

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

MARCELO OLIVEIRA ABRÃO

**ANÁLISE DA MULTIPLA ESTIMAÇÃO NO PROCESSO DE
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO**

São Carlos

2019

MARCELO OLIVEIRA ABRÃO

**ANÁLISE DA MÚLTIPLA ESTIMAÇÃO NO PROCESSO DE
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada

São Carlos

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Abrão, Marcelo

A161a Análise da múltipla estimação no processo de localização de faltas em sistemas de distribuição / Marcelo Abrão; orientador Eduardo Asada. São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. Múltipla estimação. 2. Localização de Faltas. 3. Calculo da reatância. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Marcelo Oliveira Abrão

Título: "Análise da multipla estimação no processo de localização de faltas em sistemas de distribuição"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 07 / 06 / 2019,

com NOTA 8,0 (oito , zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Associado Eduardo Nobuhiro Asada - Orientador -
SEL/EESC/USP*

*Mestre Antônio Eduardo Ceolin Momesso - Doutorando -
SEL/EESC/USP*

Prof. Associado Mário Oleskovicz - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

Agradecimentos

Agradeço à minha família, por todo o suporte, ajuda e motivação. Ela foi imprescindível para todo o desenvolvimento, tanto deste trabalho, quanto para o meu próprio.

Ao professor Eduardo Nobuhiro Asada, pela oportunidade e ajuda.

A todos meus amigos que entraram comigo na automação 012. Todos tiveram papel fundamental nessa longa jornada, e, sem eles, seria impossível chegar aonde cheguei.

A todos os outros amigos que me apoiaram e me ajudaram.

À Universidade de São Paulo, por oferecer todos os recursos para que eu pudesse ter cumprido esta etapa.

E a Deus, por toda oportunidade oferecida, e por toda conquista que me é concedida.

Resumo

ABRAO, M. O. **Análise da múltipla estimação no processo de localização de faltas em sistemas de distribuição**. 2019. 69p Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo mostrar um dos problemas mais comuns na localização de faltas em sistemas de distribuição, a múltipla estimação. Para a contextualização deste trabalho, foram introduzidos todos os aspectos de um sistema de distribuição (elementos, topologia, perfil de consumo e aspectos regulatórios), definição e caracterização das faltas e introdução a alguns dos métodos de localização de falta (método do cálculo da reatância, ondas viajantes e sinalizadores). Para o desenvolvimento da pesquisa, foi utilizado o método do cálculo da reatância para a obtenção da distância. Após o cálculo, foi demonstrado um dos problemas associados a esse método, a multipla estimação. Para a demonstração, foi utilizado o modelo de sistema IEEE 34 barras, simulando as possíveis faltas no *software* OpenDSS. Após a análise dos resultados, foi feito o cotejamento com o novo método, que utiliza todas as fases para o cálculo da distância da falta. Esse se mostrou eficaz, diminuindo (mas não erradicando) consideravelmente a múltipla estimação.

Palavras-chave: múltipla estimação, localização de faltas, cálculo da reatância

Abstract

ABRAO, M. O. **Analysis of the multiple estimation in the fault location process in distribution systems**. 2019. 69p Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

This work had as objective to show one of the most common problems in the location of faults in distribution systems, the multiple estimation. For the contextualization of this work, all aspects of a distribution system (elements, topology, consumption profile and regulatory aspects) were introduced, definition and characterization of faults and introduction to some fault location methods (reactance calculation method, traveling waves and FLAGS) For the development of the research, the reactance calculation method was used to obtain the distance. After the calculation, was demonstrated one of the problems associated with this method, the multiple estimation. For the demonstration, the IEEE 34 bus system model was used, simulating the possible faults in the OpenDSS software. After the analysis of the results, the comparison was made with the new method, which uses all phases to calculate the distance of the fault. This was effective, decreasing (but not eradicating) considerably the multi estimation.

Keywords: multiple estimation, fault location, reactance calculation

Lista de Figuras

Figura 1- Diagrama de Blocos do SEP.....	22
Figura 2 - Diagrama unifilar do SEP.....	23
Figura 3- Exemplo de configuração de uma subestação.	25
Figura 4- Diagrama unifilar da rede primária.....	27
Figura 5 - Subsistemas do sistema de proteção	33
Figura 6-Configuração de instalação do sensor.....	36
Figura 7- Sensor de falta fabricado pela SEL (Schweitzer engineering laboratories).....	37
Figura 8 - Fluxograma das etapas para a implementação da técnica de reatância	39
Figura 9- Ilustração dos tipos de faltas	42
Figura 10 - Ilustração do efeito de múltipla estimação	45
Figura 11 - Sistema IEEE 34 barras	47
Figura 12 - Sistema 34 barras com a presença de smart meters	64

Lista de Tabelas

Tabela 1- Níveis de Tensão do Sistema de Distribuição	24
Tabela 2 - Concessionárias da Região Norte, Nordeste e Centro-Oeste	28
Tabela 3- Concessionárias da região Sudeste e Sul.....	29
Tabela 4 - Tabela de classificação de faltas	43
Tabela 5 - Configuração e comprimento por segmento de linha.....	48
Tabela 6 - Correntes de faltas trifásica e fatores X/R	55
Tabela 7 - Correntes e tensões (em p.u.) para faltas Fase-Terra	56
Tabela 8 - Tensões e Correntes para fases adjacentes.	58
Tabela 9 - Reatância para Faltas trifásicas	60
Tabela 10 - Resultados da simulação com $R_f = 0\Omega$	61
Tabela 11 - Resultado das simulações com $R_f = 40\Omega$	62

Sumário

1. Introdução	19
1.1 Motivação	19
1.2 Objetivo.....	19
1.3 Estrutura do Trabalho	20
2. Sistemas de Distribuição	21
2.1 Sistemas Elétricos de Potência (SEP).....	21
2.2 Sistemas de Distribuição	23
2.2.1 Subestações.....	25
2.2.3 Topologia	26
2.2.4 Perfil de Consumo	27
2.2.5 Aspectos Regulatórios	28
2.3 Algumas considerações.....	29
3. Localização de Falta em Sistemas de Distribuição	31
3.1 Introdução	31
3.2 Faltas nos Sistemas de Distribuição	31
3.3 Sistemas de Proteção	32
3.3.1 Relés	33
3.4 Localização de Faltas	34
3.4.1 Sinalizadores	35
3.4.2 Teoria das Ondas Viajantes.....	37
3.4.3 Técnica de Reatância.....	38
3.7.1 Valor de Tensão e Corrente	39
3.7.2 Extração das Componentes Fundamentais	40
3.7.3 Determinação do Tipo de Falta	41
3.7.4 Cálculo da Reatância Equivalente da Subestação à Falta	43

3.7.5 Efeito da múltipla estimação	45
4. Metodologia	47
4.1 Apresentação do sistema	47
4.2 Simulação	50
4.2.1 OpenDSS	50
4.3 Múltipla Estimação	51
4.3.1 Faltas Monofásicas	52
4.3.2 Faltas bifásicas	53
4.3.3 Faltas trifásicas	54
5. Resultados	55
5.1 Simulação no OpenDSS	55
5.2 Múltipla Estimação	61
5.3 Análise do método.....	63
6. Conclusão	65
7. Referências	67

1. Introdução

Atualmente a humanidade é extremamente dependente da energia elétrica, com isso é fundamental garantir a continuidade e qualidade do fornecimento de energia. Porém alguns imprevistos podem acontecer, danificando o sistema elétrico, interrompendo esse fornecimento. A partir disso é de grande importância que as distribuidoras de energia atuem de forma rápida a fim de extinguir a causa desse interrompimento.

Para auxiliar as distribuidoras, sistemas de localização de faltas podem ser uma boa alternativa. Estes, tem a função de apontar o local onde a falta ocorreu, agilizando o processo de manutenção. Porém esses métodos nem sempre são precisos, e, um dos erros mais comuns é a múltipla estimação.

Este trabalho foca no problema da múltipla estimação, apresentando uma reformulação no processo de localização de faltas em sistemas de distribuição através do método do cálculo da reatância.

1.1 Motivação

Segundo GERS e HOLMES (2004), aproximadamente 75% das faltas de energia acontecem devido a falhas localizadas no sistema de distribuição, fazendo com que seja necessária uma maneira rápida e eficiente de localizar e extinguir essa anomalia. Normalmente, a localização da falta é feita através de informes realizados por clientes.

Temos que, em linhas de transmissão, o relé com a função de localização de falta já é amplamente usado, porém no sistema de distribuição, encontramos dificuldade na sua implementação, devido ao fato desse sistema não ser homogêneo. Ao longo dele temos várias cargas e ramificações, dificultando a localização das faltas. Toda essa diversidade culmina em um dos problemas encontrados nas formas atuais de localização, a múltipla estimação de faltas.

1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho é mostrar um dos problemas mais comuns na localização de faltas em sistemas de distribuição, a múltipla estimação. Para contextualização deste trabalho foram introduzidos todos os aspectos de um sistema de distribuição (elementos, topologia, perfil de consumo e aspectos regulatórios), definição e caracterização das faltas e introdução a alguns dos métodos de localização de falta (método do cálculo da reatância, ondas viajantes e sinalizadores). Para o desenvolvimento da

pesquisa foi utilizado o método do cálculo da reatância para a obtenção da distância. Após o cálculo foi demonstrado um dos problemas associados a esse método, a múltipla estimação. Para a demonstração foi utilizado o modelo de sistema do IEEE 34 barras, simulando as possíveis faltas no *software* OpenDSS. Após a análise dos resultados, foi feito o cotejamento com o novo método, que utiliza todas as fases para o cálculo da distância da falta. Esse se mostrou eficaz, diminuindo (mas não erradicando) consideravelmente a múltipla estimação.

1.3 Estrutura do Trabalho

No 2º capítulo, expomos os sistemas de distribuição, ressaltando seus componentes, estruturas, topologia e aspectos regulatórios.

O 3º capítulo é destinado à apresentação e caracterização das faltas, sendo dividido em estado da arte, caracterização de faltas em sistemas de distribuição, uma breve explanação sobre relés, apresentação de alguns métodos de localização de faltas como sinalizadores e cálculo da reatância de falta, e, por fim, a introdução ao efeito da múltipla estimação, que é o enfoque deste trabalho.

No 4º capítulo temos a apresentação do sistema e do *software* OpenDSS, que servirão para a demonstração da múltipla estimação

No 5º capítulo são apresentados e discutidos os resultados das simulações no OpenDSS, e demonstrado um possível método para a eliminação de múltiplas estimações, mostrando cada etapa da formulação e os resultados obtidos com as simulações.

O 6º capítulo é destinado às conclusões obtidas neste trabalho.

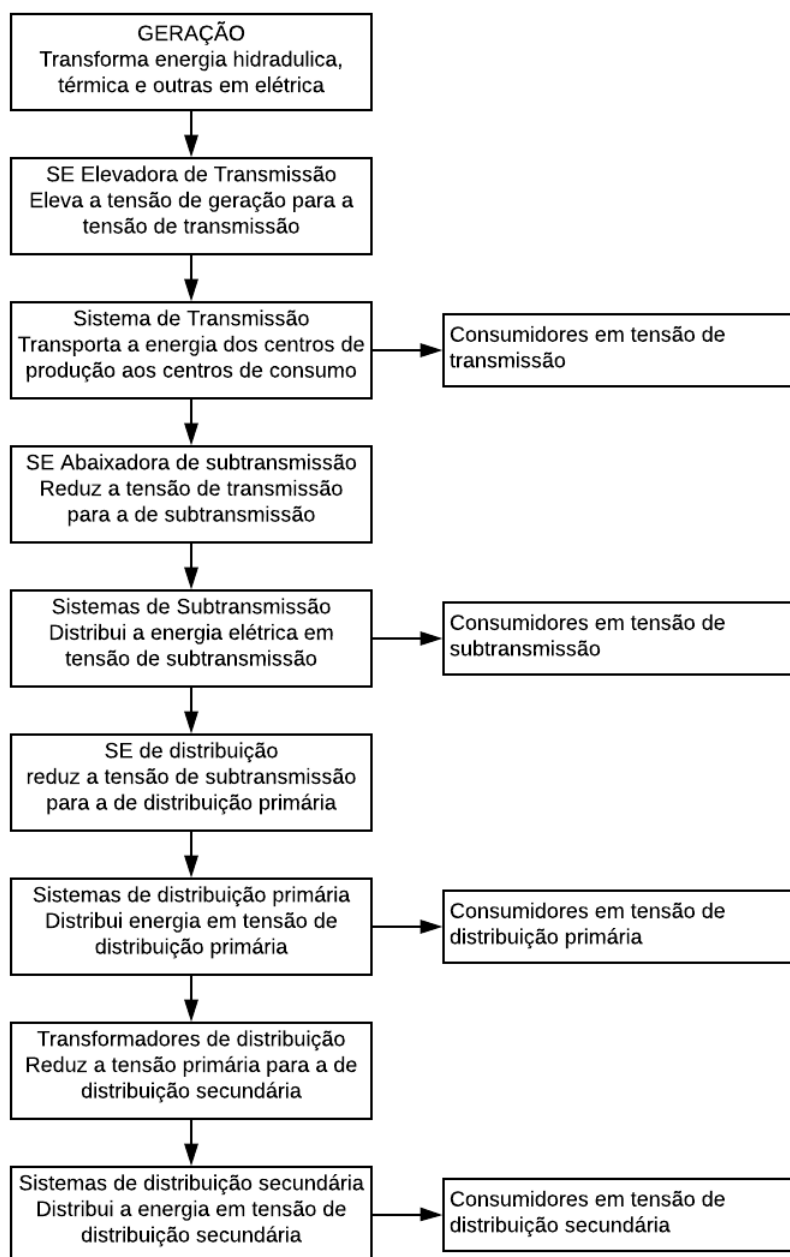
2. Sistemas de Distribuição

2.1 Sistemas Elétricos de Potência (SEP)

Segundo KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA (2005), o SEP tem como função fornecer energia elétrica aos usuários de forma rápida e com qualidade, e pode ser subdividido em sistemas de geração, transmissão e distribuição.

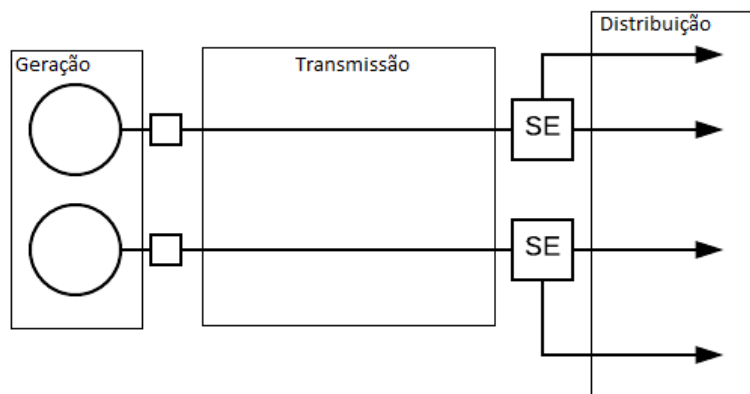
O sistema de geração consiste em transformar algum tipo de energia (hidráulica e térmica, por exemplo) em eletricidade. Já os sistemas de transmissão têm como função transmitir a energia gerada para os centros consumidores e fornecer energia para clientes que utilizam nível de tensão de transmissão. Por fim, o sistema de distribuição, que tem a função de distribuir essa energia elétrica proveniente do sistema de transmissão para os consumidores. O processo de transformação de tensão durante a transição de sistemas é feito por subestações transformadoras (SEs), que elevam ou abaixam a tensão. Esse processo também é feito por transformadores, comumente utilizados na transição do sistema de distribuição primária para o sistema de distribuição secundária. Nas Figuras 1 e 2, é possível visualizar esse processo, através de um diagrama de blocos e unifilar do SEP.

Figura 1- Diagrama de Blocos do SEP.



Fonte: Adaptado de Kagan, Oliveira e Robba (2005)

Figura 2 - Diagrama unifilar do SEP



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 1, é possível visualizar o SEP desde a geração da energia elétrica, até os consumidores em tensão de distribuição secundária. Ao sair da central geradora de energia, eleva-se a tensão a fim de fazer a sua transmissão, e, ao longo do caminho, essa tensão é distribuída conforme a solicitação dos consumidores. Estes podem ser classificados entre industriais, comerciais e residenciais, sendo que os consumidores de alta tensão (AT) são tipicamente industriais, e os de baixa tensão (BT) residenciais e comerciais.

Na Figura 2, está representado um diagrama unifilar ilustrativo de um SEP, com correspondência ao diagrama de blocos da Figura 1. Nela está identificado o sistema de geração (com duas unidades geradoras), transmissão, e distribuição. O sistema de transmissão normalmente opera em malha, enquanto o de subtransmissão opera, na maioria dos casos, radialmente. A respeito do sistema de distribuição tem-se que a rede primária possui tipicamente topologia radial, podendo o secundário operar tanto radialmente quanto em malha (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

Nos tópicos a seguir será caracterizado o sistema de distribuição, o qual será o enfoque deste trabalho.

2.2 Sistemas de Distribuição

Segundo a ABRADDEE (Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica) e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), o sistema de distribuição (SD) pode ser definido como:

O sistema de distribuição de energia é aquele que se confunde com a própria topografia das cidades, ramificado ao longo de ruas e avenidas para conectar

fisicamente o sistema de transmissão, ou mesmo unidades geradoras de médio e pequeno porte, aos consumidores finais da energia elétrica. (ABRADEE, 2015)

A distribuição se caracteriza como o segmento do setor elétrico dedicado ao rebaixamento da tensão proveniente do sistema de transmissão, à conexão de centrais geradoras e ao fornecimento de energia elétrica ao consumidor. (ANEEL, 2015)

Com essas definições, conclui-se que o SD é responsável pelo fornecimento de energia elétrica às unidades consumidoras (UC), servindo de interface entre o sistema de transmissão (ST) e as UCs.

Como apresentado nas definições, o SD está imerso na topografia das cidades, uma vez que 85% do total das unidades consumidoras são residenciais. Por esse motivo, temos que a rede é mais extensa e ramificada, se comparada ao ST (ABRADEE, 2015).

Dentro da área da distribuição há vários níveis de tensão, classificados como sistema de distribuição de alta tensão (SDAT), média tensão (SDMT) e baixa tensão (SDBT). Essa variação está demonstrada na Tabela 1:

Tabela 1- Níveis de Tensão do Sistema de Distribuição

Tensão (kV)	Campo de aplicação	Subsistema do SEP
Inferior ou igual a 1	Sistema de distribuição de baixa tensão (SDBT)	Distribuição
de 1 a 44	Sistema de distribuição de média tensão (SDMT)	
69	Sistema de distribuição de alta tensão (SDAT)	
88 a 138		
230		

Fonte: Elaborada pelo autor (dados ANEEL (2016))

Pela Tabela 1 é possível visualizar os diversos níveis de tensão do sistema de distribuição, indo desde altas tensões (230 kV), presentes nos sistemas de alta tensão, até baixas tensões (inferior a 1 kV), utilizadas por consumidores desse nível de tensão (residências, por exemplo). A rede de média tensão (entre 1 kV e 44 kV) é responsável pela distribuição de energia em ramais. São utilizados transformadores para reduzir essa tensão para níveis compatíveis com o fornecimento aos consumidores de BT.

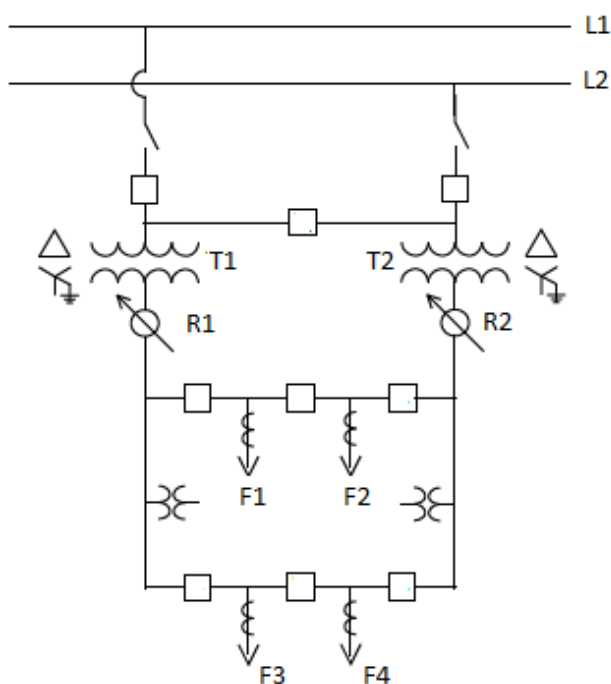
Nas próximas seções, serão abordados alguns aspectos sobre os SDs, tais como subestações, topologia, consumo, aspectos regulatórios entre outros.

2.2.1 Subestações

As SEs possuem a função de transformar a tensão proveniente da rede de subtransmissão, ou transmissão, para a rede de distribuição primária, sendo que pode ser abastecida por um ou mais alimentadores. Com isso, tem-se que, normalmente, os SDs começam pelas subestações de energia (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005; KERSTING, 2002).

Existem vários tipos de arranjos possíveis para as SEs, mas pode-se identificar a maioria de seus componentes representados na Figura 3.

Figura 3- Exemplo de configuração de uma subestação.



Fonte: Adaptado de KERSTING (2002)

A Figura 3 ilustra um arranjo de uma subestação. Essa é uma das configurações de uma subestação, utilizada para demonstrar alguns dos componentes presentes, sendo eles: disjuntores, transformadores, reguladores de tensão e corrente e medidores.

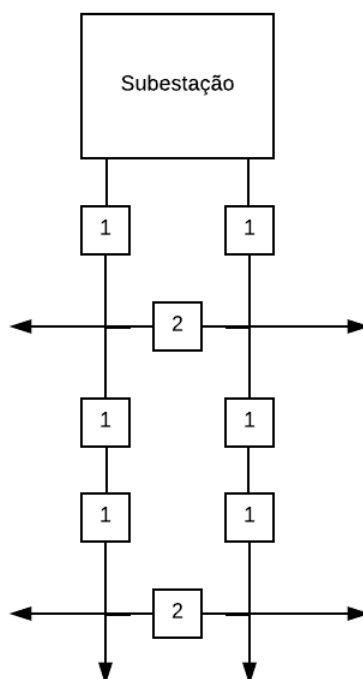
Os disjuntores atuam como conectores entre os barramentos L1 e L2 (alta tensão) e os transformadores T1 e T2. Esses transformadores são de TAP variável ou têm a presença de reguladores de tensão (R1 e R2). Após isso, temos transformadores de corrente (TC) e os alimentadores, (F1, F2, F3 e F4), responsáveis pela alimentação de energia para os sistemas subjacentes. Além dos disjuntores no começo do sistema, pode-se visualizar a presença de várias outras ao longo do sistema, proporcionando controle e possibilitando a realização de manobras no sistema.

2.2.3 Topologia

O SD possui dois tipos de topologia (como já mencionado em tópicos anteriores) sendo que em redes primárias, predomina-se a forma radial, podendo existir redes malhadas em alguns casos, e, em redes secundárias, têm-se tanto radial quanto em malha.

A rede primária radial, segundo Kersting (2002), é caracterizada por ter apenas uma direção de fluxo, que vai da fonte de energia, que seria a subestação, e chega aos consumidores (distribuição em média tensão). A figura 4 mostra um esquema típico da rede primária, sendo ilustrado um ramo principal, onde dele derivam-se outros ramos. O sistema também dispõe de chaves e disjuntores, sendo que a chave conta com dois tipos, normalmente fechada (representada com o número 1), que, em necessidade de manutenção pode ser aberta, e normalmente aberta (representada pelo número 2), que pode, por exemplo, ser fechada para manobras de transferência de carga. Os disjuntores servem para isolar algum ramo, caso este apresente alguma falha, ou precise de manutenção (Kagan et al., 2005).

Figura 4- Diagrama unifilar da rede primária



Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema de distribuição secundário é destinado a alimentar consumidores de baixa tensão, como residências, pequenos comércios e algumas indústrias. É caracterizado pela sua baixa tensão, em níveis de 220/127 V ou 380/220 V, tendo possibilidade de ser radial ou malhado.

2.2.4 Perfil de Consumo

O perfil de consumo no sistema de distribuição é bem variado, devido ao fato das cargas conectadas a ele poderem possuir demandas com características próprias de consumo que variam com alguns fatores como: a natureza da carga (que pode ser residencial, comercial, industrial, rural, iluminação pública ou serviço público), da conexão (trifásica, bifásica ou monofásica), e se é AT, MT ou BT (QUEIROZ, [s.d.])

2.2.5 Aspectos Regulatórios

Segundo o artigo 2º da lei número 9427 do dia 26 de dezembro de 1996, a ANEEL é o órgão responsável pela regulação e fiscalização da produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, conforme as diretrizes do governo federal (“L9427compilada”, [s.d.]).

Ainda segundo a ANEEL (2015), o SD brasileiro contém 114 distribuidoras de energia elétrica. Desse número, 63 são concessionárias, 38 permissionárias e 13 cooperativas de eletrização rural. Essas cooperativas estão em processo de regularização para se tornarem concessionárias ou permissionárias. Segundo a ABRADDEE (2015), essas concessionárias são responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica a 77 milhões de unidades consumidoras.

Algumas dessas concessionárias estão listadas nas Tabelas 2 e 3, onde é possível ver as regiões e estados onde atuam (dados de 2015).

Tabela 2 - Concessionárias da Região Norte, Nordeste e Centro-Oeste

NORTE	Estado	AM	AC	RO	RR		PA	AP		TO
	Concessionárias	AmE	ELETROACRE	CERON	CERR/BOA VISTA		CELPA	CEA		CELTINS
NORDESTE	Estado	MA	PI	CE	RN	PB	PE	AL	SE	BA
	Concessionárias	CEMAR	CEPISA	COELCE	COSERN	EPB/EBO	CELPE	CEAL	ESSE/CERCOS/SULGIPE	COELBA
CENTRO-OESTE	Estado	MT		GO		DF			MS	
	Concessionárias	CEMAT		CHESP/CELG-D		CEB-DIS			ENERSUL	

Fonte: Elaborada pelo autor (dados retirados de “Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica - ANEEL”, [s.d.])

Tabela 3- Concessionárias da região Sudeste e Sul

SUDESTE	Estado	MG	ES	RJ	SP
	Concessionárias	CEMIG-D/ EMG	ESCELSA/ ELFSM	AMPLA/ENF/EMG/ LIGHT/CERES	ELEKTRO/CPFL/ CAIUA-D /EDEV/CPRO/CNEE/CERRP/ CERNHE/CERIPA/DMED/EEB/ CERIM/CETRIL/ CERIS/ELETRPAULO/CERMC/ BANDEIRANTE/ CEDRAP
SUL	Estado	PR			SC
	Concessionárias	COPEL-DIS/FORCEL/ CFLO/CERAL-DIS/COCEL			CELESC-DIS/ENERGIA/ CERAÇA/CEREJ/ CERPALO/CELESC-DIS /CERAL/CERBRANORTE/CERGAPA/COOR SEL/ CERGAL/ COOPERALINÇA/COOPERA/ CELESCS- DIS/CERSUL/CEJAMA/CERTREL
	Estado	RS			
	Concessionárias	CEEE-D/AES-SUL/ CERTAJA/ RGE/CRELUZ-D/ CREAL/ MUXENERGIA/ COPREL/ ELETROCAR/ HIDROPAN/ CERLUZ/ COOPERLUZ/ CERMISSOES/ DEME/ UHENEPAL /CERTEL/ CERTALA			

Fonte: Elaborada pelo autor (dados retirados de “Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica - ANEEL”, [s.d.])

A maioria das 114 distribuidoras está listada acima. As regulamentações de preço é feito pela ANEEL, e é do tipo preço-teto, ou seja, é definido um preço máximo que pode ser aplicado pelas empresas (ABRADEE, 2015).

Vale a pena citar também dois documentos importantes elaborados pela ANEEL. Um deles são os Procedimentos de Distribuição (Prodist), responsáveis por fornecerem informações como condições, responsabilidades e penalidades relacionadas à operação, medição, expansão e conexão da energia elétrica. O segundo é a Resolução 414 de 2010, que contém informações a respeito do conceito de distribuição, normas de funcionamento, cobrança, etc (ABRADEE, 2015).

2.3 Algumas considerações

Este capítulo teve como propósito apresentar o sistema elétrico de potência, além de alguns aspectos físicos e regulatórios do SD. Também, foi dada uma ênfase no sistema de distribuição de energia, o qual será base para o desenvolvimento deste trabalho.

Esses aspectos são importantes porque influenciam diretamente no problema a ser analisado. Tanto a topologia, quanto o perfil de consumo, podem dificultar na localização precisa da falta. Como em SD temos variações de cargas ao longo do dia, devido aos variados tipos de consumidores, isso pode afetar no cálculo da distância, dificultando o processo de obtenção da distância.

Quanto às concessionárias citadas nas Tabelas 2 e 3, cabe a elas garantirem o bom funcionamento do sistema, sendo responsáveis por quaisquer danos causados pelo mau funcionamento da rede. Então, é de grande interesse para elas restituírem o sistema o mais rápido possível quando ele for abalado por qualquer distúrbio.

No capítulo a seguir será abordado como está o SD atual, o conceito de faltas, de proteção, alguns equipamentos pertencentes a este sistema, métodos de localização de falta, tais como sinalizadores e localização realizada pelo método de reatância, (será explicado detalhadamente) e será introduzido um dos grandes problemas encontrados nos localizadores de faltas em sistemas de distribuição, a múltipla estimação.

3. Localização de Falta em Sistemas de Distribuição

3.1 Introdução

O SD é um sistema que se desenvolve com o passar dos anos, por meio da implementação de novas tecnologias e técnicas para melhor controle e proteção desse sistema (TOMSOVIC et al., 2005). Apesar de ainda serem utilizadas técnicas baseadas em conceitos de 1960, existem vários projetos e pesquisas na área para mudar essa realidade. Um exemplo seriam as smart grids, que visam a utilização de tecnologias de computação, automação e comunicação para a monitoração e o controle do SD, fazendo com que ele fique mais eficiente (FALCÃO, 2010).

No que diz respeito ao processo de localização de falta, inicialmente o setor de transmissão de energia teve mais enfoque devido ao maior impacto se comparado com os sistemas de subtransmissão e distribuição. O SD tem recebido mais atenção ultimamente, e técnicas que são utilizadas para os sistemas de transmissão estão sendo adaptadas para o sistema de distribuição, como por exemplo a técnica do cálculo da reatância, e das ondas viajantes, porém, a implementação dessas enfrenta muitos obstáculos causados pelas características do SD (ramificações, não homogeneidade, etc.).

3.2 Faltas nos Sistemas de Distribuição

Faltas são distúrbios que acontecem no sistema e podem acarretar diversos danos. O distúrbio mais frequente é o curto-circuito, que pode ser causado por diversos fatores, como, por exemplo, intempéries climáticas (vento, neve e raios), acidentes causados pela presença de animais na rede (como por exemplo pássaros), ou galhos de árvores que se enroscam nas linhas de distribuição. Outras causas de distúrbios, que valem a pena ser citadas, são as causadas pela urbanização, tais como acidentes de trânsito, que podem ocasionar, por exemplo, a queda de um poste de energia, ou acúmulo de poeira ou poluição, e também falhas de equipamentos, como isoladores (Saha, Izykowski, Eugeniusz, 2010; Xu, Chow, Gao, 2005).

Há dois tipos principais de classificação de faltas quanto à duração delas, sendo conhecidas como temporárias (ou transitórias) ou permanentes. As permanentes são mais graves por possuírem maior duração, em razão de não haver possibilidade de reparo automático do sistema, necessitando reparo manual. Podem ser causadas por falhas na isolação, rupturas de cabos ou danos em equipamentos da rede, como transformadores. Já as faltas temporárias são mais brandas, e, normalmente, basta religar o sistema para corrigir esse tipo de falta. São normalmente causadas por objetos nos cabos aéreos (como

árvores e animais), intempéries, entre outros já mencionados (COATE; WAREHAM, 2001; FERREIRA, 2009).

As faltas são indesejáveis por causarem danos aos equipamentos ligados na rede (como motores, transformadores, geradores, reatores, eletrodomésticos, entre outros), além da redução da margem de estabilidade e até explosões (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011). Esses danos podem acarretar muitos prejuízos para as empresas que utilizam esses componentes, devido ao fato de que uma das características das faltas é a elevada corrente de curto-circuito, que é muito maior que a corrente nominal, fazendo então com que esses equipamentos sejam submetidos a uma corrente muito acima do que suportam, danificando-os, ou até mesmo, levando-os à explosão .

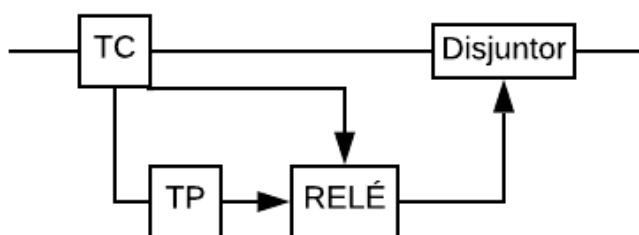
Outra problema associado às faltas é a interrupção do fornecimento de energia elétrica, o que acarreta em consequências tanto para as distribuidoras, quanto para as unidades consumidoras. Portanto, na ocorrência de faltas, o reestabelecimento do sistema deve ser feito de maneira rápida, pois quanto maior a demora, maior o prejuízo para empresas que dependem dessa energia e para a concessionária também.

3.3 Sistemas de Proteção

Cada vez mais há uma dependência de energia elétrica, aumentando, assim, as exigências dos consumidores relativas a qualidade, confiabilidade e segurança na distribuição dessa energia (GERS; HOLMES, 2004), e, como visto no item anterior, é impossível prever a ocorrência de algumas falhas, mas é possível minimizar os danos acometidos por elas através da implementação de um sistema de proteção.

O sistema de proteção auxilia as concessionárias a diminuir os danos causados pelas faltas, prezando pela agilidade e precisão, tudo isso sendo operado automaticamente. Para essas operações, usam-se equipamentos específicos para esse propósito, como, por exemplo, relés, transdutores e disjuntores, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Subsistemas do sistema de proteção



Fonte: Elaborado pelo autor

Os disjuntores são responsáveis por isolar o sistema ou equipamento quando a falta acontece.

O banco de bateria, situado juntamente com o relé, fornece energia para o relé e o disjuntor de modo que eles possam operar de maneira independente da linha, onde a falta pode ocorrer, o que afetaria a ação do sistema de proteção.

Os transdutores (transformadores de corrente (TC) e de potência (TP)) têm como função diminuir a magnitude das grandezas de tensão e corrente para níveis em que possam ser utilizadas em outros equipamentos dos sistemas de proteção, para que estes não sejam danificados, e também para a segurança do corpo técnico responsável. Os relés serão introduzidos e explicados no item a seguir.

3.3.1 Relés

O relé de proteção é um dispositivo que detecta qualquer variação do sinal recebido, normalmente esse sinal é de uma fonte de corrente e/ou tensão. Caso o valor da magnitude desse sinal não esteja conforme a faixa pré-estabelecida, o relé atua conforme programado (GERS; HOLMES, 2004).

Os relés devem ser programados e construídos visando certos aspectos funcionais essenciais como sensibilidade, seletividade, velocidade de atuação e confiabilidade. Quanto à sensibilidade, ela mostra a capacidade de resposta do relé frente a anormalidades nas condições para a qual foi programado. A seletividade diz respeito à capacidade de o sistema identificar corretamente em qual situação deve atuar ou não, garantindo a operação adequada desse sistema de proteção. A velocidade de atuação é necessária para que a falta possa ser removida o mais breve possível, com o objetivo de diminuir a extensão do dano ocorrido, mantem a estabilidade das máquinas operando em paralelo,

melhoram as condições para re-sincronização dos motores, diminuem o tempo total de paralisação dos consumidores de energia, garantem a manutenção das condições normais de operação nas partes sadias do sistema e diminuem o tempo total de não liberação de potência, durante a verificação de dano, entre outras. Por fim, o relé deve ser confiável, ou seja, ele deve operar conforme programado para a situação em que foi designado (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011).

Há vários tipos de relés, estes podem ser divididos por seus aspectos construtivos e funções:

Aspectos construtivos:

- Eletromecânicos,
- Estado sólido,
- Microprocessados,
- Numérico e
- Não elétrico (pressão, térmico, etc.), entre outros.

Funções:

- Magnitude: Operam a partir do valor da magnitude de entrada. Sua função varia conforme foi projetado, podendo atuar para valores acima ou abaixo do valor programado.
- Direcionais: Respondem através do fluxo de corrente, atuando quando ele estiver a frente ou em reverso. No caso de corrente alternada, esse controle é feito através do ângulo de fase entre a corrente e o ângulo de referência, que é programado na confecção do relé.
- Distância: Com os dados de tensão e corrente registrados, é possível calcular a distância em que a falta ocorre, através do cálculo da impedância entre a falta e a localização do relé.
- Diferenciais: A atuação desses relés acontece quando a diferença entre o valor entre duas ou mais correntes são comparadas com um valor já programado.
- Com mídia de comunicação: Usados para fazer a comunicação entre relés situados em localizações remotas.

Nesse projeto será utilizado um relé microprocessado, cuja função é de calcular a distância entre o local da falta em relação ao relé instalado no início da rede.

3.4 Localização de Falhas

Nas últimas décadas, o crescimento do sistema elétrico intensificou-se, causando também uma expansão dos sistemas, que se tornaram maiores e mais complexos. Com esse aumento da demanda e

grande expansão elétrica, juntamente com a evolução do mercado nesse setor, fez-se necessário a criação de várias normas para garantir a qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica, aumentando o investimento em tecnologias que possam garantir essas normas, como por exemplo dispositivos de proteção e controle da rede elétrica. Um desses dispositivos é o localizador de faltas (SAHA; IZYKOWSKI; EUGENIUSZ, 2010)

A localização de faltas é um processo que tem como objetivo apontar o local onde a falta ocorreu, com a maior precisão possível, para que possam ser feitos reparos para prevenir maiores danos (SAHA; IZYKOWSKI; EUGENIUSZ, 2010). Mesmo para faltas transitórias, que podem ser resolvidas remotamente, é importante saber onde ela ocorreu, para que se possa fazer a inspeção do local, prevenindo que ela aconteça novamente. Um exemplo seria uma obstrução causada por um galho de árvore; sabendo o local da falta, os técnicos podem solicitar a poda dela, para que não cause mais danos.

Há vários métodos para localizar a falta, que podem ser divididos em dois grupos, a localização por inspeção visual, e a localização por medidores colocados em pontos de referência. A localização visual pode ser feita por patrulhas realizadas pelas concessionárias, ou por dispositivos, como sinalizadores, que emitem sinal luminoso ou sonoro a fim de auxiliar os técnicos a localizar a falta. Quanto aos medidores, podemos citar técnicas que utilizam dados da corrente e tensão, como a técnica do cálculo da reatância (que será usada neste trabalho) e a técnica da teoria das ondas viajantes (STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957).

Porém, há uma grande diferença na implementação de localizadores de faltas entre os ST e SD, devido às características particulares desses sistemas. Ao contrário do ST, o SD é heterogêneo, isso acontece devido aos diferentes números e comprimentos de cabos, a presença de linhas subterrâneas, desbalanços causados pela não transposição das linhas e a não uniformidade na distribuição das cargas ao longo do circuito, devido a presença de cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas (MORA-FLÓREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008).

Apesar dos problemas para a implementação de sistemas para a localização de faltas, há diversas técnicas e pesquisas na área. Atualmente, algumas empresas utilizam sinalizadores para localizar a falta, entretanto há outros meios, como, por exemplo, a localização de faltas por intermédio da técnica de reatância, que é o objetivo deste trabalho.

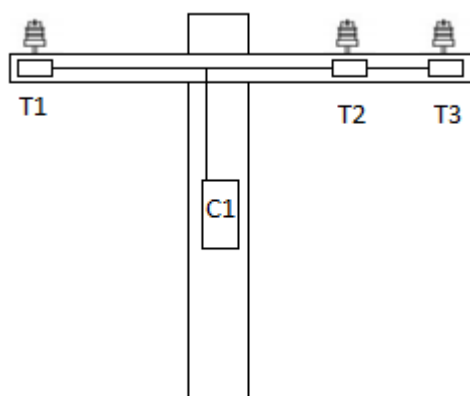
3.4.1 Sinalizadores

Os sinalizadores são sensores instalados na rede que, quando submetidos a uma corrente elevada (característica da corrente de curto), disparam um sinal visual ou sonoro (depende do sinalizador utilizado), indicando o possível local da falta. Essa indicação permite o deslocamento da equipe de

manutenção ao local com uma maior probabilidade de ter ocorrido de fato a falta, ou muito próximo, reduzindo o tempo de interrupção do fornecimento. Com esse sinal, a equipe de manutenção consegue ir ao local da falta, fazendo os reparos necessários (BARBOSA et al., 2013).

Os sensores de corrente presentes nesses sinalizadores são constituídos de duas unidades. A primeira é um transdutor instalado em cada fase da linha (ou nas cruzetas dos postes, próximo da fase monitorada), que opera convertendo os sinais eletromagnéticos da fase monitorada e o transforma em corrente contínua, com a finalidade de transmitir, para o concentrador, sinais proporcionais da corrente e tensão da fase em questão. A segunda é o concentrador, que digitaliza e processa os sinais recebidos do transdutor e transmite esse sinal para que possa ser analisado pela equipe responsável pelo setor (FERREIRA et al., 2008). Esse arranjo pode ser observado na Figura 6 onde estão ilustrados os transdutores (T1, T2 e T3) instalados nas cruzetas, próximo de cada fase que será monitorada, e o concentrador (C1), que interpreta e manda os sinais para a concessionária. Para que o sensor funcione, é necessária uma alimentação de baixa tensão. Na ausência dela, é instalado um transformador de potencial (TP) para essa finalidade. Na Figura 7 temos um exemplo de sinalizador, comercializado pela empresa SEL (Schweitzer engineering laboratories).

Figura 6-Configuração de instalação do sensor



Fonte : Elaborado pelo autor

Figura 7- Sensor de falta fabricado pela SEL (Schweitzer engineering laboratories).



Fonte: “Sensores e indicadores de falta”, [s.d.]

A localização de falta por este método tem como desvantagem o tempo que demanda para chegar até o local, uma vez que a equipe de patrulha precisa seguir o caminho indicado pelos sinalizadores, demandando tempo e gastos.

3.4.2 Teoria das Ondas Viajantes

Outro método para a estimação da localização de faltas é a técnica baseada na teoria das ondas viajantes. Esse método analisa o tempo de propagação da onda gerada pelo transitório de corrente e sua reflexão e refração.

Por exemplo, uma linha (“Lab”) que está entre dois barramentos. “A” e “B”, tem impedância característica “ Z_c ”, e a onda viaja com uma velocidade “ v ”. Quando um surto ocorrido a uma distância “ d ” do primeiro terminal acontece, ele injeta uma onda que viaja até os terminais e reflete, isso ocorre até o sistema estabilizar. À partir dessa diferença de velocidade, pode-se calcular a distância “ d ” onde ocorreu a falta (NOURI; WANG; DAVIES, 2001).

Apesar de ser um método de alto desempenho quanto à precisão, o método por ondas viajantes requer uma alta taxa de amostragem para que se possa obter bons resultados, aumentando assim o custo relativo à sua implementação

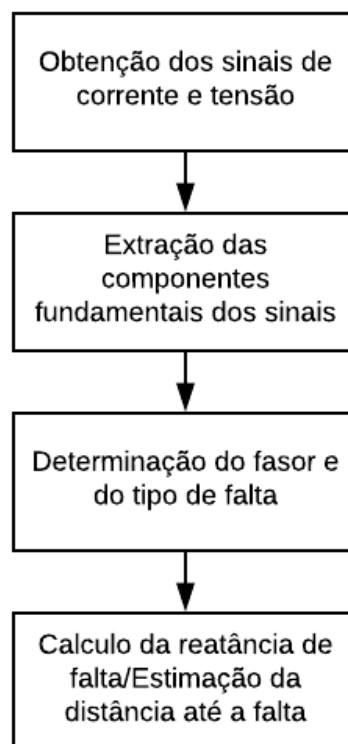
3.4.3 Técnica de Reatância

A técnica da reatância é um outro método de localização. Através dela é possível realizar o desenvolvimento de um software com o intuito de estimar a distância da falta. Esta técnica utiliza as frequências fundamentais dos fasores da corrente e tensão, obtidas através de um relé posicionado no início da linha, e com esses sinais é possível calcular a reatância entre o dispositivo de medição e o ponto da falta. As vantagens dessa técnica é que ela é de simples implementação e produz boas estimativas da localização da falta (MORA-FLÒREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008; SACHDEV, 1997; TAKAGI, 1982).

A aplicação dessa técnica no SD é similar àquela do ST. O que difere entre os sistemas é que o SD tem várias particularidades, que podem dificultar o processo de localização exata da falta. Um exemplo disso seria o efeito da múltipla estimação (MORA-FLOREZ; BARRERA-NUNEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2007), que será abordada futuramente.

O processo de implementação do localizador de falta pelo método de reatância está demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma das etapas para a implementação da técnica de reatância



Fonte: Adaptado de ZIMMERMAN; COSTELLO (2005)

Esses processos serão explicados nos tópicos a seguir.

3.7.1 Valor de Tensão e Corrente

A obtenção do valor da tensão e corrente é feita pelo relé colocado no começo da linha. Ele capta o sinal provindo da rede elétrica, sendo programado para responder às adversidades da rede. Quando identificada essa anormalidade, ele grava esses valores (dados de pós falta, ou seja, no regime permanente da falta), para que, juntamente com os dados de pré falta, o valor da reatância de falta possa ser calculado. Seria vantajoso se fossem colocados medidores tanto no começo quanto no final da linha, porém do ponto de vista prático, coloca-se apenas um medidor (TAKAGI, 1982).

3.7.2 Extração das Componentes Fundamentais

Para a extração das componentes fundamentais é necessário a aplicação de filtros, tais como Rockfeller, Fourier, Walsh ou Kalman .O método mais convencional utilizado é o filtro do Fourier que, apesar de precisar de muitas amostras para uma boa estimação dos parâmetros, é um filtro de fácil implementação, além de desempenhar adequadamente o papel de filtragem das componentes de alta frequência (RAMIREZ et al. 2014;ZAMORA-MENDEZ et al., 2016).

O filtro de Fourier opera convertendo o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência (a operação contrária é feita pelo filtro inverso de Fourier). Essa conversão é feita através das componentes ortogonais do seno e cosseno:

$$X_C^i = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N x_n \cos(n\theta) \quad (3.1)$$

$$X_S^i = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N x_n \sin(n\theta) \quad (3.2)$$

$$\theta = \frac{2\pi}{N} \quad (3.3)$$

Onde N é o número de amostras por ciclo, θ é o ângulo da frequência fundamental entre as amostras e x_n é o sinal amostrado. Com os valores de X_C^i e X_S^i é possível calcular o fasor, sua magnitude e ângulo de fase:

$$X^i = X_C^i + jX_S^i \quad (3.4)$$

$$|X^i| = \sqrt{[X_C^i]^2 + [X_S^i]^2} \quad (3.5)$$

$$\varphi_k^i = \arctan\left(\frac{X_S^i}{X_C^i}\right) \quad (3.6)$$

X^i = Fasor, $|X^i|$ = magnitude do fasor, φ_k^i = ângulo de fase.

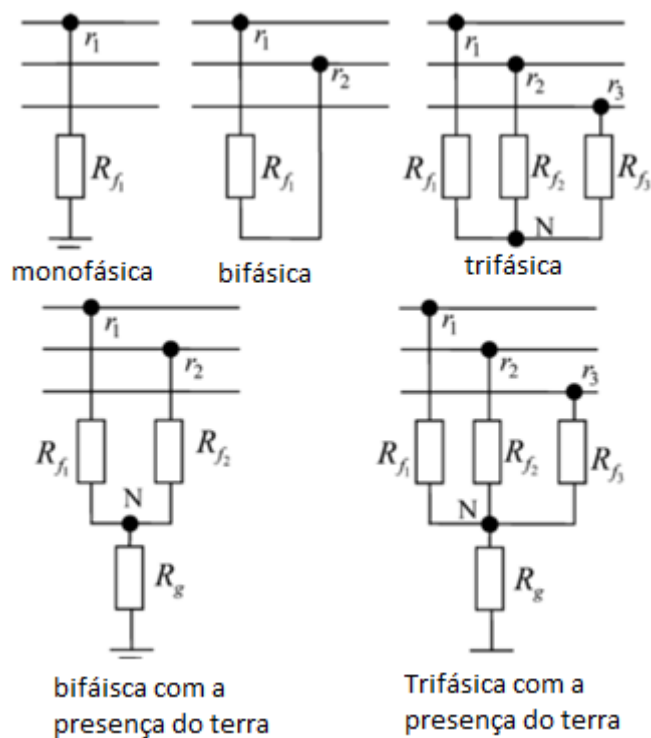
Utiliza-se o filtro em todas as fases nas quais se quer fazer a análise. Caso seja um sistema trifásico, faz-se essa transformação para todas as três fases, tanto para as amostras de corrente quanto de tensão.

3.7.3 Determinação do Tipo de Falta

A partir dos fasores calculados, pode-se determinar em qual fase a falta ocorreu. Tem-se vários tipos diferentes de classificações de faltas, sendo no total onze tipos diferentes, listadas abaixo e ilustradas na figura 9 (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011).

- Fase A – Terra
- Fase B – Terra
- Fase C – Terra
- Fase A – Fase B
- Fase A – Fase B – Terra
- Fase B – Fase C
- Fase B – Fase C – Terra
- Fase C – Fase A
- Fase C – Fase A – Terra
- Fase A – Fase B – Fase C
- Fase A – Fase B – Fase C – Terra

Figura 9- Ilustração dos tipos de faltas



Fonte: Adaptado de LIAO (2011)

Na Figura 9 são representadas as faltas monofásicas, bifásicas sem a presença do terra, bifásicas com a presença do terra e trifásicas sem e com a presença do terra.

Para que se possa classificar a falta, primeiramente há a necessidade de calcular a corrente de sequência zero (I_0), pois ela que indicará se na falta há a presença do terra ou não. I_0 pode ser calculado através da equação 3.7:

$$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (3.7)$$

I_a = módulo da corrente da fase “a”, I_b = módulo da corrente da fase “b”, I_c = módulo da fase “c”.

Conhecendo os valores de I_a , I_b , I_c e I_0 , é possível classificar a falta. Primeiramente é necessário normalizar os módulos de todas as correntes, utilizando o maior valor entre I_a , I_b e I_c . Assim é possível obter os valores normalizados I_{an} , I_{bn} , I_{cn} e I_{0n} , e então fazer a classificação. Ela é feita de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de classificação de faltas

Condição	Tipo de Falta
$I_{bn} < k$ e $I_{cn} < k$	Fase A – Terra
$I_{an} < k$ e $I_{cn} < k$	Fase B – Terra
$I_{an} < k$ e $I_{bn} < k$	Fase C – Terra
$I_{cn} < k$ e $I_{an} \cong I_{bn} / I_{0n} > I_{min}$	Fase A – B – Terra
$I_{cn} < k$ e $I_{an} \cong I_{bn} / I_{0n} < I_{min}$	Fase A – B
$I_{an} < k$ e $I_{cn} \cong I_{bn} / I_{0n} > I_{min}$	Fase B – C – Terra
$I_{an} < k$ e $I_{cn} \cong I_{bn} / I_{0n} < I_{min}$	Fase B – C
$I_{bn} < k$ e $I_{an} \cong I_{cn} / I_{0n} > I_{min}$	Fase A – C – Terra
$I_{bn} < k$ e $I_{an} \cong I_{cn} / I_{0n} < I_{min}$	Fase A – C
$I_{an} \cong I_{bn} \cong I_{cn}$	Fase A – B – C

Fonte: COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI (2011)

Na Tabela 4, há a presença de uma constante k , que representa a razão entre a corrente na qual não ocorreu a falta e aquela na qual ocorreu. Ela é usada para a análise de quais fases estão envolvidas na falta. Se o valor normalizado for menor que essa constante, a fase analisada não está presente na falta. Esse valor varia conforme a configuração do sistema analisado, sendo determinado empiricamente. Para a análise da presença ou não do terra, determina-se um valor mínimo (I_{min}) como referência. Se o valor de I_{0n} for menor que I_{min} , não há a presença do terra. Se for maior que I_{min} , há a presença do terra (GAUTIER, 1996).

3.7.4 Cálculo da Reatância Equivalente da Subestação à Falta

Após a classificação, calculamos a reatância de curto-circuito, por meio da equação (3.8) (HEALTH, 2014):

$$X = \frac{U}{I} * \text{sen}\varphi \quad (3.8)$$

Onde X é a reatância de falta, U é o módulo do fasor da tensão, I é o módulo do fasor da corrente e φ é o ângulo de fase entre a tensão e a corrente. Esses parâmetros são extraídos da saída do filtro.

A equação (3.8) pode possuir variações conforme a natureza da falta. Para faltas monofásicas, basta dividirmos a tensão pela corrente da fase onde ocorreu a falta e multiplicar pelo seno da diferença entre os ângulos de fase. Para faltas bifásicas, a equação deve contemplar o envolvimento entre as fases, como apresentado na equação (3.9).

$$X_{ab} = \frac{U_{ab}}{I_{ab}} * \text{sen}\varphi_{ab} \quad (3.9)$$

Onde U_{ab} é o módulo da diferença dos fasores da fase “a” e a fase “b”, I_{ab} é módulo da diferença dos fasores da fase “a” e fase “b”, e φ_{ab} é o ângulo de fase entre as fases “a” e “b” e X_{ab} é a reatância bifásica entre “a” e “b”. Para faltas trifásicas pode ser utilizada qualquer uma das equações, tanto monofásicas quanto bifásicas (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011).

Após o cálculo da reatância de falta (ou de curto circuito), basta comparar a distância que a reatância calculada corresponde. Isso pode ser feito através de um banco de dados utilizando, por exemplo, o Excel®, no qual estarão contidas informações sobre os parâmetros da linha de distribuição, tais como número dos nós, tamanho e comprimento dos cabos, impedância de sequência positiva e zero (ZIMMERMAN; COSTELLO, 2005).

Para que o programa compilado seja utilizável comercialmente, há a necessidade de saber se ele localiza a falta com uma certa precisão, por isso calcula-se o erro. Como a distância calculada é uma aproximação da real, então um determinado erro é plausível. Porém, se esse erro for muito grande, torna-se inviável a utilização desse dispositivo (MORA-FLÓREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008).

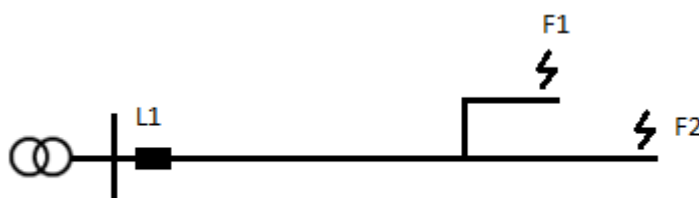
$$\text{erro} = \frac{\text{localização estimada} - \text{localização atual}}{\text{comprimento do alimentador}} \quad (3.10)$$

3.7.5 Efeito da múltipla estimação

Como mencionado por muitos autores (HEALTH, 2014; MORA-FLOREZ; BARRERA-NUNEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2007; SACHDEV, 1997), um problema encontrado nos localizadores de faltas, no sistema de distribuição, é o efeito da múltipla estimação. Este efeito acontece devido à presença de ramais ao longo da linha, e, como a localização é feita a partir do cálculo da reatância, o localizador não diferencia o ramo lateral do ramo principal, pois ambos têm a mesma distância elétrica, resultando em mais de um ponto de falta. Isso pode acarretar em alguns problemas, visto que, como não temos, com precisão, o local da falta, o reparo do sistema acaba sendo mais demorado.

Este problema não é comum em ST, por não apresentarem ramificações, e nos trechos do SD sem ramos laterais. Se o sistema não tem ramais, o valor da reatância calculada representa um único ponto, não ocorrendo múltiplas estimações. A Figura 10 ilustra esse efeito.

Figura 10 - Ilustração do efeito de múltipla estimação



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 10 temos uma ilustração demonstrando um caso de múltipla estimação. L1 é onde o localizador está posicionado na linha, F1 e F2 são seriam os possíveis locais de multipla estimação. Caso aconteça uma falta em F1, o localizador irá apontar duas possíveis localizações, F1 e F2, pois ambas têm a mesma distância elétrica em relação à posição localização

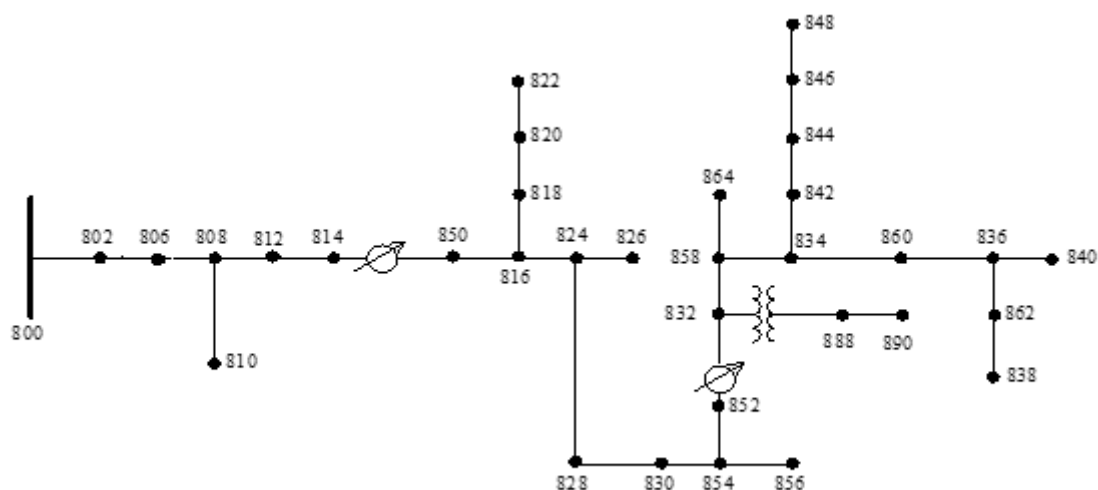
Os próximos tópicos abordarão esse tema, demonstrando esse problema no sistema do IEEE 34 barras (para a demonstração será utilizado o *software* OpenDSS), e, posteriormente, demonstrando um método proposto por MORALES-ESPAÑA, MORA-FLÓREZ e Vargas-Torres (2009) para a solução deste problema.

4. Metodologia

4.1 Apresentação do sistema

O sistema que será utilizado é o IEEE 34 barras, ilustrado na figura 11. Ele será usado para a demonstração do fenômeno da múltipla estimação em um SD.

Figura 11 - Sistema IEEE 34 barras



Fonte: POWER & ENERGY SOCIETY (2013)

No sistema há a presença de vários elementos típicos do setor de distribuição, sendo possível identificar a presença de dois reguladores, um transformador e 34 barras, além de vários ramos laterais. Além desses elementos que podem ser visualizados na figura, tem-se banco de capacitores, ramais laterais monofásicos, e cargas desbalanceadas ao longo da rede. A tensão do alimentador é de 24,9 kV, e o transformador é abaixador de tensão, transformando para 4,16 kV. Os ramos laterais são monofásicos, constituídos ou pela fase A, ou fase B. Há também vários tipos de configurações dos cabos de distribuição. Na Tabela 5 temos uma lista do tipo de cabo, o comprimento dele, e entre quais nós ele se encontra:

Tabela 5 - Configuração e comprimento por segmento de linha

Dados dos segmentos da linha			
Nó A	Nó B	Comprimento (em metros)	Configuração
800	802	786,384	300
802	806	527,304	300
806	808	9823,704	300
808	810	1769,0592	303
808	812	11430	300
812	814	9061,704	300
814	850	3,048	301
816	818	521,208	302
816	824	3112,008	301
818	820	14676,12	302
820	822	4187,952	302
824	826	923,544	303
824	828	256,032	301
828	830	6230,112	301
830	854	158,496	301
832	858	1493,52	301
834	860	615,696	301
834	842	85,344	301
836	840	262,128	301
836	862	85,344	301
842	844	411,48	301
844	846	1109,472	301
846	848	161,544	301
850	816	94,488	301
852	832	3,048	301
854	856	7110,984	303
854	852	11225,784	301
858	864	493,776	302
858	834	1776,984	301
860	836	816,864	301
862	838	1481,328	304
888	890	3218,688	300

Fonte: Adaptado de DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE (2006)

O nó A representa o nó onde o seguimento de linha começa, e o nó B representa o término do segmento. O comprimento da linha é dado em metros (DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE, 2006). As características das configurações 300, 301, 302, 303 e 304 estão

representadas asseguir, onde se mostram as matrizes de impedância (Z) e susceptância (B), sendo a primeira em ohms por milhas, e a segunda em micro Siemens por milha:

- Configuração 300:

$$Z = \begin{bmatrix} 1.3368 + j1.3343 & 0.2101 + j0.5779 & 0.2130 + j0.5015 \\ & 1.3238 + j1.3569 & 0.2066 + j0.4591 \\ & & 1.3294 + j1.3471 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 5.3350 & -1.5313 & -0.9943 \\ & 5.0979 & -0.6212 \\ & & 4.8880 \end{bmatrix}$$

- Configuração 301:

$$Z = \begin{bmatrix} 1.9300 + j1.4115 & 0.2327 + j0.6442 & 0.2359 + j0.5691 \\ & 1.9157 + j1.4281 & 0.2288 + j0.5238 \\ & & 1.9219 + j1.4209 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 5.1207 & -1.4364 & -0.9402 \\ & 4.9055 & -0.5951 \\ & & 4.7154 \end{bmatrix}$$

- Configuração 302:

$$Z = \begin{bmatrix} 2.7995 + j1.4855 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 4.2251 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$$

- Configuração 303:

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ & 2.7995 + j1.4855 & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ & 4.2251 & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$$

- Configuração 304:

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ & 1.9217 + j1.4212 & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ & 4.3637 & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$$

A partir dos valores das matrizes de impedância e susceptância torna-se possível a obtenção das impedâncias de sequência positiva, negativa e zero. Para isso basta aplicar a fórmula 4.1 (ASHOK, 2014; PAULA, 2016).

$$Z_{012} = [A]^{-1} * Z_{abc} * [A] \quad (4.1)$$

Onde Z_{012} é a matriz de impedâncias em componentes simétricas, Z_{abc} é a matriz de impedâncias da rede, e A é a matriz transformação:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

O mesmo é feito com a matriz de susceptância B :

$$B_{012} = [A]^{-1} * B * [A] \quad (4.2)$$

4.2 Simulação

4.2.1 OpenDSS

Como já mencionado, para a simulação das faltas no sistema utilizaremos o software OpenDSS (*Distribution System Simulator*). Este é um programa livre, que foi desenvolvido para realizar análises em várias áreas, tais como circuitos polifásicos, geração distribuída, harmônicos e sistemas de distribuição, além de simulações de plantas geradoras eólicas, variação anual de cargas e geradores, bem como várias outras áreas (JUNIOR, 2010).

Após a modelagem do circuito, que se dá a partir da implementação de linhas de código, há a possibilidade de vários tipos de execução, tais como fluxo de potência, harmônicos e estudos de falta (que é o objetivo deste trabalho). Dentro deste último, temos algumas opções de escolha para análise:

FaultStudy, que faz um estudo convencional de faltas, simulando todos os tipos e em todas as barras do sistema, retornando os valores da corrente de falta, tensão (em pu), e X/R, que é a relação entre a falta simétrica e assimétrica, *Snapshot*, que permite ao usuário determinar o local, tipo e resistência da falta e *Monte Carlo*, no qual o usuário define uma região, e o sistema simula faltas aleatórias nessa região.

Para a demonstração da múltipla estimação, será utilizado o comando *FaultStudy*. A vantagem da sua utilização é que ele simula todos dos tipos de faltas em todos as barras do sistema, possibilitando a demonstração da múltipla estimação. Como o sistema nos fornece os valores de tensão, corrente e X/R de cada barra, pode-se calcular as reatâncias de cada, mostrando que há valores iguais, validando o fenômeno.

4.3 Múltipla Estimação

A fim de minimizar, ou até erradicar o problema da múltipla estimação, MORALES-ESPAÑA; MORA-FLÓREZ; VARGAS-TORRES (2009) propõem um método simples para esse propósito. O método convencional do cálculo da distância através do valor da reatância até o ponto da falta usa somente os dados das fases envolvidas com a falta. Na nova proposta, usam-se todas as fases e cargas (envolvidas ou não com a falta) para o cálculo da distância.

Para a modelagem, ao invés de usar as componentes simétricas no cálculo, considera-se a análise das fases. Primeiramente, dado dois nós (N e N+1), temos a definição das impedâncias da linha (Z_{linha}) e da carga acumulada entre N+1 até o final da linha (Z_{load}). A primeira é a impedância equivalente entre o do início da linha até o ponto de falta, e a segunda seria a impedância equivalente do ponto de falta até o final da linha

Z_{linha} e Z_{load} estão representadas nas matrizes 4.3 e 4.4 abaixo:

$$Z_{linha} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$Z_{load} = \begin{bmatrix} Z_{La} & Z_{Lb} & Z_{Lc} \\ Z_{Lba} & Z_{Lbb} & Z_{Lbc} \\ Z_{Lca} & Z_{Lcb} & Z_{Lcc} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Partindo disso, basta fazer uma análise para cada falta (monofásicas, bifásicas com e sem presença do terra, e trifásicas)

4.3.1 Falta Monofásicas

Levando em consideração um sistema trifásico, e uma falta monofásica na fase “a”, com distância a ser calculada “m”, e uma resistência de falta “Rf”, tem-se as equações 4.5 e 4.6:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = Z_{eq} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$Z_{eq} = \begin{bmatrix} mZ_{aa} + Rf & mZ_{ab} & mZ_{ac} \\ mZ_{ba} & Z_{bb} + Z_{Lb} & Z_{bc} + Z_{Lbc} \\ mZ_{ca} & Z_{cb} + Z_{Lcb} & Z_{cc} + Z_{Lcb} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Os valores a serem considerados de tensão e corrente da matriz em 4.5 são antes da falta (nó N, citado anteriormente). Como pode ser visto em 4.6, as impedâncias de carga do resto do sistema nas fases não envolvidas com a falta são consideradas no cálculo da impedância equivalente (Z_{eq}).

Das duas equações anteriores, chega-se nas equações 4.7, 4.8 e 4.9, nas quais “imag” representa a imagem dos valores calculados.

$$m = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_a}{I_a}\right)}{\text{imag}\left(Z_{aa} + Z_{ab}\frac{I_b}{I_a} + Z_{ac}\frac{I_c}{I_a}\right)} \quad (4.7)$$

$$m_1 = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_a - V_b + V_c}{I_a} + B\frac{I_b}{I_a} + C\frac{I_c}{I_a}\right)}{\text{imag}(Z_{aa} - Z_{ba} + Z_{ca} + A)} \quad (4.8)$$

$$m_2 = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_a + V_b - V_c}{I_a} - B\frac{I_b}{I_a} - C\frac{I_c}{I_a}\right)}{\text{imag}(Z_{aa} + Z_{ba} - Z_{ca} + A)} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} A &= Z_{ab}\frac{I_b}{I_a} + Z_{ac}\frac{I_c}{I_a} \\ B &= Z_{bb} + Z_{Lb} - Z_{cb} - Z_{Lcb} \\ C &= Z_{bc} + Z_{Lbc} - Z_{cc} - Z_{Lc} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Das equações anteriores, 4.7 é utilizada para calcular a distância da falta, e as outras duas (4.8 e 4.9) são provenientes das outras linhas da matriz em 4.5, e resultam em uma localização aproximada à calculada em 4.7, e nelas são consideradas as cargas dos ramos onde a falta não ocorre. Com os três resultados, podemos obter o erro através de 4.11:

$$Erro_i = \frac{1}{n} \frac{\sum_{j=1}^n |m - m_j|}{|m|} \quad (4.11)$$

Onde “n” é o número de distâncias a mais calculadas. No caso de faltas monofásicas, seria 2 (m_1 e m_2). Caso ocorra de o sistema acusar mais de um local de falta, calculam-se todos esses parâmetros para todas as possibilidades, e, utiliza-se como critério de escolha a que tiver menor erro. O mesmo processo de análise é feito para os outros 3 tipos de faltas.

4.3.2 Faltas bifásicas

Para faltas envolvendo duas fases, o processo de cálculo da distância de falta é o mesmo feito para faltas monofásicas:

$$\begin{bmatrix} V_a - V_f \\ V_b - V_f \\ V_c \end{bmatrix} = Z_{eq} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$Z_{eq} = \begin{bmatrix} mZ_{aa} + R_f & mZ_{ab} & mZ_{ac} \\ mZ_{ba} & mZ_{bb} + R_f & mZ_{bc} \\ mZ_{ca} & mZ_{cb} & Z_{cc} + Z_{Lc} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$m = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b}\right)}{\text{imag}\left(\frac{DI_a + EI_b + FI_c}{I_a - I_b}\right)} \quad (4.14)$$

$$D = Z_{aa} - Z_{ba}$$

$$E = Z_{ab} - Z_{bb}$$

$$F = Z_{ac} - Z_{bc}$$

(4.15)

$$m_1 = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_a - V_b - V_c}{I_a - I_b} - (Z_{cc} + Z_{Lc}) \frac{I_c}{I_a - I_b}\right)}{\text{imag}\left(\frac{(D - Z_{ca})I_a + (E - Z_{cb})I_b + FI_c}{I_a - I_b}\right)} \quad (4.16)$$

Este processo é o mesmo em faltas envolvendo duas fases e o terra, uma vez que nos cálculos o valor da resistência do terra não influencia no resultado.

4.3.3 Faltas trifásicas

Para faltas envolvendo as 3 fases, o processo para obtenção da distância é o mesmo das duas anteriores:

$$\begin{bmatrix} V_a - V_f \\ V_b - V_f \\ V_c - V_f \end{bmatrix} = Zeq * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$Zeq = \begin{bmatrix} mZ_{aa} + Rf & mZ_{ab} & mZ_{ac} \\ mZ_{ba} & mZ_{bb} + Rf & mZ_{bc} \\ mZ_{ca} & mZ_{cb} & mZ_{cc} + Rf \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$m_1 = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b}\right)}{\text{imag}\left(\frac{DI_a + EI_b + FI_c}{I_a - I_b}\right)} \quad (4.19)$$

$$m_2 = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_b - V_c}{I_b - I_c}\right)}{\text{imag}\left(\frac{GI_a + HI_b + JI_c}{I_b - I_c}\right)} \quad (4.20)$$

$$m_3 = \frac{\text{imag}\left(\frac{V_c - V_a}{I_c - I_a}\right)}{\text{imag}\left(\frac{KI_a + LI_b + MI_c}{I_c - I_a}\right)} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} G &= Z_{ba} - Z_{ca} & K &= Z_{ca} - Z_{aa} \\ H &= Z_{bb} - Z_{cb} & L &= Z_{cb} - Z_{ab} \\ J &= Z_{bc} - Z_{cc} & M &= Z_{cc} - Z_{ac} \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$m = \frac{1}{3}(m_1 + m_2 + m_3) \quad (4.23)$$

Resolvendo o sistema 4.17, resulta nas equações 4.19, 4.20, 4.21, e, com a média ponderada delas, obtém-se a distância da falta. Para o cálculo do erro, neste caso, o valor de “n” é igual a 3.

5. Resultados

5.1 Simulação no OpenDSS

Compilado o sistema implementado no OpenDSS no modo *Faultstudy*, o programa retorna às três tabelas a seguir. A tabela 6 apresenta os valores de corrente e de $\frac{X}{R}$ para cada fase, para todas as barras. A primeira coluna indica a barra onde ocorre a falta, as demais fornecem os valores da corrente de falta e da relação $\frac{X}{R}$ das fases 1, 2 e 3, respectivamente. Pode-se notar que os valores da corrente na barra 800, nas Tabelas 6, 7 e 8, é muito elevado. Isso se deve ao fato da falta ter, teoricamente, acontecido na subestação.

Tabela 6 - Correntes de faltas trifásicas e fatores X/R

Faltas Trifásicas						
Barra	Fase 1 (A)	X/R	Fase 2 (A)	X/R	Fase 3 (A)	X/R
800	2706194	5,5	2706194	5,5	2706194	5,5
802	21802	0,7	23020	0,8	21173	0,8
806	13081	0,7	13815	0,8	12703	0,8
808	1548	0,6	1635	0,8	1503	0,7
812	764	0,6	807	0,7	742	0,7
814	545	0,6	576	0,7	529	0,7
814R	500	0,6	560	0,7	512	0,7
850	500	0,6	560	0,7	512	0,7
816	498	0,6	558	0,7	510	0,7
824	446	0,6	496	0,7	455	0,7
828	442	0,6	492	0,7	451	0,7
830	367	0,5	403	0,6	372	0,6
854	365	0,5	401	0,6	370	0,6
832	258	0,5	279	0,6	259	0,6
858	250	0,5	272	0,6	252	0,5
834	243	0,5	263	0,6	244	0,5
860	240	0,5	260	0,6	241	0,5
842	242	0,5	262	0,6	243	0,5
836	236	0,5	256	0,6	237	0,5
840	235	0,5	254	0,6	236	0,5
862	236	0,5	255	0,6	237	0,5
844	240	0,5	260	0,6	241	0,5
846	235	0,5	255	0,6	236	0,5
848	235	0,5	254	0,6	235	0,5
852R	258	0,5	279	0,6	259	0,6

888	849	1	878	1	844	1
852	279	0,5	303	0,6	280	0,6
890	444	0,8	461	0,9	433	0,8

A Tabela 7 fornece os dados das faltas monofásicas de cada barra, fornecendo os valores da corrente de falta e tensão, em p.u.. Na primeira coluna tem-se o número da barra onde a falta ocorre, na segunda, em qual fase (1, 2 ou 3), na terceira os valores da corrente de falta, e depois os valores das tensões em cada barra no momento da falta. Pode-se observar que na fase onde a falta ocorre, temos que o valor da tensão em p.u. é 0, enquanto as outras acabam tendo valor unitário maior que 1, mostrando assim que houve um aumento na tensão (além do valor nominal). Para trechos monofásicos temos apenas o valor da fase 1.

Tabela 7 - Correntes e tensões (em p.u.) para faltas Fase-Terra

Faltas Monofásicas					
Barra	Fase	Corrente(A)	Tensão Fase 1(p.u.)	Tensão Fase 2(p.u.)	Tensão Fase 3(p.u.)
800	1	3319593	0,000	0,972	0,936
800	2	3319592	0,936	0,000	0,972
800	3	3319596	0,972	0,936	0,000
802	1	16279	0,000	1,339	1,131
802	2	16229	1,133	0,000	1,272
802	3	16249	1,295	1,129	0,000
806	1	9756	0,000	1,339	1,130
806	2	9730	1,132	0,000	1,272
806	3	9739	1,294	1,129	0,000
808	1	1143	0,000	1,311	1,117
808	2	1149	1,106	0,000	1,249
808	3	1143	1,255	1,115	0,000
810	2	911	0,000	-	-
812	1	558	0,000	1,279	1,100
812	2	566	1,075	0,000	1,221
812	3	560	1,210	1,100	0,000
814	1	394	0,000	1,253	1,087
814	2	403	1,051	0,000	1,199
814	3	397	1,174	1,089	0,000
814R	1	361	0,000	1,283	1,121
814R	2	392	1,143	0,000	1,235
814R	3	383	1,275	1,116	0,000
850	1	361	0,000	1,283	1,121
850	2	392	1,143	0,000	1,235
850	3	383	1,275	1,116	0,000
816	1	360	0,000	1,283	1,120

816	2	391	1,142	0,000	1,235
816	3	382	1,275	1,115	0,000
818	1	352	0,000	-	-
824	1	324	0,000	1,271	1,109
824	2	349	1,129	0,000	1,225
820	1	212	0,000	-	-
822	1	190	0,000	-	-
826	2	335	0,000	-	-
828	1	321	0,000	1,270	1,108
828	2	346	1,128	0,000	1,224
828	3	339	1,262	1,102	0,000
830	1	267	0,000	1,249	1,088
830	2	285	1,105	0,000	1,204
830	3	279	1,240	1,082	0,000
854	1	266	0,000	1,248	1,088
854	2	284	1,104	0,000	1,204
854	3	278	1,239	1,081	0,000
832	1	187	0,000	1,308	1,143
832	2	198	1,158	0,000	1,263
832	3	194	1,297	1,135	0,000
858	1	182	0,000	1,304	1,140
858	2	192	1,156	0,000	1,260
858	3	188	1,293	1,133	0,000
834	1	177	0,000	1,300	1,137
834	2	186	1,152	0,000	1,256
834	3	183	1,289	1,130	0,000
860	1	175	0,000	1,300	1,136
860	2	184	1,151	0,000	1,256
860	3	181	1,289	1,128	0,000
842	1	176	0,000	1,300	1,137
842	2	186	1,152	0,000	1,256
842	3	182	1,289	1,129	0,000
836	1	172	0,000	1,299	1,135
836	2	182	1,150	0,000	1,255
836	3	178	1,288	1,127	0,000
840	1	172	0,000	1,299	1,135
840	2	181	1,149	0,000	1,255
840	3	177	1,288	1,127	0,000
862	1	172	0,000	1,299	1,135
862	2	181	1,150	0,000	1,255
862	3	178	1,288	1,127	0,000
844	1	175	0,000	1,300	1,137
844	2	185	1,152	0,000	1,256
844	3	181	1,289	1,129	0,000
846	1	171	0,000	1,300	1,136

846	2	181	1,151	0,000	1,256
846	3	177	1,289	1,128	0,000
848	1	171	0,000	1,300	1,136
848	2	180	1,151	0,000	1,256
848	3	177	1,289	1,128	0,000
852R	1	187	0,000	1,308	1,143
852R	2	198	1,158	0,000	1,263
852R	3	194	1,297	1,135	0,000
888	1	680	0,000	1,156	1,093
888	2	699	1,106	0,000	1,127
888	3	691	1,148	1,085	0,000
856	2	222	0,000	-	-
852	1	203	0,000	1,210	1,057
852	2	214	1,071	0,000	1,169
852	3	210	1,200	1,050	0,000
864	1	180	0,000	-	-
838	2	177	0,000	-	-
890	1	321	0,000	1,161	1,019
890	2	326	1,039	0,000	1,115
890	3	323	1,134	1,020	0,000

A Tabela 8 fornece os dados das faltas bifásicas para fases adjacentes, ou seja, faltas entre as fases 1-2 e 2-3. A primeira coluna mostra em qual barra a falta acontece, na segunda e terceira, as fases envolvidas, a quarta os valores da corrente de falta (em ampères), e as demais as tensões das fases 1, 2 e 3, em pu. Podemos observar que as fases envolvidas na falta apresentam valor unitário menor, e a fase não envolvida pode haver um leve aumento em relação à tensão nominal.

Tabela 8 - Tensões e Correntes para fases adjacentes.

Faltas Fases Adjacentes						
Barra	Fases		Corrente(A)	Tensão Fase 1(p.u.)	Tensão Fase 2(p.u.)	Tensão Fase 3(p.u.)
800	1	2	2339779	0,533	0,517	1,050
800	2	3	2339782	1,050	0,533	0,517
802	1	2	19583	0,515	0,515	1,028
802	2	3	18566	1,009	0,528	0,528
806	1	2	11751	0,514	0,514	1,027
806	2	3	11141	1,008	0,527	0,527
808	1	2	1390	0,499	0,499	1,010
808	2	3	1319	0,978	0,519	0,519
812	1	2	686	0,481	0,481	0,990
812	2	3	652	0,944	0,509	0,509
814	1	2	490	0,467	0,467	0,975

814	2	3	465	0,917	0,501	0,501
814R	1	2	461	0,508	0,508	0,997
814R	2	3	451	0,998	0,514	0,514
850	1	2	461	0,508	0,508	0,997
850	2	3	451	0,998	0,514	0,514
816	1	2	460	0,508	0,508	0,997
816	2	3	449	0,998	0,514	0,514
824	1	2	410	0,503	0,503	0,989
824	2	3	401	0,990	0,509	0,509
828	1	2	407	0,503	0,503	0,988
828	2	3	397	0,989	0,509	0,509
830	1	2	335	0,493	0,493	0,972
830	2	3	326	0,973	0,500	0,500
854	1	2	334	0,493	0,493	0,972
854	2	3	325	0,973	0,499	0,499
832	1	2	234	0,514	0,514	1,020
832	2	3	227	1,022	0,522	0,522
858	1	2	227	0,513	0,513	1,018
858	2	3	221	1,020	0,521	0,521
834	1	2	220	0,511	0,511	1,016
834	2	3	214	1,017	0,519	0,519
860	1	2	218	0,511	0,511	1,015
860	2	3	211	1,017	0,519	0,519
842	1	2	220	0,511	0,511	1,016
842	2	3	213	1,017	0,519	0,519
836	1	2	214	0,511	0,511	1,015
836	2	3	208	1,017	0,519	0,519
840	1	2	213	0,511	0,511	1,015
840	2	3	207	1,016	0,519	0,519
862	1	2	214	0,511	0,511	1,015
862	2	3	208	1,017	0,519	0,519
844	1	2	218	0,511	0,511	1,015
844	2	3	212	1,017	0,519	0,519
846	1	2	214	0,511	0,511	1,016
846	2	3	207	1,017	0,519	0,519
848	1	2	213	0,511	0,511	1,016
848	2	3	206	1,017	0,519	0,519
852R	1	2	234	0,514	0,514	1,020
852R	2	3	227	1,022	0,522	0,522
888	1	2	755	0,489	0,489	1,001
888	2	3	732	1,000	0,507	0,507
852	1	2	253	0,476	0,476	0,943
852	2	3	246	0,945	0,483	0,483
890	1	2	397	0,449	0,449	0,914
890	2	3	378	0,910	0,471	0,471

Com as Tabelas 6, 7 e 8, e podemos calcular as reatâncias até o ponto de falta, conseguindo demonstrar a múltipla estimação, e onde ela ocorre nesse sistema. A Tabela 9 mostra as reatâncias de falta de cada fase para faltas trifásicas. A obtenção do valor se dá através da fórmula apresentada em 3.8. Os valores destacados representam as barras onde ocorrem a múltipla estimação.

Para a demonstração do cálculo, pegamos, por exemplo, uma falta ocorrido no barramento 802.

$$X_{802} = \frac{U}{I} * \text{sen}\varphi = \frac{24900}{21802} * \text{sen}(\arctan(0,7))$$

$$X_{802} = 0,773314$$

Para as outras fases e barras o processo se dá de forma análoga.

Tabela 9 - Reatância para Faltas trifásicas

Faltas trifásicas			
Barra	X_1	X_2	X_3
800	0,010689	0,010689	0,010689
802	0,773314	0,797829	0,867427
806	1,288876	1,329427	1,445803
808	9,771431	11,23305	11,21743
812	19,79866	20,89194	22,72209
814	27,75445	29,27047	31,87106
814R	30,25235	30,10677	32,92928
850	30,25235	30,10677	32,92928
816	30,37385	30,21468	33,05842
824	33,91519	33,99152	37,05449
828	34,22212	34,26787	37,38313
830	35,82583	37,53393	40,66176
854	36,02214	37,72114	40,88155
832	50,96155	54,21568	58,40222
858	52,59232	55,61094	52,17492
834	54,10732	57,51397	53,88557
860	54,78367	58,1776	54,55635
842	54,33091	57,73349	54,10732
836	55,7122	59,08662	55,47713
840	55,94928	59,55187	55,7122
862	55,7122	59,31833	55,47713
844	54,78367	58,1776	54,55635
846	55,94928	59,31833	55,7122
848	55,94928	59,55187	55,94928

852R	50,96155	54,21568	58,40222
888	24,48638	23,67761	24,63144
852	47,12573	49,92137	54,02205
890	41,36494	42,66283	42,41578

Pode-se observar que as barras 860 e 844 (destacado em amarelo) têm os mesmos valores de reatância de falta para as três fases, ou seja, elas têm a mesma distância elétrica a partir do medidor no início da linha. O mesmo acontece com todas as fases das barras 836 e 862 (destacado em laranja). Entre as barras 840, 846 e 848 (destacado em azul), nem todas as reatâncias são iguais, mas, como dito na teoria, para calcular a reatância de faltas trifásicas pode-se usar a tensão e corrente de qualquer uma das fases. Portanto, se calculada a reatância através da fase 1, todas as 3 têm o mesmo valor. Caso seja usada a fase 2, as barras 840 e 848 têm os mesmos valores. O mesmo acontece para a fase 3, porém temos igualdade de reatâncias entre as barras 840 e 846.

5.2 Múltipla Estimação

MORALES-ESPAÑA; MORA-FLÓREZ; VARGAS-TORRES (2009) conduzem a simulação do método proposto para o sistema do IEEE de 34 barras. Segundo o artigo, foram simulados 2.200 casos para 4 tipos de falta (8.800 simulações ao total), com a resistência de falta variando de 0Ω à 40Ω . Os resultados dos testes estão representados nas Tabelas 10 e 11. Nelas temos primeiro o local da falta, e, entre parenteses, em qual local do trecho (em porcentagem). Nas demais colunas temos as múltiplas estimações (primeira, segunda, terceira e quarta). A decisão de qual ramo está localizada a falta se dá onde o valor do erro for menor.

Tabela 10 - Resultados da simulação com $R_f = 0\Omega$

Local da Falta		Primeira estimacão		Segunda estimacão		Terceira estimacão		Quarta estimacão	
Trecho	tipo de falta	Trecho	Erro	Trecho	Erro	Trecho	Erro	Trecho	Erro
858-834 (80)	monofásica	858-834(80)	6.26E-04	832-890(2.59)	1.00E-01	-	-	-	-
	bifásica	858-834(80)	5.67E-03	832-890(2.57)	7.10E-02	-	-	-	-
	bifásica com terra	858-834(79.2)	7.92E-04	832-890(2.57)	1.60E-01	-	-	-	-
	trifásica	858-834(80)	2.36E-15	832-890(2.57)	6.40E-04	-	-	-	-
860-836 (50)	monofásica	860-836(50)	3.48E-04	844-846(46.08)	2.20E-02	832-890(3.86)	9.40E-02	-	-
	bifásica	860-836(49.5)	1.83E-03	844-846(47.14)	1.40E-02	832-890(3.79)	4.90E-02	-	-
	bifásica com terra	860-836(50)	1.65E-04	832-890(3.8)	1.20E-01	844-846(47.49)	0.14	-	-
	trifásica	860-836(50)	3.91E-14	832-890(3.8)	6.50E-04	844-846(47.35)	8.80E-04	-	-

836-840 (30)	monofásica	836-840(30)	1.49E-03	836-862(92.2)	1.30E-02	844-846(89.09)	3.30E-02	832-890(4.32)	8.10E-02
	bifásica	836-840(30)	1.84E-03	836-862(92.06)	9.30E-03	844-846(90.89)	1.90E-02	832-890(4.22)	4.70E-02
	bifásica com terra	836-840(30)	1.71E-03	836-862(92.2)	2.80E-03	844-846(91.27)	9.40E-02	832-890(4.23)	0.11
	trifásica	836-840(30)	5.56E-14	836-862(92.16)	5.30E-04	832-890(4.24)	6.60E-04	844-846(91.09)	8.20E-04
836-862 (80)	monofásica	836-862(80)	2.12E-04	836-840(26.03)	2.40E-02	844-846(88.17)	3.20E-02	832-890(4.31)	8.10E-02
	bifásica	836-862(79.4)	1.09E-04	836-840(26.07)	9.70E-03	844-846(89.96)	2.00E-02	832-890(4.21)	4.70E-02
	bifásica com terra	836-862(80)	2.12E-04	844-846(56.88)	1.80E-03	836-840(26.03)	2.40E-02	832-890(5.13)	4.70E-02
	trifásica	836-862(80)	1.03E-13	836-840(26.04)	5.30E-04	832-890(4.23)	6.6E-04	844-846(90.16)	7.90E-04
842-844 (50)	monofásica	842-844(50)	5.19E-04	832-890(3.18)	8.30E-02	834-860(47.53)	0.34	-	-
	bifásica	834-860(49.18)	1.62E-03	842-844(50)	1.10E-02	832-890(3.14)	5.40E-02	-	-
	bifásica com terra	842-844(50)	5.19E-04	832-890(4.03)	3.90E-02	858-834(98.8)	6.40E-02	-	-
	trifásica	842-844(50)	9.66E-14	834-860(47.3)	2.90E-04	832-890(3.15)	6.6E-04	-	-
844-846 (50)	monofásica	844-846(50)	2.54E-04	832-890(3.91)	5.60E-02	860-836(55.44)	1.03	-	-
	bifásica	844-846(50.12)	2.16E-03	860-836(53.9)	1.60E-02	832-890(3.82)	4.90E-02	-	-
	bifásica com terra	844-846(50)	2.54E-04	832-890(4.8)	2.40E-02	860-836(97.95)	0.58	-	-
	trifásica	844-846(50)	3.78E-14	832-890(3.83)	7.00E-04	860-836(53.6)	1.10E-03	-	-

Fonte: Adaptado de (MORALES-ESPAÑA; MORA-FLÓREZ; VARGAS-TORRES, 2009)

Tabela 11 - Resultado das simulações com $R_f = 40\Omega$

Local da Falta		Primeira estimacão		Segunda estimacão		Terceira estimacão		Quarta estimacão	
Trecho	tipo de falta	Trecho	Erro	Trecho	Erro	Trecho	Erro	Trecho	Erro
858-834 (80)	monofásica	858-834(82.5)	6.30E-04	832-890(3.37)	4.50E-02	-	-	-	-
	bifásica	858-834(81.6)	5.70E-03	832-890(2.57)	7.10E-02	-	-	-	-
	bifásica com terra	858-834(76.59)	5.10E-04	832-890(3.96)	6.50E-03	-	-	-	-
	trifásica	858-834(80.36)	2.40E-15	832-890(2.57)	6.40E-04	-	-	-	-
860-836 (50)	monofásica	860-836(51.25)	3.50E-04	844-846(37.63)	3.30E-03	832-890(4.68)	5.40E-02	-	-
	bifásica	860-836(48.70)	1.80E-03	844-846(46.27)	1.10E-02	832-890(3.79)	4.90E-02	-	-
	bifásica com terra	860-836(51.3)	1.70E-04	832-890(5.24)	6.50E-03	844-846(47.49)	0.14	-	-
	trifásica	860-836(50.17)	3.90E-14	832-890(3.8)	6.50E-04	844-846(47.35)	8.80E-04	-	-
836-840(30)	monofásica	844-846(57.77)	3.70E-05	836-862(31.62)	1.50E-03	844-846(96.64)	7.10E-03	832-890(5.14)	4.70E-02
	bifásica	836-862(63.44)	5.5E-04	836-862(28.86)	1.80E-03	844-846(89.94)	1.90E-02	832-890(4.22)	4.70E-02
	bifásica com terra	836-840(31.21)	1.70E-03	836-862(92.2)	2.80E-03	844-846(5.68)	1.10E-02	832-890(91.27)	9.40E-02
	trifásica	836-840(30.26)	5.60E-14	836-862(92.16)	5.30E-04	832-890(4.24)	6.60E-04	844-846(91.09)	8.20E-04

836-862(80)	monofásica	836-862(81.36)	2.10E-04	836-840(56.88)	1.80E-03	844-846(26.03)	2.40E-02	832-890(5.13)	4.70E-02
	bifásica	836-862(78.76)	1.10E-04	836-840(33.62)	3.20E-04	844-846(89.03)	2.00E-02	832-890(4.21)	4.70E-02
	bifásica com terra	836-862(79.87)	1.20E-05	844-846(5.67)	1.10E-02	836-840(26.03)	2.30E-02	832-890(90.33)	9.40E-02
	trifásica	836-862(80.09)	2.00E-13	836-840(26.04)	5.30E-04	832-890(4.23)	6.60E-04	844-846(90.16)	7.90E-04
842-844(50)	monofásica	842-844(51.36)	5.20E-04	832-890(4.03)	3.90E-02	834-860(95.83)	0.27	-	-
	bifásica	834-860(49.64)	1.00E-03	842-844(54.42)	1.10E-02	832-890(3.14)	5.40E-02	-	-
	bifásica com terra	842-844(50.94)	1.30E-03	832-890(87.42)	1.80E-03	858-834(4.64)	2.60E-02	-	-
	trifásica	842-844(50.48)	9.70E-14	834-860(47.3)	2.90E-04	832-890(3.15)	6.60E-04	-	-
844-846(50)	monofásica	844-846(52.43)	2.50E-04	832-890(4.8)	2.40E-02	860-836(97.95)	0.58	-	-
	bifásica	844-846(48.34)	2.00E-03	860-836(53.9)	1.60E-02	832-890(3.82)	4.90E-02	-	-
	bifásica com terra	844-846(51.39)	5.20E-05	832-890(5.4)	6.80E-02	860-836(99.76)	1.44	-	-
	trifásica	844-846(50.15)	3.80E-14	832-890(3.83)	7.00E-04	860-836(53.6)	1.10E-03	-	-

Fonte: adaptado de (MORALES-ESPAÑA; MORA-FLÓREZ; VARGAS-TORRES, 2009)

As Tabelas 10 e 11 mostram alguns resultados obtidos na simulação. Na primeira com resistência de falta igual a 0Ω , e na segunda igual a 40Ω . Os valores em destaque representam as simulações em que houve erros, ou seja, as que as faltas não foram localizadas no ramo correto.

Os testes apontaram uma eficiência maior do método apresentado para faltas monofásicas, com mais de 96% de acerto nas simulações. Já para faltas bifásicas, o programa apresentou erros maiores, tendo valor mínimo de acerto de 91,5%, isso em faltas com resistência 40Ω .

O método proposto se mostrou satisfatório, pois, como mostrado na simulação, a taxa de acerto é alta, conseguindo melhorar o método de localização de faltas.

5.3 Análise do método

A pesquisa realizada indica que a utilização do método do cálculo da reatância para a obtenção da distância da falta, apesar de ser de simples implementação, apresenta falhas, como a múltipla estimação. O método proposto por MORALES-ESPAÑA; MORA-FLÓREZ; VARGAS-TORRES, 2009 mostrou-se eficiente, diminuindo a probabilidade de ocorrência da múltipla estimação, porém ela ainda acontece em alguns casos.

6. Conclusão

Atualmente a energia elétrica é indispensável, e, com isso, torna-se necessário garantir sempre o fornecimento de energia e com qualidade. Porém acidentes podem ocorrer, fazendo com que esse fornecimento seja interrompido, sendo então de extrema importância identificar no sistema a localização do problema, para que possa ser resolvido da forma mais rápida possível.

Com esse trabalho podemos ver que em sistemas de distribuição a localização das chamadas faltas é mais complicada, devido ao fato desse sistema apresentar variações de cargas, diferentes tipos de cabos e muitas ramificações. O método de localização de falta apresentado por essa monografia, a do cálculo da distância pelo cálculo da reatância de falta, tem como vantagem a fácil implementação, porém não é preciso. Por utilizar apenas os dados das componentes envolvidas com a falta, acaba gerando resultados imprecisos, acarretando em múltiplas estimações.

A fim de minimizar ou erradicar as múltiplas estimações, o método apresentado, o qual utiliza-se não apenas os dados das fases onde a falta ocorreu para o cálculo da distância, mas tanto os dados tanto da fase faltosa, quanto os dados das fases não envolvidas com a falta. Através desse novo equacionamento, a estimativa da localização da falta apresentou melhoras, pois, através dele, mesmo que hajam múltiplas estimações, é possível determinar qual o ramo onde a falta ocorreu.

Apesar de ser melhor que o primeiro método de cálculo da distância, o novo método apresentado apresentou erros, mostrando que ele não é uma solução definitiva para esse problema. A fim de poder erradicar a múltipla estimativa, pode-se aliciar outros mecanismos na hora da decisão de qual ramo a falta ocorreu. Um possível meio, seria a utilização de medidores inteligentes, posicionados em locais onde o problema ainda é recorrente. Caso aconteça uma falta no ramo onde o medidor inteligente está alocado, ele manda a informação para o relé no começo da linha, auxiliando na localização.

7. Referências

ABRADEE. **Redes de Energia Elétrica - Abradee - Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

ANEEL. **Regulação dos Serviços de Distribuição - Regulação dos Serviços de Distribuição - ANEEL**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao/-/asset_publisher/nHNpDfkNeRpN/content/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao/656827?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fregulacao-da-distribuicao%3Fp_id%3D101_INSTANCE_nHNpDfk>. Acesso em: 15 jul. 2017.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição**, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo2_Revisão7.pdf/c1cf5bd8-b2bc-4d57-9b42-285a7fd8c2a5>. Acesso em: 14 maio. 2019

ASHOK, S. P. Modeling and Protection Scheme for IEEE 34 Radial Distribution Feeder with and Without Distributed Generation. **University of Wisconsin Milwaukee**, n. May, 2014.

BARBOSA, C. F. et al. distribuição de energia elétrica. n. iii, p. 19–24, 2013.

COATE, B. D.; WAREHAM, D. C. Decreasing Momentary Outages with Specific Distribution Feeder Improvements. v. 37, n. 2, p. 458–463, 2001.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2011.

DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE. IEEE 4 Node Test Feeder. **Ieee**, p. 1–9, 2006.

FALCÃO, D. M. Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid. **III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, p. 1–5, 2010.

FERREIRA, A. N. et al. Sistema de Localização de Falta na Rede de Distribuição da CELPE. p. 1–8, 2008.

FERREIRA, G. D. Otimização da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Uma Abordagem Considerando a Seleção e Alocação de Dispositivos de Proteção e Manobras. p. 1–182, 2009.

GAUTIER, L. R. Localizadores digitais de faltas para linhas de transmissão de alta tensão. 1996.

GERs, J. M.; HOLMES, E. J. **Protection of electricity distribution networks**. [s.l.] Institution of Electrical Engineers, 2004.

GERs, J. M.; J. HOLMES, E. Protection of Electricity Distribution networks. p. 357, 2004.

HEALTH, C. P. r P Fo ee ie w On r P Fo ee r R w On ly. p. 1–8, 2014.

JUNIOR, S. B. DA S. Análise de operação de sistemas de distribuição utilizando o OpenDSS. 2010.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. DE; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**, 2005.

KERSTING, W. H. **Distribution system modelling and analysis**. [s.l.: s.n.].

L9427compilada. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9427compilada.htm>. Acesso em: 11 jun. 2019.

LIAO, Y. Generalized Fault-Location Methods for Fault-Location System for Multiterminal Transmission Lines. **Ieee Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 1, p. 53–64, 2011.

MORA-FLOREZ, J.; BARRERA-NUNEZ, V.; CARRILLO-CAICEDO, G. Fault Location in Power Distribution Systems Using a Learning Algorithm for Multivariable Data Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 3, p. 1715–1721, 2007.

MORA-FLÓREZ, J.; MELÉNDEZ, J.; CARRILLO-CAICEDO, G. Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 78, n. 4, p. 657–666, 2008.

MORALES-ESPAÑA, G.; MORA-FLÓREZ, J.; VARGAS-TORRES, H. Elimination of multiple estimation for fault location in radial power systems by using fundamental single-end measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 3, p. 1382–1389, 2009.

NOURI, H.; WANG, C.; DAVIES, T. An accurate fault location technique for distribution lines with tapped loads using wavelet transform. **2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings**, v. 3, p. 203–206, 2001.

PAULA, G. R. DE. Modelagem e análise estática de um alimentador real da CPFL Paulista. n. M, p. 7–20, 2016.

POWER & ENERGY SOCIETY. **Distribution Test Feeders - Distribution Test Feeder Working Group - IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee**. Disponível em: <<https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>>. Acesso em: 18 set. 2017.

RAMIREZ, J. M. et al. Impedance estimation through the Taylor-Kalman-Fourier filter applied to distance relays. **2014 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, PES**

T and D-LA 2014 - Conference Proceedings, v. 2014- Octob, p. 2–7, 2014.

SACHDEV, M. S. Determining locations of faults in distribution systems. **6th International Conference on Developments in Power Systems Protection**, v. 1997, p. 188–191, 1997.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; EUGENIUSZ, R. **Fault Location on Power Networks**. [s.l: s.n.].

SATHLER DE QUEIROZ, P. V. 3 Mapeamento das curvas de carga. [s.d.].

Sensores e indicadores de falta. p. 159–164, [s.d.].

Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica - ANEEL. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/distribuicao2>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

STRINGFIELD, T. W.; MARIHART, D. J.; STEVENS, R. F. Fault Location Methods for Overhead Lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems**, v. 76, n. 3, p. 518–529, 1957.

T. TAKAGI. Development of a New Type Fault Ldcator Using the One-Terminal Voltage and Current Data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-101, n. 8, p. 2892–2898, 1982.

TOMSOVIC, K. et al. Designing the next generation of real-time control, communication, and computations for large power systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 93, n. 5, p. 965–979, 2005.

XU, L.; CHOW, M. C.; GAO, X. Z. Comparisons of logistic regression and artificial neural network on power distribution systems fault cause identification. **Soft Computing in Industrial Applications, 2005. SMCia/05. Proceedings of the 2005 IEEE Mid-Summer Workshop on**, p. 128–131, 2005.

ZAMORA-MENDEZ, A. et al. Distance Relays Based on the Taylor-Kalman-Fourier Filter. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 3, p. 928–935, 2016.

ZIMMERMAN, K.; COSTELLO, D. Impedance-based fault location experience. **2005 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers**, v. 2005, p. 211–226, 2005.