

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARTÍN CRUZ RODRÍGUEZ PAZ

**FORMULAÇÃO INTEGRADA PARA A
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Porto Alegre
2010

MARTÍN CRUZ RODRÍGUEZ PAZ

**FORMULAÇÃO INTEGRADA PARA A
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre
2010

MARTÍN CRUZ RODRÍGUEZ PAZ

**FORMULAÇÃO INTEGRADA PARA A
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela (Virginia Polytechnic Institute and State University – Blacksburg, Estados Unidos.)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Newton Geraldo Bretas, USP

Doutor pela (University of Missouri – Columbia, Estados Unidos)

Prof. Dr. Sergio Luis Haffner, UFRGS

Doutor pela (Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil)

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela (Chalmers University Of Technology – Göteborg, Suécia)

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Agosto de 2010.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Natália por ser, cada dia, essa pessoa especial que completa minha vida, por ter me dedicado tanto amor e compreensão no percurso desta aventura, sem ela nada teria sentido, e à minha família, em especial aos meus pais, exemplos de sacrifício e amor, por terem me incentivado sempre a enfrentar novos desafios.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

À Natália, minha Esposa e minha Amiga, por ter sido minha força em cada momento de nossa vida juntos.

Ao Mario e à Karina por terem recebido com tanta amabilidade nos meus primeiros passos no Brasil, e especialmente ao Mario pela ajuda incondicional e os conselhos nesta etapa final da Dissertação.

Ao meu orientador, Professor Dr. Arturo Suman Bretas, pela sua confiança e dedicação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Robert, um verdadeiro amigo, sem quem não poderia ter chegado até aqui.

Ao Renato, pela sua amizade, pelo exemplo de caráter e princípios e pela sua ajuda incondicional.

Ao Roberto, pelas conversas e pelo apoio nos momentos difíceis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEE, pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

À CAPES e à CNPq pela pelo apoio financeiro fornecido através da bolsa de mestrado.

À Transener Internacional Ltda., em especial ao Enrique e ao Augustinho, pelo apoio e compreensão na etapa de conclusão deste trabalho.

À Luciana, pela ajuda e tempo dedicado na correção do trabalho.

A todos aqueles que, de uma ou outra forma, contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho

Por último, mas principalmente, agradeço ao povo Brasileiro por ter-me acolhido tão fraternalmente, fazendo com que hoje sinta o Brasil como minha casa.

RESUMO

Neste trabalho apresentar-se-à um novo método para a localização de faltas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Este combina duas técnicas, uma baseada na Impedância Aparente e outra nas Ondas Viajantes. A técnica de localização por impedância aparente utiliza o sinal armazenado pelo relé, analisando-o na sua frequência fundamental. O resultado desta análise é a estimativa da distância da falta. Esta representa a distância elétrica desde o relé até a falta, o que em sistemas de distribuição radiais, com laterais, pode gerar mais de uma resposta como certa. A técnica das ondas viajantes é utilizada para a localização da seção faltosa utiliza os sinais de alta frequência presentes no sinal. O resultado desta análise é a estimativa da seção onde ocorreu a falta. Assim, estas duas técnicas complementam-se para fornecer a posição da falta.

Palavras-chave: Localização de Faltas, Impedância Aparente, Ondas Viajantes, Sistemas de Distribuição.

ABSTRACT

This work presents a new hybrid method to Fault Location in Power Distribution Systems. This work combines two techniques, one based on Apparent Impedance and the other based on Traveling Waves. Apparent Impedance based methods use the signals stored in the relay. That signals are analyzed in their fundamental frequency. It is obtained as result the distance from sub-station to the fault. This distance represents the electrical distance from the sending end to the fault, but in Power Distribution Systems with several laterals these fault location could be more than one. The Traveling waves method use the high frequencies presents in faulted signals. Obtain with this the faulted section. Thus both techniques are complements, resulting in only one distance to the fault point.

Keywords: Fault Location, Aparent Impedance, Traveling Waves, Distribution Systems.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS	12
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação do Trabalho	16
1.2 Objetivos	16
1.3 Estrutura do Trabalho	16
2 MODELAGEM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	18
2.1 Modelagem de Linhas de Distribuição	18
2.1.1 Modelagem de Linhas de Distribuição de Energia Elétrica por Parâmetros Concentrados	20
2.1.2 Equações de Carson	23
2.1.3 Modelos de Parâmetros Concentrados	25
2.2 Modelagem por Parâmetros Distribuídos	26
2.2.1 Modelo J. Marti (FD)	27
2.2.2 Modelo L. Marti (FDQ)	27
2.2.3 Modelo T. Noda	27
2.3 Considerações Finais	27
3 LOCALIZAÇÃO DE FALTA – ESTADO DA ARTE	28
3.1 Técnicas de Determinação da Distância da Falta	28
3.1.1 Determinação da Distância da Falta pela Impedância Aparente	28
3.1.2 Equações para a localização	33
3.1.3 Determinação da distância por Ondas Viajantes	36
3.2 Determinação da Seção Faltosa	37
3.2.1 Técnica para a Determinação da Seção Faltosa	38
3.3 Considerações Finais	40
4 METODOLOGIA PROPOSTA	41
4.1 Algoritmo Proposto	41
4.2 Impedância Aparente	43
4.3 Localização da Seção Faltosa	43

4.3.1	Tempo de Viagem das Ondas Devido a Falta	48
4.3.2	Cálculo do Índice da Falta	49
4.4	Considerações Finais	50
5	ESTUDO DE CASO E RESULTADOS	51
5.1	Estudo de Caso	51
5.2	Sistema Teste	51
5.2.1	Características do Sistema Teste	51
5.3	Casos estudados	53
5.3.1	Características do Carregamento	53
5.4	Resultados	53
5.4.1	Faltas na fase <i>a</i>	53
5.4.2	Faltas na fase <i>b</i>	55
5.4.3	Faltas na fase <i>c</i>	58
5.4.4	Faltas na fase <i>a</i> com resistência de falta	60
5.5	Considerações Finais	61
6	CONCLUSÕES	63
6.1	Conclusões	63
6.2	Trabalhos Futuros	64
	REFERÊNCIAS	65
	ANEXO A SISTEMA TESTE	69

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Condutores e as suas imagens. Adaptado de (KERSTING, 2002) . . .	23
Figura 2:	Modelo π trifásico. Adaptado de (KERSTING, 2002).	25
Figura 3:	Modelo RL trifásico. Adaptado de (KERSTING, 2002).	26
Figura 4:	Falta fase-terra na fase A, adaptada de (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997)	29
Figura 5:	Diagrama unifilar de um sistema de Distribuição simples, adaptado de (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997)	31
Figura 6:	Falta Fase-Terra, adaptada de (FILOMENA et al., 2009).	33
Figura 7:	Diagrama unifilar de uma seção faltosa.	38
Figura 8:	Diagrama de fluxo simplificado do algoritmo de localização.	42
Figura 9:	Fluxograma da sub-rotina de análise por impedância aparente.	43
Figura 10:	Diagrama de fluxo do algoritmo de determinação da seção faltosa. . .	44
Figura 11:	Propagação de uma onda que atinge uma descontinuidade.	46
Figura 12:	Diagrama de <i>lattice</i>	47
Figura 13:	Sistema teste utilizado para a validação do algoritmo proposto.	52
Figura 14:	Faltas nas fases "a", "b" e "c" na condição de carregamento 1.	60
Figura 15:	Faltas nas fases "a", "b" e "c" na condição de carregamento 2.	60
Figura 16:	Faltas nas fases "a", "b" e "c" na condição de carregamento 3.	61
Figura 17:	Sinais de tensão e corrente simulados para o sistema estudo de caso. .	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Guia para modelagem de linhas aéreas, adaptada de (MARTINEZ; GUSTAVSEN; DURBAK, 2005).	19
Tabela 2:	Dados das seções	52
Tabela 3:	Condição de carregamento 1.	53
Tabela 4:	Condição de carregamento 2.	54
Tabela 5:	Condição de carregamento 3.	54
Tabela 6:	Faltas na fase <i>a</i> , condição de carregamento 1.	54
Tabela 7:	Faltas na fase <i>a</i> , condição de carregamento 1.	55
Tabela 8:	Faltas na fase <i>a</i> , condição de carregamento 2.	55
Tabela 9:	Faltas na fase <i>a</i> , condição de carregamento 2.	55
Tabela 10:	Faltas na fase <i>a</i> , condição de carregamento 3.	56
Tabela 11:	Faltas na fase <i>a</i> , condição de carregamento 3.	56
Tabela 12:	Faltas na fase <i>b</i> , condição de carregamento 1.	56
Tabela 13:	Faltas na fase <i>b</i> , condição de carregamento 1.	57
Tabela 14:	Faltas na fase <i>b</i> , condição de carregamento 2.	57
Tabela 15:	Faltas na fase <i>b</i> , condição de carregamento 2.	57
Tabela 16:	Faltas na fase <i>b</i> , condição de carregamento 3.	57
Tabela 17:	Faltas na fase <i>b</i> , condição de carregamento 3.	58
Tabela 18:	Faltas na fase <i>c</i> , condição de carregamento 1.	58
Tabela 19:	Faltas na fase <i>c</i> , condição de carregamento 1.	58
Tabela 20:	Faltas na fase <i>c</i> , condição de carregamento 2.	59
Tabela 21:	Faltas na fase <i>c</i> , condição de carregamento 2.	59
Tabela 22:	Faltas na fase <i>c</i> , condição de carregamento 3.	59
Tabela 23:	Faltas na fase <i>c</i> , condição de carregamento 3.	59
Tabela 24:	Faltas na fase <i>a</i> com resistência de falta, na condição de carregamento 1.	61

LISTA DE ABREVIATURAS

SDEE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
SEP	Sistemas elétricos de potência
LF	Localização de Falhas
LSF	Localização da Seção Faltosa
CA	Corrente Alternada
Rf	Resistência de Falta
SE	Subestação
IA	Impedância aparente
OV	Ondas viajantes
RNA	Redes Neurais Artificiais
DMG	Distância média geométrica
RMG	Raio médio geométrico
TW	Transformada <i>wavelet</i>
ATP	Alternative transient program
EMTP	Electromagnetical transient program
BPA	Bonneville Power Administration
IEEE	International Electrical and Electronic Engineers
RDP	Registrador de Perturbações

LISTA DE SÍMBOLOS

R_{cc}	Resistência de corrente contínua
ρ_T	Resistividade do condutor, à temperatura T.
A	Área da seção transversal
l	Longitude
T	Temperatura
R	Resistência do condutor
P_{perdas}	Potência de perdas
I	Corrente elétrica
L	Indutância
δ	fluxo magnético concatenado
V_{ki}	Diferença de potencial entre os pontos k e i
ϵ	Permissividade do meio
q_m	Densidade de carga do condutor
D	Distância entre condutores
z_{ii}	Impedância própria do condutor i
z_{ij}	Impedância mútua entre o condutor i e o j
r	Resistência do condutor
ω	Frequência angular do sistema
RD_i	Raio do condutor i
f	Frequência do sistema
ρ	Resistividade da terra
S_{ij}	Distância entre o condutor i e a imagem j
θ	Ângulo entre as linhas formadas entre o condutor e a sua imagem
Y_{abc}	Admitância <i>shunt</i> da linha
Z_{abc}	Impedância série da linha
R_f	resistência de falta

V_{abc}	tensões nas fases do terminal local
V'_{abc}	tensões nas fases no terminal remoto
I_{abc}	correntes de fase no terminal local
I_{cap}	corrente capacitiva
V_{S_a}	tensão na fase "a" no terminal local
$I_{S_{abc}}$	corrente das fases no terminal local
I_F	corrente de falta
R_F	resistência de falta
V_k	tensão no nó k
V_{k+1}	tensão no nó $k + 1$
I_k	corrente na seção k
I_{k+1}	corrente na seção $k + 1$
Z	impedâncias das linhas
V_F	tensão no ponto da falta
Z_{eq}	impedância equivalente
$Z_{load_{1m}}$	impedância equivalente do sistema na condição pré-carga
$Z_{load_{2m}}$	impedância equivalente na condição padrão
V'_{S_m}	tensão no terminal local na condição pré-falta
I'^{S_m}	corrente no terminal local na condição pré-falta
Δ_{load}	coeficiente de variação de carga
x	distância da falta
I_{S_f}	corrente durante a falta no terminal local
$V_{S_{fm}}$	tensão medida no terminal local na fase m durante a falta
$I_{S_{fm}}$	correntes nas fases medidas no terminal local na fase m durante a falta
$I_{L_{abc}}$	corrente de carga
$Y_{R_{abc}}$	admitâncias da linha no terminal remoto
I_{F_m}	corrente de falta na fase m
L	comprimento da linha
Z_F	impedância da falta
δ	erro admissível
P	matriz de transformação modal
$V_{0,\alpha,\beta}$	tensões em componentes modais
$V_{a,b,c}$	tensões de fase
Z_f	matriz de impedância da linha na frequência predominante da falta

Y_f	matriz de admitância da linha na frequência predominante da falta
γ	matriz de propagação modal
k	índice da falta
t_a	tempo de viagem do sinal da falta
t_b	tempo de viagem da onda na seção
v_i	onda de tensão que atinge a descontinuidade
v_1^+	onda de tensão que viaja no sentido positivo do eixo x
i_i	onda de corrente que atinge a descontinuidade
i_1^+	onda de corrente que viaja no sentido positivo do eixo x
Z_1	impedância característica da linha
Z_2	impedância característica da linha
v_r	onda de tensão refletida na descontinuidade
v_1^-	onda de tensão que viaja no sentido negativo do eixo x
i_r	onda de corrente refletida na descontinuidade
i_1^-	onda de corrente que viaja no sentido negativo do eixo x
v_t	onda de tensão refratada na descontinuidade
v_2^+	onda de tensão que viaja no sentido positivo do eixo x
i_t	onda de corrente refratada na descontinuidade
i_2^+	onda de corrente que viaja no sentido positivo do eixo x
Γ_t	coeficiente de transmissão
Γ_r	coeficiente de reflexão
I	matriz identidade
τ	tempo de viagem das ondas na seção
ν	velocidade de propagação da onda na seção
F_s	frequência de amostragem
N_p	numeros de amostra
Y_S	admitância <i>shunt</i> desde o terminal remoto até a falta

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica – **SDEE** encontram-se constantemente expostos a faltas que afetam a confiabilidade, segurança e, principalmente, o fornecimento da energia elétrica. As faltas nos **SDEE** são dos tipos mais variados, descargas atmosféricas, árvores que encostam nas linhas e ruptura dos isoladores são as mais comuns em sistemas aéreos (FILOMENA, 2008; FILOMENA et al., 2009). Em **SDEE** subterrâneos as faltas se devem principalmente à ruptura do isolamento dos cabos, seja pelo envelhecimento ou pela ação de agentes externos como roedores entre outros (FILOMENA, 2008; FILOMENA et al., 2009).

Esquemas de proteção são importantes para a estabilidade do sistema, e para a segurança dos usuários e da rede. Quando a atuação dos esquemas de proteção é detectada, as equipes de manutenção são enviadas até o local da falta. Uma pronta e precisa determinação do local da falta acelera o processo de restabelecimento do serviço (OLIVEIRA et al., 2009). Durante anos a localização da falta foi realizada por inspeção visual ao longo da linha. Também eram utilizadas outras técnicas como o método da força bruta, que inclui o re-chaveamento do sistema em falta, telefonemas dos consumidores e também o odor de queimado dos condutores (OLIVEIRA et al., 2009).

Em anos recentes o setor de energia elétrica passou por uma forte mudança regulamentatória (MAGNAGO; ABUR, 1999). Entre estas, se destacam a punição das empresas pelo não fornecimento de energia. Esta punição, fez com que o desenvolvimento de novas técnicas de localização, rápidas e confiáveis tornara-se uma questão relevante para as empresas (MAGNAGO; ABUR, 1999).

Neste trabalho, pretende-se apresentar uma nova formulação para a localização de faltas (**LDF**) em **SDEE**. Esta combina duas técnicas, a primeira baseada na Impedância Aparente (**IA**) para determinar a distância até a falta, e a segunda nas Ondas Viajantes (**OV**) para identificar a seção onde ocorreu a falta. A técnica de localização por **IA** utiliza o sinal armazenado pelo relé, na frequência fundamental do sistema, e o resultado obtido é a estimativa da distância do relé até a falta. Porém esta estimativa representa a distância elétrica desde o ponto da medição até a falta, e no caso de sistemas de distribuição radiais com múltiplos ramais isto pode ser satisfeito por mais do que um local de falta. A técnica de localização por ondas viajantes é apresentada neste trabalho para a localização da seção faltosa. A combinação das duas formulações permitirá a estimativa da seção e distância elétrica do ponto de medição até o local de falta.

Um método de localização híbrido, combinando a determinação da distancia por **IA** e utilizando Redes Neurais Artificiais (**RNA**), foi apresentado em (SALIM et al., 2006). No entanto este apresenta o problema de que para cada alteração do sistema as **RNA** devem ser treinadas novamente. Magnano *et. al.* apresentaram em (MAGNAGO; ABUR, 1999) uma técnica que utilizava ondas viajantes para determinar a seção faltosa, para

isso, descompunha o sinal nos seus coeficientes *wavelets*, e estes eram utilizados para caracterizar o sinal e assim determinar a seção faltosa. Esta proposta possui a limitação de que para cada modificação do sistema deveriam ser achadas novamente os coeficientes *wavelets* que caracterizam cada seção.

Nos dias atuais, uma formulação de **LDF** que considere as características típicas dos **SDEE** estimando um único local de falta através de dados de um terminal é ainda matéria de investigação.

1.1 Motivação do Trabalho

Quando a atuação dos esquemas de proteção é detectada, as equipes de manutenção são enviadas até o local da falta. Uma pronta e precisa determinação do local da falta acelera o processo de restabelecimento do serviço (OLIVEIRA et al., 2009). A construção de uma formulação que permita diminuir o tempo de resposta na restituição do serviço elétrico vem sendo alvo de pesquisa nos últimos tempos, e a obtenção de uma formulação que auxilie eficientemente na localização de defeitos e na rápida restituição a principal motivação deste trabalho.

1.2 Objetivos

Uma formulação de **LDF** em **SDEE** precisa e generalista permite um rápido restabelecimento da operação bem como um aumento da segurança da população. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento matemático e construção numérica de uma formulação para a **LDF** em **SDEE** baseada em dados de um terminal. Utilizando para isto ferramentas que permitam a implementação deste como sub-rotinas em relés digitais de proteção. Levando em consideração o exposto anteriormente, com respeito às limitações que os métodos utilizados neste trabalho apresentam quando utilizados isoladamente, a presente pesquisa tem os seguintes objetivos:

- desenvolver e construir numericamente uma formulação baseada em cálculos elétricos e dados de um terminal para a localização de faltas em **SDEE** que possa ser inserida como sub-rotina de um relé digital;
- estender o algoritmo de localização da seção faltosa, apresentado em (OLIVEIRA et al., 2007, 2009), para a localização de faltas com resistência não nula;
- avaliar o desempenho da proposta por estudo de caso de um **SDEE** simulado numericamente.

1.3 Estrutura do Trabalho

A dissertação possui a seguinte estrutura:

- no Capítulo 2 são apresentadas algumas das principais técnicas de modelagem de linhas de distribuição de Energia Elétrica, que depois são utilizadas nas simulações do estudo de caso;
- no Capítulo 3 é apresentado o estado-da-arte das técnicas de localização de faltas em **SDEE**, descrevendo brevemente cada uma;

- no Capítulo 4 é apresentada a formulação de **LDF** para **SDEE** proposta, assim como o algoritmo desenvolvido;
- o Capítulo 5 apresenta o **SDEE** escolhido para a avaliação do algoritmo apresentado no Capítulo 4 assim como os resultados obtidos e a sua análise;
- o Capítulo 6 apresenta as conclusões finais do presente trabalho.

2 MODELAGEM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

SDEE são, dentro dos sistemas de potência, os encarregados de levar a energia até os usuários finais em um nível de tensão que pode chegar a algumas dezenas de quilo volts. **SDEE** são compostos, basicamente, por subestações transformadoras, linhas de transporte de energia (aéreas e subterrâneas), transformadores, sistemas de proteção e cargas. Este capítulo tem por objetivo apresentar a modelagem matemática das linhas de **SDEE**.

2.1 Modelagem de Linhas de Distribuição

As Linhas de Distribuição de Energia Elétrica, também chamados de alimentadores, são os elementos do **SDEE** encarregados da ligação entre as cargas e as fontes de energia, neste caso, as subestações. Estas linhas são compostas de elementos condutores de eletricidade, que podem ser do tipo aéreo ou subterrâneo, tendo cada um as suas características particulares. Os alimentadores também podem ser classificados conforme o número de fases, trifásicos, bifásicos e monofásicos, e pela sua função, alimentadores primários e secundários (KERSTING, 2002).

O tipo mais comum de cabo para linhas de transmissão é constituído por fios colocados em camadas superpostas, formando coroas. Estas coroas estão encordoadas em sentidos opostos, para dessa forma evitar que o cabo se desenrole, e, também, para que o raio externo de uma coroa coincida com o raio interno da seguinte. Este tipo de disposições torna flexíveis até cabos de grande seção transversal (STEVENSON, 1986).

A modelagem das linhas é um aspecto muito importante na representação dos sistemas elétricos e dos fenômenos que neles são produzidos. Com esse intuito, foram desenvolvidos diferentes modelos que tentam atender cada um dos quesitos para uma boa representação dos fenômenos envolvidos.

Segundo (MARTINEZ; GUSTAVSEN; DURBAK, 2005) existem dois tipos de modelos para linhas de distribuição, Modelo de Parâmetros Concentrados e Modelo de Parâmetros Distribuídos. A seleção adequada do modelo depende, fundamentalmente, do comprimento da linha e da faixa de frequências a serem estudadas com o mesmo. A Tabela 2.1, adaptada de (MARTINEZ; GUSTAVSEN; DURBAK, 2005), apresenta um resumo das principais características a serem consideradas na modelagem de linhas aéreas.

Tabela 1: Guia para modelagem de linhas aéreas, adaptada de (MARTINEZ; GUSTAVSEN; DURBAK, 2005).

Tópico	Transitórios de Baixa Frequência	Transitórios com Frente de Onda Lenta	Transitórios com Frente de Onda Rápida	Transitórios com Frente de Onda Muito Rápida
Linhas Transpostas	Parâmetros concentrados em circuito π polifásico	Parâmetros distribuídos em modelo polifásico	Parâmetros distribuídos em modelo polifásico	Parâmetros distribuídos em modelo monofásico
Assimetria das Linhas	Importante	As assimetrias capacitivas e indutivas são sempre importantes, exceto para estudos estatísticos, onde a assimetria indutiva é desprezível	Desprezível apenas para simulações monofásicas	Desprezível
Parâmetros Dependentes da Frequência	Importante	Importante	Importante	Importante
Efeito Corona	Importante caso a tensão de fase dos condutores ultrapassar a tensão de incidência do efeito corona	Desprezível	Muito importante	Desprezível

2.1.1 Modelagem de Linhas de Distribuição de Energia Elétrica por Parâmetros Concentrados

Os modelos de parâmetros concentrados representam as linhas por elementos concentrados com valores calculados em uma determinada frequência, sendo eles, adequados para estudos de regime permanente (MARTINEZ; GUSTAVSEN; DURBAK, 2005). Este modelo não é adequado para estudos de transitórios já que ele só representa corretamente uma frequência específica, porém é utilizado também para estudos de transitórios conectando elementos-em cascata (Power System Relay Committee, 2004).

A modelagem das linhas, quando utilizados parâmetros concentrados, baseia-se em quatro elementos elétricos básicos. Estes são, dois do tipo série e dois do tipo derivação:

- Série:
 - Resistência Ôhmica,
 - Indutâncias próprias e mútuas.
- Derivação:
 - Condutância,
 - Capacitância.

2.1.1.1 Resistência

A resistência elétrica que um condutor apresenta ao passo da corrente contínua numa determinada temperatura é definida por (1) (GLOVER; SARMA, 2003):

$$R_{cc} = \frac{\rho_T \cdot l}{A} [\Omega] \quad (1)$$

onde:

R_{cc} Resistência elétrica que um condutor apresenta ao passo da corrente contínua em $[\Omega]$.

ρ_T resistividade do condutor $[\Omega \cdot m]$ à temperatura T $[^{\circ}C]$

l longitude do condutor $[m]$

A área da seção transversal do condutor $[m^2]$

Segundo (SAADAT, 2002) a resistência de um condutor é afetada por três fatores: frequência, o trançado e a temperatura. A corrente alternada circulando pelos condutores faz com que a corrente não circule uniformemente na seção e a densidade de corrente seja maior na periferia, fazendo com que a resistência seja maior do que a resistência de corrente contínua. Este efeito é conhecido como efeito "skin" ou efeito pelicular, sendo a resistência de corrente alternada da ordem de 2% maior que a de corrente contínua (SAADAT, 2002). A resistividade dos metais utilizados para a construção dos condutores varia linearmente com a temperatura (GLOVER; SARMA, 2003), isto é:

$$\rho_{T_2} = \rho_{T_1} \frac{T_2 + T}{T_1 + T} \quad (2)$$

onde:

ρ_{T_1} resistividade $[\Omega \cdot m]$ à temperatura de T_1 $[^{\circ}C]$,

- ρ_{T_2} resistividade [$\Omega \cdot m$] à temperatura de T_2 [$^{\circ}C$],
 T_1 temperatura em [$^{\circ}C$] na condição de operação 1,
 T_2 temperatura em [$^{\circ}C$] na condição de operação 2,
 T constante de temperatura que depende do material ¹.

A resistência de corrente alternada (ca) ou resistência *efetiva* de um condutor representa, segundo (GLOVER; SARMA, 2003), a relação entre as perdas no condutor e a corrente circulante como definido em (3);

$$R = \frac{P_{perdas}}{|I|^2} \quad (3)$$

onde:

- R resistência do condutor em [Ω],
 P_{perdas} potência de perdas em [W],
 I corrente elétrica em [A].

Para condutores de material magnético, como os fios de guarda feitos de aço, a resistência depende da magnitude da corrente, isso devido à presença de correntes magnéticas dentro do condutor que dependem da magnitude das mesmas (GLOVER; SARMA, 2003).

Manuais, assim como catálogos dos fabricantes, apresentam os valores de resistência dos condutores.

2.1.1.2 Indutância

A corrente conduzida pelo condutor produz um campo magnético no redor do condutor. Por definição, para materiais não magnéticos, a indutância L é a razão entre o fluxo magnético concatenado e a corrente I que circula pelo condutor (SAADAT, 2002).

$$L = \frac{\delta}{I} [H] \quad (4)$$

onde:

- L indutância em [H];
 δ fluxo magnético concatenado em [Wb];
 I corrente que circula no condutor em [A].

Da equação (4) pode-se ver que o problema consiste na determinação do fluxo concatenado no condutor.

O fluxo total concatenado num condutor produzido tanto pela corrente circulando por ele mesmo como pelas correntes que circulam pelos outros condutores é calculado por (5)(GLOVER; SARMA, 2003);

$$\delta_n = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_n \ln \frac{1}{RMG_n} + \sum_{i=2}^m I_i \ln \frac{1}{DMG} \right) \quad (5)$$

onde:

¹228, 1 $^{\circ}C$ para o Alumínio

δ fluxo total concatenado num condutor em $[Wb]$;

I_n são as n correntes circulantes pelos condutores em $[A]$;

DMG distâncias média geométrica em $[m]$;

RMG raio médio geométrico do condutor $[m]$.

A Indutância da linha pode ser então obtida por (6);

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{DMG}{RMG} \left[\frac{H}{m} \right] \quad (6)$$

Normalmente não é preciso calcular o RMG e o DMG para linhas convencionais. O RMG é fornecido pelos fabricantes, e pode ser encontrado em vários manuais. Quando as distâncias entre os condutores são grandes, em relação aos sub-condutores de cada um deles, o DMG é, aproximadamente, igual à distância entre os centros destes (GLOVER; SARMA, 2003).

2.1.1.3 Condutância

Segundo (GLOVER; SARMA, 2003), a condutância explica as perdas de potência ocorridas entre condutores e/ou condutores e terra. Para linhas aéreas esta perda de potência deve-se às correntes de fuga pelos isoladores e ao chamado efeito *corona*.

Estas perdas costumam ser muito pequenas comparadas, com as perdas por efeito Joule no condutor (GLOVER; SARMA, 2003), razão pela qual não são levadas em consideração neste trabalho.

2.1.1.4 Capacitância

A capacitância de uma linha é o resultado da diferença de potencial entre os condutores que a compõem (KERSTING, 2002; GLOVER; SARMA, 2003). Este potencial, determinado por (7), faz com que os condutores se carreguem eletricamente.

$$V_{ki} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \sum_{m=1}^M q_m \ln \frac{D_{im}}{D_{km}} \quad (7)$$

onde:

V_{ki} diferença de potencial entre o condutor i e o condutor k em $[V]$;

ϵ permissividade do meio em $\left[\frac{F}{m}\right]$;

q_m densidade de carga do condutor m em $\left[\frac{C}{m}\right]$;

D_{im} Distância entre os condutores i e m em $[m]$;

D_{km} Distância entre os condutores k e m em $[m]$.

Esta carga, por unidade de diferença de potencial, é a capacitância da linha (KUNDUR, 1994).

A capacitância é tão pequena nas linhas aéreas curtas, até 80 *km* (STEVENSON, 1986), que não é levada em consideração. Para linhas mais longas, assim como para redes subterrâneas o efeito da capacitância é não-desprezível (KUNDUR, 1994; KERSTING, 2002). Equacionamentos mais detalhados são apresentados em (KERSTING, 2002; STEVENSON, 1986; GLOVER; SARMA, 2003; SAADAT, 2002).

2.1.2 Equações de Carson

As Linhas de Distribuição de Energia Elétrica são tipicamente desbalanceadas, e na sua análise não devem ser realizadas simplificações quanto ao espaçamento, transposição e o tamanho dos condutores (KERSTING, 2002). Carson apresentou no seu artigo de 1926 as equações que, hoje, permitem determinar as impedâncias próprias e mútuas para um número arbitrário de condutores aéreos, sendo possível aplicar estas equações para o cálculo de linhas subterrâneas.

Carson (CARSON, 1926) assumiu que a terra é um sólido infinito com uma superfície plana e resistividade constante. Carson também utilizou os condutores de imagem, isto é que cada condutor numa dada distância da terra tem um outro condutor de imagem na mesma distância debaixo da terra.

A Figura 1 apresenta os condutores e as suas imagens.

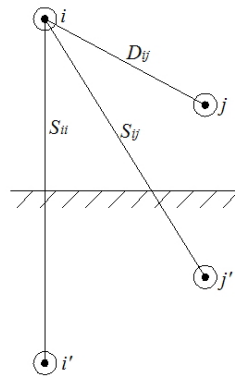


Figura 1: Condutores e as suas imagens. Adaptado de (KERSTING, 2002)

As equações originais apresentadas por Carson apresentam-se em (8) e (9).

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 4 \cdot \omega \cdot P_{ii} \cdot G + j \cdot \left(X_i \cdot 2 \cdot \omega \cdot \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4 \cdot \omega \cdot Q_{ii} G \right) \left[\frac{\Omega}{\text{mile}} \right] \quad (8)$$

$$\hat{z}_{ij} = 4 \cdot \omega \cdot P_{ij} \cdot G + j \cdot \left(2 \cdot \omega \cdot \ln \frac{S_{ij}}{RD_{ij}} + 4 \cdot \omega \cdot Q_{ij} G \right) \left[\frac{\Omega}{\text{mile}} \right] \quad (9)$$

$$X_i = 2 \cdot \omega \cdot G \cdot \ln \frac{RD_i}{RMG_i} \left[\frac{\Omega}{\text{mile}} \right] \quad (10)$$

$$P_{ij} = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} \cdot k_{ij} \cdot \cos(\theta_{ij}) + \frac{k_{ij}^2}{16} \cdot \cos(2\theta_{ij}) \cdot \left(0.6728 + \ln \frac{2}{k_{ij}} \right) \quad (11)$$

$$Q_{ij} = -0.0386 + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{2}{k_{ij}} + \frac{1}{3\sqrt{2}} k_{ij} \cdot \cos(\theta_{ij}) \quad (12)$$

$$k_{ij} = 8.565 \cdot 10^{-4} \cdot S_{ij} \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (13)$$

onde:

\hat{z}_{ii} impedância própria do condutor i em $[\Omega]$;

\hat{z}_{ij} impedância mutua entre o condutor i e o condutor j em $[\Omega]$;

r_i resistência do condutor i em $[\frac{\Omega}{mile}]$;

ω frequência angular do sistema em $[radianos]$;

G $0.1609344 \cdot 10^{-3} [\frac{\Omega}{mile}]$;

RD_i raio do condutor i em $[ft]$;

RMG_i Radio Meio Geométrico do condutor i em $[ft]$;

f frequência do sistema $[Hz]$;

ρ resistividade da terra em $[\Omega - m]$;

D_{ij} distância entre os condutores i e j em $[ft]$;

S_{ij} distância entre o condutor i e a imagem j em $[ft]$;

θ ângulo entre as linhas formadas entre o condutor i , sua imagem e a imagem do condutor j em $[radianos]$.

Algumas considerações podem ser realizadas nas equações de Carson para simplificar os cálculos sem introduzir erros significativos no resultado. Estas equações simplificadas são chamadas de equações de Carson modificadas, e se encontram detalhadas em (KERTING, 2002).

Como resultado da aplicação das equações de Carson, obtém-se uma matriz primitiva, que para uma linha trifásica com m neutros será da forma de (14), de impedâncias séries de ordem $n \times n$, onde n é o número de condutores do sistema. Por exemplo para um sistema de distribuição aéreo com 4 condutores, 3 de fase e um para o neutro, teremos uma matriz de impedância primitiva de ordem 4×4 . Para a maioria das aplicações esta matriz deve ser reduzida para uma de dimensões 3×3 , aplica-se então a técnica da redução de *Kron*.

$$[\hat{z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} \hat{z}_{aa} & \hat{z}_{ab} & \hat{z}_{ac} & | & \hat{z}_{an1} & \hat{z}_{an2} & \hat{z}_{anm} \\ \hat{z}_{ba} & \hat{z}_{bb} & \hat{z}_{bc} & | & \hat{z}_{bn1} & \hat{z}_{bn2} & \hat{z}_{bnm} \\ \hat{z}_{ca} & \hat{z}_{cb} & \hat{z}_{cc} & | & \hat{z}_{cn1} & \hat{z}_{cn2} & \hat{z}_{cnm} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \hat{z}_{n1a} & \hat{z}_{n1b} & \hat{z}_{n1c} & | & \hat{z}_{n1n1} & \hat{z}_{n1n2} & \hat{z}_{n1nm} \\ \hat{z}_{n2a} & \hat{z}_{n2b} & \hat{z}_{n2c} & | & \hat{z}_{n2n1} & \hat{z}_{n2n2} & \hat{z}_{n2nm} \\ \hat{z}_{nma} & \hat{z}_{nmb} & \hat{z}_{nmc} & | & \hat{z}_{nmn1} & \hat{z}_{nmn2} & \hat{z}_{nmnm} \end{bmatrix} \quad (14)$$

A matriz primitiva pode ser dividida em quatro sub-matrizes (15);

$$[\hat{z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [\hat{z}_{ii}] & [\hat{z}_{in}] \\ [\hat{z}_{nj}] & [\hat{z}_{nn}] \end{bmatrix} \quad (15)$$

A técnica de redução de Kron é baseada na lei das tensões de nós de *Kirchhoff* (KERTING, 2002). Sendo (16) a matriz de impedâncias do sistema na sua forma final;

$$[z_{abc}] = [\hat{z}_{ij}] - [\hat{z}_{in}] \cdot [\hat{z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{z}_{nj}] \quad (16)$$

2.1.3 Modelos de Parâmetros Concentrados

Os parâmetros calculados nas seções anteriores são agrupados em modelos equivalentes que representam o comportamento eletromagnético de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Existe uma ampla quantidade de estudos onde a análise é focada em uma só frequência, na qual os parâmetros concentrados são calculados e os modelos de parâmetros concentrados são uma escolha correta (Power System Relay Committee, 2004).

2.1.3.1 Modelo π – Nominal

O modelo π é apresentado na Figura (2). onde:

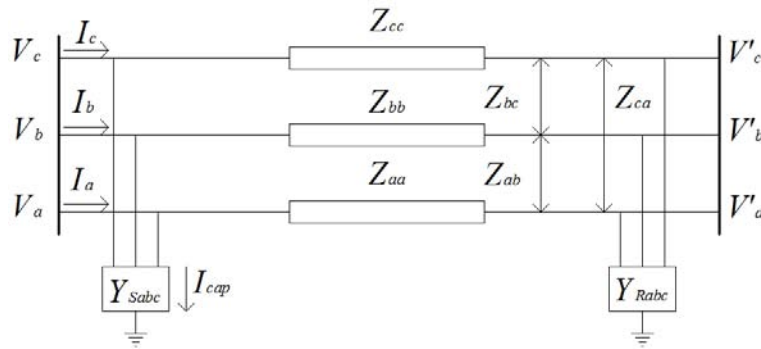


Figura 2: Modelo π trifásico. Adaptado de (KERSTING, 2002).

$V_{a,b,c}$ são as tensões de fase nas barras do terminal local em [V];

$V'_{a,b,c}$ são as tensões de fase nas barras do terminal remoto em [V];

$I_{a,b,c}$ são as correntes de fase no terminal local em [A];

I_{cap} é a corrente capacitiva em [A];

Z_{ii} são as impedâncias próprias das linhas em [Ω];

Z_{ij} são as impedâncias mútuas das linhas em [Ω];

$Y_{a,b,c}$ são as impedâncias *shunt* da linha em [Ω].

Este modelo é definido em (KERSTING, 2002) como o modelo exato de uma linha, tanto aérea como subterrânea. Porém, só apresenta bom desempenho para estudos de regime permanente, não sendo uma boa escolha para estudos de transitórios, embora ele seja utilizado na forma de uma ligação cascata de circuitos π . Sendo a quantidade de elementos ligados dependente da frequência de interesse. A principal desvantagem está na reflexão das ondas eletromagnéticas nas uniões da cascata (Power System Relay Committee, 2004).

2.1.3.2 Modelo RL

Como demonstrado em (KERSTING, 2002), a admitância *shunt* pode ser ignorada para as linhas aéreas de distribuição, ou ainda, linhas de transmissão de comprimento inferior a 80km (STEVENSON, 1986). Isto devido ao seu valor desprezível em comparação com a impedância serie. A Figura 3 ilustra o modelo RL.

onde:

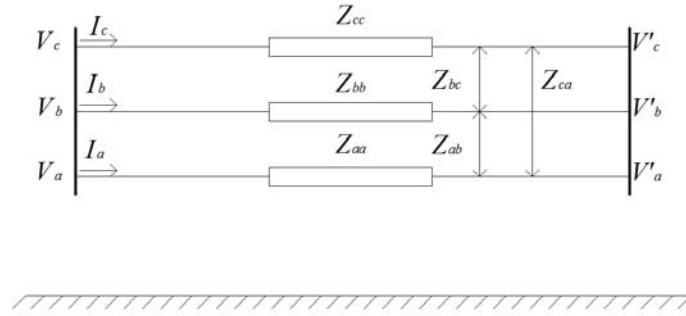


Figura 3: Modelo RL trifásico. Adaptado de (KERSTING, 2002).

$V_{a,b,c}$ são as tensões de fase nas barras do terminal local em [V];

$V'_{a,b,c}$ são as tensões de fase nas barras do terminal remoto em [V];

$I_{a,b,c}$ são as correntes de fase no terminal local em [A];

Z_{ii} são as impedâncias próprias das linhas em [Ω];

Z_{ij} são as impedâncias mútuas das linhas em [Ω]

2.2 Modelagem por Parâmetros Distribuídos

Os modelos mais precisos para o cálculo de transitórios eletromagnéticos são aqueles que levam em consideração a natureza distribuída dos parâmetros elétricos das linhas (MARTINEZ; GUSTAVSEN; DURBAK, 2005), estes são chamados de modelos de parâmetros distribuídos.

Neles, os parâmetros elétricos não são constantes, porém dependem da frequência, i.e. $R(\omega)$, $L(\omega)$, $C(\omega)$ e $G(\omega)$ (Power System Relay Committee, 2004)

Estes modelos são classificados em modelos de parâmetros distribuídos constantes e parâmetros distribuídos dependentes da frequência (Power System Relay Committee, 2004; MARTINEZ; GUSTAVSEN; DURBAK, 2005; HEVIA, 1999).

- Parâmetros Distribuídos Constantes.
 - Modelo de Bergeron de parâmetros distribuídos constantes (Power System Relay Committee, 2004).
- Parâmetros Distribuídos Dependentes da Frequência.
 - Modelo J. Marti de parâmetros distribuídos dependentes da frequência com a matriz de transformação modal constante (MARTI, 1982).
 - Modelo L. Marti de parâmetros distribuídos dependentes da frequência com matriz de transformação modal dependente da frequência (MARTI, 1988).
 - Modelo T. Noda de parâmetros dependentes da frequência sem transformação modal (no domínio das fases) (NODA; NAGAOKA; AMETANI, 1996).

Destes modelos, resultam de interesse neste trabalho os modelos de parâmetros distribuídos dependentes da frequência, nas seguintes subseções apresenta-se um breve resumo dos modelos anteriormente mencionados.

2.2.1 Modelo J. Marti (FD)

O modelo J. Marti, apresentado em (MARTI, 1982), é disponibilizado em programas do tipo EMTP (Electromagnetical Transient Program). Comercialmente é denominado **FD** (Frequency Dependent). O trabalho de J. Marti visou solucionar as dificuldades, até o momento, presentes na utilização das formulações então disponíveis, apresentando resultados precisos e sem problemas de instabilidade numérica.

Nele as linhas multifásicas são desacopladas em três modos independentes através das matrizes de decomposição modal. Cada uma delas é estudada separadamente como um circuito monofásico, sendo matriz de transformação modal considerada independente da frequência nesta formulação.

2.2.2 Modelo L. Marti (FDQ)

Apresentado por L. Marti em (MARTI, 1988) como um modelo para a simulação de transitórios eletromagnéticos em cabos subterrâneos de alta tensão compatível com os simuladores EMTP. Um modelo de parâmetros dependentes da frequência com a consideração da matriz de transformação modal dependente da frequência.

O modelo demonstrou ser preciso e apresenta bom desempenho computacional (MARTI, 1988), mas segundo (Power System Relay Committee, 2004) tende à instabilidade numérica e deve ser utilizado cuidadosamente.

2.2.3 Modelo T. Noda

Segundo (Power System Relay Committee, 2004) o estado da arte em modelos de linhas de transmissão de energia elétrica é um modelo de parâmetros distribuídos dependente da frequência no domínio das fases.

(NODA; NAGAOKA; AMETANI, 1996) no seu trabalho apresentaram uma nova técnica para a simulação de linhas de transmissão modeladas diretamente em componentes de fase sem utilizar matrizes de transformação modal. Neste método é eliminado o uso da convolução, necessária para a transformação modal, responsável pela instabilidade numérica apresentada nos métodos que utilizam estas matrizes.

A implementação desse método apresenta maior dificuldade do que o FD e o FDQ, mas o passo da integração é independente do tempo de viagem das ondas (HEVIA, 1999).

2.3 Considerações Finais

Neste capítulo, apresentou-se as principais técnicas de modelagem de linhas elétricas para o estudo de sistemas elétricos de potência. As técnicas aqui apresentadas serão utilizadas no decorrer do presente trabalho, nas simulações dos sistemas de distribuição e na elaboração dos algoritmos de localização de faltas. No Capítulo 3, apresentara-se o estado da arte das técnicas de localização que logo serão implementadas nos algoritmos propostos nesta Dissertação.

3 LOCALIZAÇÃO DE FALTA – ESTADO DA ARTE

Neste capítulo serão apresentadas as principais técnicas de Localização de Falta **LDF** para Sistemas Elétricos de Potência (**SEP**). As técnicas de **LDF** originalmente foram desenvolvidas para sistemas de Transmissão de Energia Elétrica, sendo que na década de 1980 começaram a serem estudadas as possibilidades de aplicação nos **SDEE** (SALIM, 2008).

A **LDF** em **SDEE** despertaram um recente forte interesse desde a desregulamentação da indústria da energia elétrica (MAGNAGO; ABUR, 1999).

As técnicas de **LDF** podem ser divididas em:

1. Técnicas para a determinação da distância da falta;
2. Técnicas para a determinação da seção faltosa.

A seguir, descreveremos, brevemente, as principais técnicas de cada grupo.

3.1 Técnicas de Determinação da Distância da Falta

3.1.1 Determinação da Distância da Falta pela Impedância Aparente

Os métodos baseados na impedância aparente (**IA**) utilizam as medições de tensão e corrente no terminal local, na frequência fundamental do sistema. Baseando-se no cálculo da **IA** com os dados armazenados no relé. Neste trabalho o método de localização a ser utilizado é o apresentado em (FILOMENA et al., 2009).

Segundo (ZIMMERMAN; COSTELLO, 2003), as técnicas de **LDF** baseados na impedância aparente são influenciadas pelos seguintes aspectos:

- efeito combinado entre a corrente de carga e resistência de falta;
- identificação incorreta do tipo de falta;
- influência dos efeitos mútuos de sequência zero;
- incertezas associadas aos parâmetros da linha;
- modelo de linha inadequado;
- existência de reatores *shunt* e capacitores;
- cargas desbalanceadas no sistema;
- erros de medidas de tensões e correntes;

- erros associados à filtragem para extração dos fasores de correntes e tensões.

Segundo (SALIM, 2008) tem-se registros da utilização de técnicas baseadas na impedância na década de 1950, mas foi só na década de 1980, com os trabalhos apresentados por Takagui *et al.* utilizando o teorema da superposição, que teve início o desenvolvimento de novas técnicas de localização fundamentadas na impedância.

O método de Takagi *et al.* foi proposto para a **LDF** em linhas de transmissão de energia elétrica curtas. Utilizando-se para esta análise o teorema da superposição, decompondo o sistema faltoso em um sistema pré-falta e um sistema puramente faltoso (SALIM, 2008). Este método segundo (MORETO, 2005) apresenta um aumento considerável no erro de estimativa com o aumento da R_f .

No ano de 1997, Zhu *et al.* (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997) apresentaram uma técnica que utilizava as componentes de fase no lugar de componentes simétricas, sendo um dos primeiros em fazer esta consideração (SALIM, 2008). Isto permite que as particularidades dos **SDEE**, como a não homogeneidade da linha (mais do que um tipo de condutor na mesma seção), desbalanço da carga e a não transposição da linha sejam consideradas na modelagem do sistema. (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997) utilizam valores de tensão e corrente medidos na Subestação (**SE**) e os dados disponíveis na base de dados do sistema. Uma modelagem e análise probabilística foi desenvolvida para diminuir a multiplicidade de locais de falta utilizando a evidencia da atuação das proteções e o carregamento do sistema (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997).

O equacionamento apresentado por Zhu *et al.*, para faltas fase-terra, baseia-se na solução iterativa de um grupo de equações que representa o estado permanente do sistema. Assumindo que as tensões e correntes são conhecidas no terminal local (medidas disponíveis na subestação) e equacionando o sistema segundo a Figura 4, chegaram às seguintes equações.

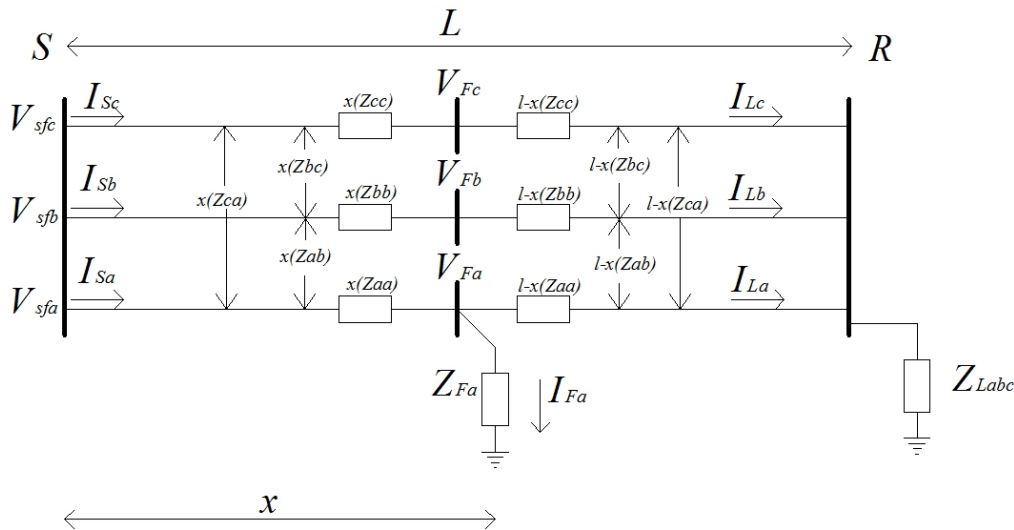


Figura 4: Falta fase-terra na fase A, adaptada de (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997)

$$V_{S_a} = x \cdot (Z_{aa}I_{S_a} + Z_{ab}I_{S_b} + Z_{ac}I_{S_c}) + R_F I_F \quad (17)$$

onde:

V_{S_a} é tensão na fase "a" medida no terminal local [V];

$I_{S_{a,b,c}}$ são as correntes nas fases medidas no terminal local [A];

Z_{ii} são as impedâncias próprias da linha [Ω];

Z_{ij} são as impedâncias mútuas da linha [Ω];

I_F é a corrente de falta [A];

R_F é a resistência da falta [Ω].

A corrente de falta pode ser calculada subtraindo a corrente da carga, da corrente do terminal local.

$$I_F = I_{S_a} - I_{L_a} \quad (18)$$

Multiplicando ambos lados da equação (17) por I_F , separando a parte real da imaginária conseguimos eliminar a variável R_F . Desta forma temos (SALIM et al., 2009),

$$x = \Im \left(\frac{I_F V_{S_a}^*}{I_F M_a^*} \right) \quad (19)$$

onde

$$M_a = \sum Z_{abc_m} I_{S_m} \quad m = \{a, b, c\} \quad (20)$$

Zhu *et al.* desenvolveram o seguinte algoritmo iterativo para determinar a distância da falta:

1. O processo começa assumindo um valor inicial para I_F , obtem-se uma boa estimativa fazendo com que $I_F = I_{S_a} - I'_{S_a}$, sendo I'_{S_a} a corrente pré-falta.
2. Com a corrente da falta calcula-se a distância da falta x com (19).
3. Calcula-se a tensão no ponto da falta com:

$$V_F = V_S - x Z_{abc} I_S \quad (21)$$

4. Utiliza-se a tensão no ponto da falta para determinar a corrente da carga mediante a aplicação de um fluxo de carga radial.
5. Usa-se (18) para atualizar a corrente de falta. Logo repete-se o algoritmo até a convergência.

Desde que a distância da falta calculada pode estar em qualquer seção do **SDEE**, Zhu *et al.* apresentaram em (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997) uma possível solução ao problema. Quando a distância x encontrada é maior que a distância da seção, procede-se ao cálculo da distância da falta na seguinte seção do **SDEE**, para isto atualizam-se as tensões e correntes para a próxima seção do sistema através de uma análise de circuitos (SALIM, 2008). Segundo a Figura 5:

$$V_{k+1} = V_k - Z_{abc_k} I_k \quad (22)$$

$$I_{L_k} = Z_{L_k}^{-1} V_k \quad (23)$$

$$I_{k+1} = I_k - I_{L_{k+1}} \quad (24)$$

onde:

V_{k+1} é a tensão no nó $k + 1$ em $[V]$;

I_{L_k} é a corrente de carga na seção k em $[A]$;

$I_{L_{k+1}}$ é a corrente de carga na seção $k + 1$ $[A]$;

I_k é a corrente na seção k $[A]$;

I_{k+1} é a corrente na seção $k + 1$ em $[A]$;

Z são as impedâncias das linhas em $[\Omega]$.

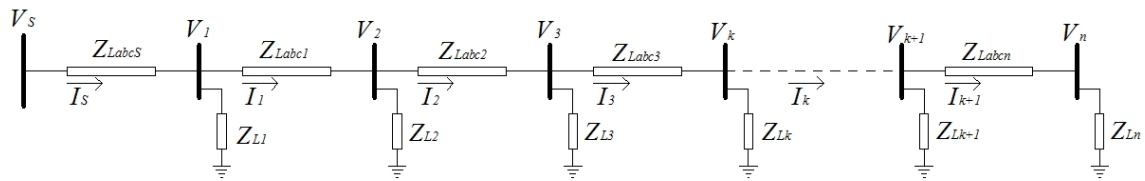


Figura 5: Diagrama unifilar de um sistema de Distribuição simples, adaptado de (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997)

Aplicado o algoritmo de atualização de correntes e tensões executa-se novamente o algoritmo de cálculo da distância até que a distância de falta estimada seja menor que o comprimento da seção analisada. Da configuração ramificada dos **SDEE** podem surgir mais do que uma seção faltosa, Zhu *et al.* desenvolveram uma técnica heurística baseada na simulação dos possíveis cenários de faltas no **SDEE**, os cenários são montados com todas as possíveis atuações das proteções do sistema. As tensões e correntes medidas na **SE** são, então, comparadas com as tensões e correntes dos cenários de faltas geradas nas simulações para desta forma determinar qual é a seção faltosa (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997).

No ano de 2004, Lee *et al.*, apresentaram uma extensão do método de Zhu *et al.*, onde a corrente da falta não é estimada através de um estudo de fluxo de carga. As cargas, consideradas como matrizes de impedância, à jusante da falta são consideradas como um equivalente, calculada através de combinações série-paralelo. A equação (25) apresenta o cálculo da corrente da falta proposto por (LEE et al., 2004).

$$I_F = Y_L \cdot V_F \quad (25)$$

onde Y_L , em $[\Omega^{-1}]$, representa a combinação das impedâncias da linha com a impedância equivalente do sistema a jusante da seção analisada e V_F é calculado com (21) em $[V]$.

Os autores utilizam, da mesma forma que Zhu *et al.*, as atuações das proteções e a variação da carga para a redução do número de possíveis locais da falta. O método apresenta a desvantagem de precisar da medição em cada uma das cargas, informação dificilmente disponível num **SDEE** (SALIM, 2008). Segundo (MORETO, 2005), o algoritmo de Lee pode ser considerado como a aplicação do método de Takagui para cada seção de linha.

Como uma continuação destes trabalhos, Salim *et al.* apresentam no seu trabalho (SALIM et al., 2009) três melhoras em relação aos trabalhos de Zhu *et al.* e de Lee *et al.*.

A primeira delas foi o desenvolvimento do método para todos os tipos de falta, a segunda foi o aprimoramento da técnica de cálculo dos equivalentes do sistema, a técnica apresentada por Lee *et al.* não é eficiente para sistemas de grandes dimensões. Para considerar todas as ramificações do **SDEE** os autores analisam cada possível caminho de fluxo de carga, assim os sistemas equivalentes são obtidos transformando as linhas e cargas que estão fora do caminho em análise como uma impedância constante.

No seu trabalho (LEE et al., 2004) obtém os equivalentes com agrupações série-paralelo, porem (SALIM et al., 2009) utilizam para isso um algoritmo de fluxo de carga para sistemas radiais, conhecido como técnica "*ladder*", descrito em (KERSTING, 2002). As tensões e correntes calculadas em cada nó do sistema são utilizadas para obter as impedâncias equivalentes, (26) apresenta o equivalente do sistema a jusante da seção K ilustrada na figura (5),

$$Z_{eq_{K-(K+1)}} = \frac{V_K}{I_{K-(k+1)}} \quad (26)$$

onde:

V_k é a tensão, calculado no fluxo de potência, no nó onde quer-se achar o equivalente [V];

$I_{K-(k+1)}$ é a corrente, calculado no fluxo de potência, na seção a jusante do nó K [A].

A terceira melhoria proposta relaciona-se a variação temporal da carga (SALIM, 2008). Os **SDEE** apresentam perfis de carregamento diferentes dependendo do tipo de consumidor (residencial, industrial ou comercial). Os métodos de localização baseados na impedância dependem fortemente da variação do carregamento do sistema no instante da falta. A extensão proposta pelos autores consiste na atualização do carregamento do sistema através do cálculo de um índice de variação das cargas. Para isto é definido um estado de carregamento padrão do sistema, e nestas condições é calculada a impedância equivalente do sistema visto desde a **SE** para cada fase m do sistema segundo (27),

$$Z_{load_{1m}} = \frac{V_{Sm}}{I_{Sm}} \quad (27)$$

onde:

V_{Sm} é a tensão no terminal local na condição de carregamento padrão [V];

I_{Sm} é a corrente no terminal local na condição de carregamento padrão [A];

$Z_{load_{1m}}$ é a impedância de carga da seção na condição de carregamento padrão [Ω].

No momento da falta é calculada uma nova impedância equivalente do sistema com os valores de tensão e corrente pré-falta, esta impedância calculada em (28) representa o estado real de operação do sistema,

$$Z_{load_{2m}} = \frac{V'_{Sm}}{I'_{Sm}} \quad (28)$$

V'_{Sm} é a tensão no terminal local na condição pré-falta [V];

I'_{Sm} é a corrente no terminal local na condição pré-falta [V];

$Z_{load_{2m}}$ é a impedância de carga da seção na condição de funcionamento pré-falta [Ω].

Com estes valores de impedância equivalente calcula-se um índice de variação da carga (29),

$$\Delta_{load} = \frac{Z_{load_{2m}} - Z_{load_{1m}}}{Z_{load_{1m}}} \quad (29)$$

onde:

Δ_{load} é o coeficiente de variação de carga.

Finalmente atualiza-se a matriz de carregamento do sistema multiplicando-a por (29).

Desta forma se obtém uma atualização uniforme do estado de carregamento do sistema. Se o perfil de cada tipo de carga fosse conhecido poderia realizar-se uma atualização para cada tipo. Esta técnica apresenta resultados altamente superiores aos obtido por Lee *et al.* (SALIM, 2008).

Nos trabalhos apresentados até agora não foi considerado o efeito capacitivo das linhas, fato que não pode ser desconsiderado em cabos subterrâneos (KERSTING, 2002), sendo levado em consideração pela primeira vez por (FILOMENA et al., 2009).

Neste caso, a modelagem é feita utilizando o circuito π no lugar do circuito RL , utilizado nas técnicas apresentadas até aqui, embora seja desconsiderada a condutância *shunt* e também considerado o neutro aterrado e o campo elétrico criado pelo condutor de fase totalmente confinado na isolação dos cabos. Assim, somente teremos a capacitância própria dos cabos, e a matriz de admitância *shunt* só será diferente de zero na diagonal principal (FILOMENA et al., 2009).

3.1.2 Equações para a localização

Considerando o exposto até agora, apresentam-se a seguir as equações utilizadas para a estimação da distância da falta (FILOMENA et al., 2009).

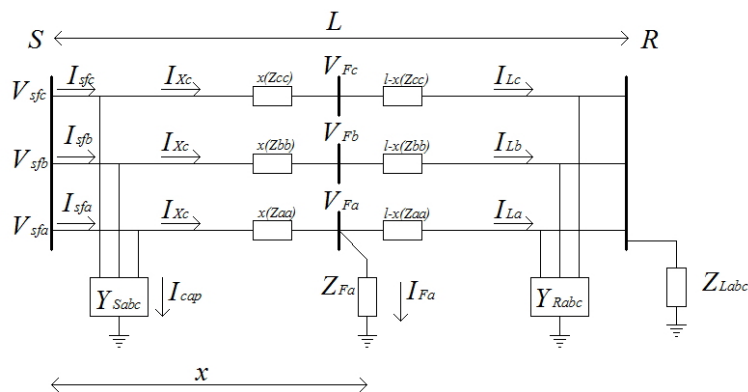


Figura 6: Falta Fase-Terra, adaptada de (FILOMENA et al., 2009).

onde:

V_{Sfm} é tensão medida no terminal local na fase m durante a falta [V];

I_{Sfm} são as correntes nas fases medidas no terminal local na fase m durante a falta [A];

- I_{cap} é a corrente capacitiva [A];
 I_{Labc} é a corrente de carga [A];
 x distância da falta em [m];
 Z_{ii} são as impedâncias próprias da linha [$\frac{\Omega}{m}$];
 Z_{Labc} são as impedâncias da carga em [Ω];
 Y_{Sabc} são as admitâncias da linha no terminal local em [$\frac{S}{m}$];
 Y_{Rabc} são as admitâncias da linha no terminal remoto em [$\frac{S}{m}$];
 I_{Fm} é a corrente de falta na fase [m];
 L comprimento da linha em [m];
 Z_F é a impedância da falta em [Ω];

Com o circuito em falta da Figura 6, é possível demonstrar que a distância até a falta e a resistência da falta para uma falta fase-terra na fase 'a' são determinadas por (30) (FILOMENA et al., 2009):

$$\begin{bmatrix} x \\ Rf \end{bmatrix} = \frac{1}{M_{1a}I_{Fa_i} - M_{2a}I_{FM_r}} \begin{bmatrix} I_{Fa_i} & -I_{Fa_r} \\ -M_{2a} & M_{1a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Sa_r} \\ V_{Sa_i} \end{bmatrix} \quad (30)$$

onde:

- r é parte real;
 i é parte imaginária;
 V_{Sa} é tensão no terminal local na fase a [V];
 Rf é a resistência da falta [Ω];
 x é distancia até a falta [m];
 I_{Fm} é corrente da falta [A].

Sendo que M_{1a} e M_{2a} são definidos por (31) e (32);

$$M_{1a} = \sum_k \left(Z_{ak_r} I_{S_{k_r}} - Z_{ak_i} I_{S_{k_i}} \right) \quad (31)$$

$$M_{2a} = \sum_k \left(Z_{ak_r} I_{S_{k_i}} - Z_{ak_i} I_{S_{k_r}} \right) \quad (32)$$

neste caso k são as fases $a, b,$ e c ; Z_{m_k} é a impedância mutua entre as fases a e k , e I_{S_k} é a corrente no terminal local na fase k .

Para a estimação da distância da falta é construído um algoritmo iterativo, assume-se para isto que a corrente da carga é inicialmente igual à corrente da **SE** na condição pré-falta $I_{La} = I_S$. A corrente da falta segundo a Figura 6 é calculada por:

$$[I_F] = [I_{Sf}] - [I_{cap}] - [I_L]. \quad (33)$$

onde:

I_F é a corrente da falta [A];

I_{Sf} é a corrente durante a falta no terminal local [A];

I_{cap} é a corrente devida a capacitância da linha [A];

I_L é a corrente da carga [A].

Sendo a corrente capacitiva estimada através de um algoritmo iterativo, levando em consideração o comprimento do trecho da linha desde o terminal local até o ponto da falta. Para isto aproxima-se na primeira tentativa que a falta ocorreu na metade da linha. Logo de cada iteração a distância calculada é utilizada no cálculo da corrente capacitiva (FILOMENA, 2008).

$$I_{Cap} = Y_S \cdot V_{Sf} \quad (34)$$

onde Y_S é a admitância *shunt* calculada com (35);

$$Y_{S_m} = \frac{x}{L} \cdot y_{L_m} \quad (35)$$

onde:

x é a distância até a falta [m];

L é o comprimento da seção [m];

y_{L_m} é a admitância da linha por unidade de comprimento $[\frac{\Omega}{m}]$;

m são as fases a , b e c .

A distância até a falta e a resistência da falta são determinadas por (30), (31), (32) e (33).

A tensão no ponto da falta é estimada por:

$$\begin{bmatrix} V_{F_a} \\ V_{F_b} \\ V_{F_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S_a} \\ V_{S_b} \\ V_{S_c} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ac} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{X_a} \\ I_{X_b} \\ I_{X_c} \end{bmatrix}. \quad (36)$$

onde:

V_{F_k} é a tensão no ponto da falta [V];

V_{S_k} é a tensão no terminal local [V];

Z_{km} são as impedâncias próprias e mutuas $[\frac{\Omega}{m}]$;

x é a distância da falta previamente estimada [m];

k são as fases a , b e c ;

m são as fases a , b e c .

A correntes I_{X_k} são definidas segundo (37),

$$I_{X_k} = I_{Sf_k} - I_{Cap} \quad (37)$$

A corrente da carga é atualizada por meio de (38), e (39)¹, utilizando a tensão no ponto da falta calculada em (36).

$$I_{L_a} = [Y_{l-eq}] \cdot [V_{F_{abc}}] \quad (38)$$

$$[Y_{l-eq}] = \{(L - x) \cdot [Z] + [Z_L] // j \cdot [X_C]\}^{-1} \quad (39)$$

onde:

Y_{l-eq} é a matriz de admitância equivalente [Ω^{-1}];

$V_{F_{abc}}$ são as tensões no local da falta [V];

X_C é a reatância capacitiva entre a falta e o terminal remoto [Ω].

A convergência do método é verificada por

$$|x(n) - x(n - 1)| < \delta \quad (40)$$

onde:

$x(n)$ é a distância calculada na iteração n [m];

$x(n - 1)$ é a distância calculada na iteração $n - 1$ [m];

δ é o erro admissível.

Se a convergência for atingida conclui-se o algoritmo, caso contrário retorna-se para o cálculo da corrente de falta e repete-se o procedimento.

A existência de laterais e cargas intermediárias é levada em consideração fazendo a análise do sistema por seções, havendo uma seção para cada caminho de fluxo de potência possível. Como foi citado na seção acima, cada uma das seções que não esta sendo analisada será substituída pela sua impedância equivalente (26) (FILOMENA et al., 2009).

3.1.3 Determinação da distância por Ondas Viajantes

Os métodos baseados nas ondas viajantes tiveram a sua origem nas técnicas de localização "off-line" do tipo "A", onde um sinal era injetado na linha em falta e calculava-se o tempo entre duas reflexões do sinal (THOMAS; CARVALHO; PEREIRA, 2003; C37.114-2004, 2005). As técnicas baseadas nas ondas viajantes com medição no terminal local foram, inicialmente, utilizadas no cálculo da distância da falta em relés de distância e em técnicas de localização de faltas, através da determinação do tempo entre duas reflexões da onda gerada pela falta que viaja pela linha (AKIMOTO et al., 1978; MCLAREN; CROSSLEY, 1983; C37.114-2004, 2005; THOMAS; CARVALHO; PEREIRA, 2003).

Com o desenvolvimento da tecnologia necessária para a sincronização de tempo, sistemas GPS (do Inglês Global Position Systems), apareceram várias técnicas baseadas nas

¹// significa o paralelo entre duas impedâncias.

Ondas Viajantes **OV** com medição em dois terminais (ELHAFFAR, Helsinki, Finland, 2008, 141 fls; ELHAFFAR; LEHTONEN, 2008; MAGNAGO; ABUR, 1999; LIN et al., 2008). Estes métodos, com medição nos dois terminais, mostram-se mais precisos que os de medição no terminal local. Estes são amplamente utilizados atualmente em sistemas de transmissão de energia do Sistema Interconectado Brasileiro (SIN), apresentando excelentes resultados também para linhas com compensação serie (TECNOLOGIA, 2009). Embora as técnicas com medição em dois terminais sejam mais precisas, elas tem um custo de implementação mais elevado (OLIVEIRA et al., 2009; C37.114-2004, 2005; SALIM, 2008; FILOMENA, 2008; LIN et al., 2008).

3.2 Determinação da Seção Faltosa

Nesta seção serão apresentadas algumas das técnicas estado-da-arte baseadas em **OV** utilizadas na determinação da seção onde ocorreu a falta. Até aqui foram tratados os tópicos relacionados à determinação da distância até a falta. Como já foi mencionado, os **SDEE** podem apresentar mais de um caminho para o fluxo da potência com a mesma impedância aparente, daí a necessidade de um método que complemente o algoritmo de localização permitindo encontrar também a seção faltosa.

Técnicas baseadas em **RNA** (Redes Neurais Artificiais) foram recentemente propostas para a determinação da seção faltosa. Salim *et al.* apresentaram em (SALIM et al., 2006) uma técnica baseada em **RNA** que consistia na divisão do sistema em várias sub-seções, e cada uma destas seções bem caracterizada pelos seus componentes (geração, carregamento, características físicas, etc.). Os autores utilizaram no seu trabalho uma **RNA** tipo 'feedforward' totalmente interconectada e função de ativação tipo *sigmoide*, com um algoritmo supervisionado de aprendizado de Levenberg – Marquardt.

Magnano *et al.* apresentaram em (MAGNAGO; ABUR, 1999) uma técnica que utilizava **OV** para determinar a seção faltosa. Para isso, simulam-se diferentes faltas em diferentes seções do sistema, o sinal resultante das simulações é decomposto, utilizando a Transformada *Wavelets* (**TW**). Os coeficientes *Wavelets* calculados são utilizados para caracterizar o sinal gerado pelas faltas em cada seção, e assim determinar a seção faltosa pela comparação da amplitude dos coeficientes *wavelets*. O sinal da falta compara-se com os sinais previamente simulados, para assim, encontrar a seção faltosa. Após a determinação da seção faltosa, simplifica-se o sistema, agrupando as outras seções calculando uma impedância equivalente. Esta técnica tem o problema de que, para cada modificação do sistema, deveriam ser calculados novamente os coeficientes *wavelets* característicos de cada seção.

Hizam *et al.* (HIZAM et al., 2002; HIZAM; CROSSLEY, 2007) utilizaram uma técnica conhecida como *Time Tree* para a identificação da seção faltosa. Esta técnica consiste na utilização de um programa computacional que gera os *Time Trees*, formas de onda baseadas nas reflexões e transmissão dos sinais na rede, onde os parâmetros, como resistência de falta, e localização da falta são variados facilmente. Estes sinais são comparados via correlação cruzada com os sinais adquiridos pelo relé durante a falta. Desta forma a seção faltosa é determinada também por comparação como em (MAGNAGO; ABUR, 1999). Esta técnica no entanto, não foi testada em linhas com laterais.

No ano de 2007, de Oliveira *et al.* apresentaram uma técnica de localização da seção faltosa utilizando ondas viajantes e correlação. Consistindo em um método de alta eficiência e baixo custo de implementação, podendo ser implementado como complemento de outros métodos existentes (OLIVEIRA et al., 2009).

Lin *et al.* (LIN et al., 2008) apresentaram uma comparação entre as técnicas de correlação e as técnicas baseadas na TW. Neste trabalho os autores destacam a maior precisão das técnicas baseadas em correlação na determinação dos picos das ondas viajantes geradas pela falta, apresentando esta melhor desempenho também em presença de ruídos externos.

A técnica utilizada nesta dissertação é a técnica apresentada por de Oliveira *et al.*, resumida brevemente na seção a seguir.

3.2.1 Técnica para a Determinação da Seção Faltosa

Quando um distúrbio ocorre numa linha de transmissão são geradas ondas que viajam pela linha até o sistema atingir seu estado estacionário, como ilustrado na Figura 7 (CHIPMAN, 1971; GREENWOOD, 1971; STEVENSON, 1986; GLOVER; SARMA, 2003). Cada vez que estas ondas atingem uma descontinuidade, geram-se na linha duas ondas, uma que continua no sentido da onda incidente, onda transmitida, e outra que retorna no sentido contrário da onda incidente, onda refletida (ZANETTA JR., 2003). A técnica de localização por OV determina o tempo compreendido entre a primeira passagem e a segunda passagem da onda transitória, gerada pela falta, pelo relé (MAGNAGO; ABUR, 1999; MCLAREN; CROSSLEY, 1983; OLIVEIRA et al., 2009). A análise espectral do sinal pós-falta apresenta frequências dominantes com um período de duas vezes o tempo de viagem desde o terminal local até a falta (MCLAREN; CROSSLEY, 1983). A auto-correlação do sinal de tensão é a técnica utilizada para determinar os instantes das passagens da onda pelo relé (LIN et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2007).

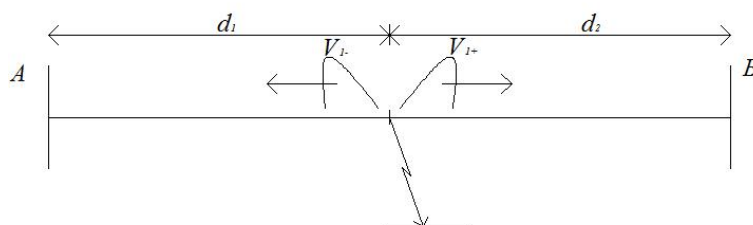


Figura 7: Diagrama unifilar de uma seção faltosa.

Em linhas trifásicas a assimetria assim como a não transposição fazem com que os elementos mútuos da matriz de impedância sejam diferentes de zero, permitindo que as ondas viajantes em uma fase se acoplem às outras fases. As ondas induzidas nas fases não faltosas viajam pela linha, e interagem com as ondas das fases faltosas, distorcendo o sinal visto pelo relé. Para contornar este problema os sinais são decompostos nos seus componentes modais (ZANETTA JR., 2003).

Tem-se para a tensão:

$$[V_{0,\alpha,\beta}] = [P][V_{a,b,c}] \quad (41)$$

onde:

P é a matriz de transformação modal, conformada por os autovetores associados aos autovalores da matriz $Z_f \cdot Y_f$;

$V_{0,\alpha,\beta}$ são as tensões em componentes modais;

$V_{a,b,c}$ são as tensões de fase.

Calcula-se também a matriz de propagação modal γ como (42)

$$[\bar{\gamma}] = (P^{-1} (Z_f Y_f) P)^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

onde:

P é a matriz de transformação modal, conformada por os autovetores associados aos autovalores da matriz $Z_f \cdot Y_f$;

Z_f matriz de impedância da linha na frequência predominante da falta;

Y_f matriz de admitância da linha na frequência predominante da falta.

No passo seguinte é determinada a seção onde a falta se encontra, para isto é calculado o índice

$$k = \frac{t_a}{t_b} \quad (43)$$

onde:

t_a é o tempo entre duas passagens consecutivas da onda transitória, gerada pela falta, pelo relé, detectada pela auto-correlação do sinal analisado;

t_b é o tempo total de viagem da onda naquela seção.

Para a estimativa do tempo de viagem das ondas na seção é utilizado o sinal de tensão no seu modo aéreo, este apresenta a menor variação da impedância característica com a frequência (ZANETTA JR., 2003; OLIVEIRA et al., 2007).

Observando a Figura 7 vemos que a falta gera duas ondas, uma onda progressiva V_1^+ e uma onda regressiva V_1^- . As tensões induzidas nos terminais A e B são:

$$V_{A_1}(s) = e^{\gamma_1(s)d_1} \cdot V_1^- \quad (44)$$

$$V_{B_1}(s) = e^{-\gamma_1(s)d_2} \cdot V_1^+ \quad (45)$$

e como as ondas V_1^+ e V_1^- são iguais (ZANETTA JR., 2003),

$$V_{B_1}(s) = -V_{A_1}(s) e^{-\gamma_1(s)(d_1+d_2)} \quad (46)$$

A equação (46) mostra que a tensão no terminal B é igual que a tensão no terminal A multiplicada por um fator de propagação, e^{γ_1} (OLIVEIRA et al., 2007, 2009). Este fator de propagação produz uma atenuação na amplitude da onda e um deslocamento angular, já que $\gamma = \alpha + j\beta$, fator que foi calculado em (42). Assim o tempo de viagem da onda é calculado por (47) (OLIVEIRA et al., 2007, 2009):

$$t_b = \frac{16,7 \cdot 10^{-3} \cdot \beta L}{2\pi} \quad (47)$$

O índice k irá ser, teoricamente, sempre igual ou menor que dois quando a falta se encontre na seção em análises (OLIVEIRA et al., 2009). Caso a falta não se encontre na seção analisada, ou seja, o índice k calculado resulte em um valor maior do que 2, a tensão medida será propagada para a próxima seção, aplicando as propriedades de propagação

das ondas nas linhas (ZANETTA JR., 2003). No caso apresentado na Figura 7, supondo que A é o terminal local, aplica-se (48) para encontrar a tensão no terminal B,

$$V_{B1} = \frac{V_{A1}}{\Gamma_t} \cdot e^{-\gamma_1 \cdot d} \quad (48)$$

sendo γ_1 o componente aéreo da matriz do coeficiente de propagação modal, e Γ_t o coeficiente de transmissão da seção A para a B. Uma vez encontrada a tensão na próxima barra, calcula-se novamente o tempo de viagem da onda, e determina-se um novo índice k , caso este for menor que dois a falta se encontra nessa seção, caso contrário o algoritmo continua avançando para a próxima seção.

3.3 Considerações Finais

Foram apresentadas neste Capítulo o estado da arte das técnicas utilizadas na localização de faltas em SEP, assim como as principais equações a serem utilizadas. No Capítulo 4 apresentar-se-á a metodologia proposta nesta Dissertação para a Localização da Seção e da Distância da Falta.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

LF em **SDEE** é um tópico de pesquisa de alta relevância. Algoritmos de **LF** objetivam melhorar os tempos de resposta das companhias perante a presença de situações anômalas nos sistemas de fornecimento de energia. Por muitos anos, as companhias de distribuição enviavam as equipes de manutenção que localizavam as faltas por inspeção visual ou por métodos chamados de força bruta.

O seguinte capítulo apresenta uma metodologia integrada de localização de faltas. Esta utiliza as técnicas de cálculo da Impedância Aparente e das Ondas Viajantes com medição no terminal local. A metodologia consiste em um algoritmo que retorna como resultados:

- a estimativa da distância até a falta,
- a estimativa da seção onde ocorreu a falta.

A formulação proposta combina dois métodos: O método de **IA** e o de **OV**. A seguir apresenta-se o algoritmo proposto.

4.1 Algoritmo Proposto

Propõe-se neste trabalho um algoritmo de **LF** integrado que poderá ser utilizado em um relé digital de proteção. Utilizaram-se para isto os sinais de tensão e corrente disponíveis na subestação de distribuição. O cálculo da distância da falta será através da técnica apresentada em (FILOMENA, 2008), enquanto que na determinação da seção faltosa utilizar-se-a metodologia de (OLIVEIRA et al., 2007, 2009).

O algoritmo de **LF** é dividido em duas sub-rotinas principais, uma para o cálculo da distância, e a outra para a determinação da seção faltosa. As seguintes informações serão utilizadas como dados de entrada do algoritmo:

- sinais de tensão e corrente locais (Pré-falta e Pós-falta);
- características topológicas e elétricas dos alimentadores;
- cargas em cada barra do sistema;
- tipo de falta e fases envolvidas.

A Figura 8 apresenta um fluxograma do algoritmo proposto, nesta figura aprecia-se que o algoritmo divide-se em duas sub-rotinas principais, uma para a análise por **IA** e o outro para as **OV**. Cada uma das sub-rotinas pode ser resumida como:

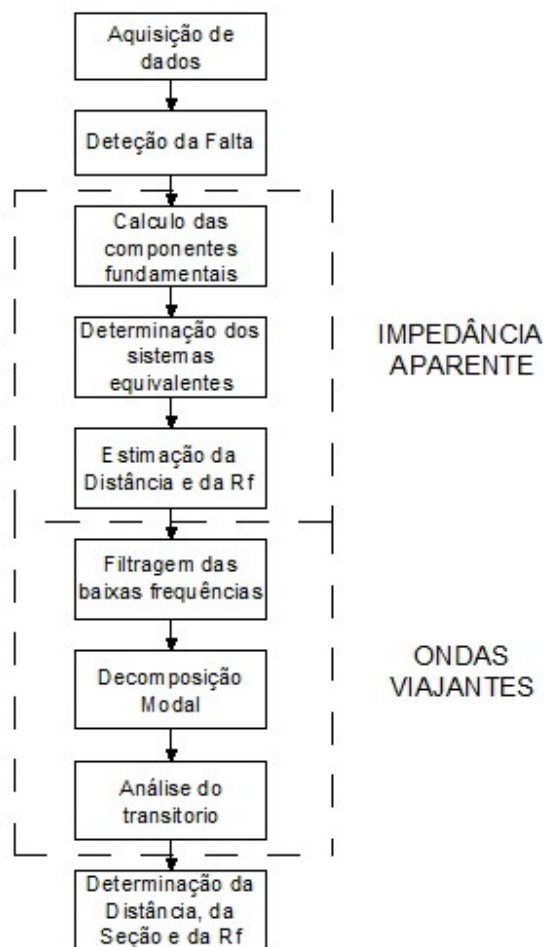


Figura 8: Diagrama de fluxo simplificado do algoritmo de localização.

Aquisição dos dados: nesta etapa dados de tensão e corrente são amostrados e coletados pelo **RDP** (Registrador de Perturbações).

Detecção da falta: identifica-se o instante em qual aconteceu a falta, assim como o tipo de falta e as fases envolvidas.

Cálculo das componentes fundamentais: através de um filtro de Fourier modificado (LIN; LIU, 2002) calculam-se as componentes fundamentais da tensão e da corrente.

Determinação dos sistemas equivalentes: o sistema em análise com ' n ' seções e simplificado em ' n ' sistemas equivalentes.

Estimativa da distância e da resistência da falta: estima-se a distância e a resistência da falta, que serão dados de entrada para a determinação da seção faltosa.

Filtragem das baixas frequências: o sinal de tensão é filtrado com um filtro passa alta.

Decomposição modal: os sinais de tensão previamente filtrados são decompostos nos seus componentes modais.

Análise do sinal: nesta etapa realiza-se a análise do sinal de alta frequência presente no sinal amostrado.

A seguir são apresentadas detalhadamente cada uma das sub-rotinas citadas anteriormente.

4.2 Impedância Aparente

Como foi mencionado na seção anterior, o algoritmo proposto tem duas importantes sub-rotinas, sendo uma delas a de análise por impedância aparente. A sub-rotina de análise por impedância aparente utiliza a formulação matemática exposta em (FILOMENA, 2008).

A Figura 9 apresenta um fluxograma desta sub-rotina.

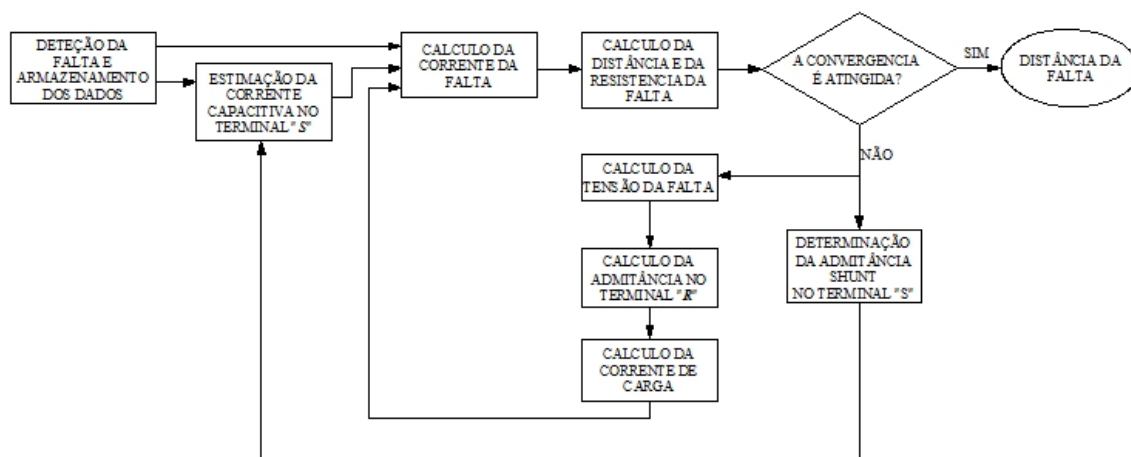


Figura 9: Fluxograma da sub-rotina de análise por impedância aparente.

Como resultado desta sub-rotina, estima-se as seções onde possivelmente se encontra a falta com a distância até esta, assim como um valor de resistência de falta.

4.3 Localização da Seção Faltosa

Com as distâncias e a resistência da falta calculadas na sub-rotina anterior inicia-se a localização da seção faltosa por **OV**.

Para a determinação da seção faltosa neste trabalho será utilizado o sinal de tensão. Devido às altas frequências presentes no sinal faltoso (SWIFT, 1979), o sinal amostrado

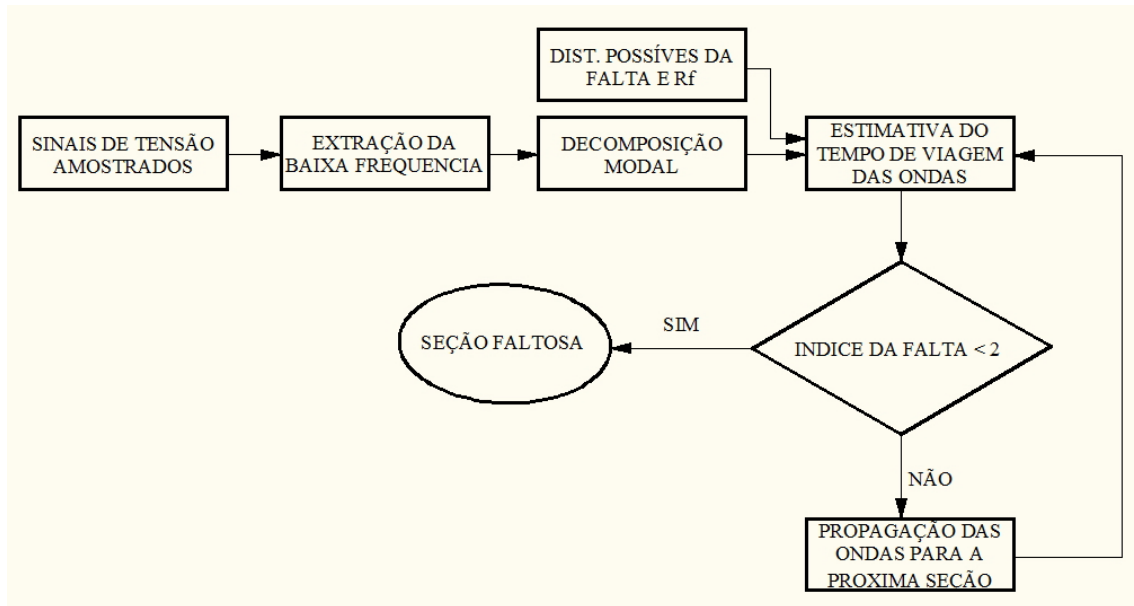


Figura 10: Diagrama de fluxo do algoritmo de determinação da seção faltosa.

é filtrado para eliminar as frequências menores, para isto, um filtro passa altas com frequência de corte de 50kHz será utilizado. Logo, a máxima frequência presente no sinal é determinada, e com esta são calculadas Z_f e Y_f , já que estas variam fortemente com a frequência (MCLAREN; CROSSLEY, 1983; ZANETTA JR., 2003; OLIVEIRA et al., 2007, 2009).

Quando a falta for sólida, a formulação utiliza as equações (41)–(48) apresentadas no Capítulo 3. Na Figura 10 apresenta-se a sub-rotina de **OV**.

Conforme pode ser observado na Figura 10, obtêm-se como resultado da sub-rotina a estimativa da seção faltosa.

Obtemos como resultado deste sub-algoritmo a seção em falta, e desta forma temos todos os dados necessários para correta localização do defeito.

Quando se tem uma resistência de falta não nula (maior do que um determinado valor previamente estipulado), $R_f \neq 0$, a sub-rotina executa os seguintes passos para determinar a seção faltosa:

1. Os sinais de tensão amostrados pelo RDP são filtrados com um filtro passa altas *Butterworth* de 3ª ordem (OLIVEIRA et al., 2007, 2009).

Para contornar o acoplamento mútuo entre as fases, os sinais de tensão são decompostos nos seus componentes modais. Esta decomposição, é realizada com a aplicação da matriz de transformação modal composta pelos autovetores associados aos autovalores da matriz resultado do produto da matriz de impedância e a matriz de admitância (41). Assim, as tensões e correntes trifásicas podem ser tratadas individualmente (ZANETTA JR., 2003).

Quando uma onda que trafega em uma linha atinge uma descontinuidade, geram-se duas ondas, uma onda transmitida que continua no mesmo sentido da onda incidente, e uma onda refletida que viaja no sentido contrário.

Suponha que têm-se duas linhas com impedâncias características diferentes, Z_1 e Z_2 , conectadas em série como ilustrado na Figura 11.

Inicialmente a onda incidente atinge a descontinuidade, e neste momento geram-se duas ondas, uma refletida e uma transmitida (ZANETTA JR., 2003). Assim, antes de atingir a falta tem-se:

$$\begin{aligned} v_i &= v_1^+, \\ i_i &= i_1^+ \end{aligned} \quad (49)$$

onde:

v_i onda de tensão que atinge a descontinuidade;

v_1^+ onda de tensão que viaja no sentido positivo do eixo x ;

i_i onda de corrente que atinge a descontinuidade;

i_1^+ onda de corrente que viaja no sentido positivo do eixo x .

As correntes e tensões, na mesma linha, têm a mesma forma de onda e relacionam-se por:

$$i_i = i_1^+ = \frac{v_i}{Z_1} = \frac{v_1^+}{Z_1} \quad (50)$$

onde:

Z_1 impedância característica da primeira linha.

Quando a onda atinge a descontinuidade, passasse a ter uma onda propagando-se no sentido contrário ao da onda incidente:

$$\begin{aligned} v_r &= v_1^-, \\ i_r &= i_1^- \end{aligned} \quad (51)$$

onde:

v_r onda de tensão refletida na descontinuidade;

v_1^- onda de tensão que viaja no sentido negativo do eixo x ;

i_r onda de corrente refletida na descontinuidade;

i_1^- onda de corrente que viaja no sentido negativo do eixo x .

As quais relacionam-se por:

$$i_r = i_1^- = -\frac{v_r}{Z_1} = -\frac{v_1^-}{Z_1} \quad (52)$$

e uma onda que será refratada na descontinuidade, que viaja no mesmo sentido da onda incidente e penetra na segunda linha, que será chamada de onda transmitida,

$$\begin{aligned} v_t &= v_2^+, \\ i_t &= i_2^+ \end{aligned} \quad (53)$$

onde:

v_t onda de tensão refratada na descontinuidade;

v_2^+ onda de tensão que viaja no sentido positivo do eixo x ;

i_t onda de corrente refratada na descontinuidade;

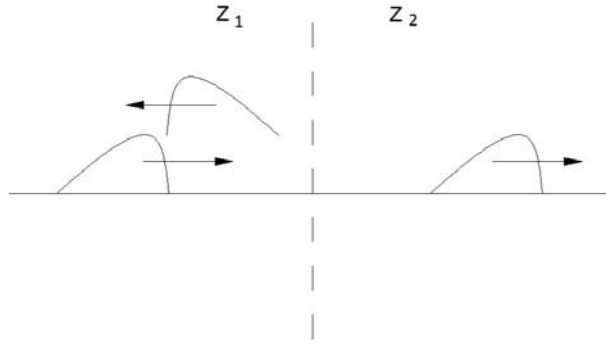


Figura 11: Propagação de uma onda que atinge uma descontinuidade.

i_2^+ onda de corrente que viaja no sentido positivo do eixo x .

Que se relacionam por:

$$i_t = i_2^+ = \frac{v_t}{Z_2} = \frac{v_2^+}{Z_2} \quad (54)$$

onde:

Z_2 impedância característica da segunda linha.

No ponto de conexão das linhas, as tensões devem ser iguais nos dois lados, assim;

$$v_1^+ + v_1^- = v_2^+ \quad (55)$$

O que também é válido para as correntes;

$$i_1^+ + i_1^- = i_2^+ \quad (56)$$

substituindo (50), (52) e (54) em (56), têm-se;

$$v_1^- = v_1^+ \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (57)$$

onde o coeficiente do lado direito da equação (57) chama-se coeficiente de reflexão da onda de tensão;

$$\Gamma_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (58)$$

onde:

Γ_r é o coeficiente de reflexão da onda de tensão.

o que resumindo fornece:

$$v_r = \Gamma_r v_i \quad (59)$$

Este coeficiente de reflexão (58), se relaciona com o coeficiente de transmissão pela matriz identidade, como indicado em (60):

$$\Gamma_t = I + \Gamma_r \quad (60)$$

onde:

Γ_t é o coeficiente de transmissão da onda de tensão;

I é a matriz identidade.

Uma das técnicas utilizadas para analisar as reflexões das ondas é do diagrama de "lattice" ou de treliças (ZANETTA JR., 2003; CHIPMAN, 1971; GREENWOOD, 1971). Este diagrama permite representar a onda utilizando para isto os coeficientes de reflexão e transmissão e o tempo de viagem da onda na linha. O tempo de viagem de uma onda em uma linha finita de comprimento finito l , é definido por:

$$\tau = \frac{l}{\nu}, \quad (61)$$

onde

τ é o tempo de viagem da onda na linha;

ν é a velocidade de propagação da onda na linha;

e ν define-se como:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (62)$$

Para um trecho genérico de linha, calculando os coeficientes de reflexão e transmissão, pode-se representar as ondas que trafegam na linha em função do tempo como ilustrado na Figura 12.

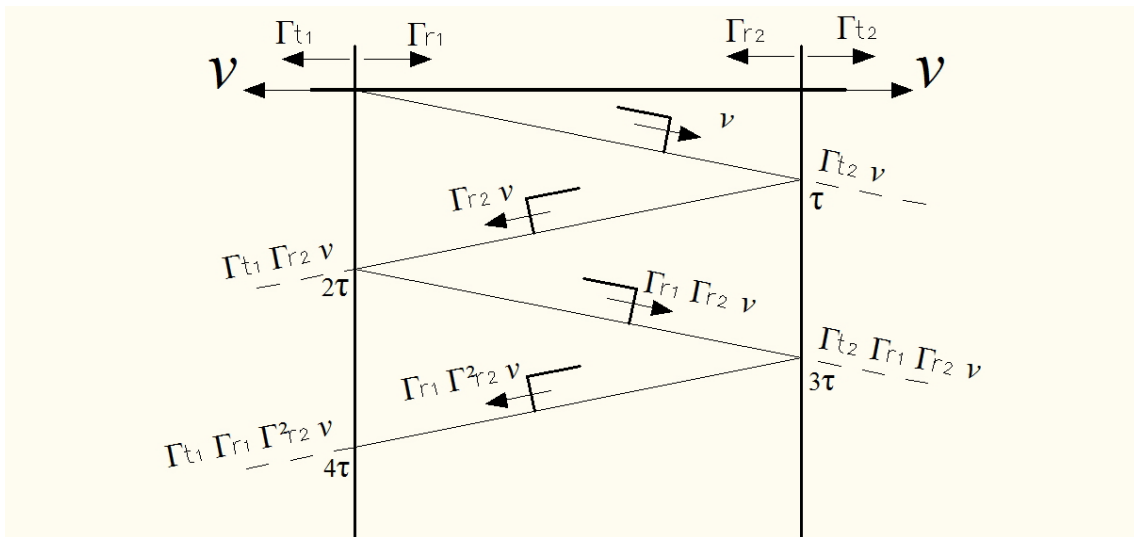


Figura 12: Diagrama de *lattice*.

Com a ajuda deste diagrama com eixos de tensão e de tempo pode-se escrever a expressão da tensão nos terminais 1 e 2 (ZANETTA JR., 2003):

$$\begin{aligned} v_1(t) &= v(t) + \Gamma_{t_1}\Gamma_{r_2}v(t-2\tau) + \Gamma_{t_1}\Gamma_{r_1}\Gamma_{r_2}^2v(t-4\tau) + \dots \\ v_2(t) &= \Gamma_{t_2}v(t-\tau) + \Gamma_{t_2}\Gamma_{r_2}\Gamma_{t_1}v(t-3\tau) + \dots \end{aligned} \quad (63)$$

onde:

$v_1(t)$ é a tensão no terminal 1 da linha em função do tempo;

$v_2(t)$ é a tensão no terminal 2 da linha em função do tempo.

Um caso especial destas reflexões acontece quando a linha termina em um curto circuito franco, $Rf = 0$, caso que foi estudado por de Oliveira *et al.* em (OLIVEIRA et al., 2007, 2009). Nesta situação tem-se que o coeficiente de transmissão é igual a zero. Portanto, só existe uma onda refletida, assim a totalidade da onda que atinge a falta retorna para o relé.

No caso de faltas com $Rf \neq 0$ tem-se também um coeficiente de transmissão diferente de zero, sendo calculado por (64) para o caso de uma linha que termina em uma resistência.

$$\Gamma_t = \frac{2 \cdot Rf}{Z_1 + Rf} \quad (64)$$

onde

Z_1 é o valor da impedância da linha;

Rf é a resistência da falta.

Analisando uma linha em falta com $Rf \neq 0$ deve-se levar em consideração que esta não acaba na falta, nesta situação tem-se que a onda transmitida encontra dois caminhos pelos quais poderá trafegar, a resistência da falta e a continuação da linha após a falta. Assim o coeficiente de transmissão será calculado com (60), resultando na equação (65);

$$\Gamma_t = \frac{2 \cdot (Rf // Z_{12})}{Z_{11} + (Rf // Z_{12})} \quad (65)$$

enquanto que o coeficiente de reflexão é calculado por (66)¹,

$$\Gamma_r = \frac{(Rf // Z_{12}) - Z_{11}}{Z_{11} + (Rf // Z_{12})} \quad (66)$$

onde:

Z_{11} é a impedância do trecho da linha antes da falta;

Z_{12} é a impedância do trecho da linha após a falta.

Estas impedâncias são calculadas com a distância de falta estimada na subrotina de análise por impedância aparente.

Uma vez encontradas as ondas que trafegam na linha devido à falta com resistência diferente de zero, onda refletida e onda transmitida, os próximos passos da sub-rotina consistem na determinação do tempo de viagem das ondas na seção, na determinação do tempo de viagem das ondas devido à falta e no cálculo do índice da seção (OLIVEIRA et al., 2007, 2009). O tempo de viagem das ondas na seção é calculado segundo o exposto no Capítulo 3.

4.3.1 Tempo de Viagem das Ondas Devido a Falta

Para faltas sólidas o sinal de tensão gerado pela falta é autocorrelacionado (OLIVEIRA et al., 2007, 2009), enquanto que para faltas com $Rf \neq 0$ correlacionam-se dois sinais, o sinal de tensão que foi gerado no instante da falta, e o sinal de tensão gerado pela

¹// significa o paralelo entre os elementos

reflexão da onda. A técnica que é utilizada para a determinação do tempo de viagem da onda é a correlação entre os dois sinais acima citados.

A correlação das tensões é definida como (PROAKIS; MONALAKIS, 1996);

$$r_{v_1 v_2}(l) = \sum_{-\infty}^{\infty} v_1(l) v_2(n-l) \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (67)$$

onde

l é o indexador;

n define as amostras do sinal, $0 \leq n \leq \infty$;

$v_1 v_2$ são os subíndices que indicam os sinais que estão sendo correlacionados;

v_1 é o sinal de tensão 1;

v_2 é o sinal de tensão 2.

No caso especial em que $v_1 = v_2$, tem-se a autocorrelação, isto é a correlação de um sinal com ele mesmo. Que se define como;

$$r_{v_1 v_1}(l) = \sum_{-\infty}^{\infty} v_1(l) v_1(n-l) \quad (68)$$

O que para sequências de duração finita acostuma-se expressar em termos de limites finitos de somatório, isto é:

$$r_{v_1 v_2}(l) = \sum_{n=i}^{N-|K|-l} v_1(l) v_2(n-l) \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (69)$$

onde:

N é o número de amostras do sinal.

O resultado da correlação será o número da amostra N_p onde se obteve a maior similitude, o que aplicando (70) dá o tempo de viagem da onda devido à falta (OLIVEIRA et al., 2007, 2009);

$$t_a = \frac{N_p}{F_s} \quad (70)$$

onde:

t_a é o tempo de viagem da onda devida a falta;

F_s é a frequência de amostragem do sinal;

N_p é o numero da amostra onde a correlação apresentou um pico.

4.3.2 Cálculo do Índice da Falta

Para o cálculo do índice da falta (43), utiliza-se o tempo de viagem de uma onda na seção em análise (47) e o tempo de viagem da onda gerada pela falta (70). O tempo de viagem da onda gerada pela falta, obtido em (70), será de $t_a = 2\tau$. Quando a falta se encontra no final da seção em análise o tempo de viagem da onda será $t_a = 2t_b$, o que fará com que o índice k calculado em (43) seja sempre menor ou igual que 2, supondo que a falta esteja na seção em análise.

Desta forma o algoritmo estimará a distância e a seção onde ocorreu a falta.

4.4 Considerações Finais

Foram apresentadas neste Capítulo as diferentes etapas do algoritmo de LF proposto. No Capítulo 5 será apresentado um estudo de caso, bem como a análise dos resultados obtidos.

5 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados o estudo de caso proposto, as características do sistema, e os resultados assim como uma análise dos mesmos.

5.1 Estudo de Caso

O algoritmo proposto neste trabalho utiliza dados provenientes de RDPs e de relés digitais para o cálculo da distância da falta e da seção faltosa. A pouca quantidade de dados reais dificulta a validação do trabalho sem a utilização de simulações numéricas. Serão utilizados neste trabalho dados gerados com simulações executadas no **ATP-EMTP** (Bonneville Power Administration, 2009). O EMTP (ElectroMagnetic Transient Program) é um programa computacional dedicado a simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos polifásicos. **SEP** foram inicialmente estudados com a ajuda de analisadores de redes (do Inglês Networks Analyser), onde os sistemas eram representados fisicamente por elementos como resistores, indutores, etc. Os analisadores de redes exigiam grande espaço físico, limitando sua aplicação a sistemas de pequeno porte (STEVENSON, 1986). A construção do computador digital, e o grande avanço no desenvolvimento destes, fizeram com que programas de cálculo numérico desenvolvessem rapidamente. O **EMTP**, foi inicialmente desenvolvido pelo Dr. Hermann Dommel, que logo cedeu o programa para a *Bonneville Power Administration (BPA)*, que o administra e distribui desde então. O **ATP** (Alternative Transient Program) por sua vez, não é um programa livre, mas é distribuído gratuitamente. Atualmente o desenvolvimento do programa é feito por uma equipe da Universidade de Leuven, na Bélgica, mas também existem modelos desenvolvidos comercialmente (LASTRA, 1990). O algoritmo computacional de localização foi desenvolvido na plataforma Matlab (R) (The Mathworks Inc., 2006).

5.2 Sistema Teste

O sistema escolhido para a validação do algoritmo de localização é composto por duas seções do sistema *IEEE 13 Node Test Feeder* apresentado em (Distribution System Analysis Subcommittee, 2001). No Anexo A apresentam-se todas as características do sistema em maior detalhe.

5.2.1 Características do Sistema Teste

A seguir, resume-se as características dos alimentadores do sistema analisado. A Figura 13 apresenta o diagrama unifilar do sistema analisado, cujas distâncias listam-se na Tabela 2.

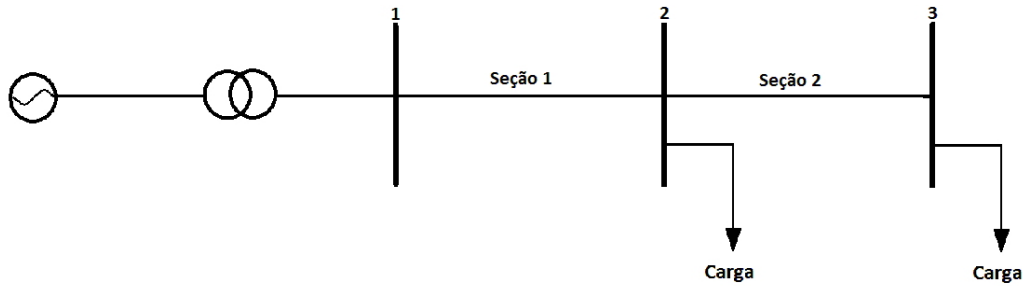


Figura 13: Sistema teste utilizado para a validação do algoritmo proposto.

5.2.1.1 Matrizes Impedâncias

O sistema possui uma configuração de linha, Tabela 25, sendo listadas abaixo as matrizes de impedâncias Z e de admitâncias Y da linha calculadas pelo **ATP** para $60Hz$.

Seção 1:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0.2166 + j0.6362 & 0.0975 + j0.3136 & 0.0988 + j0.2648 \\ 0.0975 + j0.3136 & 0.2109 + j0.6549 & 0.0959 + j0.2406 \\ 0.0988 + j0.2648 & 0.0959 + j0.2406 & 0.2134 + j0.6468 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega \\ km \end{bmatrix} \quad (71)$$

$$Y_{abc} = \begin{bmatrix} 0 + j3.947 & 0 - j1.239 & 0 - j0.777 \\ 0 - j1.239 & 0 + j3.733 & 0 - j0.454 \\ 0 - j0.777 & 0 - j0.454 & 0 + j3.535 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu S \\ km \end{bmatrix} \quad (72)$$

Seção 2:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0.4676 + j0.7341 & 0.0982 + j0.2632 & 0.0969 + j0.3117 \\ 0.0982 + j0.2632 & 0.4644 + j0.7446 & 0.0954 + j0.2392 \\ 0.0969 + j0.3117 & 0.0954 + j0.2392 & 0.4620 + j0.7526 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega \\ km \end{bmatrix} \quad (73)$$

$$Y_{abc} = \begin{bmatrix} 0 + j3.550 & 0 - j0.663 & 0 - j1.043 \\ 0 - j0.663 & 0 + j3.228 & 0 - j0.401 \\ 0 - j1.043 & 0 - j0.401 & 0 + j3.378 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu S \\ km \end{bmatrix} \quad (74)$$

Tabela 2: Dados das seções

Dados das seções			
Nó	Nó	Comprimento(m)	Configuração
1	2	1600	601
2	3	1280	602

5.3 Casos estudados

No processo de avaliação do algoritmo foram simuladas faltas fase – terra ($a - g$), ($b - g$) e ($c - g$). Sendo simuladas faltas em oito distâncias para três diferentes tipos de carregamento, num total de 72 casos. Foram também simuladas faltas com resistências de falta não nulas. Os erros relativos das estimativas das distâncias da falta, foram calculados segundo (75) apresentado em (C37.114-2004, 2005).

$$erro [\%] = \frac{d_{estimada} - d_{correta}}{L_t} \cdot 100\% \quad (75)$$

onde:

$d_{estimada}$ é a distância estimada da falta [m];

$d_{correta}$ é a distância real da falta [m];

L_t é o comprimento total do alimentador [m].

5.3.1 Características do Carregamento

Nas Tabelas 3, 4 e 5 apresentam-se detalhes dos três diferentes tipos de carregamento utilizados no estudo de caso.

Tabela 3: Condição de carregamento 1.

Condição de carregamento 1			
Seção 1	Fase a	R (Ω)	200
		L (mH)	610
	Fase b	R (Ω)	488
		L (mH)	863
	Fase c	R (Ω)	488
		L (mH)	863
Seção 2	Fase a	R (Ω)	312
		L (mH)	690
	Fase b	R (Ω)	387
		L (mH)	821
	Fase c	R (Ω)	387
		L (mH)	821

5.4 Resultados

A seguir apresentam-se os resultados obtidos para cada uma das simulações realizadas.

5.4.1 Faltas na fase a

A Tabela 6 apresentam-se os resultados obtidos nas simulações realizadas na seção 1 para faltas tipo fase 'a'-terra na condição de carregamento 1.

Podem-se ver na Tabela 6 os erros na estimativa da distância da falta assim como o índice "k" da seção.

Tabela 4: Condição de carregamento 2.

Condição de carregamento 2			
Seção 1	Fase a	R (Ω)	394
		L (mH)	610
	Fase b	R (Ω)	300
		L (mH)	700
	Fase c	R (Ω)	150
		L (mH)	350
Seção 2	Fase a	R (Ω)	280
		L (mH)	600
	Fase b	R (Ω)	300
		L (mH)	750
	Fase c	R (Ω)	400
		L (mH)	800

Tabela 5: Condição de carregamento 3.

Condição de carregamento 3			
Seção 1	Fase a	R (Ω)	200
		L (mH)	500
	Fase b	R (Ω)	250
		L (mH)	700
	Fase c	R (Ω)	200
		L (mH)	350
Seção 2	Fase a	R (Ω)	200
		L (mH)	500
	Fase b	R (Ω)	250
		L (mH)	700
	Fase c	R (Ω)	350
		L (mH)	700

Tabela 6: Falta na fase a, condição de carregamento 1.

Seção 1					
Condição de Carregamento 1					
Local Real (m) Seção 1	fase "a"				
	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
160	1,28	148,9	0,01	0,39	11,10
640	0,65	603,4	0,04	1,27	36,60
960	0,518	905	0,07	1,91	55,00
1440	0,91	1378,8	0,11	2,13	61,20

Este último apresenta um valor alto para a distância falta igual à 160m. Este erro se deve a proximidade da falta à **SE**, o que faz com que as reflexões interfiram na obtenção do sinal faltoso.

A Tabela 7 apresentam-se os resultados obtidos nas simulações realizadas na seção 2 para faltas tipo fase 'a'-terra na condição de carregamento 1.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados das simulações realizadas na seção 1 para

Tabela 7: Faltas na fase *a*, condição de carregamento 1.

Seção 2					
Condição de Carregamento 1					
Local Real (m)	fase "a"				
Seção 2	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
1696	0,64	1655,9	0,01	1,39	40,10
2048	1	2010,5	0,04	1,30	37,50
2272	1,72	2261,8	0,07	0,35	10,20
2656	2,9	2602,1	0,11	1,87	53,90

faltas tipo fase 'a'-terra na condição de carregamento 2.

Tabela 8: Faltas na fase *a*, condição de carregamento 2.

Seção 1					
Condição de Carregamento 2					
Local Real (m)	fase "a"				
Seção 1	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
160	1,28	148,9	0,01	0,39	11,10
640	0,65	603,5	0,04	1,27	36,50
960	0,52	905,1	0,07	1,91	54,90
1440	0,91	1379	0,11	2,12	61,00

Na Tabela 9 são apresentados os resultados das simulações realizadas na seção 1 para faltas tipo fase 'a'-terra na condição de carregamento 2.

Tabela 9: Faltas na fase *a*, condição de carregamento 2.

Seção 2					
Condição de Carregamento 2					
Local Real (m)	fase "a"				
Seção 2	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
1696	2,74	1660,9	0,01	1,22	35,10
2048	0,99	2011,5	0,04	1,27	36,50
2272	1,72	2251,8	0,07	0,70	20,20
2656	2,9	2603,1	0,11	1,84	52,90

Os resultados obtidos não apresentam uma diferença significativa com relação aos resultados da condição de carregamento 1.

As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados das simulações realizadas nas seções 1 e 2 para faltas tipo fase 'a'-terra na condição de carregamento 3.

Nestas vemos que os resultados são muito semelhantes aos obtidos para a mesmas condições de falta apresentados anteriormente.

5.4.2 Faltas na fase *b*

Nas Tabelas a seguir se apresentam os resultados obtidas para faltas tipo fase 'b'-terra para as três diferentes condições de carregamento.

Tabela 10: Faltas na fase *a*, condição de carregamento 3.

Seção 1					
Condição de Carregamento 3					
Local Real (m)	fase "a"				
Seção 1	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
160	1,28	148,9	0,01	0,39	11,10
640	0,65	603,5	0,04	1,27	36,50
960	0,52	905,1	0,07	1,91	54,90
1440	0,92	1379	0,11	2,12	61,00

Tabela 11: Faltas na fase *a*, condição de carregamento 3.

Seção 2					
Condição de Carregamento 3					
Local Real (m)	fase "a"				
Seção 2	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
1696	9,88	1659,5	0,01	1,27	36,50
2048	1,01	2009,4	0,04	1,34	38,60
2272	1,75	2249,2	0,07	0,79	22,80
2656	3,02	2602,7	0,11	1,85	53,30

Na Tabela 12 apresentam-se os resultados das faltas simuladas na seção 1 para a condição de carregamento 1. As estimativas das distâncias apresentam erros menores dos encontrados para a fase *a*, porém não acontece o mesmo com os coeficientes "*k*", onde erros maiores são obtidos. Estes erros, acredita-se, são devidos a problemas de instabilidade numérica obtida nas simulações.

Tabela 12: Faltas na fase *b*, condição de carregamento 1.

Seção 1					
Condição de Carregamento 1					
Local Real (m)	fase "b"				
Seção 1	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
160	0,34	150	0,01	0,35	10,00
640	3,26	608,1	0,04	1,11	31,90
960	0,49	910,5	0,06	1,72	49,50
1440	2,18	1391,8	0,11	1,67	48,20

Na Tabela 13 apresentam-se os resultados das faltas simuladas na seção 2 para a condição de carregamento 1.

Na Tabela 14 apresentam-se os resultados obtidos na seção 1 para faltas tipo fase 'b'-terra na condição de carregamento 2.

Na Tabela 15 apresentam-se os resultados obtidos na seção 2 para faltas tipo fase 'b'-terra na condição de carregamento 2.

A Tabela 16 apresentam-se os resultados para faltas na seção 2 do tipo fase 'b'-terra na condição de carregamento 3. Nota-se ainda, que em todas as simulações erros de grande valor são obtidos para o fator "*k*".

Tabela 13: Faltas na fase *b*, condição de carregamento 1.

Seção 2					
Condição de Carregamento 1					
Local Real (m)	fase "b"				
Seção 2	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
1696	2,3	1668,8	0,01	0,94	27,20
2048	0,98	2027,4	0,04	0,72	20,60
2272	1,22	2250,7	0,07	0,74	21,30
2656	1,65	2600,8	0,11	1,92	55,20

Tabela 14: Faltas na fase *b*, condição de carregamento 2.

Seção 1					
Condição de Carregamento 2					
Local Real (m)	fase "b"				
Seção 1	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
160	0,34	150	0,01	0,35	10,00
640	3,26	608,4	0,04	1,10	31,60
960	0,49	910,3	0,06	1,73	49,70
1440	2,17	1391,7	0,1	1,68	48,30

Tabela 15: Faltas na fase *b*, condição de carregamento 2.

Seção 2					
Condição de Carregamento 2					
Local Real (m)	fase "b"				
Seção 2	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
1696	0,57	1668,6	0,01	0,95	27,40
2048	0,97	2027,6	0,04	0,71	20,40
2272	1,21	2251,7	0,07	0,70	20,30
2656	1,65	2600,9	0,11	1,91	55,10

Tabela 16: Faltas na fase *b*, condição de carregamento 3.

Seção 1					
Condição de Carregamento 3					
Local Real (m)	fase "b"				
Seção 1	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
160	0,54	150	0,01	0,35	10,00
640	3,26	608,4	0,04	1,10	31,60
960	0,49	910,7	0,06	1,71	49,30
1440	2,17	1392	0,1	1,67	48,00

A Tabela 17 apresentam-se os resultados para faltas na seção 2 do tipo fase 'b'-terra na condição de carregamento 3.

Nas Tabelas 14 e 16 assim como em 15 e 17 se pode ver que os resultados não apresentam diferença com a variação do carregamento.

Tabela 17: Falhas na fase *b*, condição de carregamento 3.

Seção 2					
Condição de Carregamento 3					
Local Real (m)	fase "b"				
Seção 2	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
1696	0,61	1672,8	0,01	0,81	23,20
2048	0,93	2026,8	0,04	0,74	21,20
2272	1,21	2250,6	0,07	0,74	21,40
2656	1,69	2601,3	0,11	1,90	54,70

5.4.3 Falhas na fase *c*

As Tabelas a seguir mostram os resultados obtidos para as faltas simuladas na fase *c* em cada uma das três condições de carregamento. As Tabela 18 e 19 apresentam os resultados para faltas na seção 1 e 2 do tipo fase 'c'-terra na condição de carregamento 1. Nela se vê que a falta no início da seção apresenta um valor do índice "k" maior do esperado. Este comportamento é bastante similar aos obtidos para faltas tipo fase 'a'-terra. Novamente, acredita-se que estes erros forma devidos a instabilidade numérica nas simulações, fato que aumenta o numero de reflexões.

Tabela 18: Falhas na fase *c*, condição de carregamento 1.

Seção 1					
Condição de Carregamento 1					
Local Real (m)	Fase "c"				
Seção 1	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
160	2,27	149,5	0,01	0,36	10,50
640	0,64	606,2	0,04	1,17	33,80
960	0,48	906,8	0,07	1,85	53,20
1440	0,88	1386,3	0,11	1,86	53,70

Tabela 19: Falhas na fase *c*, condição de carregamento 1.

Seção 2					
Condição de Carregamento 1					
Local Real (m)	Fase "c"				
Seção 2	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
1696	0,66	1666,8	0,01	1,01	29,20
2048	1	2011,5	0,04	1,27	36,50
2272	1,2	2249,6	0,07	0,78	22,40
2656	1,6	2600,2	0,11	1,94	55,80

Na Tabela 20 apresentam-se os resultados obtidos para faltas tipo fase 'c'-terra na condição de carregamento 2.

A Tabela 22 apresenta os resultados para faltas tipo fase 'c'-terra na condição de carregamento 3.

Nota-se analisando as Tabelas 20, 21, 22 e 23 que as estimativas não apresentam variação com as condições do carregamento do sistema.

Tabela 20: Faltas na fase c, condição de carregamento 2.

Seção 1					
Condição de Carregamento 2					
Local Real (m)	Fase "c"				
Seção 1	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
160	2,27	149,5	0,01	0,36	10,50
640	0,64	606,2	0,04	1,17	33,80
960	0,48	906,8	0,07	1,85	53,20
1440	0,88	1386,3	0,1	1,86	53,70

Tabela 21: Faltas na fase c, condição de carregamento 2.

Seção 2					
Condição de Carregamento 2					
Local Real (m)	Fase "c"				
Seção 2	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
1696	0,65	1665,9	0,01	1,05	30,10
2048	1,04	2010,5	0,04	1,30	37,50
2272	1,2	2251,6	0,07	0,71	20,40
2656	1,56	2600,4	0,1	1,93	55,60

Tabela 22: Faltas na fase c, condição de carregamento 3.

Seção 1					
Condição de Carregamento 3					
Local Real (m)	Fase "c"				
Seção 1	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
160	2,27	149,5	0,01	0,36	10,50
640	0,64	606,4	0,04	1,17	33,60
960	0,48	906,9	0,07	1,84	53,10
1440	0,88	1386,8	0,1	1,85	53,20

Tabela 23: Faltas na fase c, condição de carregamento 3.

Seção 2					
Condição de Carregamento 3					
Local Real (m)	Fase "c"				
Seção 2	k	distância(m)	Rf	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)
1696	0,69	1666,4	0,01	1,03	29,60
2048	0,99	2011	0,04	1,28	37,00
2272	1,2	2248,2	0,07	0,83	23,80
2656	1,52	2599,7	0,1	1,95	56,30

As Figuras 14, 15 e 16 apresentam o erro relativo na estimativa da distância da falta para cada condição de carregamento.

Pode-se notar das figuras anteriores que a estimativa da distância de falta tem um aumento do erro proporcional a distância de falta.

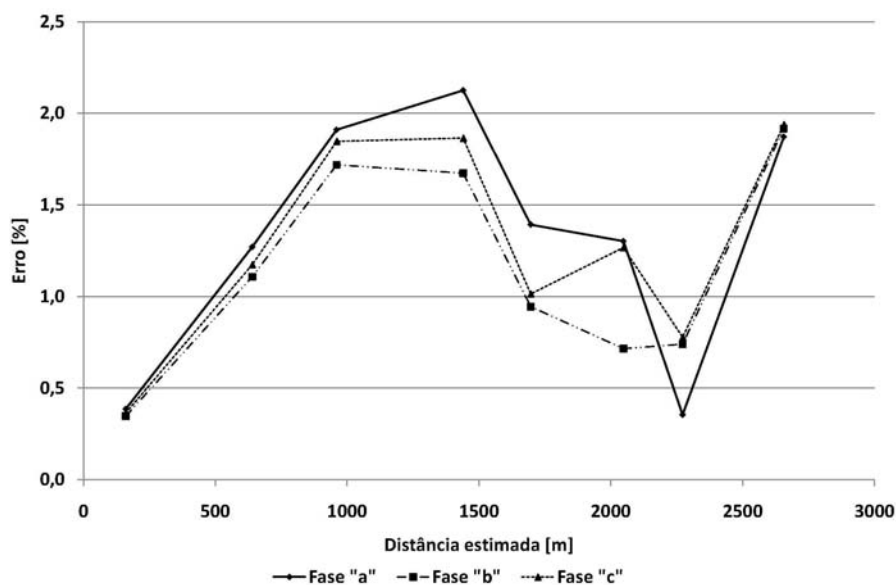


Figura 14: Faltas nas fases "a", "b" e "c" na condição de carregamento 1.

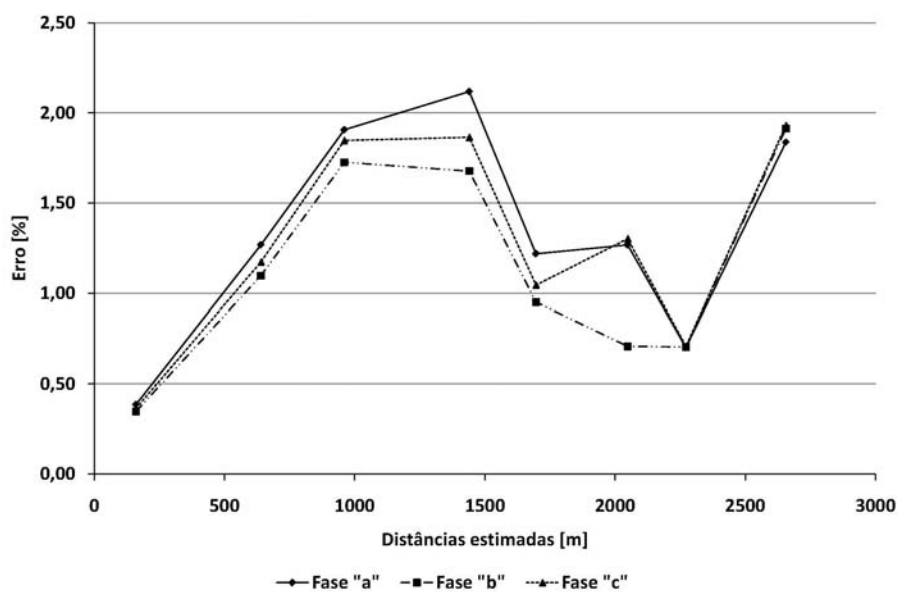


Figura 15: Faltas nas fases "a", "b" e "c" na condição de carregamento 2.

5.4.4 Faltas na fase *a* com resistência de falta

A Tabela 24 apresenta os resultados das faltas simuladas com resistência de falta diferente de zero na seção 1, na condição de carregamento 1. Analisando os resultados, pode-se notar que a estimativa da resistência de falta possui erros inferiores a 10%. A estimativa do índice "*k*" apresentou erros altos. Acredita-se que estes foram obtidos pela instabilidade numérica obtidas nas simulações.

A Figura 17 apresenta um dos sinais de tensão simulados no ATP, nele apreciam-se as instabilidades que acredita-se sejam a causa das diferenças encontradas entre os resultados obtidos e os resultados esperados.

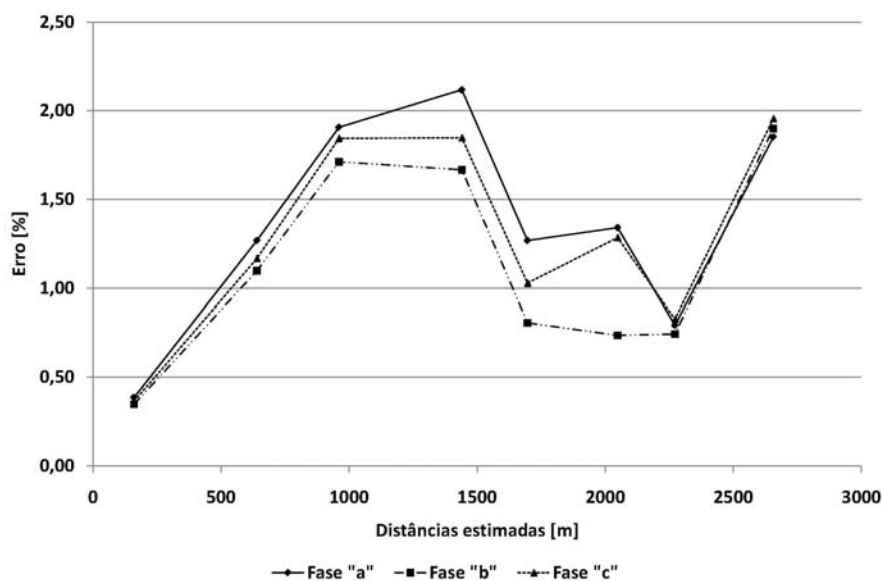


Figura 16: Faltas nas fases "a", "b" e "c" na condição de carregamento 3.

Tabela 24: Faltas na fase *a* com resistência de falta, na condição de carregamento 1.

Seção 1							
Condição de Carregamento 1							
fase "a"							
Local Real (m)	Rf (Ω)	k	distância(m)	Rf (est.)	erro Dist. (%)	erro Dist. (m)	erro Rf
320	0,1	0,14	297	0,077	1,44	23,00	0,02
320	1	0,14	302,2	0,975	1,11	17,80	0,03
640	0,1	0,41	603,4	0,06	2,29	36,60	0,04
640	1	0,43	608,4	0,95	1,98	31,60	0,05
960	0,1	2,96	904,9	0,02	3,44	55,10	0,08
960	1	2,24	909,8	0,92	3,14	50,20	0,08
1280	0,1	0,47	1216,3	0,08	3,98	63,70	0,02
1280	1	0,5	1221,1	0,90	3,68	58,90	0,10

5.5 Considerações Finais

Foram apresentados neste Capítulo as principais características do sistema utilizado na validação do algoritmo assim como os resultados obtidos nas simulações. No Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões obtidas deste trabalho.

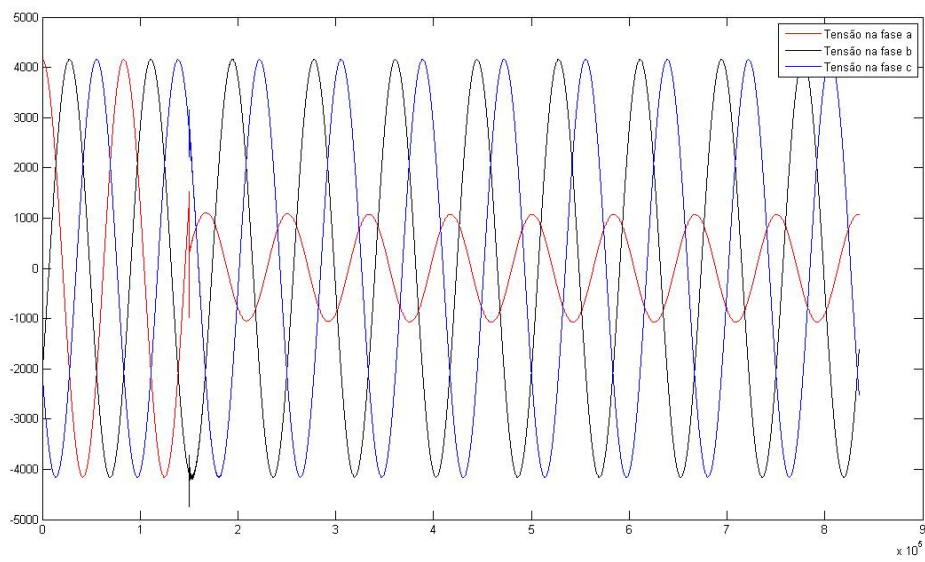


Figura 17: Sinais de tensão e corrente simulados para o sistema estudo de caso.

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Na realização deste trabalho visou-se a obtenção de uma nova formulação para a localização de faltas em **SDEE** que permitisse em uma só formulação a obtenção de todas as informações necessárias para uma estimativa do local da falta com alta precisão. Utilizaram-se para isto duas técnicas já consagradas, uma para a estimação da distância da falta baseada na **IA**, e a outra para a determinação da seção faltosa baseada nas **OV**.

Esta formulação utiliza as principais características de cada uma das técnicas que a compõem para obter assim todas as informações necessárias. A técnica baseada na **IA** permite obter uma estimativa da distância da falta e da resistência da falta, porém **SDEE** podem apresentar mais do que um local com a mesma **IA**, indicando portanto mais do que um local da falta. Para contornar este problema propôs-se neste trabalho a utilização de uma técnica baseada nas **OV** para a determinação da seção em falta. Esta permite estimar a seção onde a falta se encontra. Desta forma ambas as técnicas se complementam na determinação de um único local da falta.

Assim também no caso de faltas com resistência de falta não nulas a técnica das **OV** utiliza os valores de distância e da R_f previamente estimados com o algoritmo de localização por **IA**.

O sistema foi testado num alimentador trifásico desequilibrado, apresentando resultados promissórios na determinação do local da falta. Porém nesta dissertação não foi atingido o objetivo de estudar o desempenho da formulação em um **SDEE** com laterais, isto devido aos problemas encontrados na obtenção dos sinais no simulador de transitórios. O método apresentou um bom desempenho perante a variação do carregamento do sistema, aprecia-se que os resultados obtidos não apresentam variação significativa, tanto da distância estimada como do índice da seção, quando mudadas as condições de carregamento do sistema. O desempenho foi bom na determinação da seção em falta, apresentando erros para faltas próximas à descontinuidades do sistemas, como a **SE** ou a mudança de seção. As estimativas das distâncias da falta apresentaram um aumento nos erros relativos proporcionalmente com o aumento da distância da falta. Acredita-se que este fato seja por causa da influencias das descontinuidades da rede, como cargas presentes no final do alimentador ou ramificações. No entanto a formulação proposta não apresentou bons resultados na localização de faltas com resistências altas. A estimativa do índice " k " apresentou, no entanto, erros altos e inesperados. Acredita-se que os erros na estimativa da distância da falta com resistência diferentes de zero e na determinação do índice " k " foram obtidos devido a instabilidade numérica encontrada nas simulações realizadas. A formulação proposta depende muito da frequência predominante da falta para a determinação do tempo de viagem das ondas na seção. Durante o desenvolvimento das

simulações das faltas e na determinação desta frequência predominante apreciou-se que os sinais faltosos possuíam mais do que uma frequência predominante e que os valores de picos destas são bem menores do que o esperado. Fato que influenciou na determinação dos índices das seções.

Acredita-se assim que é ainda necessário avaliar o desempenho com um **SDEE** de características mais complexas.

6.2 Trabalhos Futuros

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho não foi possível realizar a avaliação da formulação proposta num **SDEE** de características mais complexas, portanto pretende-se no futuro realizar os testes num **SDEE** mais complexo, avaliando o desempenho da formulação proposta nas diferentes seções do sistema. Assim também pretende-se realizar testes utilizando outros tipos de modelos de linhas, como por exemplo o modelo Noda (NODA; NAGAOKA; AMETANI, 1996), que segundo a bibliografia elimina os problemas de instabilidade numérica presentes nos outros modelos por conta da utilização das matrizes de transformação (Power System Relay Committee, 2004). Propõe-se também que sejam estudados **SDEE** com geração distribuída de Energia Elétrica. Sendo a geração distribuída um ponto de altíssimo interesse que vem ganhando relevância dia a dia.

REFERÊNCIAS

- AKIMOTO, Y. et al, S. Fault protection based on traveling wave theory. **Electrical Engineering in Japan**, [S.l.], v.98, n.1, p.79–86, Jan 1978.
- BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Alternative transient program: electromagnetic transient program**. Portland, 2009.
- CARSON, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. **Bell System Technical Journal**, [S.l.], v.5, p.539–554, 1926.
- CHIPMAN, R. A. **Theory and problems of transmission lines**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1971.
- DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE. Radial distribution test feeders. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Columbus. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2001. p.908–912.
- ELHAFFAR, A. M. **Power transmission line fault location based on current traveling waves**. 2008. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia) — Department of Electrical Engineering, Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland, 2008.
- ELHAFFAR, A. M.; LEHTONEN, M. Multi-end traveling wave fault location based on current traveling waves. In: PSCC, 16., 2008, Glasgow. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2008.
- FILOMENA, A. D. **Localização de defeitos em alimentadores primários subterrâneos**: formulação estendida baseada na impedância aparente. 2008. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- FILOMENA, A. D.; RESENER, M.; SALIM, R. H.; BRETAS, A. S. Fault location for underground distribution feeders: an extended impedance-based formulation with capacitive current compensation. **Electrical Power and Energy Systems**, [S.l.], v.31 p.489–496, 2009.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S. **Sistemas de potencia, análisis y diseño**. 3. ed. Buenos Aires, Argentina: Thomson, 2003.
- GREENWOOD, A. **Electrical transients in power systems**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1971.
- HEVIA, O. P. Alternative transients program: comparison of transmission line models. **Revista Latinoamericana del ATP**, [S.l.], v.1, p. 1–5, Mar. 1999.

HIZAM, H.; CROSSLEY, P. A. Estimation of fault location on a radial distribution network using fault generated travelling waves signals. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2007, Tampa. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2007. v.3, p. 1107–1112.

HIZAM, H. et al. Fault section identification and location on a distribution feeder using traveling waves. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2002, Chicago. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2002. v.3, p.1107–1112.

IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY **C37.114-2004**: I. S. IEEE guide for determining fault location on AC transmission and distribution lines. [S.l.], 2005. C37.114 TM.

KERSTING, W. H. **Distribution system modeling and analysis**. [S.l.]: CRC Press, 2002.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1994.

LASTRA, R. B. **Manual de ATP para inexpertos**. [S.l.]: IITRE, Facultad de Ingenieria Universidad Nacional de La Plata, 1990.

LEE, S.-J. et al.. An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], v.19, n.2, p.524– 532, Apr. 2004.

LIN, D. et al. Fault location for transmission line based on traveling waves using correlation analysis method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION, 2008, Chongqing. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2008.

LIN, Y.-H.; LIU, C.-W. A new DFT-based phasor computation algorithm for transmission line digital protection. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION 2002: ASIA PACIFIC, 2002. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2002. v.3.

MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. A new fault location technique for radial distribution systems based on high frequency signals. In: IEEE POWER ENGINEER SOCIETY SUMMER MEETING, 1999, Edmonton. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1999. p.426–431.

MARTI, J. Accurate modeling of frequency - dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [S.l.], v.PAS-101, n.1, p.147–157, Jan. 1982.

MARTI, L. Simulation of transients in underground cables with frequency - dependent modal transformation matrices. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], v.3, n.3, p.1099–1110, Jul. 1988.

MARTINEZ, J. A.; GUSTAVSEN, B.; DURBAK, D. Parameter determination for modeling system transients-part I: overhead lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], v.20, n.3, p.2038–2044, Jul. 2005.

- MCLAREN, P. G.; CROSSLEY, P. A. Distance protection based on travelling waves. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [S.l.], v.102, n.9, p. 2971-2983, 1983.
- MORETO, M. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia**: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais. 2005. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- NODA, T.; NAGAOKA, N.; AMETANI, A. Phase domine modeling of frequency dependent transmission lines by means of an arma model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], v.11, n.1, Jan. 1996.
- OLIVEIRA, K. R. C. et al. Identificação da seção faltosa em sistemas de distribuição desequilibrados utilizando o princípio das ondas viajantes. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA,17., 2008, Juiz de Fora. **Anais ...** [S.l.: s.n.], 2008.
- OLIVEIRA, K. R. C. et al. Faulted branch identification on power distribution systems under noisy enviroment. In: IPST 2009 CONFERENCE, 2009, Kyoto. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2009.
- POWER SYSTEM RELAY COMMITTEE. **EMTP reference models for transmission lines relay testing**. [S.l.]: IEEE Power Engeneering Society, 2004.
- PROAKIS, J. G.; MONALAKIS, D. G. **Digital signal processing**. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- SAADAT, H. **Power system analysis**. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Primis Custom Publishing, 2002.
- SALIM, R. H. **Novos desenvolvimentos na localização de faltas em sistemas de distribuição de energia Elétrica fundamentada na impedância**. 2008. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- SALIM, R. H. et al. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], v.23, n.4, p.1846–1856, 2006.
- SALIM, R. H. et al. Extended fault-location formulation for power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], v.24, n.2, p.508–516, 2009.
- STEVENSON, W. D. J. **Elemento de análise de sistemas de potência**. [S.l.]: McGraw-Hill do Brasil, 1986.
- SWIFT, S. W. The spectra of fault-induced transients. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [S.l.], v. PAS-98, n. 3, p.940–947, May 1979.
- REASON TECNOLOGIA. **Localização de faltas por ondas viajantes**. [S.l.], 2009.
- THE MATHWORKS INC. **Mathworks Matlab**. [S.l.], 2006.

THOMAS, D. W. P.; CARVALHO, R. J. ; PEREIRA, E. T. Fault location in distribution systems based on traveling waves. In: IEEE BOLOGNA POWERTECH CONFERENCE, 2003, Bologna. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2003.

ZANETTA JR., L. C. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência** . São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

ZHU, J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. A. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], v.12, n.2, p.801–809, Apr. 1997.

ZIMMERMAN, K.; COSTELLO, D. Impedance-based fault location experience. In: IEEE RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE, 2006, Albuquerque. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–16.

ANEXO A SISTEMA TESTE

Tabela 25: Configuração geométrica das linhas.

Overhead Line Configurations (Config.)				
Config.	Phasing	Phase	Neutral	Spacing
		ACSR	ACSR	ID
601	B A C N	556,500 26/7	4/0 6/1	500
602	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1	500

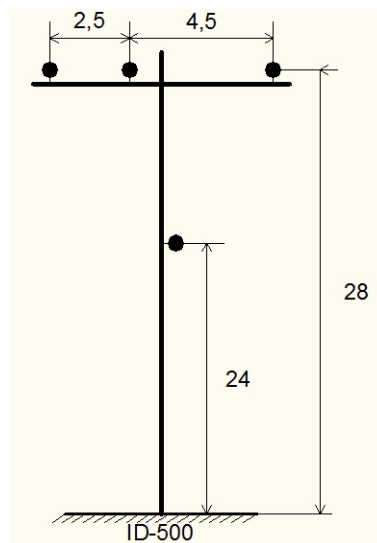


Figura 18: Configuração das estruturas, distâncias em [ft].

Tabela 26: Características dos Transformadores.

Dados dos Transformadores					
	kVA	kV-AT	kV-BT	R - %	X - %
Subestação:	5.000	115 - D	4.16 Gr. Y	1	8