



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RAISSA DE PAULA PEREIRA

**TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALHAS DE ISOLAÇÃO EM CIRCUITOS
DE DISTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEOS APLICADAS NO ATP**

SÃO LUÍS –MA

2017

RAISSA DE PAULA PEREIRA

**TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALHAS DE ISOLAÇÃO EM CIRCUITOS
DE DISTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEOS APLICADAS NO ATP**

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMA como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Clóvis Bôsko Mendonça Oliveira

SÃO LUÍS –MA

2017

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Pereira, Raissa de Paula.

TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALHAS DE ISOLAÇÃO EM
CIRCUITOS DE DISTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEOS APLICADAS NO ATP /
Raissa de Paula Pereira. - 2017.

53 f.

Orientador(a): Clóvis Bôsco Mendonça Oliveira.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2017.

1. Falhas de isolação. 2. Localização. 3. Redes de
distribuição subterrâneas. I. Oliveira, Clóvis Bôsco
Mendonça. II. Título.

RAISSA DE PAULA PEREIRA

**TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALHAS DE ISOLAÇÃO EM CIRCUITOS
DE DISTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEOS APLICADAS NO ATP**

Monografia submetida à Coordenação do
Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da UFMA como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 26 / 07 / 2017

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Clóvis Bôsko Mendonça Oliveira
(Orientador – UFMA)



Prof. Dr. Shigeaki Leite de Lima
(Examinador – UFMA)



Prof^a. Dr^a. Silvangela Lilian da Silva Lima Barcelos
(Examinadora – UFMA)

*À minha família, por acreditar e
investir em mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que sempre me incentivou, em especial aos meus pais Vanusa e Antonio que sempre estiveram comigo, cuidando, apoiando e proporcionando o melhor que podiam para que eu crescesse.

Ao meu namorado Filipe que sempre me acompanhou nessa caminhada. Obrigada pela força e apoio.

Ao meu orientador, professor Clóvis Oliveira, pelo conhecimento a mim repassado, pela paciência e orientação sempre oportuna. Obrigada pela confiança.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica – UFMA que proporcionaram o meu crescimento intelectual e profissional.

Agradeço a todos os meus amigos de graduação, em especial Mila Stefanny e Juliana Marise, pelo apoio e conhecimento compartilhados. Obrigada, meninas.

À Universidade Federal do Maranhão por proporcionar um ambiente favorável à minha formação acadêmica.

RESUMO

Devido a sua natureza construtiva, as redes de distribuição subterrâneas proporcionam uma maior dificuldade de localização de falhas de isolamento em seus circuitos. Grande parte do custo inicial na aplicação de redes subterrâneas dá-se ao uso de condutores com isolamento apropriada, pois essa isolamento é determinante para confiabilidade dos equipamentos utilizados na distribuição. É indispensável, portanto, o uso de tecnologias que propiciem maior proteção dos cabos subterrâneos para assim garantir-se maior credibilidade das redes de distribuição subterrâneas. Ademais, observa-se que localizar falhas de isolamento é um processo custoso e demorado, proporcionando um complicador no processo de manutenção e impactando negativamente nos índices de continuidade no fornecimento de energia elétrica e conseqüentemente, na qualidade do serviço. Assim, surge a necessidade de se buscar técnicas alternativas e econômicas de localização dessas falhas de isolamento para minimizar os danos causados pela duração de falhas em redes subterrâneas tornando ainda mais viável a utilização desse sistema de distribuição de energia elétrica. Dessa forma, o presente trabalho apresenta simulações e análises de métodos implicados na localização de falhas em redes de distribuição subterrâneas, desenvolvendo modelos de simulação no simulador computacional ATP.

Palavras-chave: Falhas de isolamento, redes de distribuição subterrâneas, localização.

ABSTRACT

Due to their constructive nature, underground distribution networks provide greater difficulty in locating insulation faults in their circuits. Much of the initial cost in the application of underground networks is given to the use of conductors with appropriate insulation, since this isolation is determinant for reliability of the equipment used in the distribution. Therefore, the use of technologies that provide greater protection of underground cables is indispensable in order to guarantee greater credibility of the underground distribution networks. In addition, it is observed that locating insulation faults is a costly and time-consuming process, providing a complicator in the maintenance process and negatively impacting the continuity of electricity supply and, consequently, quality of service. Therefore, it is necessary to search for alternative and economic techniques to locate these insulation faults to minimize the damage caused by the duration of failures in underground networks, making the use of this electricity distribution system even more feasible. In this way, the present work presents simulations and analysis of methods involved in fault localization in underground distribution networks, developing simulation models in the ATP computational simulator.

Keywords: Isolation faults, underground distribution networks, location.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Parâmetros de uma LT: Modelo PI	19
Figura 2. 2 - LT com parâmetros concentrados.....	20
Figura 2. 3 - Cabo coaxial	22
Figura 2. 4 - Desenho de corte transversal de um cabo coaxial.....	23
Figura 2. 5 - LT sem perdas	26
Figura 2. 6 - LT com perdas	26
Figura 3. 1 - LT1 em série com LT2	30
Figura 3. 2 - Composição das ondas refletida e refratada.....	31
Figura 3. 3 - LT com terminal em vazio	33
Figura 3. 4 - LT com terminal com carga.....	35
Figura 3. 5 - TDR 410.....	38
Figura 3. 6 - Display TDR 410.....	39
Figura 4. 1 - Janela Principal ATPDraw	40
Figura 4. 2 - Elementos básicos ATPDraw.....	41
Figura 4. 3 - Esquema de simulação TDR	42
Figura 4. 4 - Circuito ATPDraw para 1 metro do cabo XLEPE-N	44
Figura 4. 5 - Circuito simulado para XLPE-N com terminal sem perdas	44
Figura 4. 6 - Cabo XLEPE-N sem perdas para defeito de ruptura	45
Figura 4. 7 - Cabo XLPE-N sem perdas em curto-circuito	45
Figura 4. 8 - Cabo XLPE-N sem perdas em casamento de impedância	46
Figura 4. 9 - Circuito para 1 metro do cabo XLPE-N com perdas	47
Figura 4. 10 - Circuito simulado para o cabo XLPE-N com perdas	47
Figura 4. 11 - Cabo XLPE-N com perdas para defeito de ruptura.....	48
Figura 4. 12 - Cabo XLPE-N com perdas em curto-circuito	48
Figura 4. 13 - Cabo XLPE-N com perdas em casamento de impedâncias	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Pulso refletido em função da impedância da carga.....	29
Tabela 3. 2 - Reflexão para LT com terminal em vazio	33
Tabela 3. 3 - Reflexão para LT com terminal em curto-circuito.....	34
Tabela 3. 5 - Reflexão para LT sem descasamento de Impedâncias.....	35
Tabela 3. 6 - Especificações TDR 410	38
Tabela 4. 1 - Parâmetros do cabo XLPE-N	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
RDS	Rede de Distribuição Subterrânea
RDA	Rede de Distribuição Aérea
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
LT	Linha de Transmissão
TEM	<i>Transverse EletroMagnetic</i>
XLPE	Polietileno Entrecruzado
EPR	Etilenopropileno

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
.1.1. Objetivos	16
1.2. Estrutura do trabalho.....	17
2. MODELAGEM DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO	18
2.1 Parâmetros de uma Linha de Transmissão	18
2.2. Parâmetros de um cabo coaxial.....	21
2.3. Velocidade de Propagação	24
2.3.1. LT sem perdas	25
2.3.2. LT com perdas	26
3. TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEAS.....	28
3.1. Reflectometria no Domínio do Tempo - TDR	29
3.1.1. Linhas com Impedâncias Características Diferentes	30
3.1.2. Linha com terminal em vazio	32
3.1.3. Linha com terminal em curto-circuito	34
3.1.4. Linha sem defeito.....	34
3.2. Reflectometro no Domínio do Tempo	37
4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS	40
4.1. Simulação do cabo coaxial XLPE-N.....	43
4.1.1. XLPE-N – modelo sem perdas	43
4.1.2. XLPE-N – modelo com perdas	46
5. CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é formado pela geração, transmissão e distribuição. O setor de distribuição é responsável por conferir energia elétrica ao consumidor. Existem dois tipos de linhas utilizadas para este fim, linhas aéreas e subterrâneas, predominando as redes aéreas por conta da sua praticidade e baixo custo de instalação e manutenção.

A instalação de condutores direto no solo vem sendo cada vez mais difundida, devido principalmente ao atrativo econômico. Esta, que no passado era restrita a cabos de iluminação pública, instalados em parques e jardins, hoje em dia se estende também aos modernos sistemas de distribuição. (NOGUEIRA, 2010)

Segundo a Nota Técnica nº 0098 (ANEEL, 2014), “atualmente, no Brasil, há aproximadamente 1% de redes subterrâneas de distribuição. Dos mais de 13.000 km de cabos elétricos enterrados, cerca de 90% estão concentrados em apenas cinco distribuidoras”.

Entretanto, apesar do pequeno percentual das linhas subterrâneas no sistema de distribuição brasileiro, verifica-se que em valores absolutos, essa rede teve um crescimento considerável nos últimos anos.

Observa-se um aumento, em extensão, dessas redes de cerca de 17% entre 2001 e 2012. Por outro lado, no mesmo período, a extensão das redes aéreas cresceu em mais de 70%, o que levou a uma diminuição na participação das redes subterrâneas no total das redes de distribuição. (ANEEL, 2014)

As principais aplicações, hoje, das redes subterrâneas são em sistemas de distribuição interna em parques eólicos, loteamentos e condomínios. São usadas ainda em cidades históricas, devido a não interferência na paisagem urbana, preservando, assim, o design original das construções.

Atualmente, em sua maioria, a implantação de novas redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica é motivada pela solicitação das prefeituras para aplicação em projetos de revitalização urbana, em empreendimentos de construção de loteamentos e condomínios residenciais, e por grupos empresariais com a finalidade de criar um diferencial atrativo em regiões comerciais. (AZEVEDO, 2010)

Nesse cenário, a Rede de Distribuição Subterrâneas (RDS), em relação à Rede de Distribuição Aérea (RDA), oferece maior segurança no fornecimento de energia elétrica devido a sua natureza construtiva, pois os cabos enterrados

são menos expostos às interferências externas. Assim, a rede subterrânea apresenta menor incidência de falhas, conseqüentemente, menor frequência de manutenções, redução das interrupções no fornecimento de energia, maior da segurança da população além de ser visualmente mais atrativa. Porém, o seu custo inicial favorece a aplicação das redes aéreas que são mais simples e baratas.

AS Redes de Distribuição Subterrâneas proporcionam maior confiabilidade, segurança, integração com o meio ambiente, valorização da área e não possui interferência com arborização. Todavia, sua desvantagem é em relação a derivações complexas e alto investimento inicial, com utilização de itens, como cabos de energia de média tensão com isolamento elétrica adequada, podendo chegar a dez vezes mais que a rede convencional. (NOGUEIRA, 2010)

Grande parte do custo inicial na aplicação de redes subterrâneas dá-se ao uso de condutores com isolamento apropriada, pois essa isolamento é determinante para confiabilidade dos equipamentos utilizados na distribuição, pois um eventual problema de isolamento dos cabos subterrâneos traria conseqüências dispendiosas e onerosas para o sistema,

Os equipamentos elétricos utilizados em redes de distribuição subterrâneas, como cabos, transformadores, conectores e terminações, possuem características físicas com capacidade de suportabilidade elétrica e de intempéries ambientais diferenciadas dos mesmos equipamentos aplicados nas redes de distribuição aéreas, impactando diretamente na complexidade e nos custos destes. (USSUNA, 2014)

Além disso, segundo Ferreira et al., 2013 “condutores subterrâneos de sistemas de potência estão expostos a estresses de origem elétrica, mecânica e térmica durante a operação, os quais podem reduzir a vida útil ou mesmo danificar o isolamento do cabo”, levando a uma possível falha.

Os cabos utilizados nas linhas aéreas de distribuição utilizam o ar como isolante, pois possui uma alta rigidez dielétrica. Nas linhas subterrâneas a isolamento é somente o material sintético em volta do cabo, assim, é necessário que ele possua uma espessura suficiente capaz de suportar os esforços do

campo elétrico do condutor ao meio externo. Ademais, os cabos subterrâneos devem confinar o campo elétrico no seu interior, para tanto, precisam ser blindados e aterrados essa blindagem encarece a rede, pois deve ser feita em toda sua extensão. (NOGUEIRA, 2010)

Os possíveis defeitos na camada isolante do cabo, que podem causar ruptura dielétrica quando submetido ao campo elétrico, são oriundos de falhas no processo de fabricação, danos no momento da instalação ou degradação causada por intempéries ambientais no local em que o cabo se encontra instalado (USSUNA, 2014)

Sendo assim, os sistemas de distribuição de energia devem ser bem projetados, levando em consideração possíveis falhas e suas consequências, bem como o melhor modo de resolver problemas e restaurar o estado normal da rede. Nessa circunstância, as RDS apresentam dificuldades na localização e reparo de falhas e manutenção devido sua própria construção física.

Dessa forma, os índices de qualidade, baseados na duração das interrupções de fornecimento de energia, para as redes subterrâneas não se mostram atraentes. Na incidência de uma falha, normalmente, há uma demora considerável para localizar onde houve a perturbação.

Quando ocorrem as falhas em cabos subterrâneos são de custo mais elevado, pois exige a substituição da seção de linha defeituosa para o restabelecimento do sistema. De forma distinta as redes aéreas, onde a localização de defeitos pode ser realizada por meio de inspeções visuais, a topologia subterrânea impossibilita a utilização desta abordagem. (NOGUEIRA, 2010)

Assim, esses equipamentos, por serem instalados em locais de difícil acesso devem ser monitorados no decorrer de sua vida útil e no momento da falha, para assim favorecer a localização do problema e possibilitar a intervenção no defeito. (USSUNA, 2014)

Por isso, a análise de perturbações recorrentes em cabos enterrados é de grande importância, pois possibilita prever consequências que eventualmente podem ocorrer no funcionamento da rede. Para tal, é indispensável o uso de tecnologias que proporcionem maior proteção dos

cabos subterrâneos, além de investir no uso de dispositivos que possibilitem detecção e eliminação rápida de possíveis falhas.

A antecipação a uma falha, nas redes primárias, secundárias e equipamentos, é de vital importância, pois evita maiores riscos para as redes elétricas subterrâneas, equipamentos e pessoas. (RONCOLATTO, 2013).

Posto isso, o presente trabalho expõe uma análise das técnicas tradicionais de localização de falhas em sistemas de distribuição subterrâneos, desenvolvendo modelos de simulação no software ATP. Tais técnicas baseiam-se, principalmente, na Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR – *Time Domain Reflectometry*), que consiste na análise da reflexão de pulsos elétricos de curta duração que são injetados e viajam ao longo do comprimento do cabo. Esses pulsos refletem parte da sua energia quando encontram algum defeito ou a extremidade oposta do cabo, permitindo o diagnóstico da falha a partir desse retorno. (PALUDO, 2009).

Tais pulsos devem ionizar os defeitos existentes no cabo, alterando a impedância no local da falta, resultando na reflexão de parte de sua energia que representa falha presente no cabo. A TDR é uma técnica *off-line*, ou seja, deve ser usada com o cabo desenergizado, porém apresenta a vantagem de poder ser aplicada em campo sem que necessite de remoção do cabo. (USSUNA, 2014)

Através da TDR pode-se determinar a localização e o tipo de falha que ocorreu na rede, para isso se baseia no conceito de casamento de impedância. Linhas com descasamento de impedância, na incidência de um pulso de tensão podem refletir ou refratar parte da sua energia. Assim, dependendo do valor de impedância que o pulso incidente encontrar, haverá uma determinada reflexão que corresponde a uma falha específica. (AGILENT, 2013)

Numa linha real, o defeito pode ser de alta ou de baixa impedância, sendo que o que irá definir essa característica do defeito na aplicação de reflectometria é a polaridade da reflexão em relação ao pulso injetado. O tempo total que o pulso leva para refletir permite medir o comprimento do cabo, tendo em posse a velocidade de propagação do material. Assim, pode-se saber onde ocorreu a falha. (PALUDO, 2009).

Para a simulação das técnicas utilizou-se a representação por um modelo com parâmetros distribuídos de linhas eletromagnéticas, onde os efeitos físicos associados à tensão e corrente são representados por vários dispositivos por unidade de comprimento. (ZANETTA, 2003)

Um elemento distribuído representa um elemento infinitesimal de um cabo real. Logo, quanto maior for o número de elementos distribuídos que se utiliza para representar um cabo, mais próximo ao real se tornará a simulação. (PALUDO, 2009).

As simulações foram realizadas no *software* livre *ATPDraw*, derivado do ATP (*Alternative Transients Program*), usado para simulações de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência

1.1. Objetivos

O referente trabalho tem como objetivo analisar as soluções disponíveis na literatura do problema da localização de falhas de isolamento em redes de distribuição subterrâneas, utilizado o *software ATPDraw* para simulações. Os objetivos específicos estão listados abaixo:

1. Estudo das técnicas de localização de falhas em linha de distribuição subterrâneas.
2. Aprendizagem da manipulação do *software ATPDraw*.
3. Modelagem de linhas de transmissão eletromagnéticas.
4. Simulações e testes de técnicas de detecção de falhas.
5. Análise dos resultados obtidos

1.2. Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto pelo capítulo introdutório e mais 4 capítulos descritos abaixo. O capítulo 2 expõe a modelagem de linhas de transmissão e o comportamento de ondas eletromagnéticas se propagando em LTS. No Capítulo 3 são apresentadas técnicas de localização de falhas em Linhas de Distribuição Subterrâneas, enfatizando a Técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo. No Capítulo 4 são apresentados as simulações realizadas no *ATPDraw* e os resultados obtidos. O capítulo 5 aponta as conclusões observadas no trabalho.

2. MODELAGEM DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

As Redes de Distribuição Subterrâneas constituem-se um sistema robusto e de grande porte. Assim, para análise de perturbações é conveniente adotar modelos que reproduzam o comportamento real das linhas de distribuição. Neste capítulo será abordada a modelagem de linhas de distribuição, entretanto, nesse contexto, será usado o termo Linhas de Transmissão - LT, não no sentido da parte do setor elétrico responsável pela transmissão, mas do ponto de vista eletromagnético, referindo-se ao meio de propagação de energia eletromagnética.

Existem diversos modelos de LT, a representação vai depender do tipo de linha, levando em consideração propriedades específicas da aplicação, frequência, nível de tensão, potência transmitida, distância entre o transmissor e o receptor.

Os modelos de linhas aqui descritos se enquadram na distribuição subterrânea, ou seja, modelos que representem cabos coaxiais, que são as linhas de transmissão transversal eletromagnética - TEM (*Transverse ElectroMagnetic*). Este modelo é formado por duas superfícies de condução em paralelo, e a direção da propagação é perpendicular à direção do campo elétrico e magnético. (WENTWORTH, 2009)

2.1 Parâmetros de uma Linha de Transmissão

Considerando uma LT de dois condutores, ao aplicar-se uma tensão, um campo elétrico se formará em função da carga acumulada que estão separadas pelos dois condutores. Isso indica que há uma capacitância na linha. Aplicando agora uma corrente que flui do condutor superior e retorna pelo condutor inferior formando um campo magnético que passa pela espira formada pelos dois condutores, indicando que LT possui uma indutância.

Linhas de Transmissão têm em adição à indutância e à capacitância, perdas. Os condutores têm uma resistência finita e não nula, e o meio circundando os condutores tem perdas em seu dielétrico (exceto quando o isolante é o vácuo). Usualmente, tais efeitos são secundários e podem ser desprezados. Em frequências na faixa do GHz, a resistência

dos condutores pode se tornar significativa devido ao efeito pelicular. (PAUL, 2006)

Considerando uma seção horizontal, divide-se uma LT em parâmetros horizontais e verticais. Parâmetros horizontais, indutância e resistência, diminuem a amplitude do sinal, nos parâmetros verticais a capacitância refere-se a capacidade do cabo em armazenar energia e a condutância é responsável por modelar a corrente de fuga que pode ocorrer ao longo da linha como mostra a figura 2.1. (HAYT, 2006)

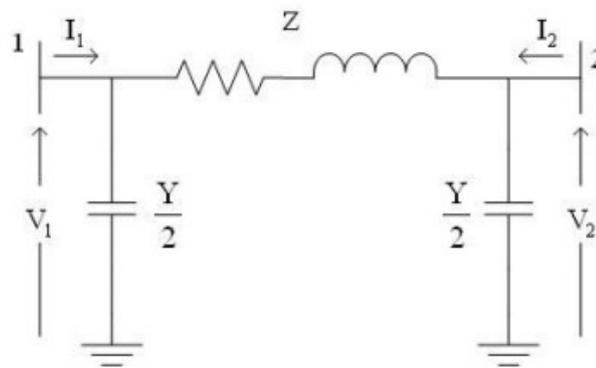


Figura 2. 1 - Parâmetros de uma LT: Modelo PI

Pode-se modelar LT considerando os parâmetros da linha. A sua representação pode ser feita por parâmetros concentrados, onde apenas um elemento resistivo, indutivo e capacitivo representa todo o efeito da linha, ou parâmetros distribuídos, onde o comportamento da linha é representado por diversos elementos distribuídos em toda extensão da linha.

Quando uma LT é curta, tal que se pode considerar que não há variação de tensão no decorrer de sua extensão, é viável utilizar a modelagem por parâmetros concentrados. Nesse caso, o comprimento da LT é muito menor que o comprimento de onda do sinal. (LEMOS, 2008)

Sendo assim, pode-se representar a LT pelo modelo PI. Nesse modelo, a impedância total longitudinal, Z , concentra todo o efeito resistivo e indutivo da linha e a admitância total transversal concentra o comportamento capacitivo da linha, a figura 2.1 ilustra essa situação.

Com o uso de parâmetros concentrados, os comportamentos resistivo, indutivo e capacitivo da linha não ocorrem distribuídos ao longo da linha, sendo essa a principal limitação desse modelo. Como esses comportamentos ocorrem distribuídos, a alteração da corrente, a alteração da corrente devido a capacitância é contínua no decorrer da linha, e a tensão sofre a influência desse efeito na corrente, portanto o fato de se concentrar os elementos ideais acrescenta um erro no modelo, sendo esse erro considerável em linhas longas [...]. (LEMOS, 2008)

Entretanto, para se obter resultados mais precisos, representado mais fielmente o comportamento real de uma LT, é importante considerar parâmetros distribuídos ao longo da linha demonstrado na figura 2.2. (STEVENSON, 1974)

Um elemento distribuído representa um elemento infinitesimal de um cabo real. Logo, quanto maior for o número de elementos distribuídos que se utiliza para representar um cabo, mais próximo ao real se tornará a simulação. (PALUDO, 2009)

Para uma representação mais efetiva, número de elementos deveria ser tanto que tendesse ao infinito, ou a parte da linha representada deveria ser o menor possível, tendendo a zero.

O modelo de parâmetros concentrados é utilizado para representar a impedância característica e o atraso de propagação de um sinal eletromagnético de uma LT. Para determinar as atenuações e dispersões causadas em um sistema real deve-se considerar perdas dissipativas associadas aos elementos do sistema. (USSUNA, 2014)

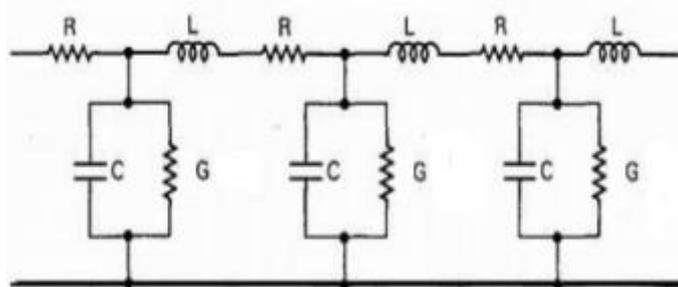


Figura 2. 2 - LT com parâmetros concentrados

Em se tratando de linhas de distribuição subterrâneas, em sua maioria são utilizados cabos coaxiais. Este tipo de cabo apresenta uma capacitância que armazena e devolve energia ao circuito através do campo elétrico, uma

indutância que armazena energia no campo magnético, uma resistência relacionada aos condutores externos e internos e uma condutância correspondente à resistividade do dielétrico, por metro de cabo na representação de elementos distribuídos. (ULABY, 2006)

Sendo assim, será enfatizado o modelo de parâmetros distribuídos, o qual melhor se aplica na representação de linhas de distribuição subterrâneas.

2.2. Parâmetros de um cabo coaxial

Um cabo coaxial consiste em diversas camadas concêntricas de condutores e isolantes. Um fio de cobre rígido forma o núcleo que é envolvido o por um material isolante envolto em um condutor cilíndrico. Uma capa protetora isolante protege o cabo de interferências elétricas ou magnéticas. (DARSKI ROCHA, 2007)

A figura 2.3 ilustra a estrutura de dum cabo coaxial, que é composto por:

- 1 – Condutor Central
- 2 – Camada semicondutora interna
- 3 – Dielétrico
- 4 – Camada semicondutora externa
- 5 – Blindagem Externa
- 6 – Capa protetora Isolante

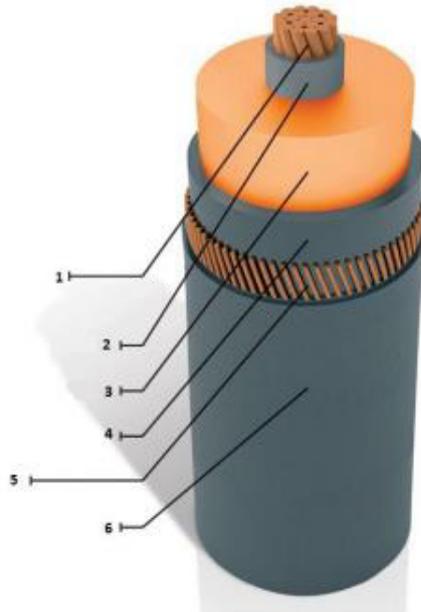


Figura 2. 3 - Cabo coaxial

Fonte: USSUNA 2014

Segundo Darski Rocha, 2007, os materiais mais utilizados na camada dielétrica de um cabo coaxial são o polietileno entrecruzado (XLPE) e borracha extrudada de etilenopropileno (EPR), por possuírem características dielétricas semelhantes.

Para determinar os parâmetros que compõem uma linha coaxial utilizaram-se as características físicas dos materiais que integram o cabo.

Para definir a resistência do cabo R é necessário conhecer a resistência da superfície do condutor, chamada de Resistência Intrínseca R_s . Abaixo se tem a equação da resistência intrínseca, que depende da frequência e do tipo do material. (WENTWHORTH, 2009)

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_c}{\sigma_c}} \quad (2.1)$$

Onde:

R_s – Resistência Intrínseca

f – Frequência do pulso

μ_c - Permeabilidade Magnética do Condutor

σ_c - Condutividade do Condutor

A resistência por metro de cabo também depende de dimensões internas do cabo, o raio da camada semicondutora interna (a) e o raio da camada semicondutora externa (b) demonstrado na figura 2.4.

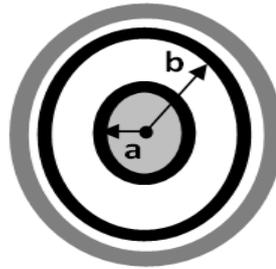


Figura 2. 4 - Desenho de corte transversal de um cabo coaxial

Portanto, a resistência por metro de cabo dada em Ω/m é:

$$R = \frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (2.2)$$

Nota-se que R é diretamente proporcional à R_s , que depende diretamente da frequência. Assim, aumentando-se a frequência tem-se um acréscimo na resistência por metro do cabo. Fisicamente, representa o deslocamento da corrente para a superfície do condutor, conhecido como Efeito Pelicular ou Skin.(ULABY, 2006)

A condutância por metro de cabo G depende da condutividade do dielétrico, σ , que separa o condutor interno do externo. Assim, a condutância é dada em S/m descrita na equação 2.3. O valor de G é o inverso de R .

$$G = \frac{2\mu\sigma}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (2.3)$$

Para determinar a indutância por metro do cabo L , dada em H/m precisa-se das dimensões dos raios a e b demonstrados na figura 2.4 e também da permeabilidade magnética do material isolante que separa os condutores externo e interno.

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.4)$$

O cabo coaxial possui duas superfícies metálicas separadas por um isolante, por consequência, possui uma capacitância por unidade de comprimento C , que depende da permissividade elétrica do dielétrico ϵ e é dada em F/m.

$$C = \frac{2\mu\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (2.5)$$

2.3. Velocidade de Propagação

Ondas eletromagnéticas possuem velocidades de propagação que dependem do meio em que serão propagadas. Assim, cada meio possui características específicas que são definidas pela permeabilidade magnética (μ) e a permissividade elétrica (ϵ) do material. (HAYT, 2006)

Cabos coaxiais são feitos com materiais que possuem permeabilidade magnética igual à permeabilidade do vácuo μ_0 , ou seja, esses componentes não impactarão, neste caso, no valor da velocidade de propagação da onda percorrendo o cabo. (ULABY, 2006)

Fazendo então, a relação entre a permeabilidade magnética dos materiais utilizados na fabricação de cabos coaxiais e a permeabilidade do vácuo, chamada de permeabilidade relativa do material (μ_r), tem-se:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu_0}{\mu_0} = 1 \quad (2.6)$$

A permissividade elétrica (ϵ), também conhecida como constante dielétrica do material, que é usada no cálculo da velocidade de propagação de ondas é a permissividade relativa, definida pela equação 2.5. A permissividade elétrica do vácuo é dada por $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} F/m$. (WENTWHORTH, 2009)

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.7)$$

Dessa forma, a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética em um meio material é expressa pela equação 2.8.

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (2.8)$$

Relacionando as equações 2.2 e 2.3 e as equações 2.1 e 2.2, respectivamente, obtêm-se:

$$LC = \mu\varepsilon \quad (2.9)$$

$$\frac{G}{C} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

Assim, a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas pode ser descrita de maneira simplificada na equação 2.12.

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.11)$$

De acordo com Papazyan, 2002, a constante de propagação de onda de uma linha de transmissão (γ) é um numero complexo que representa, em sua parte real, a constante de atenuação da linha, e em sua parte imaginária, a constante de fase da linha. Sendo assim, define-se γ pela equação 2.7.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} \quad (2.12)$$

2.3.1. LT sem perdas

A figura 2.5 ilustra uma linha sem perdas onde as resistências dos condutores são desprezadas, além disso, considera-se que o dielétrico não permite a passagem de corrente elétrica entre os condutores, tendo apenas indutância e capacitância para representar a linha.

Sem perdas significa que, no devido tempo, toda potência injetada na linha na extremidade inicial chega em sua extremidade final. (HAYT, 2006)

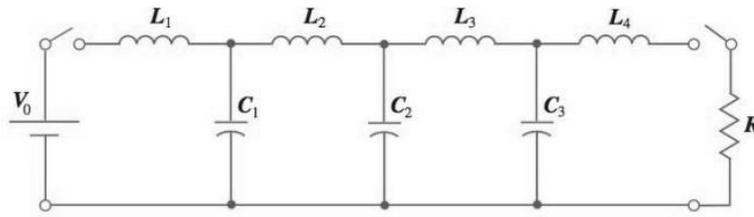


Figura 2. 5 - LT sem perdas

Para uma LT sem perdas, $R = 0$ e $G = 0$ e a equação 2.10 se reduz a equação 2.11.

$$\gamma = \sqrt{(j\omega L) \cdot (j\omega C)} = j\omega\sqrt{LC} \quad (2.13)$$

Observa-se que, neste caso, a parte real da constante de propagação é nula, $\alpha = 0$, ou seja, como não há perdas, a onda se propaga sem atenuar.

Logo, a impedância característica de uma LT sem perdas é definida por:

$$Z_0 = \frac{R+j\omega L}{\gamma} = \frac{j\omega}{j\omega\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.14)$$

2.3.2. LT com perdas

Uma LT com perdas leva em consideração os elementos dissipativos de energia do condutor, resistência, e também considera que o dielétrico permite fuga de corrente entre os condutores. (HAYT, 2006).

Dessa forma, considera-se os 4 parâmetros de modelagem de uma LT: resistência, indutância, capacitância e condutância como mostrado na figura 2.6.

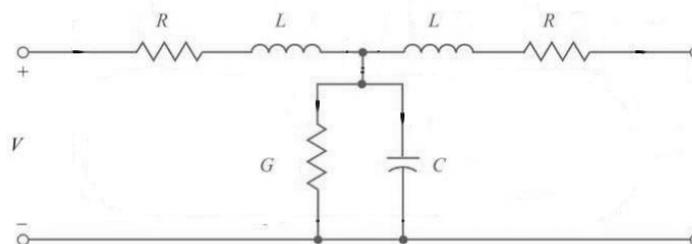


Figura 2. 6 - LT com perdas

A constante de propagação de onda de uma LT com perdas é dada pela equação 2.7. Nota-se que a parte real da equação não é nula, logo há atenuação da onda propagada. As equações que modelam uma LT com perdas são as equações definidas no modelo geral. (ULABY, 2006)

Para o presente trabalho, foram feitas simulações considerando os dois casos de linhas de transmissão, com e sem perdas. O capítulo 4 mostra os resultados e as considerações de cada caso, bem como o que melhor se aplica na representação de LTS subterrâneas para localizar falhas no sistema.

3. TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEAS

Localizar falhas em linhas subterrâneas de distribuição é fundamental para a confiabilidade do sistema. Esse diagnóstico deve ser feito o mais breve possível, pois reduzindo o tempo de inspeção, manutenção e reparação do cabo a restauração do estado de operação da rede torna-se mais rápida. Por isso, faz-se necessário utilizar técnicas viáveis para tornar essa localização mais eficiente.

Os métodos usuais para localização de faltas em cabos subterrâneos dividem-se em dois grupos básicos: Métodos Traçadores e Métodos Terminais. O método traçador rastreia sistematicamente a rede de distribuição subterrânea, percorrendo toda extensão dos cabos para localizar o defeito. O método dos terminais faz uso de uma ou as duas extremidades dos cabos para determinar a localização da falha sem que seja necessário rastrear o sistema. (GESTADELLO, 2012)

O método dos terminais apresenta uma maior praticidade na detecção de falhas em sistemas subterrâneos, pois se necessita apenas das extremidades dos cabos, sem necessidade de percorrer toda sua extensão. Por isso, a análise das técnicas neste trabalho se baseará no método dos terminais. As técnicas mais comuns de identificação de faltas a partir dos terminais de cabos baseiam-se no princípio da Reflectometria no Domínio do Tempo.

Segundo Dubickas, 2006, a Reflectometria no Domínio do Tempo (*TDR – Time Domain Reflectometry*), baseia-se no princípio da reflexão de ondas eletromagnéticas. Ao enviar um sinal eletromagnético pela extremidade de um cabo subterrâneo haverá uma possível reflexão, caso encontre um ponto de impedância diferente da impedância característica do cabo. A análise dessa reflexão possibilita a detecção do tipo e da localização da falha existente.

3.1. Reflectometria no Domínio do Tempo - TDR

A técnica de reflectometria no domínio do tempo destaca-se como um método de análise de reflexões de sinais. Através do coeficiente de reflexão Γ que representa um descasamento de impedâncias (variações de impedâncias), pode-se perceber o quanto de energia é refletida quando um sinal passa pelo ponto de conexão entre dois elementos. (WENTWHORTH, 2009)

Caso não haja descasamento de impedância, ou seja, $Z_L = Z_c$, não haverá reflexões e o sinal incidente é completamente absorvido pela carga. Caso $Z_L > Z_c$, haverá reflexão do sinal com polaridade igual à do sinal incidente e caso $Z_L < Z_c$, haverá reflexão de sinal com polaridade invertida em relação ao sinal incidente. (USSUNA, 2014)

Tabela 3. 1 - Pulso refletido em função da impedância da carga

Impedância da Carga	Pulso Incidente	Pulso Refletido
$Z_L \rightarrow \infty$		
$Z_L \rightarrow 0$		
$Z_L = Z_c$		

Z_L – Impedância da Carga
 Z_c = Impedância Característica do cabo

Para diagnosticar falhas em um cabo subterrâneo através da TDR, deve-se procurar por características particulares no pulso de onda refletido e a partir dele encontrar a localização e a natureza da falha. A Tabela 3.1 ilustra três casos que simulam estados do cabo e como seria a reflexão do sinal.

Considerando um defeito de ruptura, o cabo estaria em circuito aberto, portanto a impedância no fim da linha seria muito alta, tendendo ao infinito. Para esse caso, o pulso refletido teria a mesma polaridade do pulso incidente. Num estado de curto-circuito, o local do defeito teria uma impedância muito

baixa, tendendo à zero, nessa situação o pulso seria refletido com inversão de fase. Para um cenário onde o cabo não apresenta defeito, não haverá reflexão, pois o sinal incidente não encontrará nenhum ponto de variação de impedância.

Tais comportamentos são explicados a partir da equação do coeficiente de reflexão de ondas eletromagnéticas.

3.1.1. Linhas com Impedâncias Características Diferentes

Supondo duas LTS conectadas em séries com impedâncias características diferentes, Z_1 e Z_2 , respectivamente. Alisando o comportamento de uma onda que trafega a linha 1 e atinge o ponto de descontinuidade com a linha 2, nota-se que no ponto de descontinuidade há a formação de duas novas ondas, uma que é refratada e outra que é refletida. Assim, em qualquer ponto da LT o resultado é a composição das ondas progressivas e regressivas. (ZANETTA, 2003).

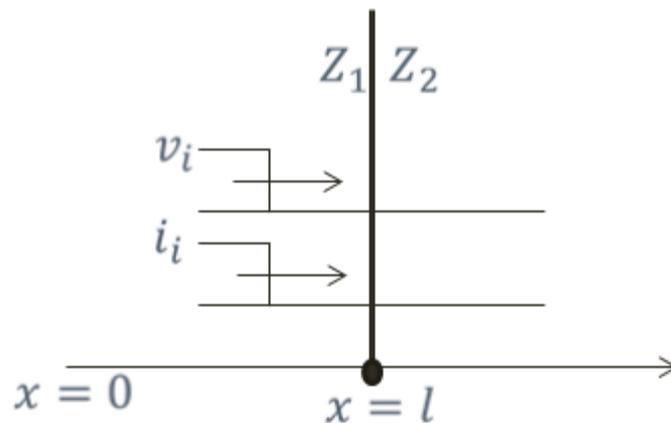


Figura 3. 1 - LT1 em série com LT2

A princípio, temos uma onda incidente v_1 que se propaga pela LT1. O ponto $x = l$ é o ponto de conexão entre as duas linhas. A análise da propagação dessa onda nas LTS está descrita abaixo:

- Antes do ponto $x = l$

A onda incidente se propaga no sentido positivo da LT 1

$$v_i = v_1^+ \quad (3.1)$$

$$i_i = i_1^+ = \frac{v_i}{Z_1} = \frac{v_1^+}{Z_1} \quad (3.2)$$

A onda refletida se propaga no sentido negativo da LT1.

$$v_r = v_1^- \quad (3.3)$$

$$i_r = i_1^- = -\frac{v_1^-}{Z_1} \quad (3.4)$$

A onda refratada para a LT2 se propaga no sentido positivo.

$$v_t = v_2^+ \quad (3.5)$$

$$i_t = i_2^+ = \frac{v_t}{Z_2} = \frac{v_2^+}{Z_2} \quad (3.6)$$

- No ponto $x = l$

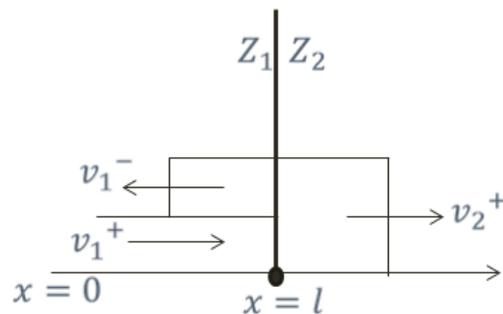


Figura 3. 2 - Composição das ondas refletida e refratada

A tensão no lado 1 é igual à tensão no lado 2, logo:

$$v_1^+ + v_1^- = v_2^+ \quad (3.7)$$

$$i_1^+ + i_1^- = i_2^+ \quad (3.8)$$

$$\frac{v_1^+}{Z_1} - \frac{v_1^-}{Z_1} = \frac{v_2^+}{Z_2} = \frac{v_1^+ + v_1^-}{Z_2} \quad (3.9)$$

$$v_1^- = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} v_1^+ \quad (3.10)$$

Denominamos **Coefficiente de Reflexão** (Γ_r), a relação da onda incidente com a onda refletida:

$$\frac{v_1^-}{v_1^+} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \Gamma_r \quad (3.11)$$

Portanto,

$$v_1^- = \Gamma_r v_1^+ \quad (3.12)$$

Substituindo a equação 3.12 na equação 3.7, tem-se:

$$v_1^+ + \Gamma_r v_1^+ = v_2^+ \quad (3.13)$$

$$v_2^+ = (1 + \Gamma_r) v_1^+ \quad (3.14)$$

$$v_2^+ = \Gamma_t v_1^+ \quad (3.15)$$

A relação entre a onda incidente e a onda refratada é chamada de **Coefficiente de Transmissão** (Γ_t). Nota-se ainda a relação entre o coeficiente de reflexão e o coeficiente de transmissão.

$$\Gamma_t = 1 + \Gamma_r = 2 \frac{Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3.16)$$

3.1.2. Linha com terminal em vazio

Tecnicamente, uma linha em vazio dá-se por uma ruptura do cabo, tal situação é emulada por uma impedância infinita. Dessa forma, esse caso particular é um caso real de um defeito em uma linha de transmissão.

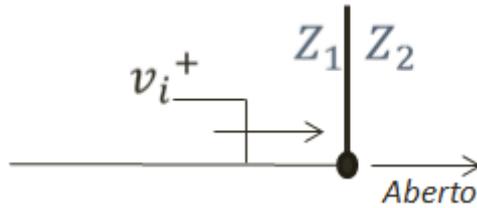


Figura 3. 3 - LT com terminal em vazio

Este caso apresenta-se como um caso particular da descrição anterior, onde a LT2 tem $Z_2 \rightarrow \infty$. Assim, a análise é feita através do limite dos coeficientes de reflexão e transmissão tendendo ao infinito.

$$\Gamma_t = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = 2 \quad (3.17)$$

$$\Gamma_r = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = 1 \quad (3.18)$$

Observa-se que o coeficiente de reflexão para uma linha com terminal em vazio é $\Gamma_r = 1$, a onda refletida será integralmente a onda incidente, ou seja, a reflexão do pulso dá-se sem inversão de fase. A onda refratada para a linha 2, em vazio, é o dobro da onda incidente, $\Gamma_t = 2$.

$$v_1^- = \Gamma_r v_1^+ \quad (3.19)$$

$$v_1^- = v_1^+ \quad (3.20)$$

Tabela 3. 2 - Reflexão para LT com terminal em vazio

Impedância da Carga	Γ_r	Pulso Incidente	Pulso Refletido
$Z_2 \rightarrow \infty$	1		

3.1.3. Linha com terminal em curto-circuito

Um dos defeitos mais recorrente em linhas subterrâneas é o curto-circuito. Essa falha é emulada por uma impedância nula. Este caso, também se apresenta como um caso da descrição 3.1.1, onde $Z_2 \rightarrow 0$.

$$\Gamma_t = \lim_{Z_2 \rightarrow 0} \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = 0 \quad (3.21)$$

$$\Gamma_r = \lim_{Z_2 \rightarrow 0} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = -1 \quad (3.22)$$

O coeficiente de reflexão para um linha com terminal em curto é $\Gamma_r = -1$, a onda refletida se propaga com valor igual à onda incidente, com sinal contrário, ou seja, a onda é refletida com inversão de fase. Não há transmissão para a linha 2, $\Gamma_t = 0$.

$$v_1^- = \Gamma_r v_1^+ \quad (3.23)$$

$$v_1^- = -v_1^+ \quad (3.24)$$

Tabela 3. 3 - Reflexão para LT com terminal em curto-circuito

Impedância da Carga	Γ_r	Pulso Incidente	Pulso Refletido
$Z_2 \rightarrow 0$	-1		

3.1.4. Linha sem defeito

Uma linha de transmissão sem defeito possui características particulares na propagação de ondas eletromagnéticas. Nesse caso, na incidência de uma onda, não haverá reflexão, isso porque a onda viajante não encontra um valor de impedância diferente da impedância característica da própria linha, Z_c , assim, toda energia é dissipada no decorrer da propagação, obedecendo ao teorema da Máxima Transferência de Potência. (PALLUDO, 2009)

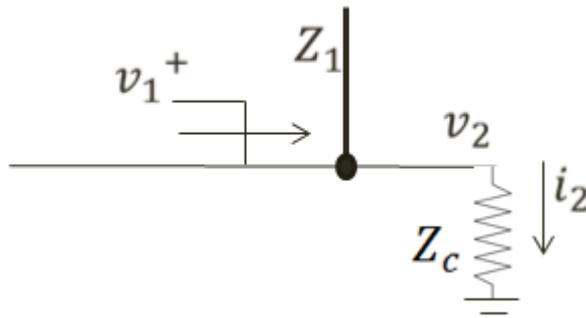


Figura 3. 4 - LT com terminal com carga

Analisando esse caso como um caso particular da seção 3.1.1 tem-se $Z_2 = Z_c = Z_1$, a onda incidente não encontrará nenhum ponto de descasamento de impedância, teoricamente, é como se linha tivesse um comprimento infinito, portanto, a impedância característica é igual à impedância de entrada. (WENTWORTH, 2009)

Substituindo nas equações dos coeficientes de reflexão e transmissão resulta:

$$\Gamma_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{Z_1 - Z_1}{Z_1 + Z_1} = \frac{0}{2Z_1} = 0 \quad (3.25)$$

$$\Gamma_t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_1} = \frac{2Z_1}{2Z_1} = 1 \quad (3.26)$$

Dessa forma, destaca-se que não há reflexão, toda onda é refratada no percorrer da linha de transmissão.

Tabela 3. 4 - Reflexão para LT sem descasamento de Impedâncias

Impedância da Carga	Γ_r	Pulso Incidente	Pulso Refletido
$Z_2 = Z_c$	0		

Dessa forma, a partir da característica da reflexão do pulso incidente pode-se diagnosticar a natureza da falha em uma linha subterrânea. A

determinação da localização do defeito é feita analisando o tempo decorrido entre o pulso incidente e as possíveis reflexões. (AGILENT, 2013)

É importante observar que a largura do pulso é determinante na localização do defeito no cabo, quanto mais largo é o pulso incidente, maior é o erro para determinar a posição da falta.

Para que seja possível verificar o efeito a reflexão, sem sobreposição de sinais, a largura do pulso injetado no cabo deve ser menor do que o tempo total que o pulso leva para se propagar por todo comprimento do cabo. (USSUNA, 2014)

Normalmente, na TDR, o pulso refletido é observado na mesma extremidade onde foi injetado o pulso de entrada. Sendo assim, compreende-se que o pulso refletido percorreu duas vezes a extensão do cabo até o defeito e para definir a posição da falha deve-se considerar apenas metade do tempo total de propagação do pulso (Δt).

$$d = v_p \frac{\Delta t}{2} \quad (3.27)$$

Portanto, a partir da equação 3.27 pode-se estabelecer a distância (d) em que a falha se encontra da extremidade inicial do cabo, sendo conhecida a velocidade de propagação (v_p) no meio de que é feito o cabo utilizado.

Assim, a Reflectometria no Domínio do Tempo destaca-se como uma técnica eficiente para localizar falhas em sistemas subterrâneos de distribuição. Além disso, apresenta-se como um meio preventivo de diagnóstico de estado do cabo, pois a análise do pulso refletido permite observar possíveis pontos fracos do sistema antes de se tornarem uma falha efetiva. (GESTADELL, 2012)

Basicamente, as técnicas atuais diferenciam-se forma de aplicar o sinal incidente para falhas específicas, fundamentando-se no princípio da TDR. Abaixo se tem duas técnicas utilizadas para tipos específicos de falhas.

a) Detecção de descarga de pulso – utilizado para falhas de alta impedância ou intermitentes.

Através de um gerador de impulso ou dispositivo de descarga capacitiva injeta-se uma onda que ocasiona a ruptura da falha existente, gerando ondas

refletidas no local. Monitora-se o tempo entre a primeira e a segunda reflexão e a partir da equação 3.27 encontra-se o local da falha. (BASCON ET. AL., 1994)

b) Pulso do arco de reflexão – utiliza o menor nível de tensão possível, minimizando possíveis danos no cabo.

Falhas de alta impedância ou intermitentes são transformadas, temporariamente, em falhas de impedância menor que a impedância característica do cabo. Falhas transitórias possuem impedâncias que se confundem com emendas e outras irregularidades presentes no cabo. Assim, um gerador de pulsos incide um pulso tal que sua amplitude é suficiente apenas para romper a falha, gerando um arco no local, se tornando temporariamente, uma impedância baixa. Assim, a reflexão será observada com polaridade invertida como é a característica deste tipo de defeito. Dessa forma, através da equação 3.27 encontra-se o ponto da falha. (IEEE Sdt, 2007)

Diante disso, observa-se que as técnicas utilizadas no processo de localização de falhas em linhas de distribuição subterrânea exigem uma perspectiva mais ampla de análise, pois diferente de linhas aéreas, os cabos enterrados possuem características particulares, além de não terem a vantagem de visualização como cabos aéreos.

3.2. Reflectometro no Domínio do Tempo

O Reflectometro no Dominio do Tempo é um dispositivo localizador de faltas em cabos. Pode detectar rupturas, curtos-circuitos e danos causados pela umidade e outras mudanças na impedância do cabo.

O TDR 410 é fabricado pela Sonel, pode ser selecionado na modalidade automática e manual detectando falhas e ajustando a escala e a sensibilidade. Tem escala disponível até 4000 m e uma avaliação da exatidão de 1%. Representação gráfica de danos do cabo com indicação automática da distância da falha na tela.



Figura 3. 5 - TDR 410

FONTE: SONEL

Tabela 3. 5 - Especificações TDR 410

Especificações	
Faixa	até 4000 m
Seleção	Manual
Precisão	1%
Comprimento mínimo do cabo	4 m
Pulso de saída	5 V, Largura 3 ns à 3 ms
Vida da bateria	30 h contínua
Fonte de alimentação	6 V - Pilhas Alcalinas AA 1,5 V
Display	128x64 pixels
Temperatura de operação	-10°/50°
Dimensões	165x90x37
Peso	350 g
Segurança	IEC 61010-1 EM 60950

FONTE: SONEL

Entra-se com o valor da velocidade de propagação e a impedância característica do cabo. Conectam-se os terminais do TDR no cabo a se e é retornando a distância da falha, além da visualização do pulso refletido que permite saber o tipo de falha ocorrida.



Figura 3. 6 - Display TDR 410

FONTE: SONEL

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A eficácia da técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo será apresentada neste capítulo a partir de simulações feitas no *ATPDraw*.

O *ATPDraw* é um editor gráfico criado para facilitar a modelagem de circuitos no *software ATP*, que permite simular fenômenos transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos em sistemas de potência, utilizando a matriz admitância de barras em seus cálculos. (FILHO, 2001)

O programa *ATPDraw* é uma ferramenta de grande flexibilidade e de grande importância na realização de estudos de transitórios em sistemas de potência, ou mesmo de estudos em regime permanente onde a topologia da rede ou o circuito a ser implementado não permite uma simples representação monofásica. (FONSECA, 2003)

O *ATPDraw* permite a análise de transitórios, análise em frequência, análise de harmônicos e análise estatística. Sendo um *software* digital, não permite a obtenção de uma solução contínua, os valores são calculados em tempo discreto.

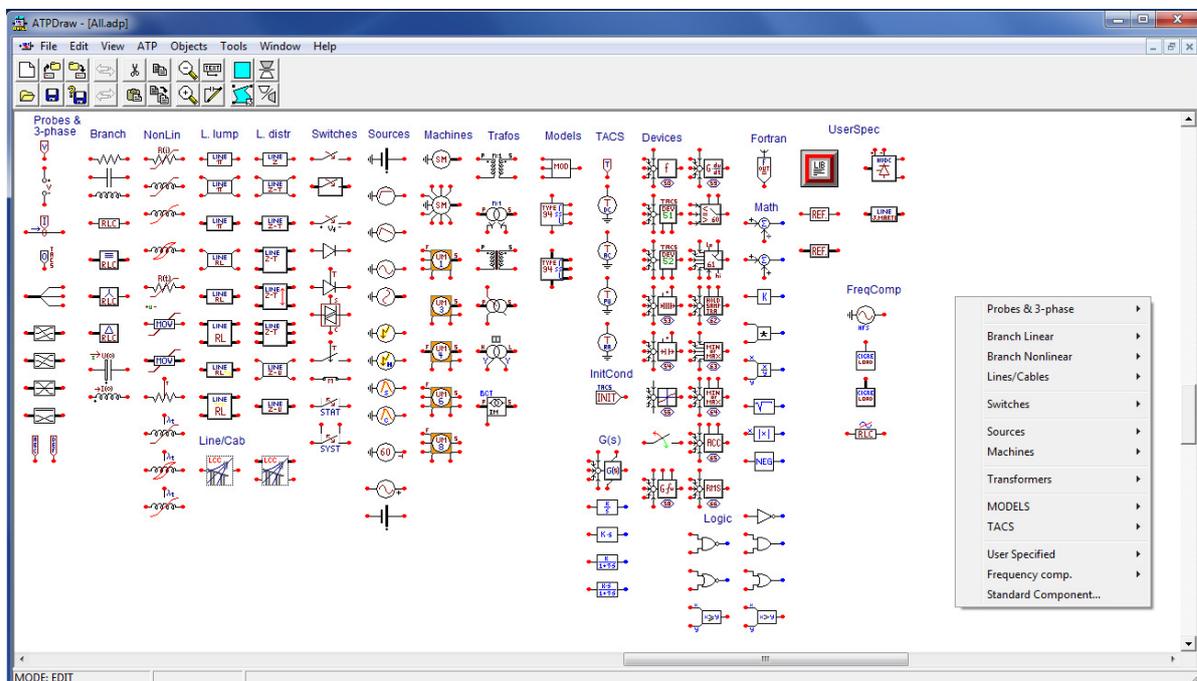


Figura 4. 1 - Janela Principal *ATPDraw*

A figura 4.1 mostra interface do programa. Observa-se a praticidade de montar o circuito desejado para simulação pela variedade de componentes existentes para uso. A figura 4.2 é um apanhado geral de todos os elementos disponíveis.

- Elementos medidores: voltímetro, amperímetro, wattímetro, etc.
- Fontes monofásicas e trifásicas, AC e DC: senoidal, triangular, rampa, etc.
- Elementos Lineares: resistor, capacitor, indutor, etc.
- Elementos não lineares: resistor, capacitor, indutor, etc.
- Linhas e Cabos: parâmetros concentrados e parâmetros distribuídos.

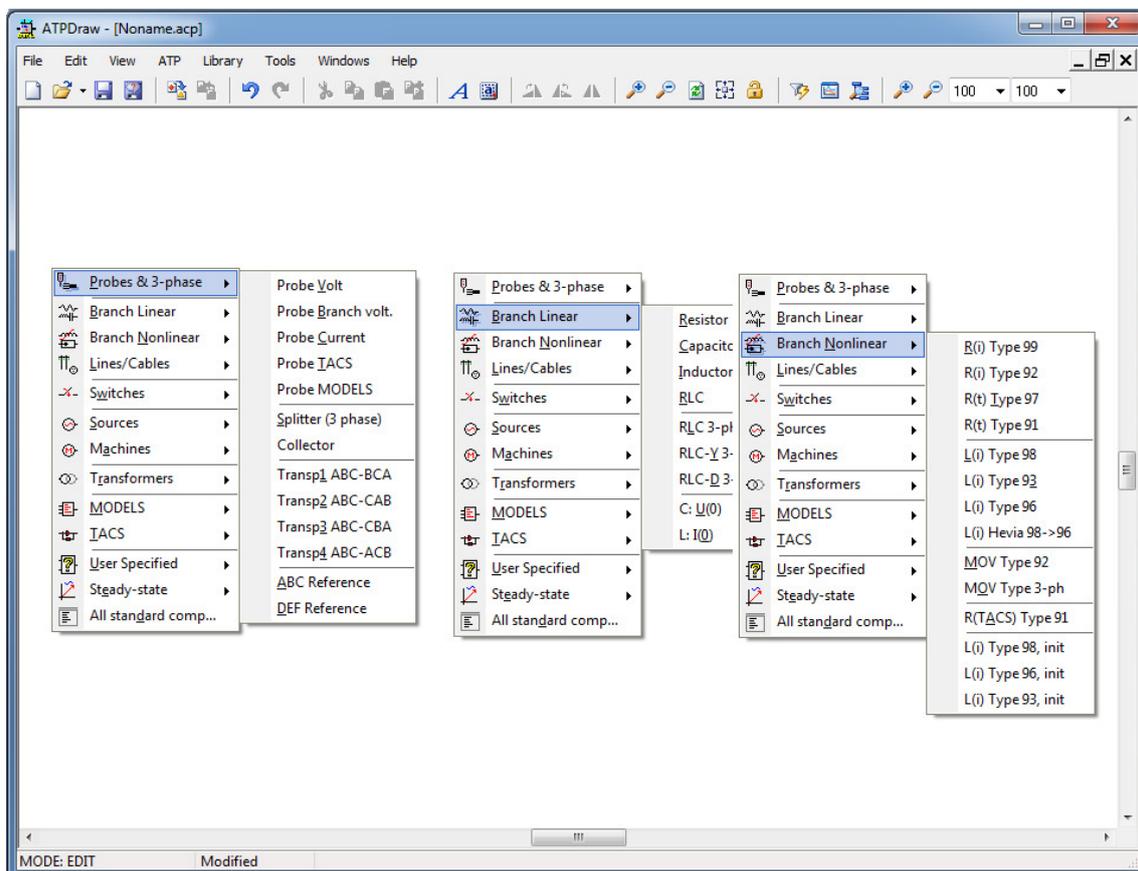


Figura 4. 2 - Elementos básicos ATPDraw

Para a análise das técnicas de localização de falhas em LTS subterrâneas foi simulado a técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo, desenvolvida a partir do modelo descrito adiante. De forma simplificada, uma

simulação de TDR é feita utilizando componentes elétricos básicos. Um gerador de função na entrada, para aplicar o pulso no cabo, um osciloscópio para visualização do pulso incidente e de reflexão e modelo de um cabo utilizando parâmetros distribuídos, para maior exatidão.

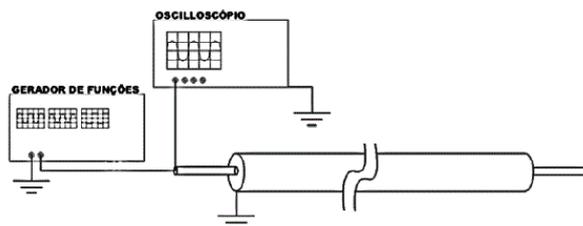


Figura 4. 3 - Esquema de simulação TDR

Fonte: USSUNA, 2014

Para a simulação, utilizou-se o cabo coaxial XLPE-N. Os parâmetros estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Parâmetros do cabo XLPE-N

Parâmetros	XLPE-N
Diâmetro do condutor	8 mm
Material do condutor interno	Alumínio
Diâmetro do dielétrico	17 mm
Material do dielétrico	XLPE
Diâmetro do semicondutor interno	1,2 mm
Diâmetro do semicondutor externo	1,1 mm
Tensão	12/20 Kv
Impedância Característica	33 Ω
Constante dielétrica	2,4
Condutividade do condutor	10^{-15} S/m
Condutividade do XLPE	$59,6 \cdot 10^6$ S/m
Permeabilidade magnética relativa	1
Diâmetro externo	2 ^a
Diâmetro interno	2b
Frequência	$2,5 \cdot 10^6$ Hz

4.1. Simulação do cabo coaxial XLPE-N

A simulação do cabo XLPE-N foi feita com os dois modelos, com e sem perdas. Os parâmetros de modelagem da linha foram calculados com base nas equações descritas no capítulo 2.

A partir do valor da permissividade elétrica relativa do material do cabo XLPE-N pode-se calcular a velocidade de propagação da onda nessa LT.

$$\varepsilon_r = 2,4 \text{ F/m}$$

$$\varepsilon_0 = 8,5 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Aplicando esses valores na equação 2.7 encontra-se o valor da permissividade do material dielétrico do cabo.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \rightarrow \varepsilon = 2,04 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$$

A permeabilidade relativa de um cabo coaxial é 1, logo,

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Substituindo esses valores na equação 2.8 tem-se o valor da velocidade de propagação para o cabo XLPE-N.

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = 198 \text{ m}/\mu\text{s}$$

4.1.1. XLPE-N – modelo sem perdas

Como se trata de um modelo sem perdas, foi calculado apenas a Capacitância C e a indutância L por metro de cabo, utilizando as equações 2.4 e 2.5.

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = 1,87 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$C = \frac{2\mu\varepsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} = 1,42 \cdot 10^{-10} \text{ F/m}$$

Na simulação, o circuito usado para o cabo XLPE-N tem 4 elementos por metro de cabo. Assim, dividindo-se o valor de C e L por 4 encontra-se a capacitância e indutância para 1/6 de metro do cabo.

$$L = 46,75 \text{ nH e } C = 35,3 \text{ pF}$$

A figura 4.4 mostra o circuito desenvolvido no *ATPDraw* para o 1 metro do cabo XLPE-N.

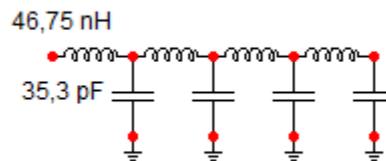


Figura 4. 4 - Circuito *ATPDraw* para 1 metro do cabo XLEPE-N

A primeira falha simulada foi uma ruptura do cabo, no fim da linha abriu-se o circuito e foi inserida uma resistência muito alta, aproximadamente $10^{10} \Omega$, para simular uma resistência infinita.

O circuito simulado para a TDR no cabo XLPE-N é mostrado na figura 4.5 como foram usado 4 elementos por metro de cabo, serão utilizados 80 elementos para um cabo de 20 m de comprimento. Uma chave foi colocada entre a fonte e a linha, a sua tarefa é abrir o circuito logo após o primeiro pulso injetado. A fonte utilizada foi uma rampa, 1 ns de subida e descida, com 20 ns de duração e amplitude de 8 V.

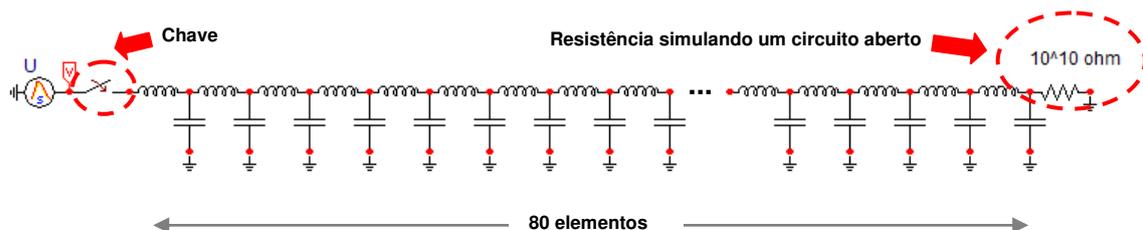


Figura 4. 5 - Circuito simulado para XLPE-N sem perdas com terminal aberto

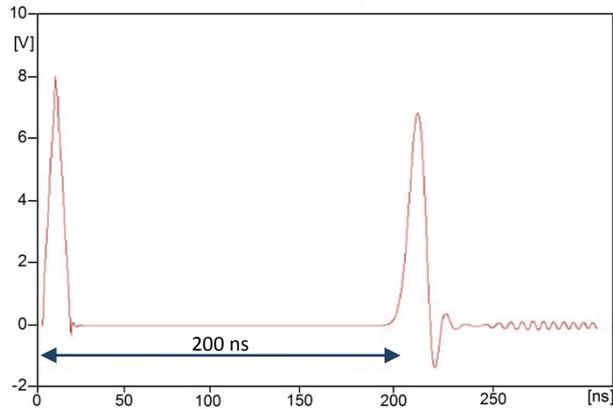


Figura 4. 6 - Cabo XLPE-N sem perdas para defeito de ruptura

A figura 4.6 demonstra o resultado da simulação para o cabo XLPE-N para um defeito de ruptura. Nota-se, como esperado que a reflexão do pulso não teve sua polaridade invertida, e o tempo de propagação foi de aproximadamente 200 ns. Dessa forma, pode-se encontrar o local da falta, tendo posse da velocidade e do tempo de propagação. Substituindo os valores conhecidos na equação 3.27 encontra-se a distância da ruptura, que no caso, foi simulada no fim da linha (20m).

$$d = v_p \frac{\Delta t}{2} = 198 \text{ m}/\mu\text{s} \cdot \frac{200 \text{ ns}}{2} = \mathbf{19,8 \cong 20 \text{ m}}$$

Em seguida é mostrado o resultado da simulação do cabo XLPE-N em curto-circuito. O circuito simulado foi igual ao circuito da figura 4.5, alterando o valor da resistência no fim da linha para uma resistência muito baixa, $10^{-8}\Omega$, representando um curto-circuito.

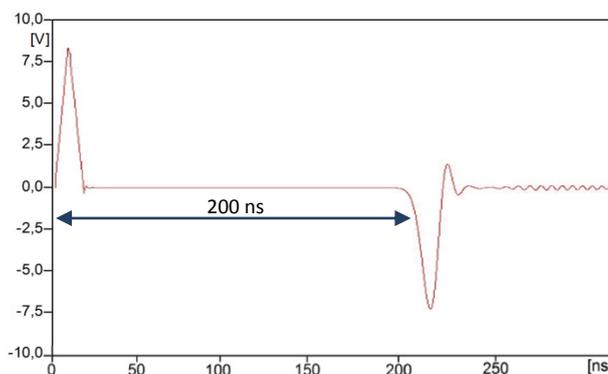


Figura 4. 7 - Cabo XLPE-N sem perdas em curto-circuito

O mesmo valor de distância encontrado para o defeito de ruptura é encontrado no caso de curto-circuito. A falha foi simulada no mesmo local (fim da linha).

$$d = 198 \text{ m}/\mu\text{s} \cdot \frac{200 \text{ ns}}{2} = \mathbf{19,8 \cong 20 \text{ m}}$$

A figura 4.8 demonstra o resultado da simulação para o cabo XLPE-N sem defeito. Para representar essa condição é preciso causar um casamento de impedâncias entre a carga e a linha. A impedância característica da linha é 33Ω , portanto, no fim da linha foi colocado um resistor de 33Ω . Dessa forma, o pulso incidente não encontrará nenhum ponto de variação de impedância, logo, não deve refletir. Pode-se perceber que há pequenas reflexões no gráfico de reflectometria para este caso, isso se deve ao fato de que a simulação foi feita com uma LT sem perdas.

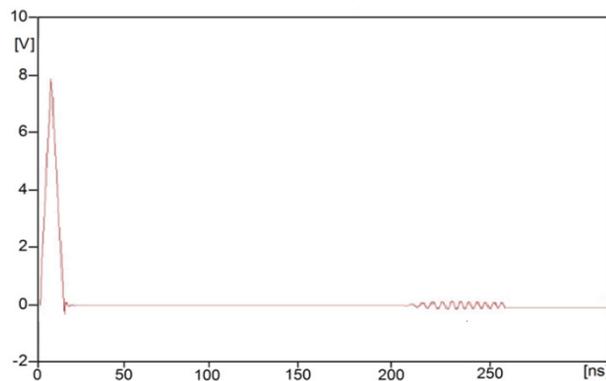


Figura 4. 8 - Cabo XLPE-N sem perdas em casamento de impedância

4.1.2. XLPE-N – modelo com perdas

Para o modelo com perdas, deve-se calcular além dos valores de Capacitância e Indutância, os valores de Resistência e Condutância por metro de cabo. Considerando os valores de C e L calculados anteriormente, os valores de R e G são calculados a partir das equações 2.2 e 2.3.

$$R = \frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) = 6,33 \cdot 10^{-2} \Omega/\text{m}$$

$$G = \frac{2\mu\sigma}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} = 6,69 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = 1,87 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$C = \frac{2\mu\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} = 1,42 \cdot 10^{-10} \text{ F/m}$$

Dessa forma, o circuito por metro de cabo está apresentado na figura 4.9. são utilizados 4 elementos por metro de cabo, assim, comprimento total do cabo é de 30 m, então são utilizados 120 elementos no circuito.

$$L = 46,75 \text{ nH}$$

$$C = 35,3 \text{ pF}$$

$$R = 15,83 \text{ m}\Omega$$

$$G = 1,67 \text{ fS}$$

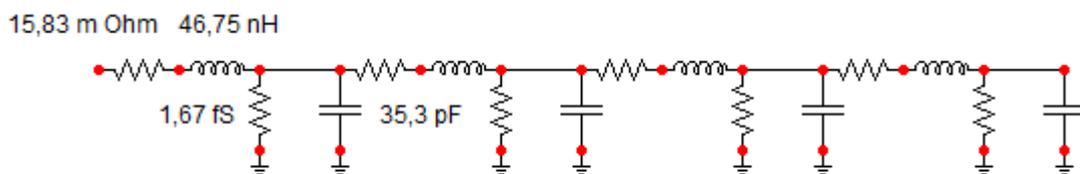


Figura 4. 9 - Cirucito para 1 metro do cabo XLPE-N com perdas

Na simulação para o defeito de ruptura foi considerado uma resistência de $10^{10}\Omega$, a figura 4.10 demonstra o circuito utilizado neste teste. Novamente, uma chave foi colocada entre a fonte e a linha para abrir o circuito logo após o primeiro pulso injetado. A fonte utilizada foi uma rampa, 1 ns de subida e descida, com 20 ns de duração e amplitude de 8 V.

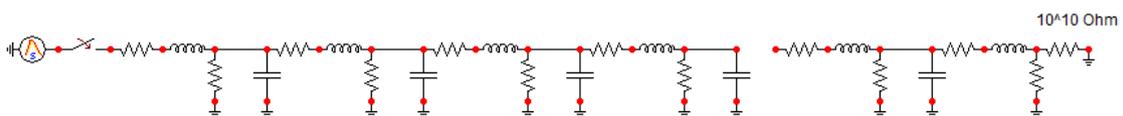


Figura 4. 10 - Circuito simulado para o cabo XLPE-N com perdas

A reflectometria para o cabo em circuito aberto está apresentada na figura 4.11. Nota-se uma atenuação do pulso refletido devido às perdas consideradas no modelo. O tempo de propagação foi de aproximadamente 300 ns, dessa forma, a partir do valor da velocidade e do tempo de propagação pode-se calcular a distância que a falha se encontra.

$$d = v_p \frac{\Delta t}{2} = 198 \text{ m}/\mu\text{s} \cdot \frac{300 \text{ ns}}{2} = 29,7 \cong 30 \text{ m}$$

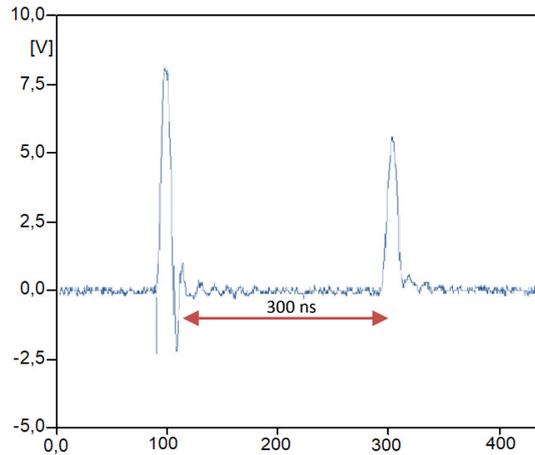


Figura 4. 11 - Cabo XLPE-N com perdas para defeito de ruptura

Para o teste de curto-circuito, foi adotado um valor de resistência de $10^{-8} \Omega$ no fim do cabo, considerando o mesmo circuito da figura 4.10. O resultado para o cabo XLPE-N é mostrado na figura 4.12.

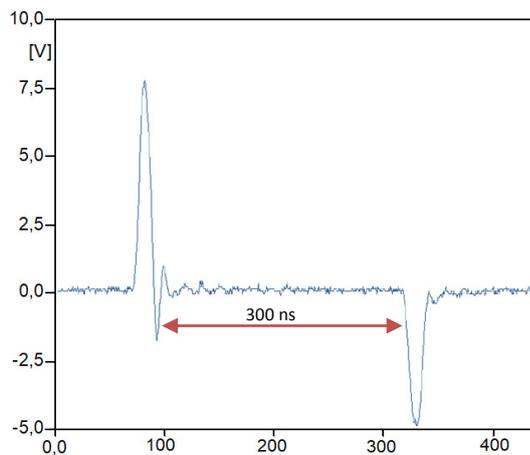


Figura 4. 12 - Cabo XLPE-N com perdas em curto-circuito

Da mesma forma que o teste anterior, o tempo de propagação foi de aproximadamente 300 ns, como era esperado já que a falha não mudou de local. Dessa forma, pode-se calcular a distância do curto-circuito.

$$d = 198 \text{ m}/\mu\text{s} \cdot \frac{300 \text{ ns}}{2} = 29,7 \cong 30 \text{ m}$$

Considerando agora um casamento de impedância, ou seja, o cabo não apresenta defeito, portanto a impedância colocada no fim da linha é igual à impedância característica do cabo, 33 Ω .

A figura 4.13 apresenta o resultado do teste par o cabo XLPE-N sem falha.

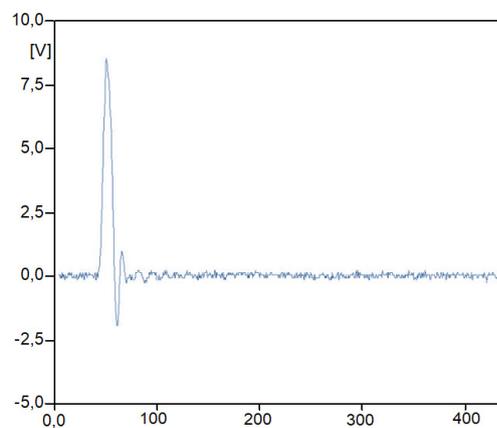


Figura 4. 13 - Cabo XLPE-N com perdas em casamento de impedâncias

5. CONCLUSÃO

As linhas de distribuição subterrâneas apresentam diversas vantagens em comparação às linhas aéreas, pois devido a sua natureza construtiva são menos suscetíveis a falhas, sendo mais seguras e conseqüentemente, mais confiáveis para o fornecimento de energia elétrica. Entretanto, possui um alto custo inicial, principalmente devido a isolação os necessária dos cabos utilizados, para que seja minimizado os riscos de um possível defeito.

Localizar uma falha em uma linha de distribuição subterrânea constitui-se um panorama ainda bastante delicado, isso porque cabos enterrados são mais difíceis de perceber onde ocorreu um problema. Dessa forma, as técnicas utilizadas para tal serviço devem ser de precisas e de alta eficiência. O Reflectometro no Domínio do Tempo se apresenta como um dispositivo barato e eficaz na localização de falhas em linhas de até 5 km.

As simulações aqui apresentadas fundamentam-se na técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo – TDR, que é a base para diversos métodos para localizar defeitos em cabos subterrâneos. A partir dos resultados obtidos, pode-se perceber que a TDR é uma técnica precisa e eficiente. Os modelos dos cabos apresentados tiveram algumas diferenças no que diz respeito à sua modelagem. O XLPE-N, modelado sem perdas, apresentou valores mais precisos de localização da falha simulada, além de não ser significativa a atenuação da onda no cabo. Isso se deve principalmente à perda na linha que é desconsiderada.

No modelo com perdas, o cabo XLPE-N também apresentou valores dentro do esperado. Contudo, mostrou uma atenuação da onda mais expressiva, devido à resistência do condutor e à fuga de corrente do dielétrico, que foram consideradas na modelagem. Os resultados apresentados são bastante satisfatórios, sendo que o modelo de uma LT com perdas é o que mais se aproxima de uma linha real.

Portanto, nota-se que para o cabo XLPE-N as perdas no dielétrico e no condutor influenciam na atenuação do sinal, entretanto, há pouca interferência no resultado final da reflexão.

Dessa forma, a Reflectometria no Domínio do Tempo simulada apresentou resultados satisfatórios, em conformidade com a teoria exposta.

REFERÊNCIAS

BRASIL. ANEEL. *Nota Técnica nº0098/2014. Redes subterrâneas de distribuição de energia: situação atual e avaliação da necessidade de aprimoramento da regulação associada*, 2014.

VILLELA, A. G., et al. *Aplicação Prática de Indicadores de Falha em Redes Subterrâneas da AES ELETROPAULO*. 6 p.

NOGUEIRA, J. F. S. *Comissionamento de Cabos Subterrâneos de Média Tensão em Parques Eólicos*. 2010, 56 p. Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, 2001.

FERREIRA, Maurissone, et al. Sistema ótico de monitoramento de linhas subterrâneas. *O Setor Elétrico*. Ed. 92, 2013.

USSUNA, D. A. *Desenvolvimento de sistema para localização de faltas em cabos isolados*. 2014, 106 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná.

RONCOLATTO, R. A. Inspeção preventiva de redes elétricas de distribuição subterrânea em condomínios - diretrizes e critérios. *O Setor Elétrico*. Ed 86, 2013.

AZEVEDO. F. A.. *Otimização de rede de distribuição de energia elétrica subterrânea reticulada através de algoritmos genéticos*. 2010, 18 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná.

STEVENSON JR.; WILLIAN, D. – *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1974.

ULABY, F. T. *Eletromagnetismo para Engenheiros*. 1ªEd. Boockman, 2006.

SHIN, T. J, et al. *Application of Time-Frequency Domain Reflectometry for Detection and Localization of a Fault on a Coaxial Cable*. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 54, NO. 6, Dezembro, 2005.

AGILENT TECHNOLOGIES. *Time Domain Reflectometry Theory*, Agilente Technologies, 2013

DUBICKAS, V. et al. *Cables Diagnostics With On-Voltage Time Domain Reflectometry*. Royal Institute of Technology, 2006.

ZANETTA JÚNIOR, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

DARSKI ROCHA, P. E. *Modelagem de cabos subterrâneos e marinhos para o estudo de transitórios*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GESTADELLO. D. S. *Metodologia de localização de defeitos em redes subterrâneas integrando PSCAD/EMTDC e sistemas inteligentes*. 2012, 113 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista.

WENTWORTH, S. M. *Eletromagnetismo aplicado, abordagem antecipada das linhas de transmissão*. Porto Alegre. Bookman, 2009.

PAUL, C. R., *Eletromagnetismo para Engenheiros – Com Aplicações*. Ed. LTC, 2006.

BASCOM, E.; VIN DOLLEN, D.; NG, H. *Computerized Underground Cable Fault Location Expertise*. In: Transmission and Distribution Conference, 1994.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Std 1234TM-2007, *IEEE Guide for Fault-Locating Technology for Fault Location System in Underground Power Cable*. Korea Electrotechnology Research Institute, 2006.

SONEL, *TDR-410 - TDR cable fault locator*. Disponível em file:///C:/Users/Filipe/Downloads/sonel_pruf-_und_messgerate_-_tdr-410_-_2017-04-05.pdf