG


Eng. DANIEL DE OLIVEIRA TONIOLO
Membro Externo

Fevereiro de 2016

DADOS CURRICULARES

JOSE ANTONIO PANINI JUNIOR

NASCIMENTO 17.08.1989 – Araras / SP

FILIAÇÃO Jose Antonio Panini
Maria Eunice Blasque Panini

2010/2016 Curso de Graduação
Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista

Aos meus pais José e Maria que sempre me apoiaram e incentivaram nos estudos, a minha irmã Mariana e eterna amiga e companheira Priscila que sempre me ajudou em qualquer momento e fez-me o homem que sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, o qual me guiou e protegeu ao longo dessa longa jornada.

Aos meus pais, José Antonio Panini e Maria Eunice Blasque Panini, pois sem eles não seria possível estar onde estou hoje. Agradeço pelo apoio e incentivo aos estudos, suas atitudes sempre me serviram como inspiração para continuar a persistir os meus sonhos, mesmo que pareçam distantes.

À minha eterna amiga e companheira Priscila Rodrigues Camargo, pelo amor, dedicação, atenção e compreensão, que foram combustíveis para trilhar a longa jornada da graduação e que servirá de impulso para muitos outros desafios de nossas vidas.

Aos familiares e todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha segunda casa República O.NU e todos aqueles pertencentes ao círculo de convivência e aprendizagem, amigos os quais nunca irei esquecer.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli e a todos outros docentes pelos ensinamentos passados, pela atenção e dedicação para tornar-me um engenheiro apto para a realização de qualquer outro trabalho fora da vida acadêmica.

À Siemens e colegas com quem trabalhei que e me ajudaram a desenvolver minhas habilidades e conhecimentos adquiridos na vida acadêmica.

À UNESP Campus de Guaratinguetá – FEG, pela chance e oportunidade de realização de mais um sonho da minha vida.

“A ciência não é uma ilusão, mas seria uma ilusão acreditar que poderemos encontrar noutra lugar o que ela não nos pode dar.”

(Sigmund Freud)

PANINI, J. A. J. **Localizador de faltas por ondas viajantes em linhas de transmissão**. 2016. 50 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

É importante assegurar a perfeita operação de uma linha de transmissão, entregando energia aos centros consumidores com o mínimo de interrupções e tornando-a mais segura. Com tal necessidade, tem crescido as técnicas de localização de faltas, para que o impacto da falta possa ser mitigado e sua correção possa ser mais rápida e precisa. Este trabalho apresenta uma comparação entre duas diferentes técnicas para localização de faltas, a localização de faltas pelo método das impedâncias, que utiliza dos parâmetros da linha, impedância característica e leituras de tensão e corrente, o outro método é o de ondas viajantes, que utiliza de uma análise muito rápida de tempo, sincronização e comprimento da linha entre os terminais, não fazendo o uso de dados de tensão e corrente da linha de transmissão, mas sim a percepção temporal da falta. A abordagem de detecção de faltas por ondas viajantes torna o conhecimento prévio dos parâmetros da linha obsoletos, o que ajuda e muito os técnicos da rede e engenheiros com uma análise fácil e rápida. Os métodos são simulados no software ATP Draw, para que ambos os algoritmos possam ser avaliados quanto a sua eficácia e exatidão.

PALAVRAS-CHAVE: Linhas elétricas. Energia elétrica. Falhas. Impedância.

PANINI, J. A. J. **Fault Locator based on traveling waves for transmission lines**. 2016. 50 f. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

It is important to ensure smoothly operation of a transmission line, sending energy to the consumption centers with minimal interruptions and safer. With this necessity, the fault location techniques have grown, in order to mitigate the impact of the fault and its correction can be more quickly and accurately. This paper presents a comparison between two different techniques of fault location, the fault location by impedance method, which uses the line parameters, the impedance per distance, voltage and current signals, and the other is the traveling wave method, which uses only a very fast analysis of time, synchronization and length between the line ends, do not using voltage and current values, but the temporal perception of the fault. Using travelling waves fault detection makes the previous knowledge of line parameters obsolete, which helps a lot network technicians and engineers with a quick and easy analysis. The methods are simulated in ATP Draw software, so both algorithms can be evaluated for their effectively and accuracy.

KEYWORDS: Electric lines. Electricity. Faults. Impedance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Topologia de linhas de transmissão.....	16
Figura 2 - Classificação do tipo de falta em sistemas elétricos de potência.....	20
Figura 3 - Falha linha-terra: fase A (a), fase B (b) e fase C (c).....	22
Figura 4 - Falha linha-linha entre as fases AB (a), BC (b) e CA (c).....	22
Figura 5 - Falha linha dupla-terra entre as fases AB e terra (a), BC e terra (b) e CA e terra (c).....	23
Figura 6 - Propagação das Ondas Viajantes em direção aos terminais.	26
Figura 7 - Diagrama de reflexão das Ondas Viajantes em uma LT de dois terminais.	28
Figura 8 - Circuito Equivalente de Linha Curta.	29
Figura 9 - Linha no momento da falta.....	30
Figura 10 - Silhueta de torre de linha 440 kV.	33
Figura 11 - Tensão do gerador em vermelho e tensão da carga em verde.	34
Figura 12 - Parâmetros da torre de transmissão.	34
Figura 13 - Disposição das linhas de transmissão.	35
Figura 14 - Dados da linha a ser simulada.	36
Figura 15 - Implementação do problema no software ATP Draw.	37
Figura 16 - Coleta do tempo de chegada aos terminais.....	39
Figura 17 - Coleta das tensões e correntes antes da falta.	40
Figura 18 - Gráfico comparativo entre os métodos analisados.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição da ocorrência de faltas em um SEP.	17
Tabela 2 - Estatística de tipos de falha em linhas de transmissão.	21
Tabela 3 - Resultado dos tempos em que é percebida a falta pelos terminais A (t_1) e B (t_2).	38
Tabela 4 - Leitura das tensões e correntes nos terminais A (V1) e terminal B (V2).	39
Tabela 5 - Leituras de tensão e corrente nos pós-falta para o terminal A.	41
Tabela 6 - Estimativa de Localização de Falta por OV e Z.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	Alternative Transients Program
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
IED	Intelligent Electronic Device
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
GPS	Global Positioning System
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema
OV	Ondas Viajantes
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
USP	Universidade de São Paulo
Z	Impedâncias

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	CENÁRIO BRASILEIRO	14
1.2	LINHAS DE TRANSMISSÃO	15
1.3	IMPORTÂNCIA DE UM LOCALIZADOR DE FALHA	17
2	DESENVOLVIMENTO.....	19
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E MÉTODOS	19
2.2	CLASSIFICAÇÃO DAS FALTAS	19
2.3	LOCALIZADOR DE FALTAS.....	23
2.4	LOCALIZADOR DE FALTAS BASEADO EM ONDAS VIAJANTES	24
2.4.1	Ondas viajantes.....	24
2.4.2	Técnica proposta.....	25
2.4.3	Outras técnicas.....	27
2.5	LOCALIZADOR DE FALTAS BASEADO EM IMPEDÂNCIA.....	28
3	METODOLOGIA	32
3.1	CONSIDERAÇÕES.....	32
3.2	SIMULAÇÃO.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	MÉTODO DE ONDAS VIAJANTES	38
4.2	MÉTODO DE IMPEDÂNCIAS	39
4.3	ANÁLISE E ESTIMATIVA DO LOCAL DE FALHA	42
5	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS.....	46
	ANEXO A.....	48

1 INTRODUÇÃO

O sistema de transmissão de energia elétrica do Brasil é formado por longas linhas aéreas, onde a rápida identificação do problema é de fundamental importância para o bom funcionamento do sistema elétrico. Com a complexidade de se interligar vários centros geradores e consumidores, somado ao fato de se tratar de um país muito extenso, de características de gerações e consumidoras diferentes, forma uma rede densa e assim de difícil controle. Para esse controle é necessário um órgão responsável, chamado ONS (Operador Nacional do Sistema). O sistema de transmissão brasileiro, considerado o maior do mundo, é controlado pela ONS, que conta com a participação de empresas de todo o país, trabalhando de forma interligada, tanto para a injeção quanto para a extração de energia da rede.

Quando se diz que o país possui diferentes características geradoras, entende-se que por ser muito extenso, há regiões onde não existe uma característica hidrográfica propensa para a construção de uma hidroelétrica, porém nota-se que esta região possui uma corrente de ventos que favorece a construção de usinas eólicas. Assim tem-se a diversificação da geração, que da mesma forma ocorre com o consumo, por exemplo, onde há grandes centros industriais há uma demanda de energia muito diferente da energia fornecida aos domicílios, onde se deve realizar o tratamento de reativos, que é a compensação da energia reativa gerada pelo fluxo magnético de motores e transformadores e também os reativos gerados por cargas não lineares como lâmpadas fluorescentes, televisões e computadores. A energia elétrica é composta pela energia ativa, que é a energia útil ou que pode ser transformada em trabalho, e a energia reativa que não é utilizável, que acaba aumentando a energia que deverá ser gerada e a ocupação dos cabos elétricos, havendo a necessidade de utilização de cabeamentos mais robustos. Porém a energia reativa pode ser compensada através de reatores e bancos de capacitores, que corrigem o fator de potência (FP), fator de energia ativa sobre a energia total (ativa + reativa). (LIGHT, 2012)

A Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. possui mais da metade das linhas de transmissão do Brasil e tem participado ativamente da expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN). O SIN, formado basicamente por empresas de geração, transmissão e distribuição do país, permite o intercâmbio de energia elétrica entre as diversas regiões brasileiras. Isso significa que a eletricidade que chega até as residências pode ter viajado centenas ou milhares de quilômetros em uma ou mais linhas de transmissão, além de poder ter sido gerada por diferentes usinas.

“Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontram-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica.” (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, 2014)

Apesar de o SIN abastecer a maior parte do país, alguns sistemas menores e isolados também são utilizados, principalmente nas regiões Norte e Nordeste. Os sistemas isolados geram a energia que vai ser consumida apenas em uma determinada localidade ou até mesmo por uma só indústria.

1.1 CENÁRIO BRASILEIRO

Como a principal fonte energética para geração de eletricidade no Brasil é a hidrelétrica, com mais de 1.000 empreendimentos e representando cerca 70% de toda energia disponibilizada (131,2 GW), se aproveita a energia potencial das águas, rios ou bacias em relevos altos, utilizando da força da água em movimento, guiada através de tubulações para mover hélices de uma turbina conectada à um gerador, transforma a energia cinética em energia elétrica, e esta é transmitida através das linhas de transmissão para as diversas regiões do país.(PORTAL DO BRASIL, 2011)

A produção energética é fortemente dependente do regime de chuvas e bacias hidrográficas, que variam entre regiões de todo o território do país, portanto na maioria das vezes os centros geradores se encontram muito distante dos centros consumidores de energia, sendo necessário o transporte desta energia gerada e ficando assim sujeito à possíveis problemas de transmissão. A malha formada pelas interconexões de linhas de transmissão é controlada pelo SIN, que faz a interface consumidor/rede e rede/gerador.

Com a interconexão elétrica das usinas elétricas através do SIN, a entrega de energia se torna mais eficiente, menos sujeito às possíveis interrupções e/ou restrições de ofertas regionais, pelo fato da energia produzida em uma região (com grande quantidade de água) poder ser transmitida para outra de forma a equilibrar todo o sistema. A operação do SIN é

concentrada em um núcleo, ou seja, ela é centralizada, o que assegura que as decisões de emissão das usinas geradoras sejam tomadas de forma a suprir as necessidades de abastecimento nacional de energia. Um dos fatores que determinam a operação centralizada é a diminuição dos custos futuros associados a eventuais faltas de energia, que podem originar significativos prejuízos no futuro.

Uma ferramenta utilizada para se ter maior flexibilidade e manobra para o controle do déficit de energia são também utilizadas as usinas termelétricas, para não se ficar totalmente dependentes do regime de chuvas de determinada região para a produção de energia elétrica. Assim é possível economizar água utilizando uma usina termelétrica quando se há a necessidade (período de seca), resultando em menores riscos aos setores dependentes da água, tais como o setor agrícola, pecuário e abastecimento das cidades.

Considerando tais circunstâncias do sistema de transmissão brasileiro, é de fundamental importância para o sistema elétrico, a utilização de métodos precisos e eficientes de localização de faltas. Dentre os diversos métodos existentes na literatura, os algoritmos baseados em ondas viajantes (OV) têm se destacado como os mais eficientes.

Este trabalho pretende desenvolver e avaliar o desempenho para a determinação do local da faltas utilizando os algoritmos do método de OV comparando-o com o método mais utilizado, o método de impedâncias (Z). A localização rápida da falta na linha de transmissão permite uma ação imediata, facilitando os reparos e a restauração da linha, sendo de fundamental importância também para no sentido econômico, pois a concessionária responsável pela transmissão de energia é sujeita a pagar altas taxas de indenização associado ao tempo em falta.

1.2 LINHAS DE TRANSMISSÃO

Linhas aéreas de transporte são os meios mais convenientes para o transporte de energia elétrica, a partir da fonte de geração, de subestação à subestação até os centros consumidores. Uma representação de forma simplificada do sistema onde é utilizada a linha de transmissão é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Topologia de linhas de transmissão



Fonte: (BRAIN, 2014).

Na Figura 1 é possível identificar os vários setores envolvidos na geração (usina de energia), transmissão (subestação elevadora e linhas de transmissão de alta tensão), distribuição (subestação abaixadora, linhas de média tensão, transformadores de distribuição) e enfim os centros consumidores.

A desregulamentação do mercado da eletricidade, as exigências econômicas e ambientais têm levado as concessionárias de energia elétrica a operar linhas de transmissão perto de seus limites máximos. O funcionamento correto das linhas de transmissão elétrica é essencial para o mínimo de interrupção para os consumidores, uma vez que se tornaram cada vez mais dependentes da energia, com o crescimento da tecnologia em todo o mundo. Isto requer uma operação confiável de equipamentos de energia e satisfação dos consumidores.

Linhas de transmissão e distribuição apresentam falhas que são causadas pela natureza, como tempestades, relâmpagos, nevascas, entre outros e falhas de curto circuito causado por pássaros, galhos de árvores e outros objetos externos. Na maioria dos casos, as falhas elétricas devem ser reparadas antes de voltar a religar a linha, pondo-a em serviço novamente. Qualquer falha, se não for detectada e isolada rapidamente, poderá causar diversos problemas para o sistema, causando interrupções generalizadas e até mesmo apagões.

1.3 IMPORTÂNCIA DE UM LOCALIZADOR DE FALTA

Entre os elementos que compõem o Sistema Elétrico de Potência (SEP), tais como transformadores, barramentos, disjuntores entre outros, a linha de transmissão é a mais susceptível à falha, devido ao seu tamanho e extensão, deve ser capaz de suportar diversos climas, sujeito às variações climáticas e intempéries, além de sua manutenção ser em locais de difícil acesso, com isso apresenta maior dificuldade de reparo, manutenção e monitoramento. Um estudo realizado Universidade de São Paulo (USP), levantou dados estatísticos da ocorrência de falhas em um SEP e mais de 80% das faltas são em linhas de transmissão, como mostrado na Tabela 1.

A restauração do fornecimento de energia após a ocorrência de uma falta permanente pode ser feito somente após a equipe técnica responsável terminar a manutenção e reparar os danos causados pela falha. Para esta finalidade, a localização da falha deve ser conhecida, caso contrário toda a linha deve ser inspecionada para encontrar a origem dos danos. Esta tarefa torna-se ainda mais trabalhosa se considerarmos linhas de transmissão de alta tensão, geralmente com centenas de quilômetros de distância.

Tabela 1 - Distribuição da ocorrência de faltas em um SEP.

Equipamento	Ocorrência
Linha de transmissão	82%
Circuito disjuntores	4%
Transformadores	6%
Barramentos	1%
Geradores	1%
Erro humano	5%
Outros	1%

Fonte: (VALINS, 1987)

As linhas e cabos subterrâneos devem ser descobertos do subsolo, o que exige muita mão de obra e maquinários pesados. Em áreas povoadas é necessário bloquear o local para que se possa cavar e inspecionar os cabos, o que acaba impactando não somente no atrasado do reparo, mas também na mobilidade local.

Deste modo, é importante que o local de um defeito seja conhecido ou possa ser estimado com precisão razoável, isto permite economizar tempo e dinheiro para a inspeção e reparo, auxiliando também na realização do serviço pelas concessionárias, possibilitando a restauração mais rápida da energia.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E MÉTODOS

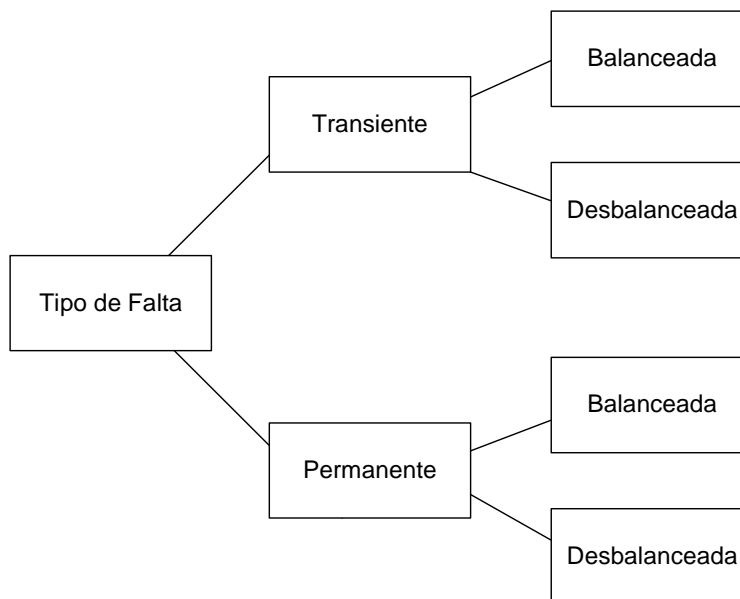
Os conceitos básicos de análise de falhas e localizadores de faltas são descritos de forma comparativa, sendo analisados em relação à sua eficácia na detecção e localização. Uma revisão abrangente de todos os diferentes métodos de localização de falhas em sistemas de energia é apresentada em conjunto com as vantagens e desvantagens de cada método de detecção de localização de faltas. Porém, antes disso é necessário se conhecer as classificações e tipos de faltas existentes.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS FALTAS

As faltas podem ser do tipo balanceada ou desbalanceada, a balanceada acontece nas três fases da mesma maneira, podendo ser chamada também de falta trifásica. A falta desbalanceada pode ser monofásica, bifásica ou bifase-terra. Além disso, podem ser classificadas também em permanente ou transitória. Uma falta é classificada como permanente quando, após a sequência de tentativas de religamento estabelecida pela concessionária ou pelo proprietário da linha, não se consegue reenergizar, mantendo assim um circuito aberto para que não ocorram mais danos ao sistema. A falta é chamada de transitória quando após essa sequência de tentativas de religamentos, a linha pode ser reestabelecida com sucesso, porém ocorre a propagação de ondas que podem desestabilizar as fases, sendo assim prejudiciais para o sistema elétrico. (PARMAR, 2015)

Estas classificações de faltas podem ser mais bem representadas na Figura 2, onde são mostradas as possibilidades de tipos de falta.

Figura 2 - Classificação do tipo de falta em sistemas elétricos de potência.



Fonte: Adaptado de (PARMAR, 2015)

Uma falha é uma interrupção do fluxo normal de corrente em um circuito, resultando não só em perdas financeiras para a os fornecedores e inconvenientes para os clientes, mas também em casos mais graves, o completo desligamento do abastecimento da rede.

Em linhas de transmissão e distribuição podem ocorrer ambas faltas temporárias ou permanentes. Faltas temporárias são em sua maioria autocorrigidas e faltas permanentes podem ser detectadas e corrigidas com a ajuda de dispositivos tais como os relés de proteção.

Quando uma linha é retirada de serviço por causa de falhas, não é fornecida energia às cargas conectadas e por sua vez, outras linhas são obrigadas a fornecer energia às cargas da linha em falta. É também possível que uma série de trips (eventos que comandam o disjuntor para ser aberto ou fechado) em cascata de um relé de proteção ocorra, promovendo a falta em partes sucessivamente maiores do sistema, o que resulta em grandes *blackouts* no sistema de potência.

Um estudo estatístico dos tipos de falhas da rede elétrica do norte europeu no ano de 2013 e dados apresentados em uma publicação no IEEE Journal (S. TAMRONGLAK, 1996), mostrado na Tabela 2, revelaram que a falta mais comum é a falha linha-terra, monofásica, porém as mais perigosas ainda são as trifásicas. O quadro apresentado no estudo é mostrado abaixo e alerta ao seu percentual de ocorrência, que muito superiores aos demais tipos.

Tabela 2 - Estatística de tipos de falha em linhas de transmissão.

Tipo de falha	Natureza	Ocorrência
Linha Simples – Terra	Desbalanceada	85%
Linha - Linha	Desbalanceada	8%
Linha Dupla – Terra	Desbalanceada	5%
Linha Tripla	Balanceada	2%

Fonte: (S. TAMRONGLAK, 1996)

Comumente há dois tipos de falhas em linhas de transmissão - falhas transitórias e falhas permanentes como são mostradas na Figura 2. Uma falha transitória não está mais presente se a energia for desligada por um curto período de tempo e então religada com sucesso. A maioria das falhas em linhas elétricas aéreas é por natureza transitória e os dispositivos do sistema de proteção operam para isolar a área da falha, ao se remover a falha, a linha pode ser religada para voltar à operação normal. Exemplos típicos de falhas transientes incluem:

- Contato de galho de árvore, pássaros ou outros animais;
- Descargas atmosféricas;
- Choque entre condutores.

Uma falha permanente pode causar danos irreparáveis às linhas de transmissão e para combatê-la, primeiramente deve-se isolar a linha e em seguida a correção tem que ser feita. Alguns exemplos da falha de natureza permanente são:

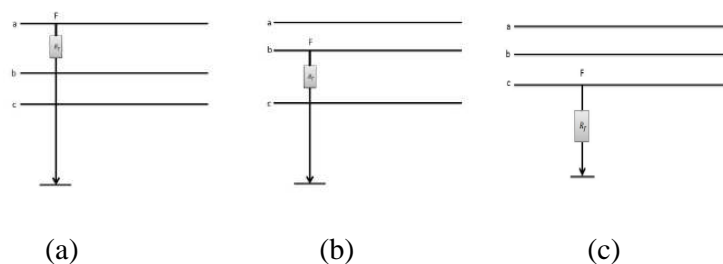
- Relâmpago direto na linha;
- Danos provocados pelo homem;
- Danos mecânicos devido ao ambiente e tempo de operação.

Uma falha simétrica em uma linha afeta cada uma das suas três fases igualmente e, como visto na Tabela 1, representam apenas 3-5% do total das falhas. Em contraste com as

falhas simétricas, existem as falhas assimétricas, que afetam as fases da linha de forma desigual. Abaixo são mostrados os tipos existentes de falha assimétrica. (PARMAR, 2015)

- **Falha linha-terra:** Pode ocorrer devido a um curto circuito entre uma linha e a terra ou neutro, muitas vezes causado por contato físico de árvores, descargas atmosféricas ou outros danos causados por tempestades. Isso é representado na Figura 3 (a), (b) e (c) para diferentes fases.

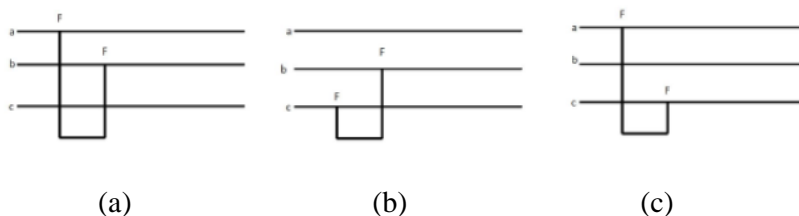
Figura 3 - Falha linha-terra: fase A (a), fase B (b) e fase C (c).



Fonte: Adaptado de (PARMAR, 2015)

- **Falha de linha-linha** - É um curto circuito entre as linhas, causada por ionização de ar ou quando ocorre o contato físico entre as linhas, por exemplo, devido a um isolador quebrado ou ventos muito fortes que acabam fazendo os condutores se chocarem. A Figura 4 mostra as possíveis faltas linha-linha.

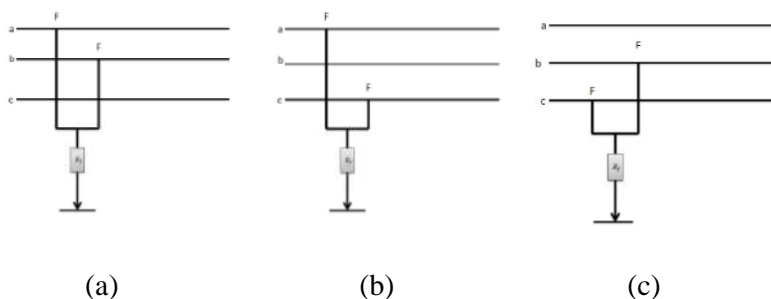
Figura 4 - Falha linha-linha entre as fases AB (a), BC (b) e CA (c).



Fonte: Adaptado de (PARMAR, 2015)

- **Falha linha dupla-terra:** É o contato entre duas linhas e a terra, geralmente é causado devido a danos por tempestades, onde ventanias fortes e a água tornam esse tipo de falha mais propenso a ocorrer. A Figura 5 demonstra as possibilidades desta falha.

Figura 5 - Falha linha dupla-terra entre as fases AB e terra (a), BC e terra (b) e CA e terra (c).



Fonte: Adaptado de (PARMAR, 2015)

2.3 LOCALIZADOR DE FALTAS

Um localizador de falta é um sistema projetado para localizar uma falha com a mais alta precisão, ampliando a capacidade de proteção de determinado equipamento, pois aplica os algoritmos de localização de falta para estimar o quão distante está a falha, podendo também ser usado para a identificação do tipo de falha e cálculos de impedância da falta.

Localizadores também acionam os sistemas de proteção convencionais, trabalhando em conjunto com relés digitais e dispositivos eletrônicos inteligentes (IED - Intelligent Electronic Devices), compartilhando os mesmos dados da linha, porém realizando outros cálculos de modo a também proteger a linha, aplicando a redundância no sistema de proteção e tornando-o mais seguro e confiável.

As detecções tradicionais de falha de linha dependem fortemente de inspeções visuais da linha em falta, resultando em tediosas patrulhas aéreas ou em terra. Estes métodos eram caros e propensos a mais erros. Assim, a mudança para localizadores de faltas automáticos não só foi desejado, mas também natural.

Os algoritmos de localização de falha mais utilizados podem ser divididos em dois grupos principais: baseados em impedância e os baseados em ondas viajantes (OV).

Algoritmos baseados impedância fazem uso dos parâmetros de linha (resistância, indutância e condutância por unidade de comprimento e o comprimento da linha), assim como dados de tensão e de corrente a partir de um ou mais terminais de linha para calcular a distância à falta de uma referência ponto ou terminal de linha.

Algoritmos baseados em Ondas Viajantes utilizam a teoria de que as ondas viajam ao longo de uma linha a partir de uma falha na velocidade da luz para calcular a distância a uma falha de um ponto de referência de onda e tempo de alcance de um terminal de linha. Mais detalhes sobre os tipos de técnicas de detecção de localização de faltas são apresentados nas seções subsequentes.

2.4 LOCALIZADOR DE FALTAS BASEADO EM ONDAS VIAJANTES

2.4.1 Ondas viajantes

Ondas viajantes (OV) ocorrem após as falhas, em comutações ou relâmpagos. Quando ocorre uma falha ao longo de uma linha de transmissão, os transientes de tensão e corrente viajam para os terminais de linha. Uma vez que as ondas de viajam ao longo da linha de transmissão com a velocidade muito próxima à velocidade da luz, medindo com precisão o tempo necessário para propagação da onda para os terminais de linha, a distância da falta pode ser encontrada.

A velocidade com que ela se propaga é dependente das características da linha de transmissão, de seus materiais, de seus elementos, isoladores, distância de um terminal ao outro entre outras.

Pode até parecer estranho à primeira vista as grandezas, indutância e capacitância, sejam comparadas à velocidade, e isto pode ser comparado, pois o resultado tem como origem as suas grandezas dado que L é expressa em *henrys* por unidade de comprimento e C em *farad* por unidade de comprimento, pois quando se multiplica *henrys* por *farads*, se obtém a dimensão de segundo ao quadrado, como se pode verificar na Equação (1), chamada de equação de ressonância de um circuito série simples, obtém-se a velocidade angular (ω).

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{\text{henrys} \times \text{farads}}} = \frac{[\text{radianos adimensionais}]}{[\text{segundo}]} \quad (1)$$

Sendo assim, pode-se obter a velocidade da onda (v) em uma linha de transmissão a partir da densidade linear da indutância e capacitância de uma linha de transmissão, como é mostrado na Equação (2) abaixo.

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{[\text{comprimento}]}{[\text{segundo}]} \quad (2)$$

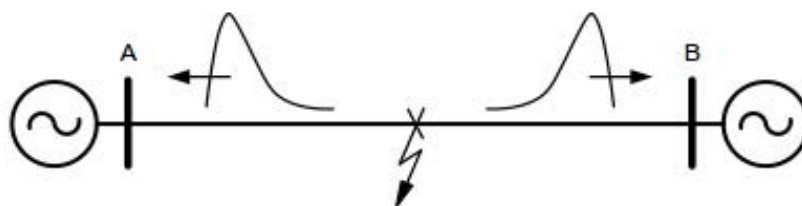
Onde L é a indutância e C é a capacitância da linha por metro.

O valor numérico de $1/\sqrt{LC}$ para condutores isolados a ar é próxima de $3 \cdot 10^8$ m/s, o que confirma a determinação da experimental da velocidade da luz no espaço livre. Isolantes sólidos, de constantes dielétricas maiores fazem com que essa velocidade se torne menor, além disso, as perdas na linha tendem de alguma forma a reduzir esta velocidade. (JOHNSON, 1980). Contudo, as linhas de transmissão aéreas não apresentam isolantes, são basicamente de alumínio nu, tendo como isolante somente o ar, a velocidade de propagação da onda pode ser muito próxima à da luz.

2.4.2 Técnica proposta

Os surtos de tensão, afundamentos de tensão, faltas ou quaisquer perturbações, por viajarem juntamente com a onda de tensão e corrente, se propagam com a mesma velocidade, sobre as ondas principais, com isso a velocidade com que tais perturbações se propagam é a mesma, e desta forma é possível estimar sua localização através de um cálculo básico. Sabendo-se a distância entre os terminais de linha e a sua velocidade de propagação é possível calcular a distância entre a falta e o terminal referência. A Figura 6 exemplifica a situação abordada.

Figura 6 - Propagação das Ondas Viajantes em direção aos terminais.



Fonte: (S. MARX, 2013)

A Equação (3) apresenta a solução de localização de falta através apenas dos parâmetros, diferença de tempo de chegada da perturbação, distância entre os terminais e velocidade da onda.

$$Dov = \frac{L + v_p \times (t_A - t_B)}{2} \quad (3)$$

Onde:

Dov é a distância da falta ao terminal A por ondas viajantes;

L é o comprimento da linha;

v_p é a velocidade de propagação da onda;

t_A é o tempo quando a falha é percebida pelo terminal A;

t_B é o tempo quando a falha é percebida pelo terminal B.

Com a diferença de tempo com que a perturbação chega aos dois terminais da linha de transmissão e a velocidade da onda, é possível estimar a distância de um terminal que ocorre a falta. Vale ressaltar que além de um sistema de sincronização global de tempo (GPS) individual, é necessário um canal de comunicação entre os dois terminais, sincronizando-os e permitindo a troca de dados de tempo e informações da onda que chega no outro terminal, assim é possível obter dados confiáveis para a aplicação deste método.

Uma vantagem deste método sobre técnicas baseadas em impedância é a persistência de pré-falta, falta e resistência de aterramento da linha com carga. A desvantagem dos algoritmos por OV é que eles não podem ser usados em cabos subterrâneos, pois como as alterações de

impedância aumentam drasticamente entre eles, resultam em grandes imprecisões na localização da falha. A precisão pode ser afetada mediante erros na detecção das ondas, causado por grandes barramentos no sistema de energia que influenciam a tensão e corrente devido à impedância de linha, podendo reduzir a amplitude das ondas de tensão tornando-os mais difíceis de detectar, e reduzindo assim a sua precisão.

Para obter resultados satisfatórios, é necessário que os parâmetros da linha estejam bem distribuídos para que o comportamento transitório de uma onda na linha possa ser bem representado, pois assim permite que a teoria de ondas viajantes seja bem aplicada. (GREENWOOD, 1991)

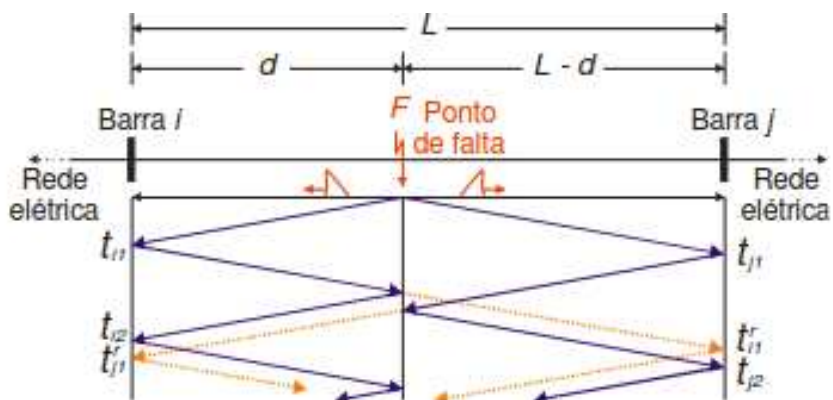
2.4.3 Outras técnicas

Existem algoritmos de localização de falta também baseados no método de ondas viajantes muito interessantes, por exemplo o qual utiliza da reflexão da onda de falta que se propaga ao longo das 2 linhas. Este método é muito interessante pois é possível localizar a falta através dos dados apenas de um dos terminais de linha, não sendo necessária a sincronização dos terminais e um canal de comunicação dedicado, pois não há a necessidade de um localizador de um terminal se comunicar com o do outro terminal. Muito viável para aplicações onde podemos ter dois equipamentos diferentes e até mesmo de fabricantes diferentes, assim não ficam dependentes da comunicação entre eles e/ou interferência no outro terminal de linha.

Na linha de transmissão, qualquer perturbação seja por descargas atmosféricas ou por condições permanentes dá a origem a ondas viajantes, que se propagam nas direções dos terminais da linha, onde são refletidas. Ao longo desta reflexão da onda é atenuada dada pela perda resistiva da linha e corrente de fuga. (VALINS, 2005)

A Figura 7 mostra como são formadas as reflexões das ondas, através de uma linha temporal na vertical e uma linha horizontal representando a distância entre os terminais.

Figura 7 - Diagrama de reflexão das Ondas Viajantes em uma LT de dois terminais.



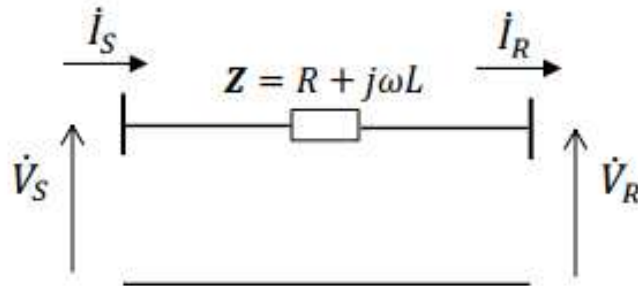
Fonte: (LOPES, SILVA e KÜSEL, 2015)

Porém este método utiliza um forte embasamento matemático onde se analisa as componentes harmônicas, dado que na reflexão da onda é atenuada e havendo a reflexão também de outras frequências que sujam o sinal a ser analisado. Este método utiliza os conceitos de Transformadas de Wavelet e Clarke somado à filtros para as altas frequências (VALINS, 2005), que não são discutidas neste trabalho, pois a medida que a onda é refletida e atenuada, a sua precisão diminui, diminuindo também a confiabilidade dos dados. Com isso, aumenta os erros e inviabiliza a aplicação para longas distâncias, onde uma pequena porcentagem de erro representa algumas centenas de metros de uma zona de imprecisão.

2.5 LOCALIZADOR DE FALTAS BASEADO EM IMPEDÂNCIA

Os algoritmos de localização de faltas à base de impedância calculam a distância até a falta utilizando basicamente a lei de Ohm e as leis de Kirchhoff de tensão e corrente. Assumindo como base o modelo de linha curta da Figura 8, onde se conhece a sua impedância característica e com dados de tensão e corrente dos terminais da linha, é possível estabelecer uma relação da distância à falta.

Figura 8 - Circuito Equivalente de Linha Curta.



Fonte: (SANTO, 2009)

Onde o Z da figura representa a impedância série total da linha de transmissão, \dot{V}_S e \dot{I}_S são respectivamente a tensão e corrente da fonte e \dot{V}_R e \dot{I}_R são as tensões e correntes que chegam à carga antes de ocorrer a falta. Resolvendo o circuito da Figura 8 acima, se obtém as Equações (4.1), (4.2) e (5).

$$\dot{V}_S = \dot{V}_R + \dot{I}_R Z \quad (4.1)$$

$$\dot{I}_S = \dot{I}_R \quad (4.2)$$

Desenvolvendo o sistema, temos o quadripolo matricial para linhas curtas da Equação (5) abaixo.

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_S \\ \dot{I}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{pmatrix} \quad (5)$$

E sabendo que a impedância Z pode ser representada através da impedância característica da linha, como mostra a Equação (6).

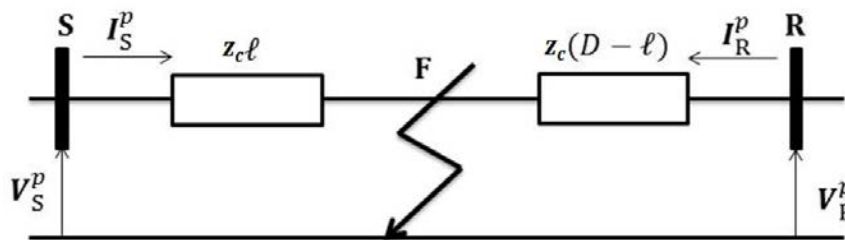
$$Z = z_c \cdot L \quad (6)$$

Onde z_c é a impedância série por unidade de comprimento de linha e L a comprimento da linha, medidos antes de ocorrer a falta, se tem a memória da impedância da linha por unidade de distância.

A partir dos dados de tensão e corrente dos terminais, é possível calcular a impedância, e com o comprimento da linha e a memória da impedância da linha completa, é possível estimar a localização até falta. (SANTO, 2009)

A Figura 9 representa uma linha no momento da falta, tomando apenas o terminal A como referência e aplicando o método de Z, é possível calcular a distância com os dados de tensão, corrente e impedância característica da linha.

Figura 9 - Linha no momento da falta.



Fonte: Adaptado de (PARMAR, 2015)

A fim de se facilitar o cálculo, adotou-se que a falta seja tipo fase-terra, portanto, no local da falha temos tensão nula. Assim, para o terminal A, tem-se a Equação (7) que encontra o local da falha pelo método Z.

$$DZ = \frac{V_S}{I_S \times z_c} \quad (7)$$

Onde:

Dz é a distância da falta em relação ao terminal A através do método das impedâncias;

z_c é a impedância característica da linha;

V_S é a tensão no terminal A;

I_S é a corrente no terminal A.

O algoritmo de localização de falta de terminal único utiliza os dados atualizados de apenas um terminal da linha de transmissão. Ele determina a distância através do cálculo da impedância da linha de transmissão e em seguida utilizando os parâmetros de linha para converter esse valor para uma medição de distância. Implementando o cálculo em um relé microprocessado ou outro dispositivo que possua as leituras de tensões e correntes no terminal de linha local durante o período pós-falta, é possível produzir uma estimativa da distância até falha com base nessas medições. A principal vantagem de se utilizar este método, é que não é necessária uma comunicação de dados entre os terminais de linha.

Uma das desvantagens do uso deste método é de que além de se utilizar leituras de tensão e corrente após se ocorrer a falta, necessitando passar o período transitório para ter leituras fiéis, os algoritmos de localização de faltas baseados em impedância, infelizmente exigem parâmetros de linha muito precisos e dados de sequência de impedância. Parâmetros de linha também tendem a variar de acordo com as condições de falha e isso tende a distorcer a exatidão desta aplicação.

3 METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES

Para analisar os dois métodos de localização de falha é considerado o esquema de linha apresentado anteriormente na Figura 8, onde adotou-se o terminal A como referência para ambos os métodos, assim se torna mais fácil a comparação direta entre os métodos.

Algumas considerações são necessárias para se realizar a análise comparativa entre os métodos, uma delas é a velocidade de propagação da onda para cabos de transmissão. Como já mencionado anteriormente, a velocidade é muito próxima à velocidade da luz (LOPES, SILVA e KÜSEL, 2015), deste modo, para fins de estudo é considerado que a onda se propaga na mesma velocidade que a luz, ou seja, 299.792 km/s. A distância entre os terminais e, portanto o comprimento da linha adotada para a simulação e estudo dos métodos foi de 200 km.

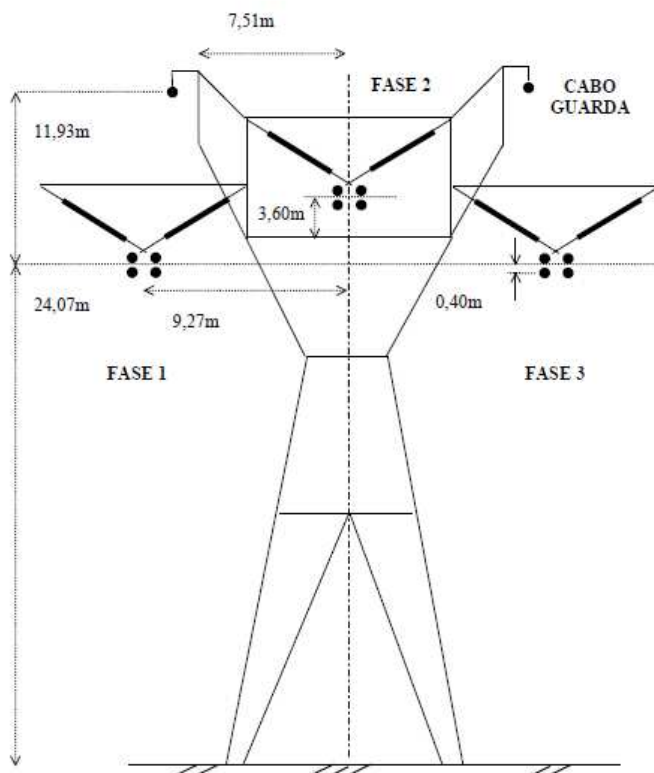
Para o método das impedâncias, são considerados apenas os casos de baixa impedância de surto, pois à medida que a impedância de surto aumenta os erros relacionados aos algoritmos apresentados, aumenta e tornando inviável o comparativo.

A transmissão de energia elétrica é realizada em alta tensão, na faixa de tensão de 138 kV à 750 kV, portanto é escolhido dentro do regime citado a tensão de linha de 440 kV para a simulação. Para a estrutura da torre, é considerada uma torre de transmissão típica da concessionária de energia CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) de circuito simples horizontal, conforme a estrutura e cotas da Figura 10.

Para a linha de transmissão é utilizado o cabo Grosbeak, de alumínio nu (sem isolamento) com alma de aço, normalmente usado nos casos de transmissão para esta faixa de tensão e possui as seguintes características presentes no ANEXO A. (ALUBAR, 2010):

- Diâmetro nominal do cabo 25,15 mm;
- Raio interno do condutor: 4,635mm;
- Raio externo do condutor: 12,57 mm;
- Massa Linear 1301,7 kg/km;
- Resistência Elétrica 0,09 Ω /km;
- Capacidade 775 A;
- 4 cabos por fase.

Figura 10 - Silhueta de torre de linha 440 kV.

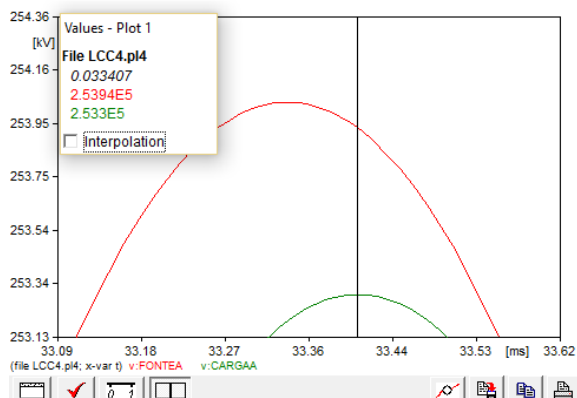


Fonte: (LIMA JUNIOR, NEVES, *et al.*, 2015)

Por fim, é considerado que o sistema está alimentando um forno de 100 MVA, desconsiderando as perdas envolvidas nos transformadores, chaves seccionadoras, disjuntores, e circuitos de manobra, é modelado uma impedância de 1909Ω , para que esta forneça os 100 MVA de potência proposta. É também considerado a queda de tensão na linha de 200 km. Sendo assim, a tensão de alimentação que chega à carga é de 438 kV linha a linha, ou 253 kV tensão linha-terra, como visto na Figura 11.

Os efeitos indutivos destes fornos são desconsiderados, pois a defasagem das ondas não implicaria em diferenças para as análises dos dois métodos, impedância da linha e velocidade da onda, deste modo o forno elétrico é representado com efeito puramente resistivo.

Figura 11 - Tensão do gerador em vermelho e tensão da carga em verde.



Fonte: (AUTOR)

3.2 SIMULAÇÃO

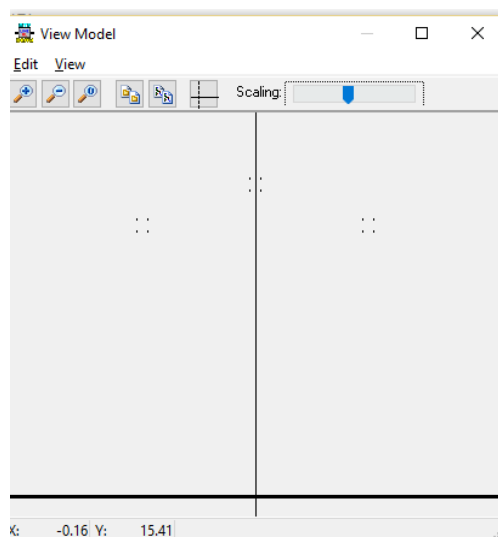
Para se realizar os testes dos tipos de localizadores, é utilizado o software ATP Draw (Alternative Transients Program), um simulador digital utilizado para se estudar os transientes eletromagnéticos, com uma apresentação muito amigável, permitindo analisar de forma detalhada os transitórios de um sistema elétrico. O esquema da torre da Figura 10 é modelado no programa e é possível inserir os parâmetros da linha e disposições dos cabos, Figura 12, e assim pode-se observar a disposição dos cabos na Figura 13.

Figura 12 - Parâmetros da torre de transmissão.

Line/Cable Data: LT1							
Model Data Nodes							
#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0.4635	1.257	0.09	-10.27	24.07	24.07
2	2	0.4635	1.257	0.09	-0.5	27.67	27.67
3	3	0.4635	1.257	0.09	9.27	24.07	24.07
4	1	0.4635	1.257	0.09	-10.27	23.07	23.07
5	2	0.4635	1.257	0.09	-0.5	26.67	26.67
6	3	0.4635	1.257	0.09	9.27	23.07	23.07
7	1	0.4635	1.257	0.09	-9.27	24.07	24.07
8	2	0.4635	1.257	0.09	0.5	27.67	27.67
9	3	0.4635	1.257	0.09	10.27	24.07	24.07
10	1	0.4635	1.257	0.09	-9.27	23.07	23.07
11	2	0.4635	1.257	0.09	0.5	26.67	26.67
12	3	0.4635	1.257	0.09	10.27	23.07	23.07

Fonte: (AUTOR)

Figura 13 - Disposição das linhas de transmissão.



Fonte: (AUTOR)

É de extrema importância a disposição dos cabos, pois assim é possível calcular a interação de um cabo com o outro, alterando assim as características e parâmetros da linha. A interação dos campos elétrico e magnéticos de um condutor em outro condutor acaba alterando a capacitância da linha ou fase analisada, deste modo, a capacitância depende fortemente da distribuição geométrica das linhas. A linha de transmissão é modelada conforme os parâmetros de uma linha presentes no catálogo de linhas e cabos da Alubar, conforme já mencionado anteriormente e presente no ANEXO A.

Através da simulação do modelo de linha acima, para a frequência de 60 Hz, tensão de 440 kV e comprimento de 100 km, são obtidos os seguintes dados da linha que servem como base de cálculo para o método das impedâncias, tais dados são representados na Figura 14.

Figura 14 - Dados da linha a ser simulada.

```

Calculated steady state benchmark data for line/cable model
Frequency [Hz]: 6.000000000000000E+0001
Line-voltage [kV]: 4.400000000000000E+0002
Positive and zero- sequence data:
      R0 [ohm]  X0 [ohm]  Rp [ohm]  Xp [ohm]  Q0 [MVA]  Qp [MVA]
cir. 1:      8.469   66.63   2.408   26.88   53.41   117.6

Zero sequence mutual data:
      R00 [ohm] X00 [ohm]

```

Fonte: (AUTOR)

sendo:

R_0 : resistência na sequência zero;

X_0 : impedância na sequência zero;

R_p : resistência na sequência positiva;

X_p : impedância na sequência positiva;

Para obter a impedância característica da linha (z_c) é utilizado a sequência positiva, pois outras frequências não são necessárias para o estudo do método de impedâncias proposto, sendo assim, o módulo de z_c é obtido pela Equação (8).

$$z_c = \frac{|R_p + jX_p|}{100\text{km}} \quad (8)$$

Desenvolvendo a Equação (8) com os valores obtidos na simulação da Figura 14, tem-se o valor de z_c igual a 0,26987 Ω/km , que então é armazenado como memória de cálculo.

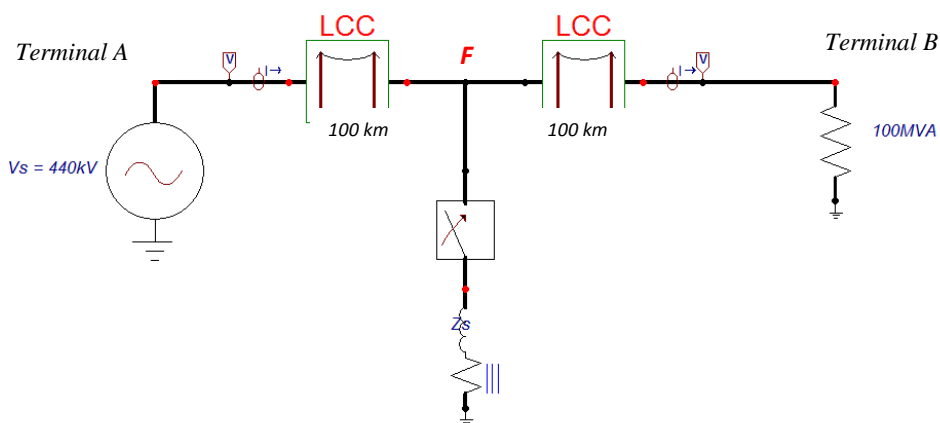
Representando a falta, é considerada uma chave temporizada que na simulação é fechada em 50 ms após o início. O Tempo total da simulação é de 100 ms, tempo necessário para que se possa obter as tensões e correntes para o método de impedâncias, tais leituras são realizadas no seu último ciclo visível (antes de 100 ms), após os transitórios provocados pelo fechar da chave.

Na figura 15, Z_s é a impedância de surto e representa a resistência de determinados objeto que é o motivo da falha, sendo galhos ou mesmo o próprio cabo rompido que venha a

ter o contato diretamente com solo, para esta impedância são analisados três valores: $0,1 \Omega$, $1,0 \Omega$ e 10Ω . São valores muito pequenos, dados que a impedância de um galho de árvore molhado é muito pequena (SILVEIRA, 2013), em situação de chuva com ventos, onde são mais propensos a quebra de galhos, caindo sobre a linha de transmissão, mas que mesmo assim geram erros para o método de impedância, o que pode vir a ser um ponto negativo deste método de localização.

Finalmente o circuito testado para a simulação de ambos os métodos é representado na Figura 15.

Figura 15 - Implementação do problema no software ATP Draw.



Fonte: (AUTOR)

São testadas diferentes posições para falha (F), de 10, 20, 30 km e assim sucessivamente até 190 km, no ramal de linha de 200 km. A partir das leituras de tempo que é percebida a falta, para o método de OV e leituras de tensão e corrente no período de pós falta, para o método das impedâncias, é possível comparar os dois métodos. Os resultados obtidos são mostrados no capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MÉTODO DE ONDAS VIAJANTES

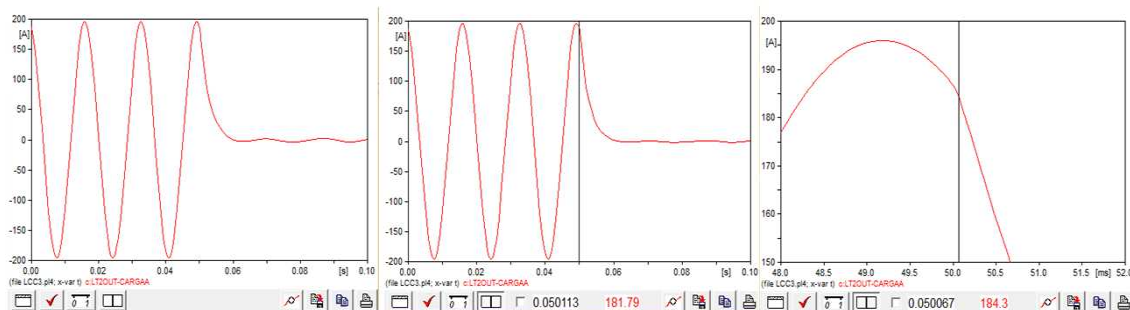
Como para este método não interessa as grandezas relacionadas à tensão, corrente e impedâncias envolvidas e sim o tempo que a perturbação que é lida através dos transdutores, são feitas leituras de tempo para as posições da falta (F), tomando com referência o terminal A. Os dados obtidos são mostrados na Tabela 3. A Figura 16 mostra como são obtidos os tempos da Tabela 3, repetindo o mesmo processo para cada posição da falta e cada terminal.

Tabela 3 - Resultado dos tempos em que é percebida a falta pelos terminais A ($t1$) e B ($t2$).

F [km]	t1 [ms]	t2 [ms]
10	50,058	50,619
20	50,088	50,583
30	50,119	50,553
40	50,150	50,522
50	50,181	50,493
60	50,212	50,460
70	50,243	50,429
80	50,274	50,398
90	50,305	50,366
100	50,336	50,336
110	50,367	50,305
120	50,398	50,274
130	50,429	50,242
140	50,460	50,213
150	50,491	50,182
160	50,522	50,151
170	50,553	50,119
180	50,584	50,088
190	50,618	50,059

Fonte: (AUTOR)

Figura 16 - Coleta do tempo de chegada aos terminais.



Fonte: (AUTOR)

Utilizando a Equação (3) de localização da falta por OV, é possível calcular a distância à falta. Isto é demonstrado na Tabela 5 mais adiante, onde são comparados os dois métodos, juntamente com seus respectivos erros.

4.2 MÉTODO DE IMPEDÂNCIAS

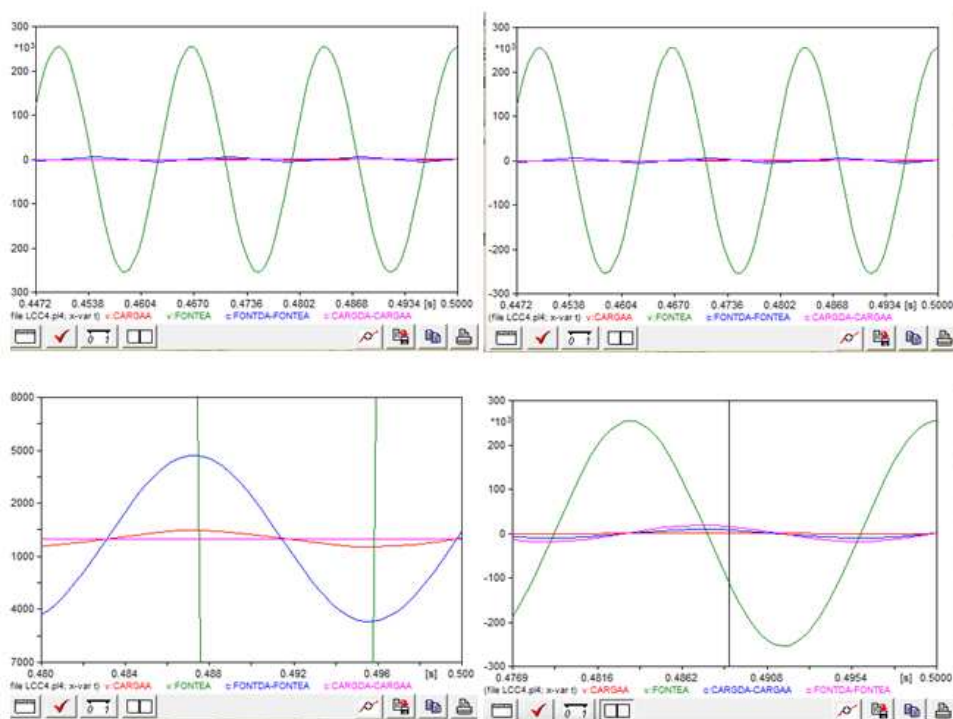
Tomando como referência a tensão da fase A da fonte, é possível também calcular a defasagem angular das leituras de tensão e corrente, estes dados são utilizados para se calcular a distância para o método Z. Os dados antes de ocorrer a falta são mostrados na Tabela 4, na Figura 17 é mostrado como são obtidos.

Tabela 4 - Leitura das tensões e correntes nos terminais A (V1) e terminal B (V2).

Fase	V1_N [kV]	V2_N [kV]	I [kA]
A	254,04L 0°	253,3L -1,576°	132,69L -1,5335°
B	254,04L -120°	253,3L -1,57612°	132,69L -121,533°
C	254,04L 120°	253,3L 118,466°	132,69L 118,466°

Fonte: (AUTOR)

Figura 17 - Coleta das tensões e correntes antes da falta.



Fonte: (AUTOR)

Para o método de impedâncias são analisadas as mesmas distâncias de falta anteriormente simuladas, porém para uma análise mais criteriosa são simuladas três impedâncias de surto (Z_s) diferentes, 0,1 Ω , 1,0 Ω e 10 Ω , que são impedâncias bem pequenas se relacionadas à curtos em linhas de transmissão. Adotando como referência e para o cálculo somente o terminal A, temos as tensões e correntes da fase A obtidas no período de pós-falta são mostradas na Tabela 5. Os dados para as fases B e C não são mostrados, pois é sabido que os dados obtidos para a fase A são os mesmo para as outras duas fases, porém defasados de 120° uma da outra.

Tabela 5 - Leituras de tensão e corrente nos pós-falta para o terminal A.

F	V _{IAN} [kV]	I _{A fonte} [kA]		
		Z _s = 0,1 Ohm	Z _s = 1 Ohm	Z _s = 10 Ohm
10	254,04 ∠ 0°	93756 ∠ -8,251°	85811 ∠ -8,251°	24107 ∠ -8,251°
20	254,04 ∠ 0°	46979 ∠ -8,315°	45512 ∠ -8,315°	21649 ∠ -8,315°
30	254,04 ∠ 0°	31340 ∠ -8,402°	30668 ∠ -8,402°	18992 ∠ -8,402°
40	254,04 ∠ 0°	23512 ∠ -8,423°	23014 ∠ -8,403°	16583 ∠ -8,403°
50	254,04 ∠ 0°	18813 ∠ -8,439°	18361 ∠ -8,439°	14545 ∠ -8,439°
60	254,04 ∠ 0°	15679 ∠ -8,439°	15242 ∠ -8,439°	12865 ∠ -8,439°
70	254,04 ∠ 0°	13441 ∠ -8,482°	13011 ∠ -8,482°	11483 ∠ -8,482°
80	254,04 ∠ 0°	11761 ∠ -8,461°	11339 ∠ -8,461°	10341 ∠ -8,461°
90	254,04 ∠ 0°	10455 ∠ -8,482°	10041 ∠ -8,482°	9388,9 ∠ -8,482°
100	254,04 ∠ 0°	9409,8 ∠ -8,471°	9005,8 ∠ -8,471°	8586,6 ∠ -8,471°
110	254,04 ∠ 0°	8554,7 ∠ -8,482°	8160,9 ∠ -8,482°	7903,8 ∠ -8,482°
120	254,04 ∠ 0°	7842 ∠ -8,461°	7459,1 ∠ -8,461°	7316,9 ∠ -8,461°
130	254,04 ∠ 0°	7238,9 ∠ -8,461°	6867 ∠ -8,461°	6807,9 ∠ -8,461°
140	254,04 ∠ 0°	6722 ∠ -8,461°	6361 ∠ -8,461°	6362,7 ∠ -8,461°
150	254,04 ∠ 0°	6273,9 ∠ -8,471°	5923,7 ∠ -8,471°	5970,5 ∠ -8,471°
160	254,04 ∠ 0°	5881,9 ∠ -8,482°	5542,2 ∠ -8,482°	5622,4 ∠ -8,482°
170	254,04 ∠ 0°	5536 ∠ -8,461°	5206,4 ∠ -8,461°	5311,7 ∠ -8,461°
180	254,04 ∠ 0°	5228,5 ∠ -8,504°	4908,7 ∠ -8,504°	5032,6 ∠ -8,504°
190	254,04 ∠ 0°	4953,3 ∠ -8,504°	4642,9 ∠ -8,504°	4780,7 ∠ -8,504°

Fonte: (AUTOR)

Com os dados da Tabela 5 e utilizando a Equação (5) é possível calcular a impedância da linha, sabendo que na posição de falta a linha possui tensão nula (técnica proposta para o tipo de falta fase-terra) e ainda, se for dividida a impedância encontrada pela memória de impedância característica da linha z_c , como demonstrado na Equação (8), é possível se obter a aproximação do local da falta.

4.3 ANÁLISE E ESTIMATIVA DO LOCAL DE FALHA

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos através dos dois métodos de localização de falta. Lembrando que não se faz necessário a análise de Z_s para o método de OV, pois a variação de impedâncias não alteram as velocidades da onda para faixa de baixa impedância que foi analisada, deste modo se obteria os mesmos resultados.

Tabela 6 - Estimativa de Localização de Falta por OV e Z.

F [km]	Localizador OV Dov [km]	Localizador Z Dz [km]		
		$Z_s = 0,1 \Omega$	$Z_s = 1,0 \Omega$	$Z_s = 10 \Omega$
10	16,06	10,04	10,97	39,05
20	25,65	20,04	20,68	43,48
30	34,95	30,04	30,69	49,56
40	44,24	40,04	40,90	56,76
50	53,53	50,04	51,27	64,72
60	62,83	60,04	61,76	73,17
70	72,12	70,03	72,35	81,98
80	81,41	80,04	83,02	91,03
90	90,71	90,04	93,75	100,26
100	100,00	100,04	104,52	109,63
110	109,29	110,04	115,35	119,10
120	118,59	120,04	126,20	128,65
130	127,88	130,04	137,08	138,27
140	137,17	140,04	147,98	147,94
150	146,47	150,04	158,91	157,66
160	155,76	160,04	169,85	167,42
170	165,05	170,04	180,80	177,22
180	174,35	180,04	191,77	187,04
190	183,94	190,04	202,74	196,90

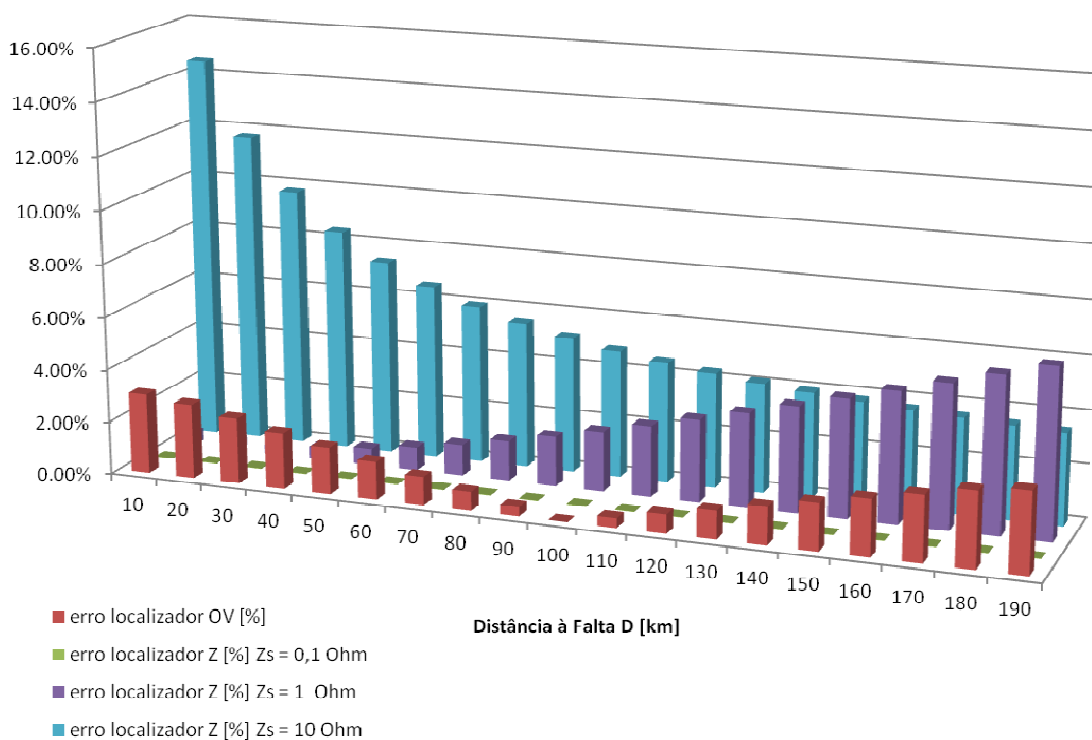
Fonte: (AUTOR)

Sendo *dist.real* a distância real até a falha, *dist.estimada* a distância calculada por ambos os métodos e o *comprimento da linha* de 200 km, pode-se obter o erro pela Equação (9) e analisar a eficácia dos dois métodos.

$$\%erro = \frac{|dist.real - dist.estimada|}{comprimento da linha} \times 100\% \quad (9)$$

Com as porcentagens de erro de cada método, foi construído um gráfico de barras, representado na Figura 18, onde é possível ver de forma clara e objetiva o quão eficiente são os métodos analisados.

Figura 18 - Gráfico comparativo entre os métodos analisados.



Fonte: (AUTOR)

Como é possível observar no gráfico da Figura 18, apesar de apresentar erros consideráveis, de até 2,5% do comprimento da linha, os resultados obtidos foram muito satisfatórios, pois este não apresenta variação com a impedância de surto, diferentemente do método de Z, que conforme a impedância de surto é aumentada, o erro para este método cresce consideravelmente, impossibilitando realizar estimativas confiáveis para localização de faltas de alta impedância.

5 CONCLUSÕES

Os métodos analisados apresentam duas abordagens diferentes para se localizar a falta em uma linha de transmissão. O método de ondas viajantes (OV) não depende dos parâmetros da linha, tornando os cálculos de mais fácil utilização se comparado ao método de impedâncias (Z), ajudando os técnicos de rede e engenheiros em sua implementação.

O método de localização por impedância utiliza os parâmetros de linha, portanto, revela-se um pouco mais trabalhoso para a localização da falta, além de não poder ser utilizado com eficiência para qualquer caso de falta (Figura 18), apresentando um erro elevado para casos de alta impedância de surto. Para faltas de alta impedância é necessário se realizar outros algoritmos mais trabalhosos, tornando os cálculos mais extensos e lentos. Um ponto positivo do método de Z é que não faz uso de um canal de comunicação entre os terminais para a sincronização de tempo, diferentemente do método de OV, que apenas alguns milissegundos que esteja fora de sincronia, ocasionam em grandes erros na localização da falta.

As falhas foram simuladas em várias posições da linha, para diferentes impedâncias de surto e notou-se que quando as falhas são simuladas mais perto dos terminais da linha, um grande valor de erro é observado em quase todos os casos de simulação. Isso é devido a um valor elevado de corrente no pós-falta, que aumenta o erro de medição e gera resultados incorretos. Embora apresentar também este tipo de erro, os dados obtidos tiveram resultados muito satisfatórios para o modelo proposto, confirmando que a aplicação deste método é útil para ajudar os sistemas de proteção, controle e supervisão a encontrarem o local da falta com maior segurança e rapidez.

Estes métodos são uma maneira de mostrar como são realizadas as localizações, sabe-se que há vários outras técnicas, modelos de linhas e formas de cálculos, onde se analisam também as frequências superiores, ângulo de incidência e fazem uso da Transformada de Fourier, da Transformada de Clarke/Wavelet e vários outros fatores. A proposta neste trabalho foi obter um método simples e rápido para se encontrar a falta, e como demonstrado, o método de localização de faltas por ondas viajantes é muito útil, pois não utiliza de extensos algoritmos para obter resultados muito satisfatórios e precisos para várias aplicações e situações de falta.

Um estudo complementar sugerido é o método de OV de terminal único, mencionado no do item 2.4.3, que realiza medições de ondas refletidas com atenuações variadas, o que

pode ocasionar em erros nos resultados, contudo, pode apresentar uma viabilidade muito grande, pois não é necessária a conexão e comunicação entre os terminais de linha.

REFERÊNCIAS

ALUBAR. Condutores de alumínio com alma de aço CAA. **Catálogo Técnico Alubar**, 2010. Disponível em: <www.alubar.net.br/downloads/produtos/catalogo_tecnico_2010-2.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2015.

BRAIN, M. Como funcionam redes elétricas. **Como tudo funciona**, 2014. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/redes-eletricas.htm>>. Acesso em: 1 Agosto 2015.

GREENWOOD, A. **Electrical transients in power systems**. 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 1991. 143 p.

JOHNSON, W. C. **Linhas de transmissão e circuitos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1980. v. 2. 398 p.

LIGHT. Energia reativa. **Agencia virtual - Light**, 2012. Disponível em: <<https://agenciavirtual.light.com.br/LASView/av/energiareativa/energiaReativaHome.do>>. Acesso em: 29 jan. 2016.

LIMA JUNIOR, J. R. (. et al. Proteção para linhas de transmissão baseada na Teoria das Ondas Viajantes: Estudo de um Caso no Sistema CHESF de Transmissão. **23 SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Foz do Iguaçu - PR, 20 Outubro 2015. 10.

LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; KÜSEL, B. F. Um algoritmo baseado na teoria das ondas viajantes para localização de faltas em tempo real utilizando dados não sincronizados de dois terminais. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 23., 2015, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [s.n.], 2015. p. 1-9.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. ONS - Conheça o sistema. **ONS**, 2014. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Acesso em: 20 Agosto 2015.

PARMAR, S. Fault location algorithms for electrical power transmission lines - Methodology, design and testing. **Intelligent electrical power grids - EWI**, Delft, 8 July 2015. 86.

PORTAL DO BRASIL. Fontes hidráulicas geram a maior parte da energia elétrica. **Portal do Brasil**, 2011. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/fontes-hidraulicas-geram-a-maior-parte-da-energia-eletrica>>. Acesso em: 29 jan. 2016.

S. MARX, B. K. J. A. G. V. S. **Localização de faltas em relé de proteção baseada no princípio das ondas viajantes**. Bonneville Power Administration, University of Idaho and Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Idaho, p. 15. 2013.

S. TAMRONGLAK, S. H. A. P. A. J. T. Anatomy of power system. **IEEE Transactions on Power Delivery, blackouts: preventive relaying strategies**, v. 2, n. 2, p. 708-715, 1996.

SANTO, S. G. D. **Localização de faltas em linhas de transmissão com múltiplas derivações utilizando dados somente dos terminais**. USP. São Paulo, p. 135. 2009.

SILVEIRA, P. F. L. D.; UFRGS; IF. Condução na madeira molhada. **Centro de Referência para o Ensino de Física**, 2013. Disponível em: <www.if.ufrgs.br/~lang/>. Acesso em: 29 jan. 2016.

VALINS, T. F. **Relé digital de distância baseado na teoria de ondas viajantes e transformada Wavelet**. 2005. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ANEXO A

condutores de alumínio com alma de aço
CAA

Cabo	AWG/ MCM	Área			Formação, Número e Diâmetro dos Fios		Diâmetro Nominal do Cabo	Massa Linear	RMC	Resistência Elétrica CC a 20°C	Capaci- dade de Corrente
		Al	Aço	Total	Al	Aço					
		mm ²	mm ²	mm ²	N° x mm	N° x mm					
Turkey	6	13,30	2,22	15,52	6 x 1,68	1 x 1,68	5,04	53,7	5,30	2,1569	95
Thrush	5	16,83	2,81	19,64	6 x 1,89	1 x 1,89	5,67	68,1	6,65	1,7046	110
Swan	4	21,18	3,53	24,71	6 x 2,12	1 x 2,12	6,36	85,6	8,30	1,3545	130
Swallow	3	26,69	4,45	31,14	6 x 2,38	1 x 2,38	7,14	107,8	10,23	1,0749	150
Sparrow	2	33,59	5,60	39,19	6 x 2,67	1 x 2,67	8,01	135,7	12,65	0,8540	175
Robin	1	42,41	7,07	49,48	6 x 3,00	1 x 3,00	9,00	171,4	15,85	0,6764	200
Raven	1/0	53,52	8,92	62,44	6 x 3,37	1 x 3,37	10,11	216,2	19,45	0,5360	230
Quail	2/0	67,33	11,22	78,55	6 x 3,78	1 x 3,78	11,34	272,0	23,53	0,4261	265
Pigeon	3/0	85,12	14,19	99,31	6 x 4,25	1 x 4,25	12,75	343,9	29,42	0,3370	310
Penguin	4/0	107,22	17,87	125,09	6 x 4,77	1 x 4,77	14,31	433,2	37,06	0,2676	350
Waxwing	266,8	135,00	7,50	142,50	18 x 3,09	1 x 3,09	15,47	430,5	31,22	0,2136	430
Partridge	266,8	134,87	21,99	156,86	26 x 2,57	7 x 2,00	16,28	545,5	50,11	0,2148	440
Ostrich	300,0	152,19	24,71	176,90	26 x 2,73	7 x 2,12	17,28	614,7	56,41	0,1904	470
Merlin	336,4	170,22	9,46	179,68	18 x 3,47	1 x 3,47	17,35	542,9	39,36	0,1694	500
Linnnet	336,4	170,55	27,83	198,38	26 x 2,89	7 x 2,25	18,31	689,9	62,92	0,1699	510
Oriole	336,4	170,50	39,78	210,28	30 x 2,69	7 x 2,69	18,83	784,3	77,27	0,1703	515
Chickadee	397,5	200,90	11,20	212,10	18 x 3,77	1 x 3,77	18,87	640,8	45,14	0,1435	555
Brant	397,5	201,60	26,10	227,70	24 x 3,27	7 x 2,18	19,61	762,5	65,10	0,1437	584
Ibis	397,5	201,34	32,73	234,07	26 x 3,14	7 x 2,44	19,88	813,5	72,43	0,1439	570
Lark	397,5	200,90	46,88	247,78	30 x 2,92	7 x 2,92	20,44	924,1	90,48	0,1446	575
Pelican	477,0	242,30	13,50	255,80	18 x 4,14	1 x 4,14	20,68	772,8	53,50	0,1190	615
Flicker	477,0	241,60	31,40	273,00	24 x 3,58	7 x 2,39	21,49	914,6	76,56	0,1199	655
Hawk	477,0	241,65	39,49	281,14	26 x 3,44	7 x 2,68	21,80	977,9	87,18	0,1199	640
Hen	477,0	241,27	56,30	297,57	30 x 3,20	7 x 3,20	22,40	1109,8	105,61	0,1204	645
Osprey	556,5	282,50	15,70	298,20	18 x 4,47	1 x 4,47	22,33	900,9	62,37	0,1021	690
Parakeet	557,1	282,31	36,60	318,91	24 x 3,87	7 x 2,58	23,22	1068,1	88,29	0,1026	700
Dove	556,5	282,59	45,92	328,51	26 x 3,72	7 x 2,89	23,55	1141,6	100,84	0,1025	710
Eagle	556,5	282,10	65,80	347,90	30 x 3,46	7 x 3,46	24,21	1297,5	123,47	0,1030	710
Squab	605,0	305,80	49,80	355,60	26 x 3,87	7 x 3,01	24,54	1236,4	108,14	0,0947	745
Wood Duck	605,0	306,55	71,55	378,10	30 x 3,61	7 x 3,61	25,25	1412,5	128,74	0,0946	774
Teal	605,0	306,55	69,60	376,15	30 x 3,61	19 x 2,16	25,25	1397,7	133,08	0,0946	750
Duck	605,7	306,89	39,78	346,67	54 x 2,69	7 x 2,69	24,21	1161,0	98,87	0,0944	745
Kingbird	636,0	323,00	17,90	340,90	18 x 4,78	1 x 4,78	23,88	1030,2	71,32	0,0893	750
Rook	636,0	323,10	41,90	365,00	24 x 4,14	7 x 2,76	24,82	1222,2	101,04	0,0897	784
Grosbeak	636,0	321,84	52,49	374,33	26 x 3,97	7 x 3,09	25,15	1301,7	111,87	0,0900	775
Scoter	636,0	322,22	75,26	397,48	30 x 3,70	7 x 3,70	25,88	1483,8	135,23	0,0900	798
Egret	636,0	322,22	73,55	395,77	30 x 3,70	19 x 2,22	25,88	1461,1	138,69	0,0900	775
Flamingo	666,6	337,74	43,81	381,55	24 x 4,23	7 x 2,82	25,40	1275,9	105,48	0,0859	807
Gannet	666,6	337,74	55,03	392,77	26 x 4,07	7 x 3,16	25,76	1366,0	117,26	0,0856	795
Stilt	715,5	362,58	46,97	409,55	24 x 4,39	7 x 2,92	26,31	1372,6	113,35	0,0797	844
Starling	715,5	361,93	59,15	421,08	26 x 4,21	7 x 3,28	26,68	1464,8	125,95	0,0800	830
Redwing	715,5	362,06	82,41	444,47	30 x 3,92	19 x 2,35	27,43	1650,6	153,66	0,0802	845
Tern	795,0	403,77	27,83	431,60	45 x 3,38	7 x 2,25	27,03	1338,8	98,20	0,0719	875
Condor	795,0	402,84	52,19	455,03	54 x 3,08	7 x 3,08	27,74	1527,5	125,06	0,0724	885
Cuckoo	795,0	402,30	52,20	454,50	24 x 4,62	7 x 3,08	27,74	1522,1	123,82	0,0720	900
Drake	795,0	402,84	65,51	468,35	26 x 4,44	7 x 3,45	28,14	1626,5	139,67	0,0720	890
Mallard	795,0	402,84	91,87	494,71	30 x 4,14	19 x 2,48	28,96	1839,9	171,22	0,0719	918
Ruddy	900,0	455,50	31,67	487,17	45 x 3,59	7 x 2,40	28,74	1512,4	108,96	0,0638	945
Cannary	900,5	456,28	59,15	515,43	54 x 3,28	7 x 3,28	29,52	1726,2	141,80	0,0635	945
Rail	954,0	483,84	33,54	517,38	45 x 3,70	7 x 2,47	29,61	1605,8	115,63	0,0600	980
Cardinal	954,0	484,53	62,81	547,34	54 x 3,38	7 x 3,38	30,42	1839,6	150,61	0,0601	995
Ortolan	1033,5	523,90	36,31	560,21	45 x 3,85	7 x 2,57	30,78	1738,6	123,28	0,0554	1025
Curlew	1033,5	522,51	67,73	590,24	54 x 3,51	7 x 3,51	31,59	1983,8	162,41	0,0557	1025
Bluejay	1113,0	565,49	38,90	604,39	45 x 4,00	7 x 2,66	31,98	1874,4	132,71	0,0514	1060
Finch	1113,0	563,93	71,55	635,48	54 x 3,65	19 x 2,19	32,84	2133,2	174,09	0,0515	1080
Bunting	1192,5	604,26	41,55	645,81	45 x 4,14	7 x 2,76	33,07	2009,5	142,42	0,0479	1110
Grackle	1192,5	604,26	76,58	680,84	54 x 3,77	19 x 2,27	33,99	2280,1	186,38	0,0483	1125
Bittern	1272,0	644,40	44,66	689,06	45 x 4,27	7 x 2,85	34,17	2138,5	151,63	0,0451	1155
Pheasant	1272,0	644,75	81,65	726,40	54 x 3,90	19 x 2,34	35,10	2435,5	194,13	0,0451	1175
Martin	1351,5	684,71	87,40	772,11	54 x 4,02	19 x 2,41	36,17	2586,5	206,08	0,0425	1225
Bobolink	1431,0	725,27	50,14	775,41	45 x 4,53	7 x 3,02	36,24	2406,0	170,51	0,0400	1250
Plover	1431,0	725,10	91,87	816,97	54 x 4,14	19 x 2,48	37,21	2742,1	218,40	0,0400	1270
Nuthatch	1510,5	765,35	52,90	818,25	45 x 4,65	7 x 3,10	37,24	2535,1	177,64	0,0380	1295
Parrot	1510,5	765,35	96,84	862,19	54 x 4,25	19 x 2,55	38,23	2892,2	230,53	0,0380	1315
Lapwing	1590,0	807,53	55,60	863,13	45 x 4,78	7 x 3,18	38,22	2677,0	187,43	0,0360	1335
Falcon	1590,0	806,23	102,43	908,66	54 x 4,36	19 x 2,62	39,26	3046,3	242,99	0,0361	1360
Chukar	1780,0	902,70	73,50	976,20	84 x 3,70	19 x 2,22	40,69	3090,1	226,97	0,0322	1453
Bluebird	2156,0	1092,31	88,90	1181,21	84 x 4,07	19 x 2,44	44,75	3737,9	268,05	0,0266	1623
Kiwi	2167,0	1098,27	47,53	1145,80	72 x 4,41	7 x 2,94	44,07	3433,0	223,52	0,0265	1607
Thrasher	2312,0	1171,42	63,78	1235,20	76 x 4,43	19 x 2,07	45,77	3761,8	251,86	0,0249	1675
Grouse	80,0	40,54	14,13	54,67	8 x 2,54	1 x 4,24	9,32	221,6	23,10	0,7112	205
Petrel	101,8	51,58	30,06	81,64	12 x 2,34	7 x 2,34	11,70	377,4	46,21	0,5586	240
Minorca	110,8	56,14	32,77	88,91	12 x 2,44	7 x 2,44	12,20	410,4	50,24	0,5138	250
Guinea	159,0	80,56	46,97	127,53	12 x 2,92	7 x 2,92	14,63	587,7	71,18	0,3588	300
Dotterel	176,9	89,64	52,19	141,83	12 x 3,08	7 x 3,08	15,40	653,9	76,85	0,3224	310
Dorking	190,8	96,71	56,39	153,10	12 x 3,20	7 x 3,20	16,03	705,8	82,95	0,2987	325
Brahma	203,2	102,97	91,87	194,84	16 x 2,86	19 x 2,48	18,14	1001,7	126,62	0,2805	340
Cochin	211,3	107,06	62,45	169,51	12 x 3,37	7 x 3,37	16,87	782,8	92,00	0,2693	340

NBR 7271 / ASTM B231M. Bitolas que não estejam na tabela acima podem ser fabricadas sob consulta.