

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**RODRIGO PALUDO**

**REFLETOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO: ANÁLISE DO EFEITO DAS  
CAMADAS SEMICONDUTORAS DE CABOS ISOLADOS**

**CURITIBA  
2009**

**RODRIGO PALUDO**

**REFLETOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO: ANÁLISE DO EFEITO DAS  
CAMADAS SEMICONDUTORAS DE CABOS ISOLADOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho

**CURITIBA**

**2009**

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Vitoldo Swinka Filho pela orientação clara e segura, e por ter propiciado mesmo nos momentos de dificuldades um ambiente familiar e descontraído, facilitando dessa forma o aprendizado e o desenvolvimento do trabalho.

Ao Instituto de Tecnologia Para o Desenvolvimento (LACTEC) pela concessão da bolsa e por disponibilizar os laboratórios e equipamentos para a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia (PIPE) pela oportunidade concedida.

Aos colegas Rafael Pires Machado e Eduardo Massahiko Higashi, por estarem sempre dispostos a colaborar.

Aos Engenheiros, Ms. Carlo Giuseppe Filippin, Glauco Domingues de Mello e Giuliano Cesar Breda de Souza, pelo apoio e pela motivação em todos os momentos.

Ao Técnico Robson Cardoso dos Santos pelo auxílio no desenvolvimento experimental.

Ao bolsista Guilherme Sombrio pela ajuda na realização das medidas.

A todos que de alguma forma colaboraram no meu desenvolvimento intelectual.

## RESUMO

A Refletometria no Domínio do Tempo (Time Domain Reflectometry – TDR) é uma técnica utilizada para a localização de falhas em linhas de transmissão de alta, média e baixa tensão, na qual um pulso é aplicado no cabo e sua reflexão é analisada. Na presente dissertação, a TDR foi aplicada a cabos isolados de média tensão com e sem camada semicondutora. Através da análise de refletometria foi mostrado que em cabos envelhecidos em campo com camadas semicondutoras as refletometrias apresentam comportamento não previsto no modelo teórico clássico. Um novo modelo de circuito foi proposto e considera a resistência das camadas semicondutoras do cabo isolado. As refletometrias foram simuladas e os resultados foram comparados com refletometrias realizadas em cabos isolados com polietileno entrecruzado mostrando que o modelo proposto é adequado para esse tipo de cabo.

**Palavras-chave:** Refletometria. Cabos isolados. Simulação computacional.

## **ABSTRACT**

The Time Domain Reflectometry (TDR) is a technique used for locating faults on high, medium and low voltage transmission lines, in which a pulse is applied to the cable and its reflection is analyzed. In this dissertation, the TDR was applied to insulated cables of medium voltage with and without semiconducting layer. Through analysis of reflectometry, it was shown that the reflectometries in aged cables with semiconductor layers present a non-expected-behavior. Noticing this effect, a new model was proposed. The new model of circuit considers the semiconductor layers of the insulated cable. The reflectometries were simulated and the results were compared with reflectometries carried out in crosslinked polyethylene insulated cables, showing that the proposed model is suitable for this type of cable.

**Keywords:** Reflectometry. Insulated cable. Computational simulation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA CONSTRUTIVO DE UM CABO ISOLADO COM DIELETRICO EM POLIETILENO ENTRECruzADO (XLPE).....	5
FIGURA 2 - FOTO DE TRECHOS DE CABO DE XLPE, COM E SEM O CONDUTOR INTERNO.....	6
FIGURA 3 – ESQUEMA MOSTRANDO O TEMPO ENTRE O PULSO DE ENTRADA E O PULSO REFLETIDO.....	7
FIGURA 4 - MODELO CLÁSSICO DE ELEMENTO DISTRIBUÍDO REPRESENTANDO UM TRECHO $\Delta Z$ DO CABO.....	10
FIGURA 5 – DESENHO ESQUEMÁTICO EM CORTE TRANSVERSAL DE UM CABO COAXIAL MOSTRANDO AS DIMENSÕES $a$ E $b$ DO CABO.....	11
FIGURA 6 – ESQUEMÁTICO DE CIRCUITO QUE REPRESENTA UM ELEMENTO DISTRIBUÍDO MOSTRANDO A TENSÃO E A CORRENTE DE ENTRADA E DE SAÍDA.....	14
FIGURA 7 – CIRCUITO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO UM ELEMENTO DISTRIBUÍDO PARA UMA LINHA SEM PERDAS.....	18
FIGURA 8 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO LIGANDO UMA FONTE DE TENSÃO $V_g$ A UMA CARGA DE IMPEDÂNCIA $Z_L$ .....	21
FIGURA 9 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE APLICAÇÃO DE REFLETOMETRIA SEM CARGA NO CABO.....	23
FIGURA 10 – GRÁFICO MOSTRANDO A FORMA DE ONDA DO PULSO UTILIZADO NO CABO RG-58.....	24
FIGURA 11 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM PARA APLICAÇÃO DE REFLETOMETRIA NUM CABO EM CIRCUITO ABERTO.....	24
FIGURA 12 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM PARA APLICAÇÃO DE REFLETOMETRIA NUM CABO EM CURTO-CIRCUITO.....	25
FIGURA 13 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM PARA APLICAÇÃO DE REFLETOMETRIA NUM CABO COM IMPEDÂNCIA CASADA.....	25
FIGURA 14 – AMPLIAÇÃO FEITA NO PRIMEIRO NO PULSO PARA ESTABELECIMENTO DO INSTANTE INICIAL.....	26
FIGURA 15 – ESQUEMA DE UM CABO DE XLPE MOSTRANDO AS DIMENSÕES UTILIZADAS NO CÁLCULO DA RESISTIVIDADE DAS CAMADAS SEMICONDUTORAS, EXTERNA E INTERNA.....	27
FIGURA 16 – ESQUEMA MOSTRANDO A FORMA COM QUE AS QUEDAS $V_1$ E $V_2$ SÃO OBTIDAS.....	28
FIGURA 17 – FOTO DOS CABOS MOSTRANDO A PINTURA PRATEADA CONDUTORA E A LIGAÇÃO DOS ELETRODOS.....	29
FIGURA 18 - GRÁFICO MOSTRANDO REFLEXÃO POSITIVA NUM TEMPO POSTERIOR.....	32
FIGURA 19 - TRECHO DE CABO RG-58, MOSTRANDO AS QUATRO PARTES CONSTITUTIVAS DO CABO.....	34
FIGURA 20 - GRÁFICO MOSTRANDO REFLEXÃO INVERSA NUM $\Delta T$ POSTERIOR.....	34
FIGURA 21 - GRÁFICO MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE REFLEXÃO, NO CASO DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA PARA O CABO RG-58.....	35
FIGURA 22 – REFLETOMETRIA DO CABO XLPE-E EM CIRCUITO ABERTO.....	36

FIGURA 23 – REFLETOMETRIA DO CABO XLPE-E COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA.....	37
FIGURA 24 – GRÁFICO DE REFLETOMETRIA DO CABO XLPE-N EM CIRCUITO ABERTO.....	38
FIGURA 25 - GRÁFICO DE REFLETOMETRIA DO CABO XLPE-N EM CURTO-CIRCUITO.....	38
FIGURA 26 – ELEMENTO DISTRIBUÍDO PARA UM CABO SEM PERDAS. ....	40
FIGURA 27 – GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DE REFLETOMETRIA PARA O CABO RG-58 EM CIRCUITO ABERTO. ....	40
FIGURA 28 – GRÁFICO MOSTRANDO SIMULAÇÃO DE REFLETOMETRIA PARA O CABO RG-58 EM CURTO CIRCUITO.....	41
FIGURA 29 – GRÁFICO SIMULADO PARA O CABO RG58 COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA.....	42
FIGURA 30 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE CIRCUITO MOSTRANDO UM ELEMENTO CONCETRADO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES PARA O CABO XLPE-E. ....	44
FIGURA 31 – GRÁFICO DE REFLETOMETRIA SIMULADA PARA O CABO XLPE-E EM CIRCUITO ABERTO.....	44
FIGURA 32 - GRÁFICO DE REFLETOMETRIA SIMULADA PARA O CABO XLPE-E EM CURTO-CIRCUITO.....	45
FIGURA 33 - GRÁFICO DE REFLETOMETRIA SIMULADA PARA O CABO XLPE-E COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA.....	46
FIGURA 34 - GRÁFICO DE REFLETOMETRIA SIMULADA PARA O CABO XLPE-N EM CIRCUITO ABERTO COM DOIS CANAIS DO OSCILOSCÓPIO.....	47
FIGURA 35 - GRÁFICO DE REFLETOMETRIA SIMULADA PARA O CABO XLPE-N EM CURTO-CIRCUITO.....	48
FIGURA 36 – GRÁFICO MOSTRADO A SIMULAÇÃO PARA O CABO XLPE-N COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA. ....	48
FIGURA 37 – GRÁFICO SIMULADO DE REFLETOMETRIA PARA O CABO XLPE-E COM RESISTÊNCIA DE 300 T OHM.....	49
FIGURA 38 – GRÁFICO SIMULADO DE REFLETOMETRIA PARA O CABO XLPE-E COM RESISTÊNCIA DE 200 OHM.....	50
FIGURA 39 - MODELO DE ELEMENTO DISTRIBUÍDO PROPOSTO. ....	51
FIGURA 40 – DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO O MODELO CLÁSSICO E O MODELO PROPOSTO.....	52
FIGURA 41 – FOTO DOS CABOS UTILIZADOS NA MEDIDA DA RESISTÊNCIA POR METRO DAS CAMADAS SEMICONDUTORAS. ....	54
FIGURA 42 - FOTO DO CABO XLPE-E UTILIZADO NA MEDIDA DE RESISTÊNCIA POR METRO.....	54
FIGURA 43 – GRÁFICO DE SIMULAÇÃO DE REFLETOMETRIA MOSTRANDO O PULSO ENTRANDO NO CABO, SEGUÍDO DE REFLEXÃO NUM $\Delta T$ POSTERIOR. ....	55
FIGURA 44 – GRÁFICO DE SIMULAÇÃO DE REFLETOMETRIA OBTIDO COM DOIS CANAIS DO OSCILOSCÓPIO. ....	56
FIGURA 45 – DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO OS PONTOS DE LIGAÇÃO DO OSCILOSCÓPIO PARA A ANÁLISE DA ATENUAÇÃO NA REFLETOMETRIA SIMULADA.....	57
FIGURA 46 – GRÁFICO SIMULADO MOSTRANDO O PULSO EM DIFERENTES PONTOS DO CABO.....	57

FIGURA 47 – GRÁFICO DE SIMULAÇÃO DA ENERGIA AO LONGO DO CABO XLPE-E COM RESISTÊNCIA DA CAMADA SEMICONDUTORA IGUAL A 20 OHM. ....	59
FIGURA 48 – COMPARAÇÃO DA ATENUAÇÃO AO LONGO DO CABO PARA DIFERENTES VALORES DE RESISTÊNCIA. ....	60
FIGURA 49 – ESPECTRO EM PONTOS DIFERENTES DO CABO, MOSTRANDO A ATENUAÇÃO DAS COMPONENTES DE FREQUÊNCIA. ....	61
FIGURA 50 – ESPECTRO DE ATENUAÇÃO SIMULADO PARA UM CABO COM RESISTÊNCIA DAS CAMADAS SEMICONDUTORAS DE 100 Ω.....	62

### **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 - REPERSENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PULSO REFLETIDO EM FUNÇÃO DA ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO DEFEITO.....	7
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS CABOS UTILIZADOS.....	22
TABELA 3 - VALORES UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO CABO XLPE-E. ....	43
TABELA 4 - PARÂMETROS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO PARA O CABO XLPE-E. ....	43
TABELA 5 – TABELA MOSTRANDO OS VALORES DE RESISTÊNCIA DAS CAMADAS SEMICONDUTORAS POR METRO DE CABO.....	53

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO .....	2
1.1.1. APRESENTAÇÃO.....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1. CABOS DE ENERGIA .....	4
2.2. REFLETOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	6
2.2.1. Linhas de transmissão com perdas.....	9
2.2.2. Modelo clássico de elementos distribuídos .....	9
2.2.3. Parâmetros de uma linha coaxial .....	11
2.2.4. Equações da telegrafia.....	13
2.2.5. Linhas sem perdas .....	17
2.2.6. Velocidade de propagação.....	19
2.2.7. Coeficiente de reflexão de tensão .....	20
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>22</b>
3.1. MATERIAIS .....	22
3.2. MÉTODOS.....	23
3.2.1. Refletometria em laboratório .....	23
3.2.2. Simulação computacional de refletometrias.....	26
3.2.3. Medida de resistividade volumétrica das camadas semicondutoras .....	27
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>31</b>
4.1. RESULTADOS DAS REFLETOMETRIAS REALIZADAS EM LABORATÓRIO	31
4.1.1. Medidas no cabo coaxial RG-58 .....	31
4.1.2. Medidas nos cabos com dielétrico em XLPE .....	35
4.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS REFLETOMETRIAS.....	39

4.2.1. Simulações para o cabo RG-58 .....	39
4.2.2. Simulações para os cabos XLPE-E e XLPE-N.....	42
4.2.3. Hipótese da variação da condutância .....	48
4.2.4. Modelo de elementos distribuídos proposto.....	50
4.2.5. Resistividade das camadas semicondutoras .....	53
4.2.6. Simulações com o modelo de elementos distribuídos proposto.....	55
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>6. TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>
<b>DOCUMENTOS CONSULTADOS.....</b>	<b>67</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de utilização de energia elétrica, em consequência da evolução tecnológica, gera a necessidade de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica mais confiáveis. A tendência atual é a ampliação da utilização de linhas subterrâneas, principalmente nas regiões centrais das grandes cidades [1].

A aplicação de linhas subterrâneas apresenta vantagens em relação as linhas aéreas em dois aspectos. O primeiro aspecto diz respeito á segurança, onde os cabos isolados não apresentam risco de contato de pessoas ou animais com os condutores energizados, evitando acidentes. A linha subterrânea também é mais confiável, uma vez que elimina as interrupções do fornecimento de energia devido ao contato com galhos de árvores, quedas de postes por colisões de automóveis ou descargas atmosféricas. O segundo aspecto está relacionado com o meio ambiente, pois linhas de transmissão enterradas não necessitam abertura de clareiras nas vegetações e nos centros urbanos e reduzem a poluição visual, sonora e eletromagnética [1].

Linhas de transmissão e distribuição subterrâneas estão presentes em muitas das grandes cidades do país e do mundo. No Brasil, um exemplo é a cidade de Foz do Iguaçu no Paraná, onde a Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL) construiu 1,5 km de linhas subterrâneas e gastou R\$ 8 milhões, entre projeto e execução da obra, retirando 123 postes, 3 km de cabos de alta tensão, 3,6 km de cabos de baixa tensão e 30 transformadores, segundo os dados da Agência Estadual de Notícias [2].

Os cabos utilizados em linhas de distribuição e transmissão subterrâneas apresentam um sistema de isolamento composto por uma camada de material isolante, duas camadas semicondutoras e uma blindagem metálica externa, que são responsáveis pelo confinamento do campo elétrico gerado no condutor [3].

Para o diagnóstico do estado de degradação e detecção de defeitos no sistema de isolamento desses cabos são utilizadas diversas técnicas, entre elas a Refletometria no Domínio do Tempo (TDR). A TDR consiste na análise do comportamento de pulsos elétricos de curta duração que são injetados e viajam ao longo do comprimento do cabo. Esses pulsos podem ter parte da sua energia refletida em algum defeito, ou na extremidade oposta do cabo, o que permite através

da análise do retorno, a identificação e a localização de alguns tipos de defeitos. Numa linha subterrânea com um defeito de curto-circuito, por exemplo, pode-se reduzir consideravelmente o tempo de manutenção aplicando refletometria [4].

Ao se realizar medidas de refletometria em cabos envelhecidos em campo os quais foram retirados da linha de distribuição de energia elétrica do centro da cidade de Curitiba, verificou-se um comportamento diferenciado. Foi percebido nesses cabos que o pulso refletido apresenta grande atenuação e alteração da forma de onda dificultando a análise da Refletometria no Domínio do Tempo.

## 1.1. OBJETIVO

Avaliar o efeito das camadas semicondutoras de cabos isolados de energia, nos resultados de ensaios por refletometria no domínio do tempo por meio de comparação de medidas em laboratório com simulações computacionais.

### 1.1.1. APRESENTAÇÃO

O trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica onde primeiramente é abordada a história da evolução dos cabos isolados de média tensão. As partes constitutivas dos cabos isolados são mostradas e posteriormente é descrita a técnica da refletometria no domínio do tempo. A refletometria é aplicada em cabos com base na teoria sobre linhas de transmissão que é apresentada posteriormente.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais que foram utilizados no desenvolvimento do trabalho e também os métodos necessários para a realização das refletometrias, simulações e medidas de resistividade.

No Capítulo 4 os resultados das refletometrias realizadas em diferentes cabos são apresentados e comentados separadamente. As simulações também são apresentadas e discutidas, bem como a proposta de um novo modelo de elementos distribuídos para representar um cabo isolado. Posteriormente são apresentados os resultados das medidas de resistividade das camadas semicondutoras dos cabos e as simulações de refletometria com o modelo de elementos distribuídos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e no Capítulo 6 as sugestões para trabalhos futuros. Posteriormente são apresentadas as referências utilizadas e os documentos consultados no decorrer do trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CABOS DE ENERGIA

Os cabos de transmissão e distribuição de energia elétrica começaram a ser produzidos no final do século XIX. Para a sua confecção inicialmente, utilizaram-se como dielétricos vários materiais, como papel, borracha natural, borracha vulcanizada, óleo, cera, algodão, seda envernizada, entre outros [1].

Ao longo dos anos os cabos isolados com papel impregnado em óleo (PILCS - Paper Insulated Lead Covered) se sobressaíram e por volta de 1890 passaram a ser largamente utilizados. Inicialmente, utilizava-se óleo-vegetal substituído mais tarde pelo óleo mineral [4].

Com os crescentes avanços no desenvolvimento de materiais poliméricos ocorridos, principalmente, durante a segunda guerra mundial, os cabos passaram a serem constituídos com dielétricos poliméricos. O material utilizado a partir de 1960 para a construção de cabos passou a ser o polietileno entrecruzado (XLPE), sendo uma variação do polietileno com estrutura ramificada, de baixa densidade [4].

Data-se de 1935 o surgimento do polietileno, o qual teve sua primeira aplicação comercial durante a segunda guerra mundial na isolação de cabos de radar na Inglaterra [5]. O polietileno é obtido pela reação entre moléculas de etileno ( $C_2H_4$ ) e é representado pela cadeia  $(-CH_2-CH_2-)_n$ , podendo se apresentar na forma linear, ramificada ou reticulada [3]. Observa-se que um polímero pode ter sua estrutura modificada por exposição à luz ultravioleta, aquecimento, reprocessamento como reciclagem, etc. Constata-se que ao alterar sua estrutura, há também alterações de suas propriedades físicas. Exemplos de alterações físicas podem ser o aumento da cristalinidade por exposição ao sol, aumento da temperatura de fusão, aumento da resistência mecânica e diminuição da ductilidade. O polietileno entrecruzado (XLPE) apresenta-se como um material termofixo e foi obtido na década de 30 pela irradiação do polietileno de baixa densidade com feixes de elétrons de alta energia [6].

Os primeiros tipos de cabos construídos com dielétrico em polietileno entrecruzado (XLPE) começaram a ser fabricados em 1960. Nesses cabos a proteção externa é feita com o policloreto de vinila (PVC) que em 1970 foi

substituído pelo polietileno (PE) com o objetivo de reduzir a infiltração de água no cabo [1]. Nos PILCS a presença de umidade foi o principal fator de degradação do dielétrico e cabe ressaltar que o dielétrico é o principal fator que define a vida útil de um cabo [1, 3].

A adição das camadas poliméricas sobre o condutor metálico é feita por extrusão com controle de impurezas de até 100  $\mu\text{m}$ . A extrusão tripla é o processo utilizado na construção de cabos isolados, em que a adição das três camadas poliméricas ocorrem simultaneamente. Após a extrusão, o polímero passa por um processo de resfriamento que inicialmente era feito em água e posteriormente passou a ser a seco para evitar a presença de umidade [1].

A Figura 1 mostra as partes constituintes de um cabo da década de 70.

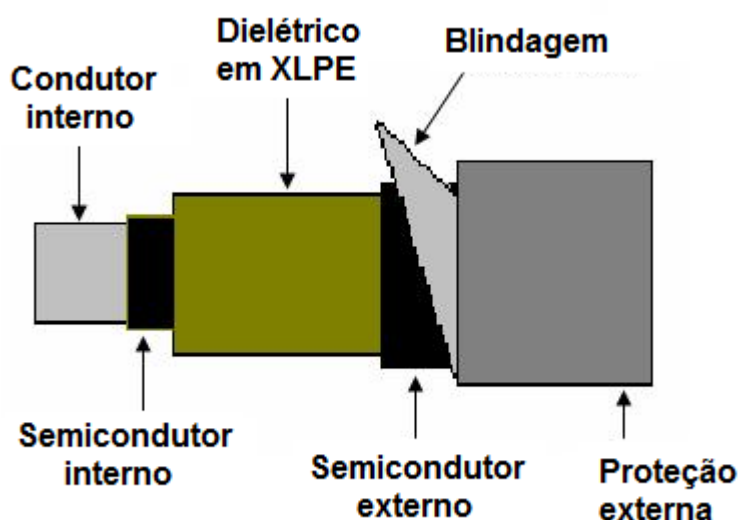


FIGURA 1 - ESQUEMA CONSTRUTIVO DE UM CABO ISOLADO COM DIELÉTRICO EM POLIETILENO ENTRECruzADO (XLPE).

Na década de 90, pode-se dizer que ocorreram evoluções nas técnicas até então utilizadas para a construção de cabos, como o controle de impurezas, que passou a ser de 60  $\mu\text{m}$ . A camada semicondutora externa também foi alterada. Os cabos da década de 70 possuíam uma fita semicondutora externa enrolada sobre o dielétrico, enquanto que, nos cabos da década de 90, a camada semicondutora externa foi feita de um compósito polimérico (polímero ao qual se adiciona partículas de negro de fumo), o qual pode ser visto constituindo a camada semicondutora

interna dos trechos de cabo mostrados na Figura 2, extrudado sobre o dielétrico [7]. Em alguns casos é adicionado um aditivo retardante de arborescência no dielétrico do cabo (TRXLPE - tree-retardant) [8].

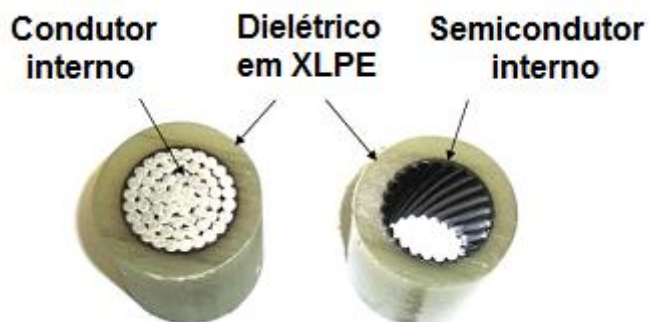


FIGURA 2 - FOTO DE TRECHOS DE CABO DE XLPE, COM E SEM O CONDUTOR INTERNO.

Todavia, em muitos países existem cabos das décadas de 60 e 70 em operação. Os custos para a substituição desses cabos por novos são extremamente altos e em alguns casos, inviáveis. Dessa forma o estudo e desenvolvimento de técnicas de diagnóstico para a localização de defeitos nesses cabos é de fundamental importância [1]. Uma técnica bastante eficaz no que diz respeito ao diagnóstico de defeitos em cabos, é a refletometria no domínio do tempo que será abordada na próxima sessão.

## 2.2. REFLETOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Um dos princípios básicos utilizado na refletometria no domínio do tempo é a reflexão. Se um pulso é injetado num cabo (pulso de entrada) e viaja ao longo do mesmo, irá refletir se houver em algum ponto uma impedância diferente da impedância característica do cabo. Essa variação de impedância poderá ser para um valor maior ou menor que o da impedância característica do cabo o que pode ser diagnosticado através da análise do pulso refletido [9]. Podem-se destacar três casos como exemplos de reflexões de sinais em cabos, os quais são mostrados na Tabela 1.

TABELA 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PULSO REFLETIDO EM FUNÇÃO DA ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO CABO.

Impedância característica do cabo ( $Z_0$ )	Impedância da carga ( $Z_L$ )	Característica do pulso de entrada	Característica do pulso refletido
$Z_0$	$Z_L \rightarrow \infty$		
$Z_0$	$Z_L \rightarrow 0$		
$Z_0$	$Z_L = Z_0$		

$Z_0$  → impedância característica do cabo;  
 $Z_L$  → impedância da carga.

No primeiro caso na Tabela 1, onde é mostrada a reflexão para  $Z_L \rightarrow \infty$ , o pulso é injetado no cabo (pulso de entrada) com a extremidade livre e o pulso refletido retorna sem inversão de fase, o que em campo ocorre em caso de ruptura do cabo. No segundo caso, a extremidade do cabo está em curto-circuito, com  $Z_L \rightarrow 0$ , e na refletometria o pulso refletido retorna com a fase invertida. No terceiro caso, a refletometria não apresenta pulso refletido devido a  $Z_L = Z_0$  o que está de acordo com o teorema da máxima transferência de potência [10, 11].

Para a determinação da posição do defeito, utiliza-se o tempo decorrido entre o pulso de entrada e o pulso refletido conforme se observa na Figura 3.

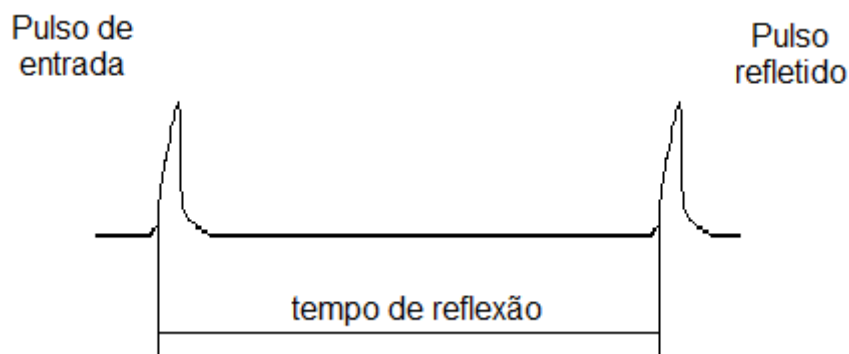


FIGURA 3 – ESQUEMA MOSTRANDO O TEMPO ENTRE O PULSO DE ENTRADA E O PULSO REFLETIDO.

Para a determinação do espaço percorrido pelo pulso, multiplica-se a velocidade de propagação pelo tempo de reflexão. Se o pulso é injetado no início do cabo e refletido no final, deve-se observar que o tempo de reflexão corresponde ao necessário para percorrer o comprimento do cabo duas vezes. Nesse caso deve-se dividir o tempo pela metade para encontrar a posição do defeito [12].

Destaca-se nesse ponto do trabalho que, no que diz respeito à nomenclatura, atribui-se dois significados ao termo **linhas de transmissão**. Do ponto de vista técnico, o termo refere-se aos cabos que transmitem energia elétrica desde a geração até a distribuição, porém o mesmo termo é utilizado na parte do eletromagnetismo que estuda os fenômenos relativos à propagação de energia eletromagnética.

Uma linha de transmissão é definida como sendo qualquer meio ou estrutura que transmite energia entre uma fonte e uma carga. Nas discussões futuras, a energia transmitida será um pulso elétrico de curta duração [12].

As linhas de transmissão se dividem em dois tipos:

- Modo de propagação TEM;
- Modo de propagação de alta-ordem.

As linhas de transmissão transversal eletromagnética (TEM - Transverse ElectroMagnetic) consistem em duas superfícies de condução em paralelo, e nesse tipo de linhas de transmissão a direção de propagação é perpendicular à direção do campo elétrico e magnético. Os cabos coaxiais pertencem a esse grupo [12, 13]:

Outro tipo de linha de transmissão é o de alta ordem, onde ao menos uma componente do campo possui direção paralela à propagação do pulso. As fibras ópticas se classificam nesse grupo [12].

Uma linha de transmissão deve ser levada em consideração como fator que pode alterar a tensão e a corrente no circuito dependendo da frequência do sinal e do comprimento do cabo. Pode-se dizer que a relação entre o comprimento da linha  $z$  e o comprimento de onda  $\lambda$  do sinal é o que determina o quanto a linha vai interferir no circuito. Observa-se que quando  $z/\lambda$  é muito pequeno, a linha não afeta consideravelmente a transmissão, porém se  $z/\lambda > 0,01$  deve-se considerar a influência da linha [13]. Os efeitos provocados por uma linha de transmissão podem ser:

- O deslocamento de fase;
- Sinais refletidos;
- Efeitos dispersivos;
- Perda de potência.

O tipo de linha abordada na presente dissertação será a Transversal Eletromagnética (TEM) mais especificamente os cabos coaxiais, devido ao fato de estarem presentes em grande número nas linhas de transmissão de energia. As linhas de transmissão serão divididas em dois grupos. Um deles é o das linhas com perdas, que será abordado primeiramente, e o outro, o das linhas sem perdas que será abordado mais adiante.

#### 2.2.1. Linhas de transmissão com perdas

As linhas com perdas são aquelas em que ocorre a dissipação da energia do sinal ao viajar pelo cabo. Dentro da representação de uma linha através de um modelo de circuito elétrico, o elemento dissipativo será uma resistência, elemento que converte a energia elétrica em térmica [10].

Pode-se dizer que praticamente não existe um cabo perfeito, porém para muitos casos a dissipação pode ser desprezada, o que facilita os cálculos de localização de falhas para uma linha de transmissão.

#### 2.2.2. Modelo clássico de elementos distribuídos

Uma forma de representar uma linha de transmissão é pelo modelo clássico de elementos distribuídos, sendo fragmentada em partes que representam os fenômenos físicos relacionados à corrente e tensão que ocorrem na linha real [13]. Na Figura 4 é mostrado um desenho esquemático de circuito (elemento distribuído) representando um trecho de cabo.

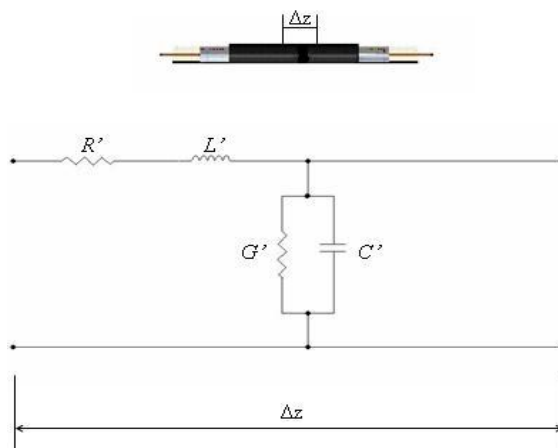


FIGURA 4 - MODELO CLÁSSICO DE ELEMENTO DISTRIBUÍDO REPRESENTANDO UM TRECHO  $\Delta z$  DO CABO.

onde:

$R'$  → resistência por unidade de comprimento.

$L'$  → Indutância por unidade de comprimento.

$G'$  → Condutância por unidade de comprimento.

$C'$  → Capacitância por unidade de comprimento.

$\Delta z$  → Elemento infinitesimal do cabo.

Sabe-se que um cabo coaxial, apresenta uma determinada capacitância  $C'$  que armazena e devolve energia ao circuito. Na capacitância a energia é armazenada no campo elétrico, enquanto que na indutância, a energia é armazenada no campo magnético. Além de indutância  $L'$  e da capacitância  $C'$ , um cabo apresenta uma resistência  $R'$  relacionada aos condutores interno e externo, e também uma condutância  $G'$  devido à parte resistiva do dielétrico. Esses são os parâmetros estabelecidos por metro de um cabo e que são utilizados para se representar uma linha em termos de elementos distribuídos [13].

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.

Observa-se que para uma simulação perfeita  $\Delta z$  deveria tender a zero  $\Delta z \rightarrow 0$ , ou do contrário o número de elementos distribuídos  $n$  deveria tender ao infinito  $n \rightarrow \infty$ . Dessa forma existirá uma relação entre  $z$  e  $n$ , para a qual a simulação apresenta resultados próximos ao real.

$$\Delta z = \frac{z}{n} \quad (1)$$

### 2.2.3. Parâmetros de uma linha coaxial

Para a determinação dos parâmetros de um cabo coaxial, faz-se uso das dimensões mostradas na Figura 5.

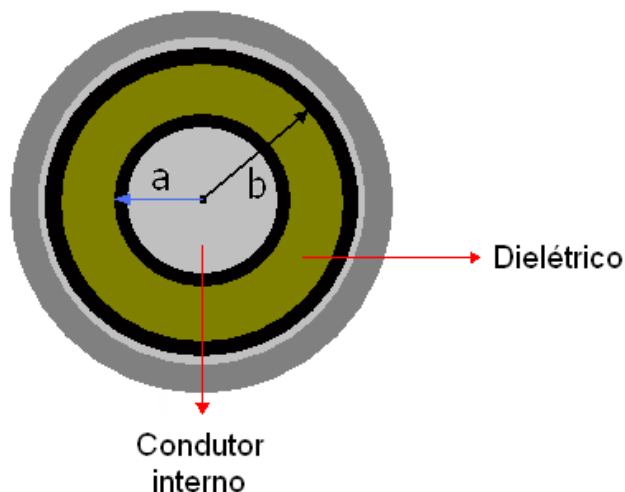


FIGURA 5 – DESENHO ESQUEMÁTICO EM CORTE TRANSVERSAL DE UM CABO COAXIAL MOSTRANDO AS DIMENSÕES  $a$  E  $b$  DO CABO.

Os parâmetros para uma linha coaxial são dados pelas equações [13]:

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

$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left( \frac{b}{a} \right) \quad (3)$$

$$G' = \frac{2\pi\sigma}{\ln \left( \frac{b}{a} \right)} \quad (4)$$

$$C' = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \left( \frac{b}{a} \right)} \quad (5)$$

onde:

$R'$  → Resistência por unidade de comprimento do condutor interno do cabo;

$R_s$  → Resistência de superfície do condutor interno (Efeito Skin);

$a$  → Raio da camada semicondutora interna;

$b$  → Raio da camada semicondutora externa;

$L'$  → Indutância por unidade de comprimento de cabo;

$\mu$  → Permeabilidade magnética do dielétrico do cabo;

$G'$  → Condutância por unidade de comprimento do dielétrico do cabo;

$\sigma$  → Condutividade do dielétrico do cabo;

$C'$  → Capacitância por unidade de comprimento de cabo;

$\varepsilon'$  → Permissividade elétrica do dielétrico do cabo.

Para a determinação de cada parâmetro faz-se uso das características físicas dos materiais constituintes do cabo.

A resistência por metro ( $R'$ ) do cabo é determinada utilizando o valor da resistência intrínseca ( $R_s$ ), que é a resistência de superfície do condutor. Observa-se na equação (6) que o valor de  $R_s$  dado em ohm, depende da frequência [12,13].

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_c}{\sigma_c}} \quad (6)$$

onde:

$R_s$  → Resistência intrínseca;

$f$  → Frequência do pulso;

$\mu_c$  → Permeabilidade magnética do condutor;

$\sigma_c$  → Condutividade do condutor.

Como  $R'$  é diretamente proporcional a  $R_s$ , que por sua vez é diretamente proporcional à frequência, com o aumento da frequência será observado um acréscimo na resistência por metro do cabo [14]. Esse fenômeno é conhecido como Efeito Skin ou Peculiar, e fisicamente ele representa o deslocamento da corrente para a superfície do condutor, com o aumento da frequência [12,13].

Para a determinação da indutância  $L'$  por metro do cabo são utilizados os valores das dimensões  $a$  e  $b$  vistas na Figura 5, bem como a permeabilidade magnética  $\mu$  do dielétrico que separa o condutor externo do interno. A unidade de  $L'$  é dada em  $H/m$  [10].

Outro parâmetro utilizado para representação do cabo é a condutância por unidade de comprimento  $G'$ , que é dada em  $S/m$ . Para o cálculo de  $G'$  utiliza-se o valor da condutividade do dielétrico que separa os condutores interno e externo. O valor de  $G'$  é o inverso da resistência do dielétrico por unidade de comprimento. Sabe-se que o cabo apresenta duas superfícies metálicas separadas por um dielétrico em forma cilíndrica se o cabo for coaxial. Logo o mesmo apresentará uma capacitância por unidade de comprimento  $C'$  [12,13].

Como um capacitor armazena a energia no campo elétrico o cálculo de  $C'$  depende da permissividade elétrica  $\varepsilon$  do dielétrico, que separa as placas do capacitor, nesse caso representadas pelos condutores externo e interno. A permissividade elétrica  $\varepsilon$  de um dielétrico possui uma parte real e uma imaginária que dependem da frequência e variam diferentemente dependendo do material [14, 15]. Esse efeito não foi considerado. O valor de  $C'$  é dado em  $F/m$ . Uma vez obtidos os valores constitutivos do cabo, o mesmo será representado por um circuito equivalente e pode ser simulado utilizando algum software que permita a simulação de circuitos elétricos. O Multisim10, fabricado pela National Instruments o qual possui uma versão livre foi o software utilizado para as simulações.

#### 2.2.4. Equações da telegrafia

Através do modelo clássico de elementos distribuídos podem-se encontrar as equações para corrente e tensão ao longo da linha. Como uma linha qualquer possui um determinado comprimento  $z$  a tensão e a corrente serão dadas em função de  $z$  e do tempo  $t$  [12,13].

Cada elemento da linha possui uma tensão de entrada e uma tensão de saída, conforme mostrado na Figura 6.

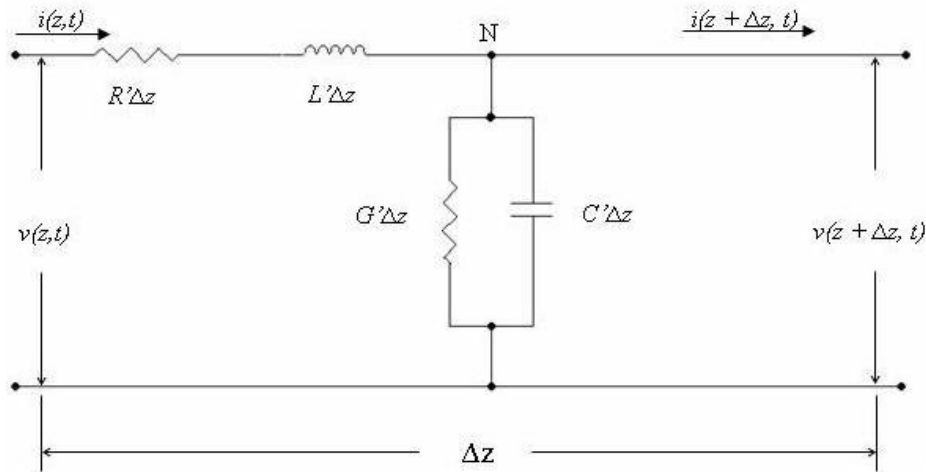


FIGURA 6 – ESQUEMÁTICO DE CIRCUITO QUE REPRESENTA UM ELEMENTO DISTRIBUÍDO MOSTRANDO A TENSÃO E A CORRENTE DE ENTRADA E DE SAÍDA.

Se ao entrar no elemento, a tensão e a corrente são dependentes da dimensão  $z$  e do tempo, sendo dadas por  $v(z, t)$  e  $i(z, t)$ , ao longo da linha a dimensão  $z$  é acrescentada de  $\Delta z$ . Sendo considerado esse acréscimo, a tensão e a corrente na linha serão dadas por  $v(z + \Delta z, t)$  e  $i(z + \Delta z, t)$  para um mesmo instante  $t$ . Entrando na malha através da resistência  $R'$  e aplicando a Lei de Tensão de Kirchhoff, obtém-se que a soma total das quedas de tensão sobre cada componente do elemento distribuído será igual à zero [16].

$$-v(z, t) + R' \Delta z i(z, t) + L' \Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} + v(z + \Delta z, t) = 0 \quad (7)$$

Dividindo todos os termos da equação (7) por  $\Delta z$ , obtém-se a equação (8).

$$\frac{v(z + \Delta z, t) - v(z, t)}{\Delta z} = -R' i(z, t) - L' \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (8)$$

Fazendo  $\Delta z \rightarrow 0$  em (8) obtém-se a equação diferencial (9) da telegrafia para a tensão.

$$-\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = R' i(z, t) + L' \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (9)$$

Da mesma forma que foi obtida a equação (9) para a tensão aplicando a Lei de Tensão de Kirchhoff, aplicando a Lei de Corrente de Kirchhoff no nó N da Figura 6 obtém-se a equação (10) [10].

$$i(z, t) - G' \Delta z v(z + \Delta z, t) - C' \Delta z \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t} - i(z + \Delta z, t) = 0 \quad (10)$$

Novamente, dividindo todos os termos da equação (10) por  $\Delta z$ , tem-se a equação (11) [12,13].

$$\frac{i(z + \Delta z, t) - i(z, t)}{\Delta z} = -G'v(z + \Delta z, t) - C' \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t} \quad (11)$$

Fazendo em (11)  $\Delta z \rightarrow 0$ , obtém-se a equação diferencial (12) da telegrafia para a corrente [12,13].

$$-\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = G'v(z, t) + C' \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \quad (12)$$

As equações (9) e (12) definem a tensão e a corrente ao longo de uma linha no domínio do tempo e são conhecidas como equações da telegrafia.

Outra representação do pulso de tensão é feita através de números complexos na forma fasorial, na qual se tem uma parte real e uma parte imaginária. Dadas as definições (13) e (14) substituídas em (9) e em (12) e ainda utilizando a propriedade de que  $\frac{\partial}{\partial t}$  pode ser substituído por  $j\omega$  no domínio da frequência se obtêm as equações fasoriais da telegrafia, mostradas em (15) e (16) [17].

$$v(z, t) = \Re \left\{ \tilde{V}(z) e^{j\omega t} \right\} \quad (13)$$

$$i(z, t) = \Re \left\{ \tilde{I}(z) e^{j\omega t} \right\} \quad (14)$$

Nesses casos, os símbolos  $\tilde{I}$  e  $\tilde{V}$  representam fasores de tensão e corrente ao longo da linha.

$$-\frac{d\tilde{V}(z)}{dz} = (R' + j\omega L') \tilde{I}(z) \quad (15)$$

$$-\frac{d\tilde{I}(z)}{dz} = (G' + j\omega C') \tilde{V}(z) \quad (16)$$

Utilizando o artifício de derivar em  $z$  os dois lados das equações (15) e (16), obtêm-se as equações chamadas equações de onda para uma linha de transmissão [12,13].

$$-\frac{d^2 \tilde{V}(z)}{dz^2} = (R' + j\omega L') \frac{d\tilde{I}(z)}{dz} \quad (17)$$

Percebe-se na equação (17) que o termo  $\frac{d\tilde{I}(z)}{dz}$  pode ser substituído, dada a igualdade com a equação (16).

Logo a equação (18), de segunda ordem em  $z$ , é a equação de onda para  $\tilde{V}$  [17].

$$\frac{d^2\tilde{V}(z)}{dz^2} - \gamma^2\tilde{V}(z) = 0 \quad (18)$$

Onde  $\gamma$  é definido como sendo a constante de propagação complexa da linha de transmissão e tem valor mostrado em (19) [4].

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (19)$$

Da mesma forma com que foi obtida a equação (18), obtém-se a equação (20) de onda para a corrente ao longo da linha de transmissão [17].

$$\frac{d^2\tilde{I}(z)}{dz^2} - \gamma^2\tilde{I}(z) = 0 \quad (20)$$

A constante de propagação é representada por um número complexo onde a parte real ( $\alpha$ ) representa a constante de atenuação da linha e a parte imaginária ( $\beta$ ) é chamada constante de fase da linha [4].

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (21)$$

As soluções das equações de segunda ordem (18) e (20) são obtidas.

$$\tilde{V}(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad (22)$$

$$\tilde{I}(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \quad (23)$$

Observa-se que nas equações (22) e (23) o primeiro termo ( $V_0^+$  e  $I_0^+$ ) representa a amplitude no sentido positivo de  $z$ , enquanto que o segundo termo ( $V_0^-$  e  $I_0^-$ ) representa a onda se propagando no sentido negativo de  $z$ , ou simplesmente representam a incidência e a reflexão do pulso no cabo [18].

Logo, relacionando os termos  $I_0$  e  $V_0$  das equações (22) e (23) pode-se encontrar a impedância característica do cabo. Para isso substituem-se na equação (15) as equações (22) e (23) [12,13].

$$\frac{R'+j\omega L'}{\gamma} = \frac{V_0^+}{I_0^+} - \frac{V_0^-}{I_0^-} \quad (24)$$

Na equação (24) observam-se três termos, dos quais o primeiro termo é definido como sendo a impedância característica  $Z_0$  em ohm ( $\Omega$ ) do meio em que o sinal se propaga, visto na equação (25) [12,13].

$$Z_0 = \frac{R'+j\omega L'}{\gamma} \quad (25)$$

Substituindo o valor do coeficiente de propagação complexo, obtêm-se a equação (26), que define a impedância característica de uma linha de transmissão [19].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R'+j\omega L'}{G'+j\omega C'}} \quad (26)$$

Para caracterizar uma linha os dois fatores fundamentais são a constante de propagação complexa e a impedância característica do meio. A impedância, mostrada na equação (26), depende dos parâmetros da linha e da frequência, da mesma forma que a constante de propagação da linha mostrada na equação (19) [19].

#### 2.2.5. Linhas sem perdas

Na prática muitas linhas apresentam baixas perdas o que permite que a teoria para linhas sem perdas tenha, com alguma aproximação, aplicação prática [12].

Para uma linha sem perdas, desconsidera-se a resistência dos condutores e desconsidera-se também que o dielétrico possa permitir a passagem de corrente elétrica entre os condutores, ou seja, o elemento distribuído que representa um cabo sem perdas possui apenas uma indutância e uma capacitância como mostrado na Figura 7 [12,13].

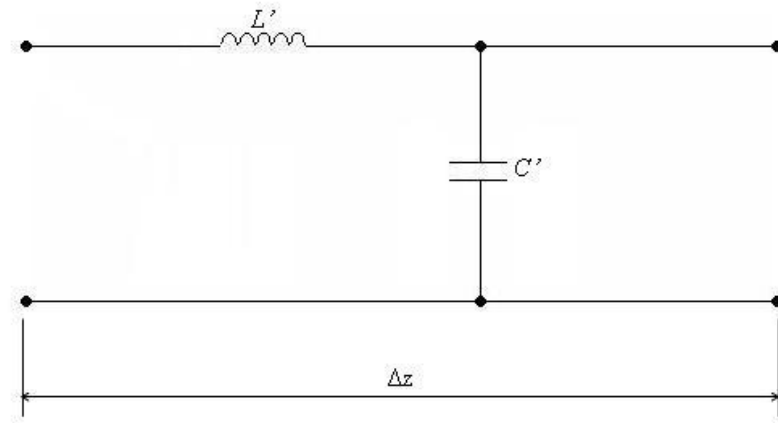


FIGURA 7 – CIRCUITO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO UM ELEMENTO DISTRIBUÍDO PARA UMA LINHA SEM PERDAS.

Percebe-se que, para esse caso, a equação (19) fica reduzida a equação (27), onde  $R'=0$  e  $G'=0$  [12,13].

$$\gamma = \sqrt{(j\omega L')(j\omega C')}$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{L'C'} \quad (27)$$

Deve-se observar na equação (27), comparada com (21), que a constante de atenuação da linha ( $\alpha$ ) é zero, o que faz com que a constante de fase da linha seja dada em (28) [12,13].

$$\beta = \omega\sqrt{L'C'} \quad (28)$$

Logo:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (29)$$

Duas observações importantes são feitas isolando o termo geométrico  $\left[ \ln \frac{b}{a} \right]$  em (3) e em (5) e são mostradas convenientemente em (30) e em (31).

$$L'C' = \mu\varepsilon \quad (30)$$

$$\frac{G'}{C'} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (31)$$

### 2.2.6. Velocidade de propagação

Sabe-se que uma onda eletromagnética possui velocidade que só depende das características do meio de propagação. As características do meio de propagação são definidas pelas constantes  $\mu$  e  $\varepsilon$ , que caracterizam o meio material onde as ondas se propagam [20].

Os materiais dielétricos utilizados para a construção de cabos, como é o caso do XLPE, possuem permeabilidade magnética igual a  $\mu_0$ , que é a permeabilidade magnética do vácuo. Esses materiais são conhecidos como não-magnéticos, e nesse caso, a permeabilidade magnética não irá influenciar no valor da velocidade de propagação. Dessa forma, se  $\mu = \mu_0$  a permeabilidade magnética relativa para esse material é igual a um [12,13].

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 \quad (32)$$

No caso da permissividade elétrica  $\varepsilon$  do dielétrico que constitui o cabo, é comum a utilização da permissividade relativa  $\varepsilon_r$  que é definida na equação (33). Para o vácuo tem-se que  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} F/m$  [12,13].

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (33)$$

Logo, para um material qualquer a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética será dada pela equação (34), ou utilizando os valores relativos, à equação que fornece a velocidade é a (35) [20].

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (34)$$

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0}} \quad (35)$$

Igualando a equação (30) à equação (34) obtém-se uma relação direta entre os elementos distribuídos da linha e a velocidade de propagação do pulso no cabo, o que é mostrado na equação (36).

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (36)$$

Uma forma de se determinar a permissividade elétrica do material dielétrico com que o cabo é constituído é mostrada em (37) isolando  $\varepsilon$  na equação (35) e considerado  $\mu_r = 1$  [20].

$$\varepsilon = \frac{1}{\mu_0 (v_p)^2} \quad (37)$$

Nesse caso deve-se observar que a permissividade elétrica do material irá definir o valor da velocidade, ou, pode-se dizer que a velocidade de propagação está diretamente relacionada com a permissividade elétrica. Observa-se que a velocidade de propagação é uma característica de cada cabo [9].

### 2.2.7. Coeficiente de reflexão de tensão

Pode-se escrever que a impedância de carga é a razão entre o fasor de tensão e o fasor de corrente na carga, o que é verificado na equação (38) [12,13].

$$Z_L = \frac{\tilde{V}_L}{\tilde{I}_L} \quad (38)$$

Sendo:

$Z_L \rightarrow$  impedância da carga;

$\tilde{V}_L \rightarrow$  fasor de tensão da carga;

$\tilde{I}_L \rightarrow$  fasor de corrente;

De acordo com as equações (22) e (23) pode-se determinar os fasores tensão e corrente em função de  $z$ . Da equação (24) entende-se que a impedância característica da linha pode ser calculada por qualquer um dos dois termos de tensão e corrente, incidente ou refletido [18].

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-} \quad (39)$$

Na Figura 8, é atribuída como referencial  $z = 0$  o ponto de entrada da carga  $Z_L$  que substituído nas equações (22) e (23) e considerando a igualdade dada em (38) obtêm-se os valores mostrados nas equações (40) e (41) [18].

$$\tilde{V}(l) = \tilde{V}(z=0) = V_0^+ + V_0^- \quad (40)$$

$$\tilde{I}(l) = \tilde{I}(z=0) = \frac{V_0^+}{Z_0^+} - \frac{V_0^-}{Z_0^-} \quad (41)$$

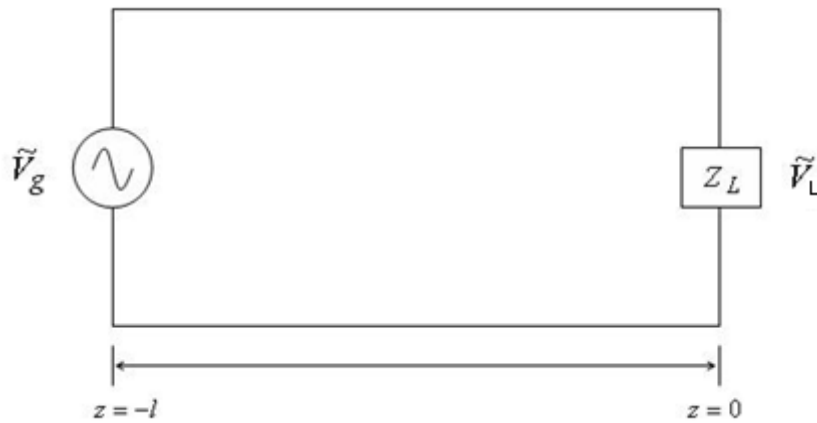


FIGURA 8 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO LIGANDO UMA FONTE DE TENSÃO  $V_g$  A UMA CARGA DE IMPEDÂNCIA  $Z_L$ .

onde:

$\tilde{V}_g$  → fasor de tensão da fonte;

$z$  → referência nas coordenadas espaciais ao longo da linha;

$l$  → comprimento da linha.

Substituindo os valores de  $\tilde{V}(z=0)$  e  $\tilde{I}(z=0)$  em  $Z_L = \frac{\tilde{V}_L}{\tilde{I}_L}$ , e isolando  $V_0^-$ , obtêm-se a equação (42) onde a razão entre  $V_0^-$  e  $V_0^+$  representa a grandeza adimensional conhecida como coeficiente de reflexão de tensão ( $\Gamma$ ) [12,13].

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_0 + Z_L} \quad (42)$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão descritos os cabos e os materiais utilizados para a realização das medidas. Na segunda parte do capítulo serão descritos os métodos utilizados no trabalho.

#### 3.1. MATERIAIS

No presente trabalho a refletometria foi aplicada a dois tipos de cabos isolados cujas principais características estão sendo mostradas na Tabela 2.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS CABOS UTILIZADOS.

Tipo de cabo	RG-58(novo)	XLPE-N (Novo)	XLPE-E (Envelhecido)
Diâmetro do condutor	0,8 mm	8 mm	9 mm
Material do condutor interno	Cobre estanhado	Alumínio	Alumínio
Diâmetro do dielétrico	3 mm	17 mm	19 mm
Material do dielétrico	PE	XLPE	XLPE
Permissividade elétrica relativa	2,3	2,4	2,4
Espessura da camada semicondutora interna	Não possui	1,2 mm	0,6 mm
Espessura da camada semicondutora externa	Não possui	1,1 mm	0,5 mm
Impedância característica	50 $\Omega$	33 $\Omega$	36 $\Omega$
Classe de tensão	Não possui	12/20 kV	12/20 kV
Comprimento do cabo utilizado	20 metros	67 m	33 m

O cabo XLPE-E possui data de fabricação da década de 70 e foi retirado de operação do centro da cidade de Curitiba, enquanto que os outros dois cabos utilizados são novos.

### 3.2. MÉTODOS

No presente trabalho foram utilizados três métodos:

- Refletometria em laboratório;
- Simulação computacional de refletometrias;
- Medidas de resistividades das camadas semicondutoras.

#### 3.2.1. Refletometria em laboratório

Para a realização das medidas de refletometria, foi utilizado um osciloscópio Tectronix série TDS, modelo 2024B com taxa de aquisição de 1 GS/s de quatro canais. Os pulsos utilizados nas refletometrias foram obtidos com um gerador de funções digital Agilent 33220A. A Figura 9 mostra a configuração esquemática básica para a realização de refletometria com o cabo sem carga.

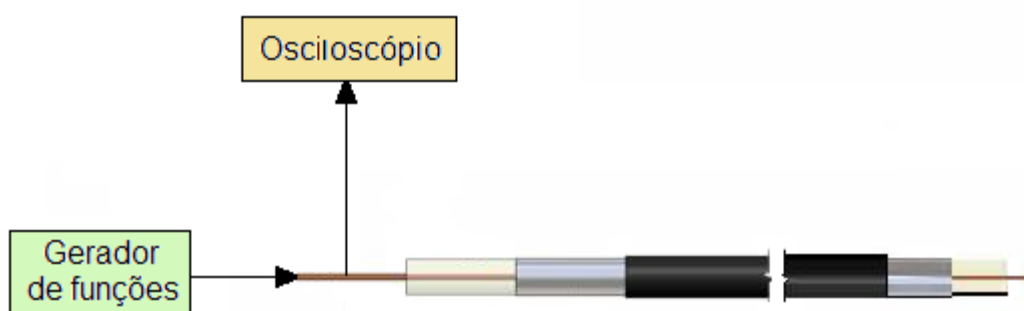


FIGURA 9 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE APLICAÇÃO DE REFLETOMETRIA SEM CARGA NO CABO.

Para a conexão do osciloscópio e do gerador de funções no cabo, foram utilizadas as pontas de prova e os cabos originais dos equipamentos. Como a impedância interna do gerador de funções é de  $50 \Omega$  e os cabos XLPE-N e XLPE-E possuem impedância diferente de  $50 \Omega$ , para ligá-los ao gerador de funções foram utilizadas associações de resistores ou casador de impedância para obter a máxima transferência de potência.

Na Figura 10 é mostrado o gráfico da forma de onda do pulso utilizado para a realização de refletometria no cabo RG-58. O gráfico foi construído com o software específico *OriginPro*® utilizando os dados obtidos na aquisição com o osciloscópio.

As principais características do pulso são o tempo de subida (7,3 ns), largura total (15,3 ns) e amplitude (12,5 V) as quais são mostradas no gráfico.

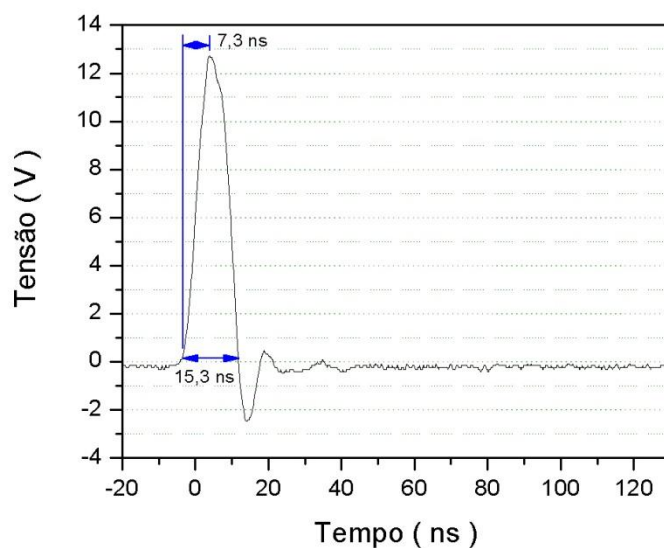


FIGURA 10 – GRÁFICO MOSTRANDO A FORMA DE ONDA DO PULSO UTILIZADO NO CABO RG-58.

No cabo RG-58 foram realizadas medidas de refletometria com o cabo nas três situações típicas; circuito aberto, curto-circuito e com impedância casada em  $50 \Omega$ , com apenas um canal (amarelo), o que pode ser visto esquematicamente nas Figuras 11, 12 e 13 onde a ponta de prova (azul), mostra o pulso chegando ao lado oposto do cabo [16].

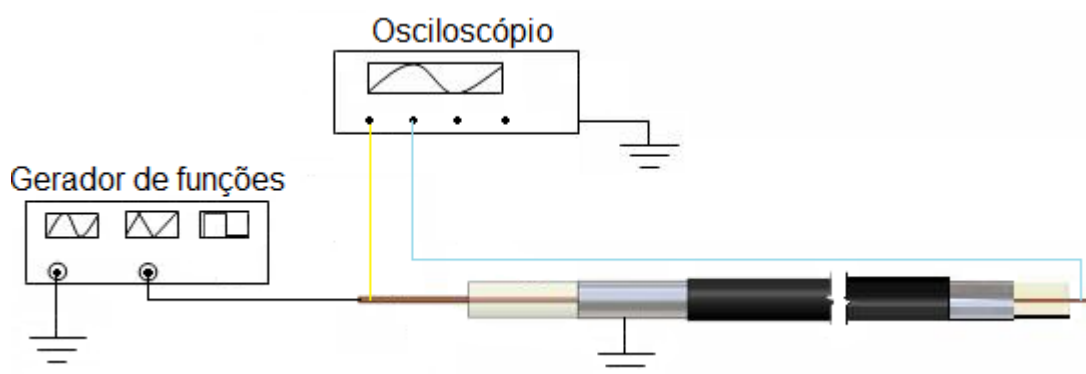


FIGURA 11 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM PARA APLICAÇÃO DE REFLETOMETRIA NUM CABO EM CIRCUITO ABERTO.

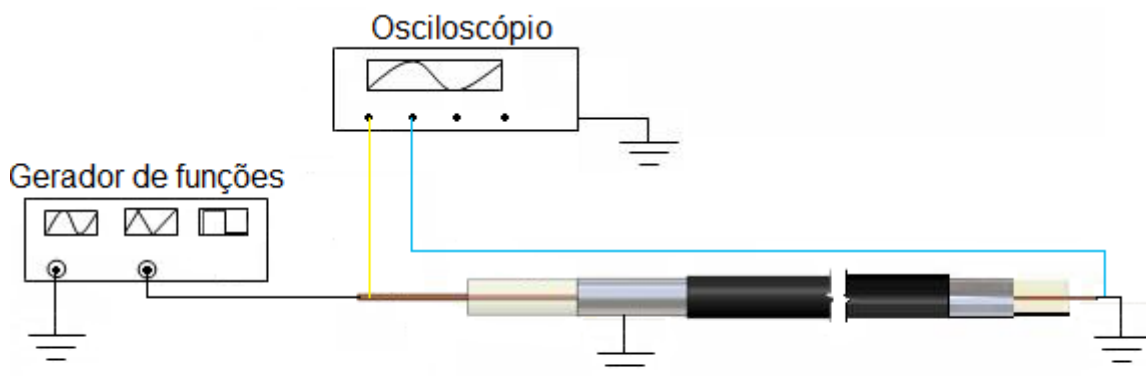


FIGURA 12 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM PARA APLICAÇÃO DE REFLETOMETRIA NUM CABO EM CURTO-CIRCUITO.

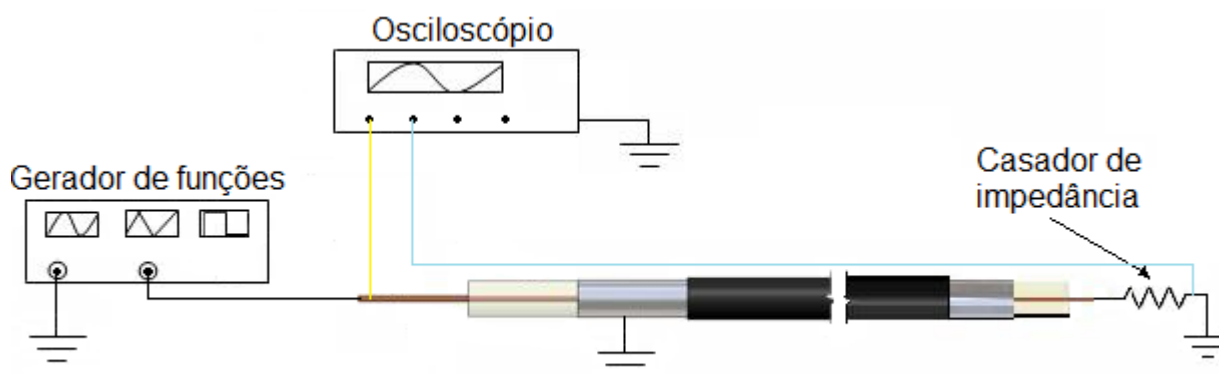


FIGURA 13 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM PARA APLICAÇÃO DE REFLETOMETRIA NUM CABO COM IMPEDÂNCIA CASADA.

Para a determinação do início do pulso, na medida do tempo de reflexão, foi utilizado o procedimento no qual é estabelecido um limiar para o início da contagem do tempo, a qual é feita no software *OriginPro®7.0*. O software permite a medida do tempo através de uma ferramenta específica, a qual fornece os valores dos eixos horizontal e vertical do gráfico nos pontos de interesse. Na Figura 14 é mostrado um gráfico no qual a linha verde representa o limiar de contagem do tempo.

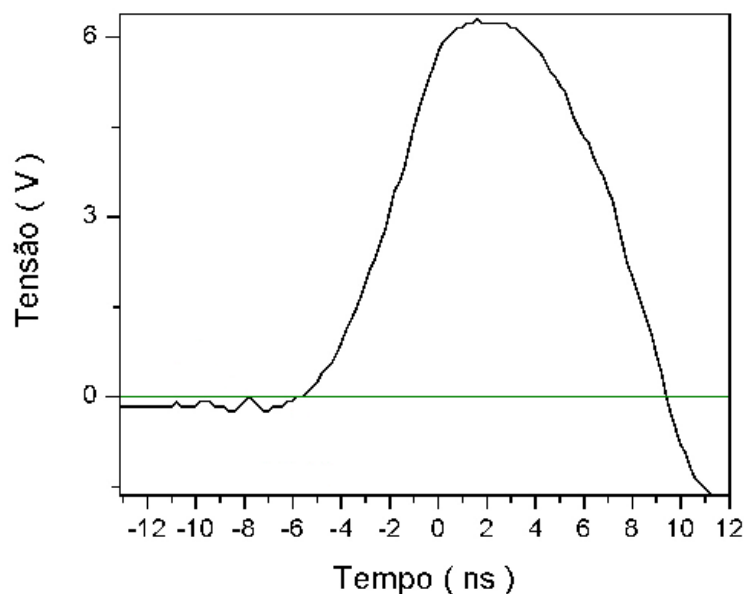


FIGURA 14 – AMPLIAÇÃO FEITA NO PRIMEIRO NO PULSO PARA ESTABELECIMENTO DO INSTANTE INICIAL.

### 3.2.2. Simulação computacional de refletometrias

Para a realização das simulações foi utilizado o software Multisim10 da NATIONAL INSTRUMENTS. Esse software possui uma arquitetura que permite a simulação através de ferramentas virtuais, como gerador de pulsos e osciloscópio, as quais possuem características muito próximas às dos equipamentos reais.

Para realização da simulação foram obtidos os valores dos parâmetros da linha ( $R'$ ,  $L'$ ,  $G'$  e  $C'$ ), que representam os fenômenos físicos que ocorrem no cabo. Obtidos os parâmetros da linha foi determinado o número de elementos distribuídos que serão utilizados para representar um metro de cabo. Nas primeiras simulações realizadas, um metro de cabo foi representado por quatro elementos. Essa escolha faz-se necessária para a divisão dos valores dos parâmetros pelo número de elementos por metro. Optou-se por dois elementos ao ser verificado que esse número de elementos por metro é suficiente para as simulações dos cabos em estudo.

Estabelecido o critério descrito acima, o circuito foi montado com o número de elementos capaz de representar o comprimento do cabo a ser simulado. O gerador de pulso fornece a possibilidade de variação das características como

largura, tempo de subida e tempo de descida do pulso. O osciloscópio utilizado nas simulações foi o de dois canais.

Os dados obtidos nas simulações foram exportados para o software *OriginPro®7.0*, com o qual foram gerados os gráficos.

### 3.2.3. Medida de resistividade volumétrica das camadas semicondutoras

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, fez-se necessário a obtenção do valor de resistência por metro das camadas semicondutoras dos cabos. O objetivo foi comparar o valor de resistência por unidade de comprimento das camadas semicondutoras do cabo envelhecido em campo com o cabo novo. Para essa medida utilizou-se o procedimento descrito pela norma NBR 6251 [21].

As dimensões utilizadas para o cálculo da resistividade volumétrica das camadas semicondutoras são apresentadas na Figura 15.

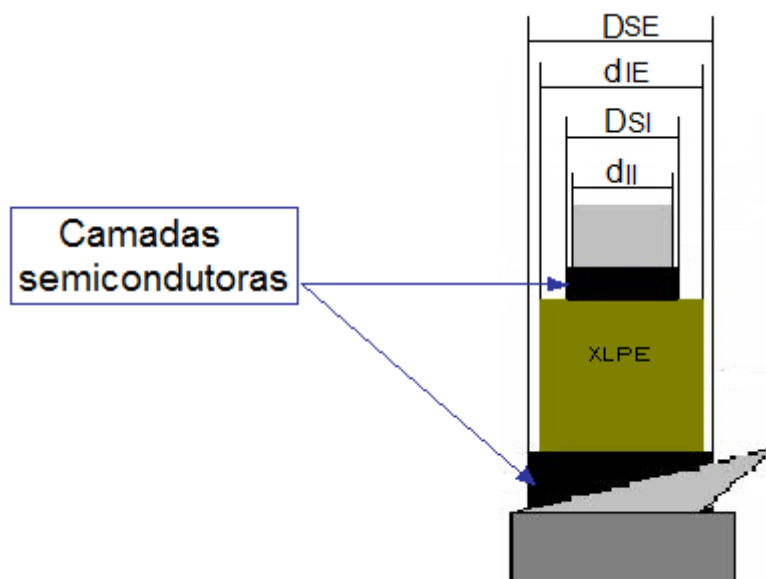


FIGURA 15 – ESQUEMA DE UM CABO DE XLPE MOSTRANDO AS DIMENSÕES UTILIZADAS NO CÁLCULO DA RESISTIVIDADE DAS CAMADAS SEMICONDUTORAS, EXTERNA E INTERNA.

A determinação da resistência das camadas semicondutoras é feita em corrente contínua utilizando um circuito onde um resistor ( $R$ ) é ligado em série com comprimentos ( $L$ ) conhecidos do cabo (Figura 16). Com esse circuito, faz-se a medida da queda de tensão ( $V1$ ) no resistor e estabelece-se a corrente no circuito. Conhecendo a corrente que percorre o circuito e a queda de tensão ( $V2$ ) entre

outros dois pontos do cabo, utilizando a lei de Ohm, pode-se descobrir a resistência de um determinado comprimento das camadas semicondutoras [21].

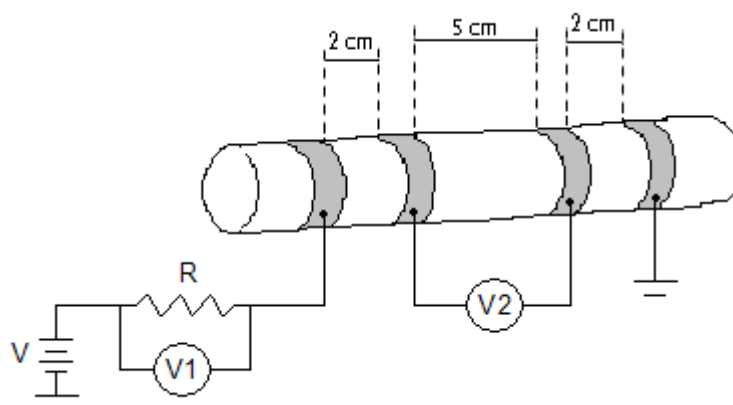


FIGURA 16 – ESQUEMA MOSTRANDO A FORMA COM QUE AS QUEDAS V1 E V2 SÃO OBTIDAS.

Na Figura 16 as faixas acinzentadas, representam a pintura feita no cabo com tinta prateada condutora. A tinta é utilizada para melhorar o contato entre a camada semicondutora e os eletrodos utilizados e pode ser vista na foto da Figura 17.

Com os valores das dimensões do cabo, do resistor  $R$  e das quedas de tensão  $V1$  e  $V2$  torna-se possível o cálculo da resistividade através das equações (43) e (44).

Nas medidas realizadas no presente trabalho, foi utilizado um resistor de  $R = 1 \text{ k}\Omega$ , e a tensão ( $V$ ) foi variada de  $10 \text{ V}$  a  $20 \text{ V}$  obtendo-se ao todo cinco valores de resistividade com os quais foram realizadas as médias.

Para o cálculo da resistividade da camada semicondutora externa foi utilizada a equação (43) [21].

$$\rho_{vE} = \frac{\pi \cdot R_{CE}}{4 \cdot L} \cdot (D_{SE}^2 - d_{IE}^2) \quad (43)$$

onde:

$\rho_{vE}$  → Resistividade volumétrica da camada externa do cabo;

$R_{CE}$  → Resistência da camada semicondutora externa;

$D_{SE}$  → Diâmetro sobre a camada semicondutora externa;

$d_{IE}$  → Diâmetro sobre a camada dielétrica de XLPE, ou abaixo da semicondutora externa.

No caso da resistividade da camada semicondutora interna é efetuado um corte no cabo (C3) conforme a foto mostrada na Figura 17.



FIGURA 17 – FOTO DOS CABOS MOSTRANDO A PINTURA PRATEADA CONDUTORA E A LIGAÇÃO DOS ELETRODOS.

Desta forma, é realizado de acordo com equação (44) o cálculo da resistividade da camada semicondutora interna [21].

$$\rho_{vi} = \frac{\pi \cdot R_{Ci}}{8 \cdot L} \cdot (D_{SI}^2 - d_{II}^2) \quad (44)$$

onde:

$\rho_{vi}$  → Resistividade da camada semicondutora interna ( $\Omega \cdot m$ );

$R_{Ci}$  → Resistência da camada semicondutora ( $\Omega$ );

$D_{SI}$  → Diâmetro sobre a camada semicondutora interna ( $m^2$ );

$d_{II}$  → Diâmetro abaixo da camada semicondutora interna, ou sobre o condutor interno ( $m^2$ );

Para o cálculo da resistência por metro de cabo deve-se lembrar que o objetivo é encontrar o valor da resistência entre a blindagem e o dielétrico (camada semicondutora externa) e entre o condutor interno e o dielétrico do cabo (camada semicondutora interna) e não ao longo do cabo.

Para a camada semicondutora externa a equação utilizada e as variáveis são apresentadas a seguir [10]:

$$R = \frac{\rho_{vE} \cdot e}{S} \quad (45)$$

onde:

$R$  → Resistência de um comprimento  $l$  da camada semicondutora entre a blindagem e o dielétrico;

$e = \left( \frac{D_{SE} - d_{iE}}{2} \right)$  → espessura da camada semicondutora externa;

$S = \pi \cdot D_{SE} \cdot l$  → Área superficial da camada semicondutora externa para um metro de cabo.

Para o cálculo da resistência por metro da camada semicondutora interna a equação (45) foi novamente utilizada, porém com as modificações apresentadas a seguir:

$\rho = \rho_{vi}$  → Resistividade volumétrica da camada semicondutora interna;

$l = \left( \frac{D_{SI} - d_{iI}}{2} \right)$  → espessura da camada semicondutora interna;

$S = \pi \cdot D_{SI}$  → Área superficial do cilindro semicondutor interno para um metro de cabo.

Dessa forma obtiveram-se os valores de resistência para um metro das camadas semicondutoras, interna e externa.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa parte do trabalho serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação de refletometria e com as simulações de refletometria. Também será discutida a relação existente entre os resultados experimentais e simulados, e a teoria sobre linhas de transmissão.

### 4.1. RESULTADOS DAS REFLETOMETRIAS REALIZADAS EM LABORATÓRIO

Os resultados das refletometrias serão apresentados em dois tópicos distintos, conforme a divisão abaixo:

- Medidas no cabo coaxial (RG-58);
- Medidas em cabos isolados (XLPE-E e XLPE-N);

#### 4.1.1. Medidas no cabo coaxial RG-58

Cabos coaxiais, sem camadas semicondutoras, são normalmente utilizados para a transferência de dados e possuem características físicas diferentes dos cabos de transmissão e distribuição de média e alta tensão. Um cabo coaxial de transmissão de dados de telefone, por exemplo, é projetado para baixa tensão e para transferir dados (pulsos curtos) a uma taxa maior do que cabos de transmissão e distribuição de alta tensão, que normalmente são projetados para trabalhar em 60 Hz. A refletometria no domínio do tempo (TDR), quando aplicada a cabos sem camadas semicondutoras apresenta resultados que são previstos pelo modelo clássico de elementos distribuídos mostrado na Figura 6. Na seqüência serão apresentadas algumas refletometrias feitas em cabos do tipo RG-58, sem camadas semicondutoras. Foram utilizados dois cabos RG 58, porém serão apresentados somente os resultados das refletometrias obtidas com um dos cabos, visto que os dois apresentaram o mesmo comportamento. Na primeira medida o pulso foi injetado no cabo em circuito aberto, e no gráfico da Figura 18, é observado que o pulso retorna sem inversão de fase, o que pode ser verificado pela equação (42) do coeficiente de reflexão de tensão [18]. Considerando  $Z_L \rightarrow \infty$  e, sendo  $Z_0 = 50 \Omega$ , pode-se considerar o valor do coeficiente de reflexão igual a um,  $\Gamma = 1$ .

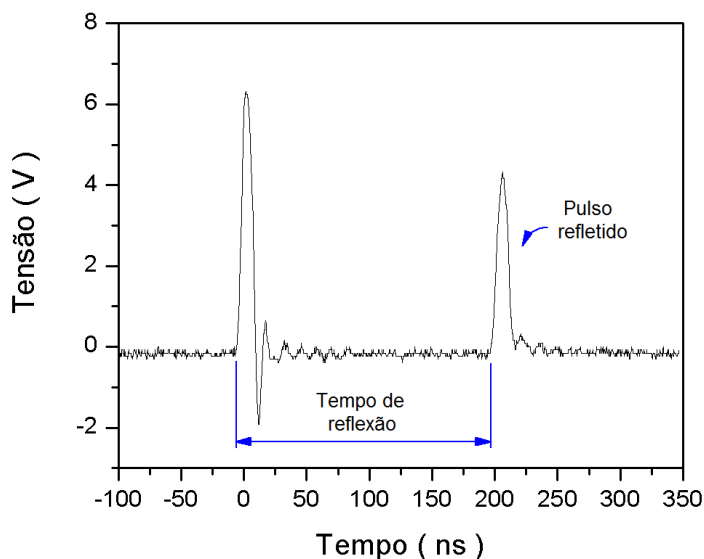


FIGURA 18 - GRÁFICO MOSTRANDO REFLEXÃO POSITIVA NUM TEMPO POSTERIOR.

No gráfico da Figura 18, o primeiro pulso, representa a entrada no cabo, enquanto que o da direita representa a reflexão num tempo posterior. Observa-se nesse ponto que, mesmo para um cabo de comprimento 20 metros o qual para efeito de linhas de transmissão é um cabo curto e sem camadas semicondutoras, ocorre uma atenuação do pulso. Na Figura 18, a reflexão possui amplitude menor do que a amplitude do pulso de entrada. Sabe-se, do Teorema de Fourier, que um pulso é formado por várias componentes de frequência [10,11,17]. Os cabos RG-58 não deveriam apresentar comportamento dispersivo, porém existem componentes de alta frequência que são atenuadas, mesmo num cabo não dispersivo, o que explica o efeito apresentado na Figura 18 [22, 23]. Na prática não existe um cabo não dispersivo ideal.

O valor obtido através da Figura 18 para o tempo foi de 202,6 ns. O valor da velocidade de propagação é obtido da razão entre o dobro da distância pelo tempo de reflexão [12,13].

$$V_p = \frac{2 * L}{\Delta t} \quad (46)$$

$$V_p = 197,4 \text{ m} / \mu\text{s}$$

A razão entre esse valor e a velocidade da luz ( $2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) fornecerá a porcentagem da velocidade da luz com que o pulso se propaga pelo cabo, que nesse caso é de 65% [14].

Obtido o valor da velocidade de propagação do pulso no cabo pode-se calcular a permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) do material isolante do cabo. Sabendo que o material do isolamento do cabo é não-magnético, pode-se dizer que a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) do meio é igual a do vácuo  $\mu_0 = 4.\pi \times 10^{-7} H/m$  ou que a permeabilidade magnética relativa do meio é igual a um [20].

Para o vácuo, pode-se escrever que a velocidade da luz só depende das constantes ( $\epsilon_0$ ) e ( $\mu_0$ ) [20].

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \quad (47)$$

Logo, para um meio qualquer, escreve-se que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética só irá depender das características do meio [1].

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}} \quad (48)$$

Como  $\mu_0 = \mu$ , para o caso considerado, isolando ( $\epsilon$ ) na equação anterior pode-se escrever que  $\epsilon = \frac{1}{\mu_0 \cdot V_p^2}$ .

Com o valor de velocidade  $V_p = 197,4 m/\mu s$ , se obtém o valor  $\epsilon = 2,04 \times 10^{-11} F/m$ . Encontrado esse resultado, pode-se também encontrar o valor da permissividade relativa utilizando o valor da permissividade do vácuo  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} F/m$  [12,13]. Substituindo os valores na equação (33) apresentada a seguir, tem-se que:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$$\epsilon_r = 2,3$$

Esse valor refere-se à permissividade elétrica do isolamento existente entre a malha externa e o condutor interno conforme visto na Figura 19 e terá fundamental importância na determinação dos parâmetros da linha para simulação. O valor da permissividade, obtido através da velocidade de propagação, coincide com o valor esperado de acordo com os dados do fabricante do cabo.

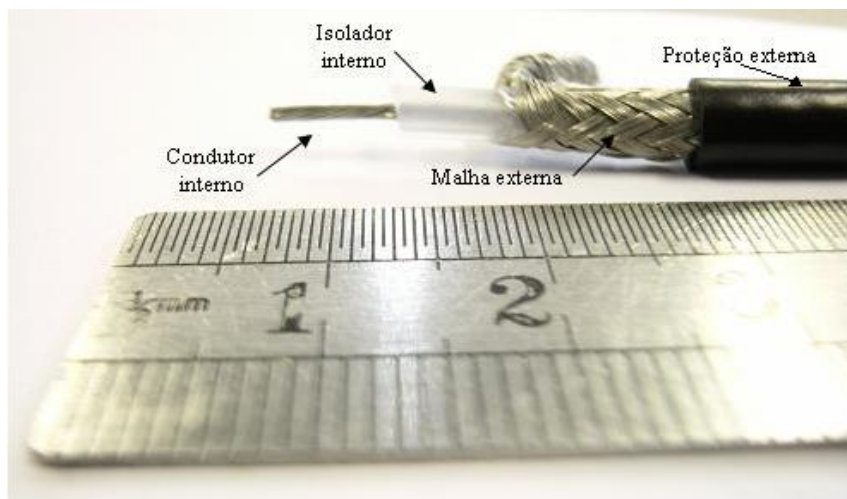


FIGURA 19 - TRECHO DE CABO RG-58, MOSTRANDO AS QUATRO PARTES CONSTITUTIVAS DO CABO.

Com o cabo RG-58 em curto-circuito, de acordo com o desenho esquemático da Figura 12, onde  $Z_L = 0$  através da equação do coeficiente de reflexão de tensão, e lembrando que  $Z_0 = 50 \Omega$ , tem-se que  $\Gamma = -1$  representando a reflexão inversa ao pulso de entrada [24].

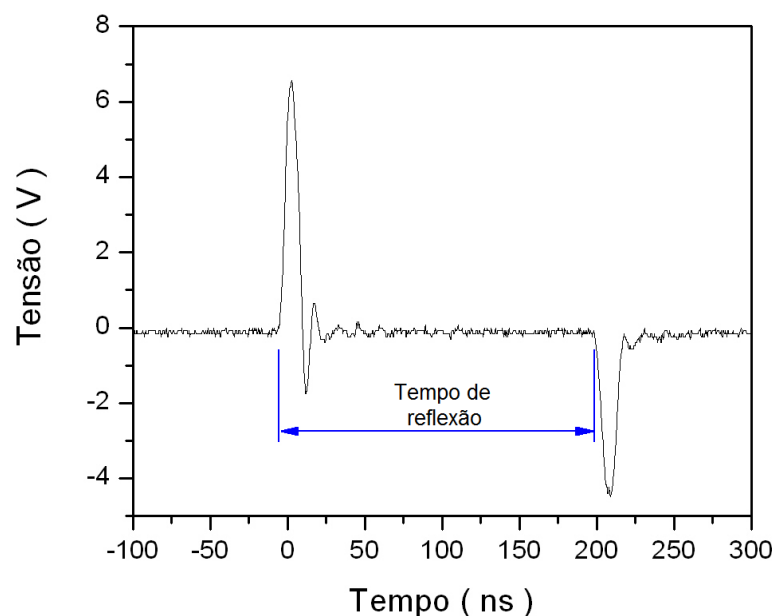


FIGURA 20 - GRÁFICO MOSTRANDO REFLEXÃO INVERSA NUM  $\Delta t$  POSTERIOR.

O valor do tempo de reflexão do pulso mostrado na Figura 20 foi de 203,8 ns. A diferença entre os tempos de reflexão, encontrados nas Figuras 18 e 20 foi de 1,2 ns. Sendo  $\Delta t$  o tempo para o pulso percorrer duas vezes o comprimento do cabo, para a Figura 20, pode-se encontrar novamente a velocidade de propagação:

$$V_p = \frac{2.L}{\Delta t} \quad (49)$$

Substituindo os valores, encontra-se o valor de  $V_p = 196,2 \text{ m} / \mu\text{s}$  que corresponde a 65% da velocidade da luz.

Na Figura 21 o que se observa é que com o casador de impedância de  $50 \Omega$  acoplado na extremidade do cabo  $Z_L = Z_0$ , não existe reflexão, confirmado pela equação (42). Nesse caso  $\Gamma = 0$  [16,24].

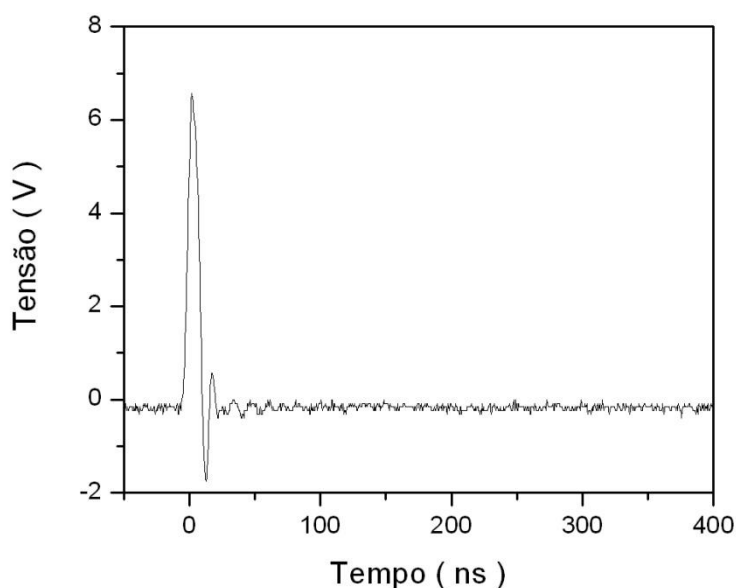


FIGURA 21 - GRÁFICO MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE REFLEXÃO, NO CASO DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA PARA O CABO RG-58.

Nesse caso o pulso percorre todo o comprimento do cabo, não reflete, e dissipa toda sua energia no casador de impedância.

O que se pode observar na primeira parte do trabalho experimental, é que a teoria vista no capítulo para as linhas de transmissão está muito próxima do que se verifica experimentalmente para os cabos RG-58, conforme pode ser visto nas refletometrias.

#### 4.1.2. Medidas nos cabos com dielétrico em XLPE

A refletometria realizada no cabo XLPE-E com 33 m de comprimento é mostrada na Figura 22, onde se observa em preto o canal 1 do osciloscópio que foi ligado onde o pulso entra no cabo e, em vermelho o canal 2 que foi ligado na

extremidade oposta do cabo. O mesmo procedimento utilizado na refletometria mostrada na Figura 22 para o cabo XLPE-E, foi utilizado na refletometria do cabo RG-58 na Figura 18. A teoria para linhas de transmissão aplica-se da mesma forma aos dois tipos distintos de cabos, logo as refletometrias deveriam apresentar a mesma forma de onda, com um tempo de reflexão um pouco maior para o cabo XLPE-E, devido ao seu comprimento [12,13].

Porém o que se observa na Figura 22 é que o comportamento do cabo não está de acordo com o previsto pelo modelo clássico de elementos distribuídos mostrado na Figura 4. Nesses cabos verifica-se que o sinal refletido é atenuado quase por completo, provocando um alargamento do pulso com uma oscilação o que impossibilita a análise da refletometria.

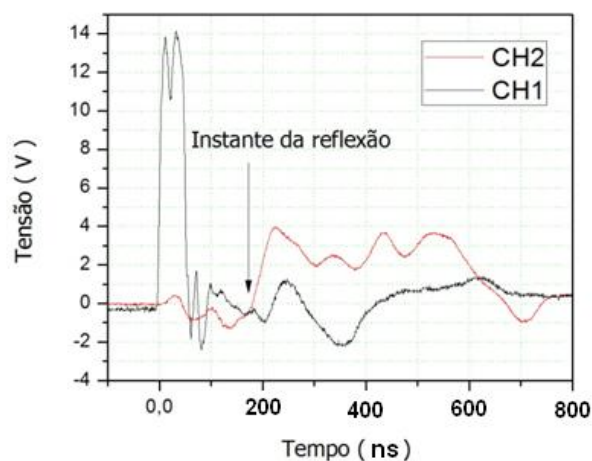


FIGURA 22 – REFLETOMETRIA DO CABO XLPE-E EM CIRCUITO ABERTO.

A velocidade é calculada utilizando a equação (35), com a qual foi obtido o valor de  $195,1 m/\mu s$  [20]. Com esse valor de velocidade, o pulso deveria aparecer na extremidade oposta do cabo com atraso de  $169 ns$ , mostrado na Figura 22 por uma seta preta. O pulso utilizado como parâmetro de entrada para a realização da refletometria cujo gráfico é mostrado na Figura 22, foi configurado com  $50 ns$  de largura e o pulso utilizado nos cabos RG-58, mostrado na Figura 10 foi configurado com  $15,3 ns$ . O que se observa é que o pulso atenua mais no cabo XLPE-E do que no RG-58, mesmo com menor frequência.

Feito o cálculo da impedância característica do cabo, o que será mostrado no tópico destinado às simulações, verifica-se que não ocorre o casamento de impedância. Parte do pulso retorna não ocorrendo total transferência de energia.

As refletometrias do cabo XLPE-E, não correspondem as refletometrias obtidas no caso do cabo sem camadas semicondutoras.

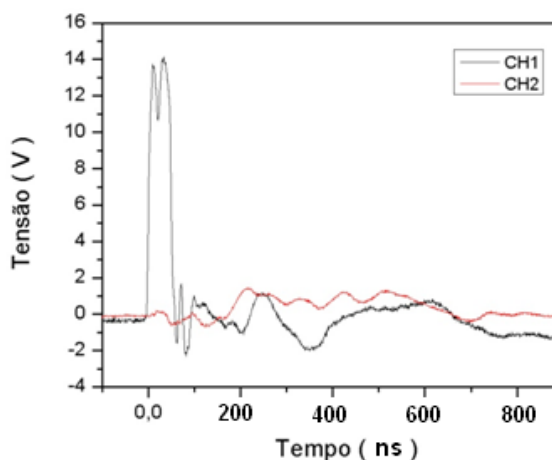


FIGURA 23 – REFLETOMETRIA DO CABO XLPE-E COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA.

Considerando que o cabo XLPE-E possui data de fabricação da década de 70, que foi retirado de operação e que visualmente apresenta degradação da blindagem, os testes foram repetidos com um cabo novo com camadas semicondutoras e características parecidas.

O cabo XLPE-N difere fisicamente do XLPE-E no tipo de material utilizado na camada semicondutora externa. No cabo XLPE-E a camada semicondutora externa é feita com uma fita enrolada sobre a camada dielétrica do cabo enquanto que o cabo XLPE-N possui a camada semicondutora externa polimérica.

Na Figura 24 o pulso retorna ao ponto de entrada, segundo pulso em preto no gráfico, sem ter sido alargado. O primeiro pulso, em vermelho, representa a chegada do pulso ao lado oposto no cabo em circuito aberto.

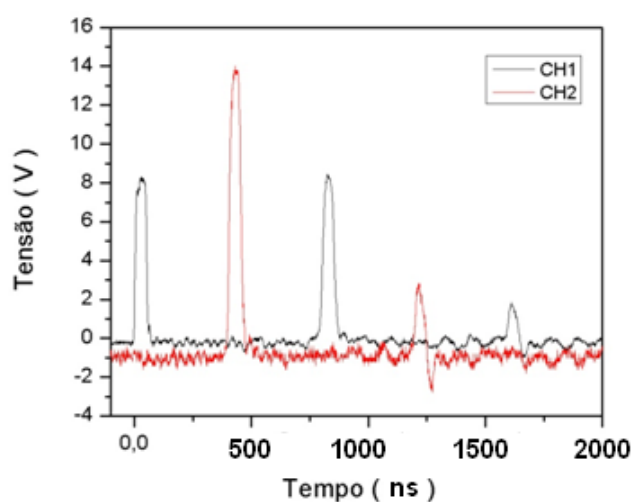


FIGURA 24 – GRÁFICO DE REFLETOMETRIA DO CABO XLPE-N EM CIRCUITO ABERTO.

Na Figura 25 a refletometria é feita no cabo XLPE-N em curto circuito, o que pode ser verificado pela inversão do pulso, muito próximo ao obtido no RG-58.

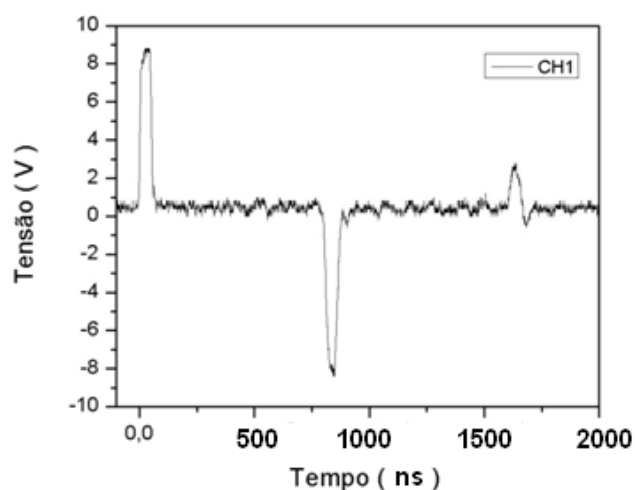


FIGURA 25 - GRÁFICO DE REFLETOMETRIA DO CABO XLPE-N EM CURTO-CIRCUITO.

Verificado o comportamento diferente do cabo XLPE-E em relação aos outros cabos em que foram realizadas refletometrias, o trabalho passou a ser o de explicar o fenômeno, visto que a refletometria não apresenta resultados coerentes em cabos com essa característica. Uma das formas de estudo do fenômeno foi através das simulações, as quais serão apresentadas a seguir.

## 4.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS REFLETOMETRIAS

### 4.2.1. Simulações para o cabo RG-58

As primeiras simulações tiveram o objetivo de verificar se as refletometrias obtidas experimentalmente seriam representadas adequadamente pelas simulações. Dessa forma, foram realizadas simulações primeiramente com as características do cabo RG-58, visto que esse cabo apresentou refletometrias bem comportadas em relação ao previsto pela teoria de linhas de transmissão [12].

A capacitância e a indutância por metro do cabo RG-58 foram obtidas com as equações para cabos sem perdas. Para isso fez-se uso do valor da impedância característica do cabo, previamente conhecida, e da velocidade de propagação, encontrada através das refletometrias realizadas no cabo [12,13].

$$C' = \frac{1}{V_p^2 \cdot Z_0} \rightarrow 101 \text{ pF} / m$$

$$L' = \frac{Z_0}{V_p} \rightarrow 253 \text{ nH} / m$$

Para representar um metro de cabo na simulação foram utilizados quatro elementos, por esse motivo os valores da capacitância e indutância foram divididos por quatro, o que é mostrado abaixo:

$$C' = 25 \text{ pF} \rightarrow \text{para } 1/4 \text{ de metro}$$

$$L' = 63 \text{ nH} \rightarrow \text{para } 1/4 \text{ de metro}$$

Admitindo o cabo como sendo sem perdas, observa-se que para a simulação, o circuito que representa cada elemento distribuído fica simplificado a um capacitor e um indutor, conforme o diagrama esquemático da Figura 26.

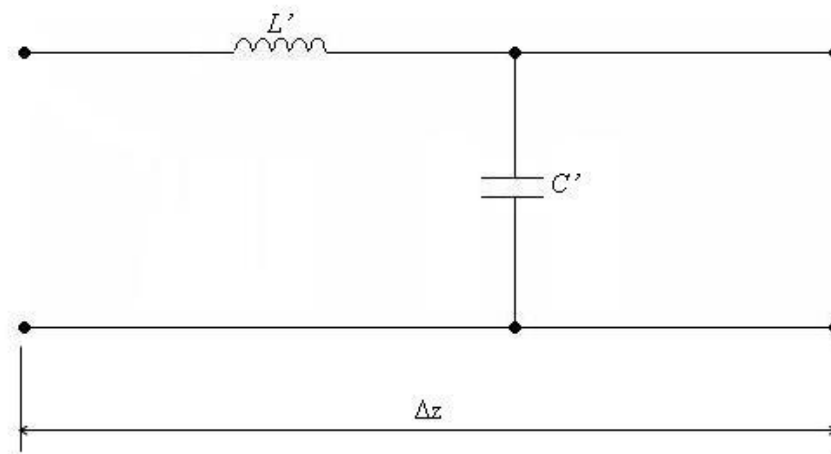


FIGURA 26 – ELEMENTO DISTRIBUÍDO PARA UM CABO SEM PERDAS.

Como cada elemento representa  $1/4$  de metro do cabo RG-58, para a simulação dos 20 metros foram utilizados 80 elementos (Figura 26) e o resultado da simulação com o cabo em circuito aberto pode ser vista na Figura 27.

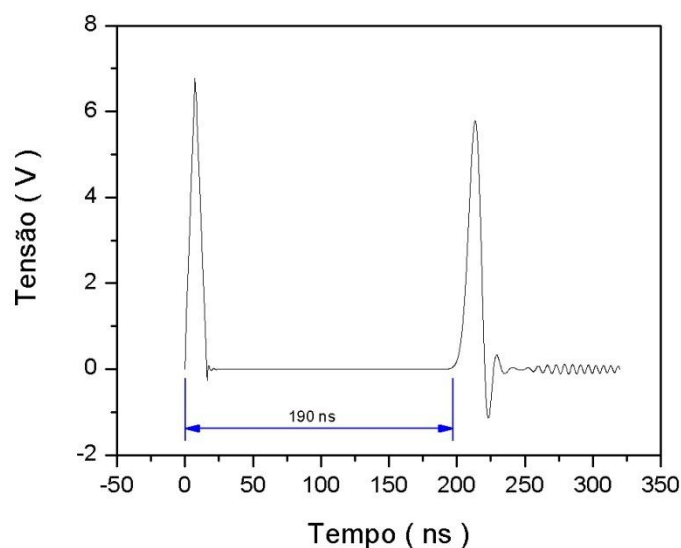


FIGURA 27 – GRÁFICO DA SIMULAÇÃO DE REFLETOMETRIA PARA O CABO RG-58 EM CIRCUITO ABERTO.

Observa-se que o fato de o cabo ter sido considerado sem perdas para a realização da simulação, possivelmente não alterou o tempo de propagação visto que a diferença entre o tempo de reflexão, obtido experimentalmente e simulado, é de  $12,6 \text{ ns}$ . Se a aproximação para um cabo sem perdas altera o tempo de reflexão, essa alteração está compreendida dentro dos  $12,6 \text{ ns}$ . Na simulação não estão

presentes os ruídos que aparecem nas refletometrias experimentais, o que pode gerar um erro na medida do tempo de início do pulso.

Em seguida é mostrada no gráfico da Figura 28 a refletometria simulada com o cabo em curto-circuito.

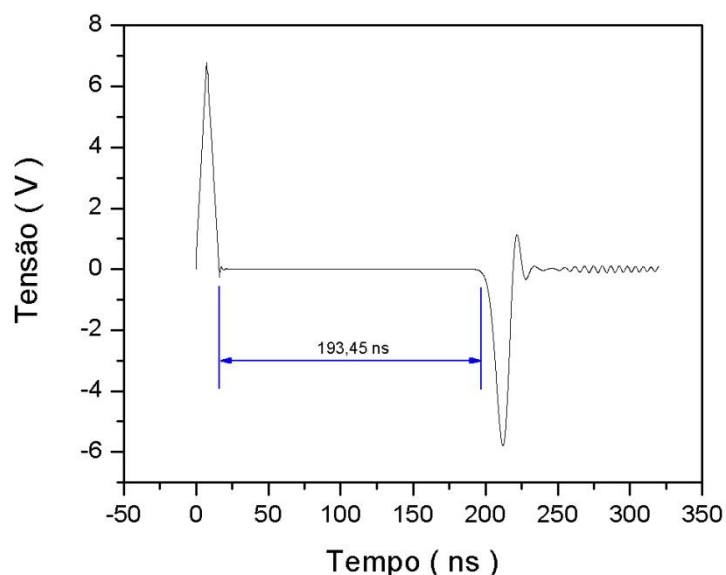


FIGURA 28 – GRÁFICO MOSTRANDO SIMULAÇÃO DE REFLETOMETRIA PARA O CABO RG-58 EM CURTO CIRCUITO.

Nesse caso pode-se verificar a inversão do pulso, quando a extremidade oposta aquela em que o pulso é injetado, estiver com impedância menor do que a impedância característica do cabo [18].

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 refletometria é a polaridade da reflexão em relação ao pulso injetado.

Na seqüência é mostrada a refletometria simulada com casamento de impedância em  $50 \Omega$ , que é a impedância característica do cabo RG-58. Pode-se verificar no gráfico da Figura 29 uma pequena reflexão, o que possivelmente foi provocado pela aproximação a um cabo sem perdas.

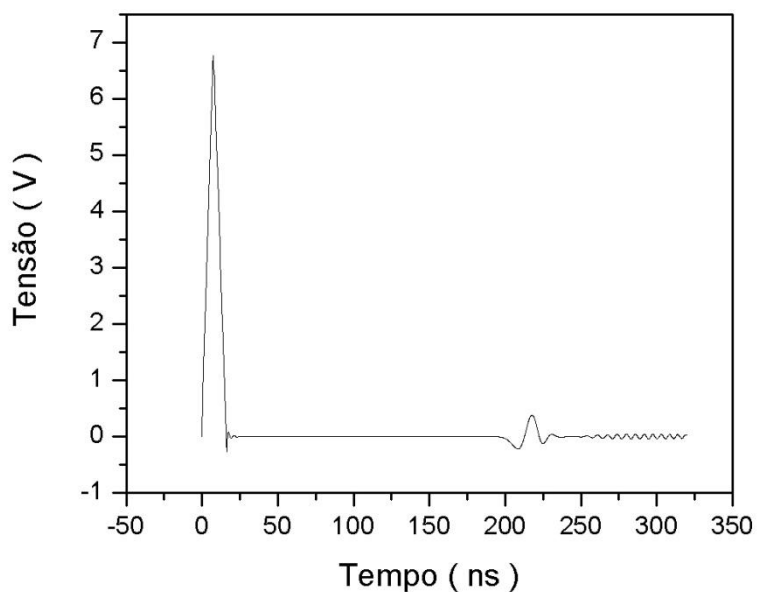


FIGURA 29 – GRÁFICO SIMULADO PARA O CABO RG58 COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA.

#### 4.2.2. Simulações para os cabos XLPE-E e XLPE-N

As simulações para o cabo XLPE-E serão apresentadas primeiramente e por ter comportamento diferente do previsto, o mesmo será considerado com perdas.

Com as equações dos parâmetros para um cabo coaxial, e os valores mostrados na Tabela 3, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 4.

TABELA 3 - VALORES UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO CABO XLPE-E.

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Condutividade do XLPE	$\sigma$	$\cong 10^{-15}$	$S/m$
Condutividade do condutor	$\sigma_c$	$59,6 \times 10^6$	$S/m$
Permeabilidade magnética do vácuo	$\mu_0$	$4.\pi \times 10^{-7}$	$H/m$
Permeabilidade magnética relativa dos condutores e isolantes	$\mu_r$	1	(Adimensional)
Permissividade elétrica do vácuo	$\varepsilon_0$	$8,85 \times 10^{-12}$	$F/m$
Permissividade elétrica relativa do XLPE.	$\varepsilon_r$	2,4	(Adimensional)
Diâmetro externo do condutor	$2.a$	9	$mm$
Diâmetro interno do condutor	$2.b$	23	$mm$
Freqüência	$f$	$25 \times 10^6$	$Hz$

FONTE: CALLISTER [25] E EDMINISTER [10]

TABELA 4 - PARÂMETROS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO PARA O CABO XLPE-E.

Parâmetros de Linha	Valores	Unidades
$R'$	$6,33 \times 10^{-2}$	$\Omega/m$
$L'$	$1,87 \times 10^{-7}$	$H/m$
$C'$	$1,42 \times 10^{-10}$	$F/m$
$G'$	$6,69 \times 10^{-15}$	$S/m$

A forma com que o circuito foi montado para a simulação do cabo XLPE-E é mostrada na Figura 30 onde se utilizou dois elementos por metro de cabo.

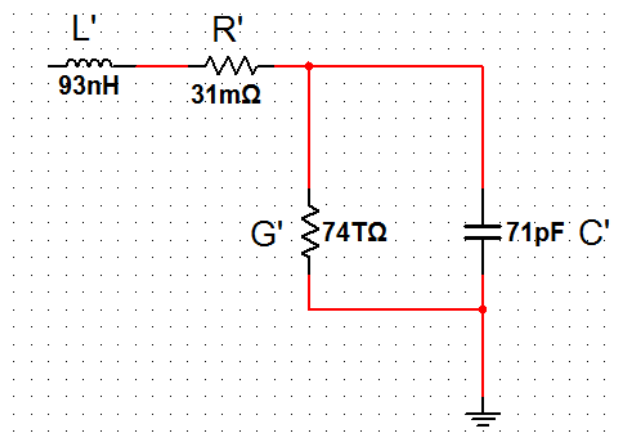


FIGURA 30 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE CIRCUITO MOSTRANDO UM ELEMENTO CONCENTRADO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES PARA O CABO XLPE-E.

Na Figura 31 é mostrado o gráfico da refletometria simulada para o cabo XLPE-E utilizando os parâmetros para uma linha de transmissão em circuito aberto. Pode-se observar que a simulação, Figura 31, não corresponde ao obtido experimentalmente, Figura 22.

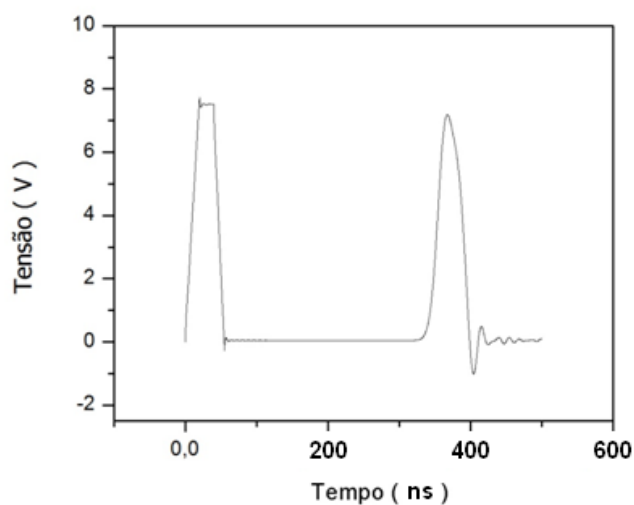


FIGURA 31 – GRÁFICO DE REFLETOMETRIA SIMULADA PARA O CABO XLPE-E EM CIRCUITO ABERTO.

A simulação do cabo em curto-circuito é mostrada no gráfico da Figura 32, onde se verifica claramente o pulso retornando com fase invertida.

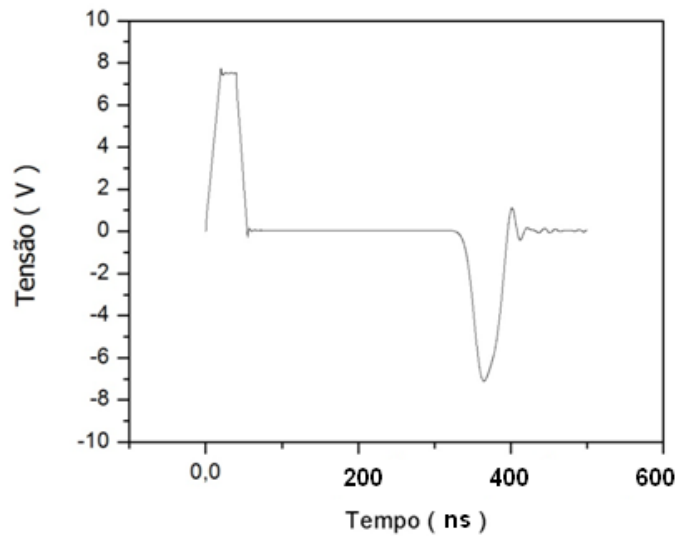


FIGURA 32 - GRÁFICO DE REFLETOMETRIA SIMULADA PARA O CABO XLPE-E EM CURTO-CIRCUITO.

Com os valores dos parâmetros da linha, tornou-se possível o cálculo da constante de propagação complexa  $\gamma$  do cabo de acordo com a equação (19)  $\gamma = \alpha + j\beta$  [15]. A parte real  $\alpha$  da equação (19) é chamada de constante de atenuação da linha, e possui unidade dada em (Nepers / metro - Np/m) enquanto a parte imaginária  $\beta$  é chamada constante de fase da linha (radianos / metro - rad / m) [1,22,23].

O valor do coeficiente de propagação complexo calculado, para o cabo cujos parâmetros são mostrados na Tabela 4, é mostrado abaixo:

$$\gamma = 9,18 \times 10^{-4} + j0,809$$

Logo:

$$\alpha = 9,18 \times 10^{-4} \text{ Np/m}$$

O valor em Neper/metro tem origem no logaritmo natural de uma razão.

$$\alpha = 9,18 \times 10^{-4} \text{ Np/m} = \ln \frac{X_1}{X_2}$$

Logo, aplicando a propriedade inversa.

$$e^{9,18 \times 10^{-4}} = \frac{X_1}{X_2}$$

Nesse caso  $X_1$  representa a energia do pulso de entrada no cabo, enquanto  $X_2$  representa a energia do pulso deslocado  $z$  em relação à origem  $z=0$  do cabo.

Como  $e^{9,18 \times 10^{-4}}$  é próximo a um, pode-se dizer que  $X_1 \cong X_2$ , e a linha pode ser considerada não dissipativa.

O que se pode observar com o cálculo da constante de atenuação é que o valor obtido não está de acordo com o que foi medido no cabo envelhecido, o qual apresenta grande atenuação.

A impedância do cabo foi encontrada utilizando a equação (25) a qual está sendo mostrada abaixo [14].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

Substituindo os valores na equação obtém-se:

$$Z_0 = 36,28 - j4,09 \times 10^{-2} \Omega$$

Obtido o valor da impedância característica do cabo foi realizada a simulação com casamento de impedância o que pode ser visto no gráfico da Figura 33.

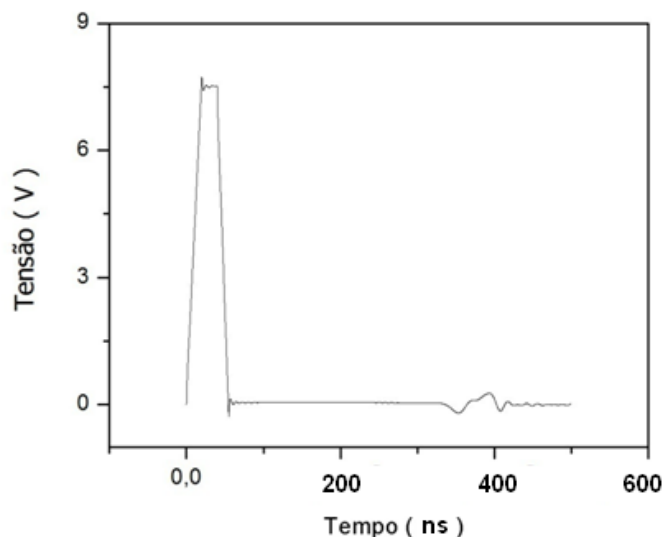


FIGURA 33 - GRÁFICO DE REFLETOMETRIA SIMULADA PARA O CABO XLPE-E COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA.

Para o cabo XLPE-N as refletometrias foram simuladas com base na teoria para linhas sem perdas em virtude das refletometrias obtidas com o cabo não apresentarem atenuação significativa. Os valores de capacitância e indutância por metro do cabo foram calculados e são apresentados a seguir:

$$C' = 1,54 \times 10^{-10} \text{ F/m}$$

$$L' = 1,73 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

Para a representação com dois elementos por metro, os valores foram divididos por dois e são novamente apresentados a seguir:

$$C' = 7,71 \times 10^{-11} \text{ F para cada meio metro}$$

$$L' = 8,65 \times 10^{-8} \text{ H para cada meio metro}$$

A impedância característica do cabo é encontrada utilizando a equação (29) e o valor é apresentado a seguir:

$$Z_0 = 33,5 \ \Omega$$

Com esses valores foram realizadas as simulações. Na Figura 34 pode ser visto o gráfico da refletometria simulada para o cabo XLPE-N em circuito aberto.

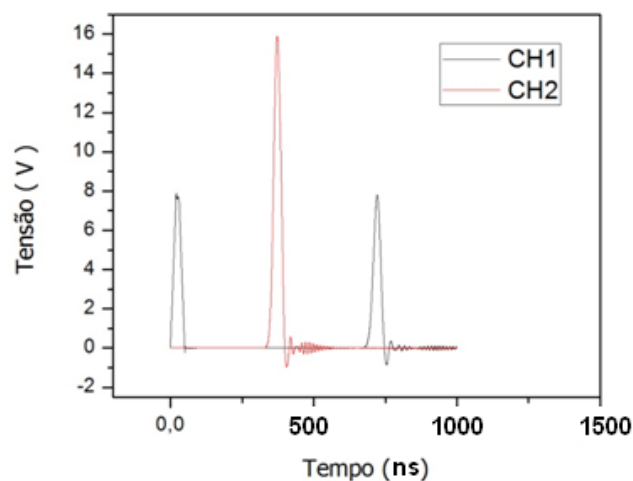


FIGURA 34 - GRÁFICO DE REFLETOMETRIA SIMULADA PARA O CABO XLPE-N EM CIRCUITO ABERTO COM DOIS CANAIS DO OSCILOSCÓPIO.

Nesse caso foram ligados os dois canais do osciloscópio, um na entrada e outro na extremidade oposta. Na Figura 35 o gráfico mostra a simulação com o cabo em curto-circuito.

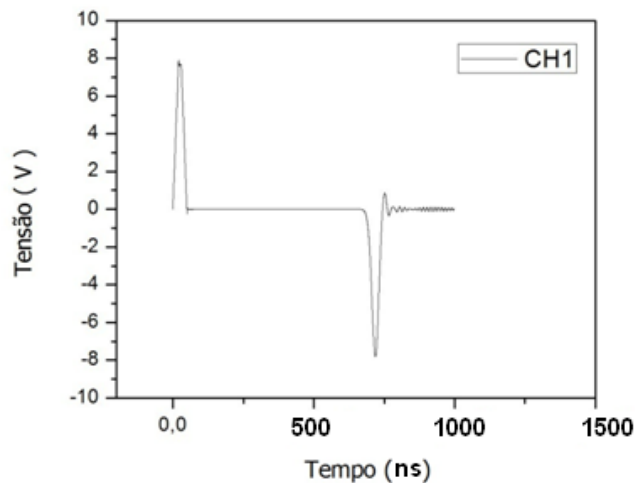


FIGURA 35 - GRÁFICO DE REFLETOMETRIA SIMULADA PARA O CABO XLPE-N EM CURTO-CIRCUITO.

Com o valor de  $33,5 \Omega$  para a impedância foi realizada a simulação com casamento de impedância o que é mostrado na Figura 36.

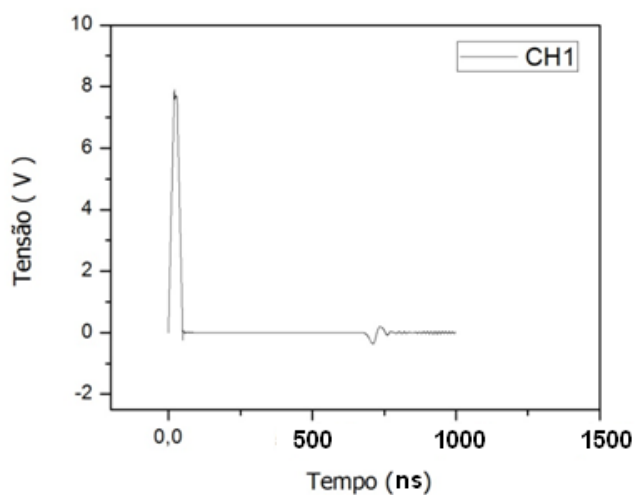


FIGURA 36 – GRÁFICO MOSTRADO A SIMULAÇÃO PARA O CABO XLPE-N COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA.

#### 4.2.3. Hipótese da variação da condutância

As refletometrias realizadas no cabo XLPE-E em comparação com o cálculo da constante de atenuação, mostrou que o comportamento do cabo não é o previsto pelo modelo clássico. A dissipação de energia verificada na refletometria foi maior do que a prevista e calculada para o cabo.

A hipótese inicial para o fenômeno de atenuação diferente do previsto para o cabo XLPE-E, foi que a condutância possuía valor elevado e superior ao calculado sendo dessa forma não previsto pelo modelo clássico. A explicação para a variação da condutância seria devido a alguma alteração das características do polietileno entrecruzado (XLPE) [26,27].

O valor de resistência com base no valor de condutância  $G'$  mostrado no circuito esquemático da Figura 30 deveria ser de  $\cong 7,4 \times 10^{13} \Omega$ , visto que a relação entre a condutância e a resistência é [10]:

$$R = \frac{1}{G'} \quad (50)$$

Os valores de resistência utilizados nas simulações foram: 300 T $\Omega$ , 200 G $\Omega$ , 200 M $\Omega$ , 2,5 K $\Omega$ , 1 K $\Omega$ , 600  $\Omega$  e 200  $\Omega$ , observado que a condutância foi aumentada de  $10^{-15} S$  até  $10^{-3} S$ . Pode-se observar um grande intervalo de valores de resistências utilizados o que teve o objetivo de aumentar a possibilidade de encontrar um valor adequado.

Nas Figuras 37 e 38 são mostrados dois gráficos de refletometrias simuladas com alteração no valor da resistência que representa a condutância.

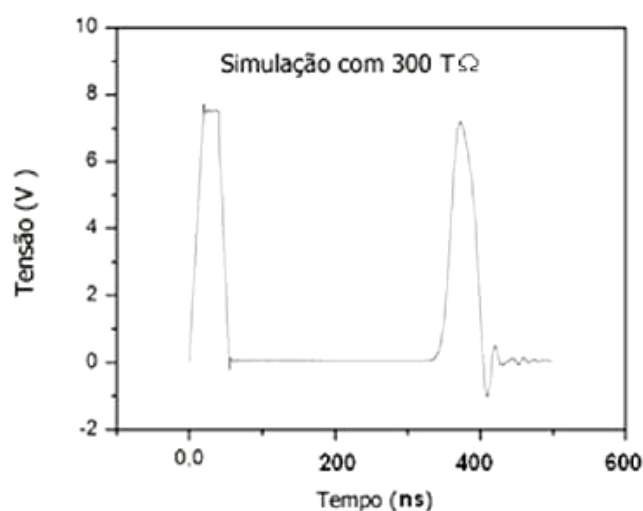


FIGURA 37 – GRÁFICO SIMULADO DE REFLETOMETRIA PARA O CABO XLPE-E COM RESISTÊNCIA DE 300 T $\Omega$ .

No primeiro gráfico, mostrado na Figura 37, pode-se observar que o pulso refletido não está de acordo com a refletometria obtida do cabo envelhecido em campo (Figura 22).

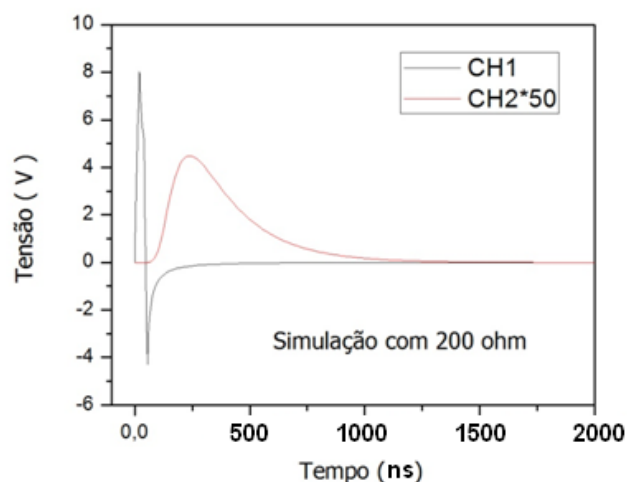


FIGURA 38 – GRÁFICO SIMULADO DE REFLETOMETRIA PARA O CABO XLPE-E COM RESISTÊNCIA DE 200 OHM.

No gráfico mostrado na Figura 38 observa-se que o pulso não retorna ao ponto de entrada. O canal 2 do osciloscópio é ligado na extremidade oposta do cabo simulado e mostra o pulso atenuado demasiadamente.

Após a realização das simulações pode-se verificar que a variação no valor da condutância para o modelo de elementos distribuídos clássico, não explica o efeito ocorrido no cabo XLPE-E. Essa verificação foi feita através da comparação entre as refletometrias realizadas em laboratório nos cabos, e as simulações. Dessa forma esse procedimento de variação da condutância foi descartado como forma de explicar o efeito ocorrido no cabo XLPE-E, pois seria impossível a resistência do dielétrico ser da ordem de  $200 \Omega$  [28].

#### 4.2.4. Modelo de elementos distribuídos proposto

Na tentativa de explicar o fenômeno observado no cabo envelhecido, visto que a alteração da condutância não é a causa do efeito, foi proposto um modelo em que as camadas semicondutoras são representadas por resistências  $R_{interno}$  e  $R_{externo}$  ligadas em série com a capacitância  $C'$  no modelo de elementos distribuídos, o que é representado esquematicamente pela Figura 39.

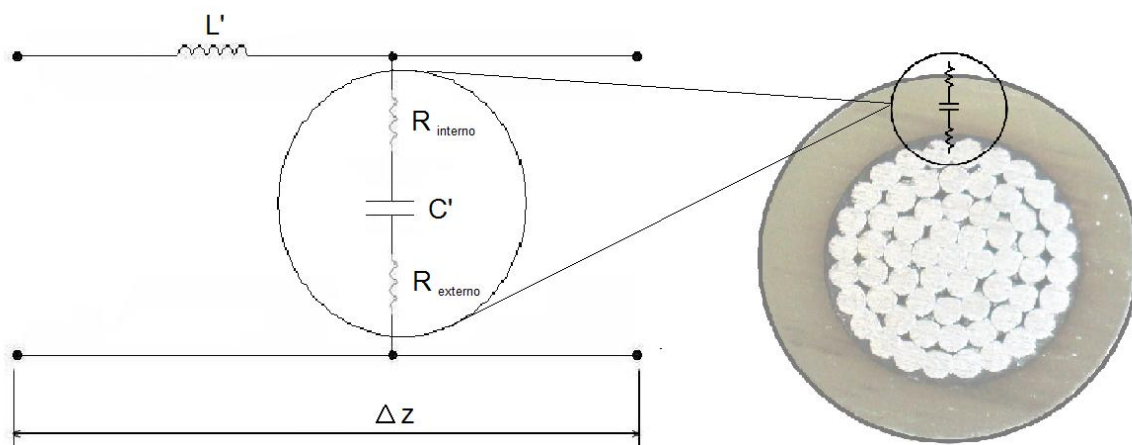


FIGURA 39 - MODELO DE ELEMENTO DISTRIBUÍDO PROPOSTO.

onde:

$L'$  → Indutância por metro do cabo;

$R_{\text{interno}}$  → Resistência da camada semicondutora interna;

$R_{\text{externo}}$  → Resistência da camada semicondutora externa;

$C'$  → Capacitância por metro do cabo;

$\Delta z$  → Elemento infinitesimal de cabo.

O modelo proposto possui o objetivo de explicar o efeito das camadas semicondutoras presentes no cabo isolado envelhecido (XLPE-E).

Sugere-se que alguns mecanismos das camadas semicondutoras são ativados em virtude do envelhecimento e essas mudanças podem alterar a forma com que os pulsos viajam ao longo do cabo. Essas alterações fazem com que os cabos se tornem altamente dissipativos e dispersivos para pulsos de curta duração [29].

Nas simulações utilizando o modelo proposto, os valores de  $L'$  e  $C'$  foram mantidos.

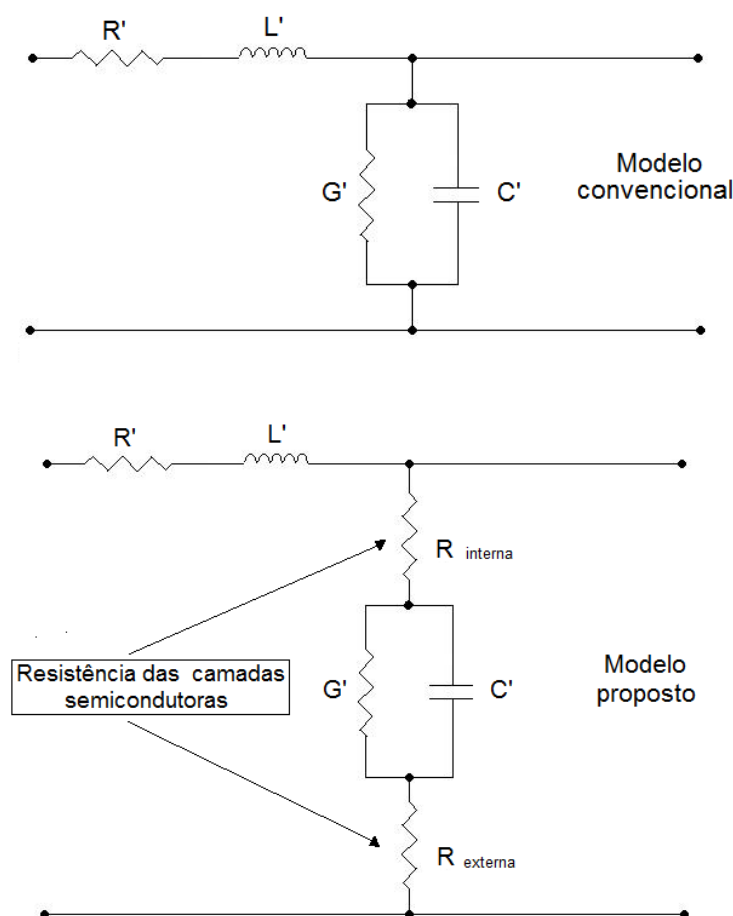


FIGURA 40 – DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO O MODELO CLÁSSICO E O MODELO PROPOSTO.

O sinal obtido através das refletometrias realizadas no cabo, mostrado na Figura 22, foi utilizado como parâmetro para relacionar a simulação com algum valor de resistência adequado para a representação da camada semicondutora. Na simulação a resistência ( $R_{interna} + R_{externa}$ ) foi variada de 2  $\Omega$  até 1 K $\Omega$ . Essa variação do valor da resistência teve o intuito de encontrar algum valor, com o qual a simulação fique o mais próximo possível da refletometria mostrada na Figura 22.

Com o aumento do valor da resistência observou-se uma melhor aproximação dos valores da refletometria simulada com os valores da refletometria realizada em laboratório mostrada na Figura 22. O valor de resistência que fez com que a simulação mais se aproxime do resultado encontrado com o cabo XLPE-E foi de 100  $\Omega$ .

Conforme visto anteriormente nas Figura 24 e 25, o cabo novo com camadas semicondutoras não apresentou o mesmo efeito do cabo envelhecido. O cabo novo apresenta refletometrias muito próximas às do cabo RG-58 mostradas

anteriormente. Esse fato é um forte indício de que algum fator ligado ao envelhecimento do cabo provoca o fenômeno visto no cabo XLPE-E.

Com base na hipótese de a camada semicondutora estar degradada, é que se optou em realizar a medida da resistividade das camadas semicondutoras, interna e externa, e estabelecer o valor de resistência por metro de cabo das camadas semicondutoras.

#### 4.2.5. Resistividade das camadas semicondutoras

São apresentados na Tabela 5 os valores de resistência por metro das camadas semicondutoras do cabo novo (XLPE-N) e de dois trechos de pontos distintos do cabo envelhecido (XLPE-E). A nomenclatura para o cabo envelhecido se divide em um (XLPE-E1) e dois (XLPE-E2).

TABELA 5 – TABELA MOSTRANDO OS VALORES DE RESISTÊNCIA DAS CAMADAS SEMICONDUTORAS POR METRO DE CABO.

Resistência média ( $\Omega/m$ )			
Camada Semicondutora	XLPE-E1	XLPE-E2	XLPE-N
Interna	$5,2 \times 10^{-3}$	$3,7 \times 10^{-3}$	$3,9 \times 10^{-1}$
Externa	$2,7 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$5,1 \times 10^{-2}$

Na Tabela 5 verifica-se que os valores de resistência por metro das camadas semicondutoras, interna e externa, dos trechos de cabos envelhecidos, possuem a mesma ordem de grandeza.

No que diz respeito a camada semicondutora externa, os três trechos de cabo apresentaram valores muito próximos de resistência por metro.

Quanto à resistência por metro da camada semicondutora interna, o cabo novo possui valor de resistência por metro maior em relação aos cabos envelhecidos, o que descarta a possibilidade de ser essa camada a responsável pelo aumento da resistência no cabo XLPE-E.

Pode-se perceber através dessa medida que a resistência intrínseca das camadas semicondutoras do cabo XLPE-E não é a responsável pela deformação e atenuação do pulso, mas provavelmente pelo aumento da resistência devido à oxidação. Nos cabos que foram submetidos a medidas de resistividade, os quais possuem mais de 25 anos, foram encontradas regiões de oxidações na camada semicondutora externa e interna. Observa-se que a fita semicondutora no cabo

XLPE-E apresenta baixa resistência intrínseca por metro, porém antes de se cortar o cabo a fita está posicionada entre a blindagem e o dielétrico oferecendo grande resistência de acoplamento entre a blindagem e o dielétrico em função da oxidação, umidade e infiltrações que vão se tornando presentes ao longo da vida útil do cabo. O mesmo não se verifica no cabo novo. A camada semicondutora externa do cabo XLPE-E foi desenrolada e é mostrada na Figura 41.



FIGURA 41 – FOTO DOS CABOS UTILIZADOS NA MEDIDA DA RESISTÊNCIA POR METRO DAS CAMADAS SEMICONDUTORAS.

Na Figura 42 observa-se novamente as regiões de oxidação, num trecho do cabo XLPE-E o qual foi cortado mantendo-se as características de montagem.

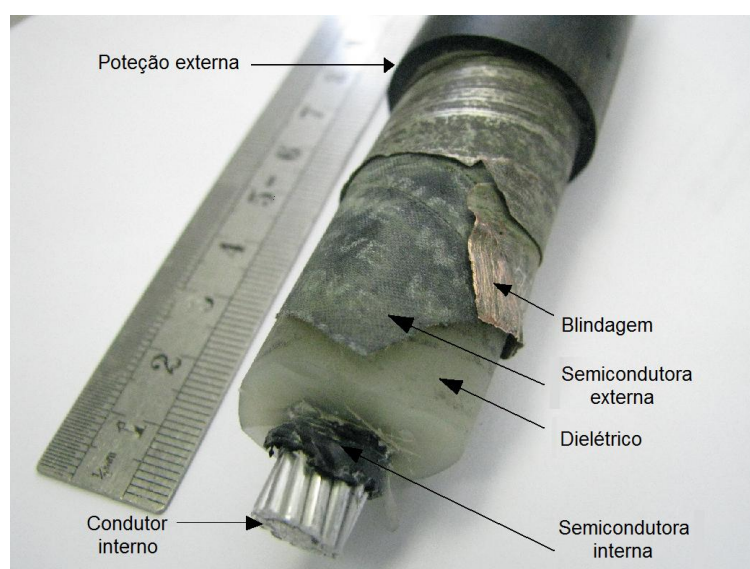


FIGURA 42 - FOTO DO CABO XLPE-E UTILIZADO NA MEDIDA DE RESISTÊNCIA POR METRO.

A partir desse ponto o trabalho voltou-se as simulações com o novo modelo de elementos distribuídos.

#### 4.2.6. Simulações com o novo modelo de elementos distribuídos

As primeiras simulações feitas a partir do novo modelo de elementos distribuídos tiveram o objetivo de comparar o comportamento do modelo proposto com o comportamento do cabo XLPE-E.

Na Figura 43 a refletometria com apenas um canal é mostrada e na Figura 44 é mostrada a refletometria utilizando-se de dois canais do osciloscópio comparativo à refletometria obtida do cabo XLPE-E. É notável a relação entre as refletometrias mostradas nas Figuras 22 e 44. Deve-se observar que na Figura 22 um pulso possa estar sobreposto ao outro e que a simulação é livre de ruído.

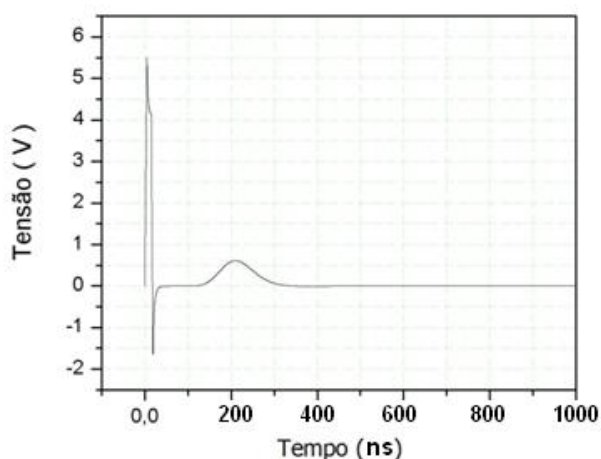


FIGURA 43 – GRÁFICO DE SIMULAÇÃO DE REFLETOMETRIA MOSTRANDO O PULSO ENTRANDO NO CABO, SEGUIDO DE REFLEXÃO NUM  $\Delta t$  POSTERIOR.

Na refletometria realizada em laboratório no cabo XLPE-E não se verifica claramente a existência de reflexão o que é visível na Figura 43.

Na refletometria do cabo XLPE-E verifica-se a existência de ruídos externos ao sistema o que pode ser atribuído a alguma interferência na aquisição, sendo que, se a amplitude da reflexão for reduzida pode ser confundida com o ruído. Esse problema poderá existir quando a amplitude da reflexão for reduzida o que pode ocorrer quando, por exemplo, a amplitude do pulso de entrada for muito baixa, quando o cabo for muito comprido ou quando a constante de atenuação do cabo for suficientemente alta para atenuar o pulso.

Se o cabo for muito curto o pulso refletido pode estar sobreposto ao pulso de entrada no cabo e não existirá tempo livre no sistema de medida entre o pulso de entrada e o refletido.

Pode-se verificar que a razão entre a amplitude do pulso de entrada e a amplitude do pulso na extremidade oposta do cabo XLPE-E (Figura 22) é aproximadamente 3,5 vezes em comparação com o cabo simulado com o modelo proposto (Figura 44), a mesma razão é 3,0 vezes.

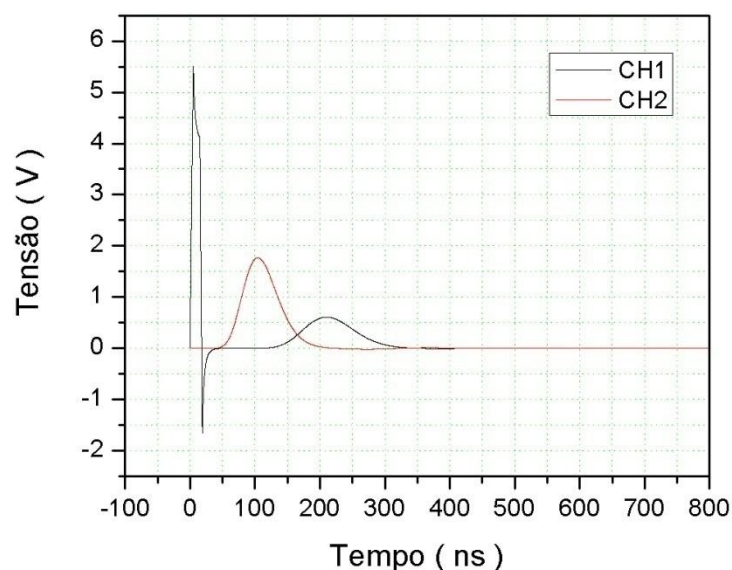


FIGURA 44 – GRÁFICO DE SIMULAÇÃO DE REFLETOMETRIA OBTIDO COM DOIS CANAIS DO OSCILOSCÓPIO.

Observada essa proximidade entre as razões, realizou-se o estudo do fator de dissipação para as refletometrias simuladas, com diferentes valores de resistência representando as camadas semicondutoras do cabo. Os valores de resistência para as camadas semicondutoras utilizados foram: 20, 40, 60, 80, 100, 500 e 1 K $\Omega$  [29].

Foram simulados cabos com 100 metros de comprimento utilizando dois elementos distribuídos por metro de cabo, e foram realizadas medidas a 0, 25, 50, 75 e 100 m (Figura 45) em relação ao ponto de entrada do pulso no cabo.

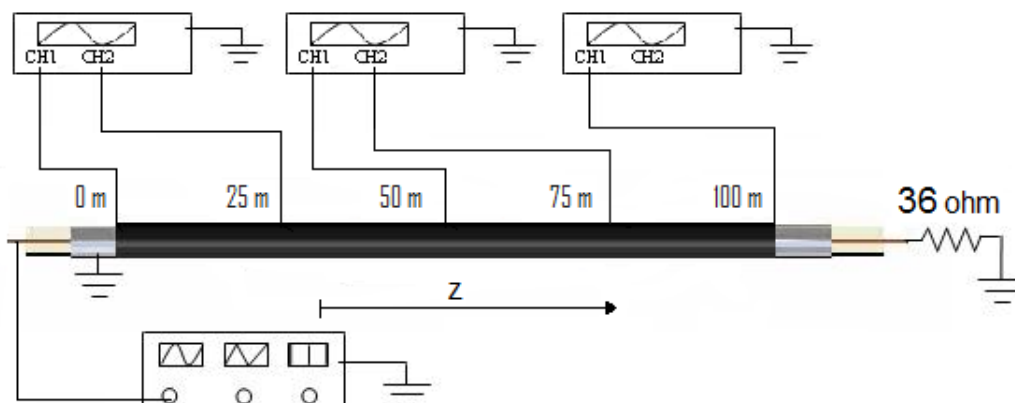


FIGURA 45 – DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO OS PONTOS DE LIGAÇÃO DO OSCILOSCÓPIO PARA A ANÁLISE DA ATENUAÇÃO NA REFLETOMETRIA SIMULADA.

Na Figura 46 é ilustrado o gráfico de uma refletometria simulada num cabo XLPE-E com o modelo proposto de elementos distribuídos, utilizando o valor  $20 \Omega$  para a resistência das camadas semicondutoras.

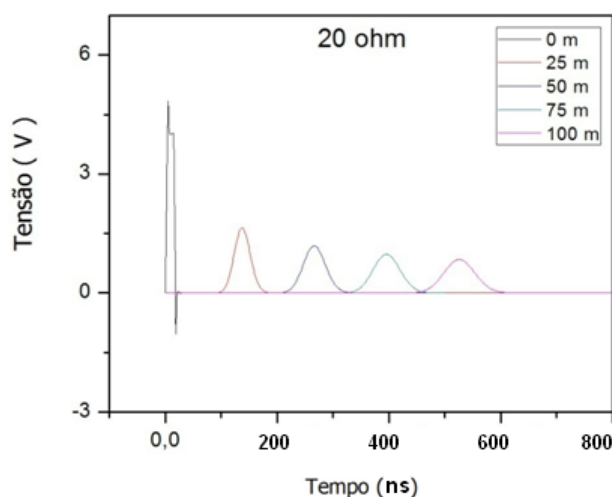


FIGURA 46 – GRÁFICO SIMULADO MOSTRANDO O PULSO EM DIFERENTES PONTOS DO CABO.

Nesse gráfico fica claro que a atenuação é maior no início do cabo [30]. Um pulso de alta frequência perde mais componentes de frequência no início da viagem pelo cabo, pois, depois de ter perdido uma componente de frequência, que foi por algum mecanismo de atenuação dissipada no início do cabo, essa mesma componente não será perdida futuramente. Esse fenômeno faz com que a diferença de amplitude entre o primeiro e o segundo pulso seja maior, que a diferença de amplitude entre os demais pulsos [23].

Uma característica importante para a aplicação de refletometria é a constante de atenuação do cabo, que será explorada nesse ponto.

Para a determinação da constante de atenuação do cabo, através do modelo de elementos distribuídos proposto, primeiramente foi encontrado o valor da potência de cada pulso, que integrado para um intervalo de tempo forneceu um valor de energia.

Os valores de potência instantânea dos pulsos, ao longo de ( $z$ ) foram obtidos através da equação (51) [19].

$$p(t) = \frac{v(t)^2}{Z_0} \quad (51)$$

Uma vez obtido os valores de potência em cada ponto ( $z$ ) do cabo, a integração de  $P$  para um intervalo de tempo considerado forneceu os valores de energia de cada pulso, em cada ponto do cabo, o que é mostrado na equação (52) [10].

$$E_z = \int_{t_0}^t p \cdot dt \quad (52)$$

Para cada valor de resistência, atribuído ao modelo proposto de elementos distribuídos, tem-se cinco curvas de potência as quais fornecem cinco valores de energia, um para cada distância ( $z$ ) em relação ao referencial zero [10].

A relação entre a constante de atenuação ( $\alpha$ ) e a energia em qualquer ponto ( $z$ ) pode ser dada pela equação (53) [17].

$$E_z = E_0 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot z} \quad (53)$$

Na equação (53) aplicando a propriedade inversa, se obtém a equação (54).

$$\ln \frac{E_z}{E_0} = -2 \cdot \alpha \cdot z \quad (54)$$

Da equação (54) é extraída a constante de atenuação para cada cabo, o que é feito através do *OriginPro®7.0* onde os gráficos e seus respectivos ajustes foram feitos. Se a simulação estiver de acordo com a equação (54), a atenuação ao longo do cabo deve apresentar comportamento linear.

O gráfico da Figura 47 mostra a forma com que a energia se dissipa ao longo do cabo.

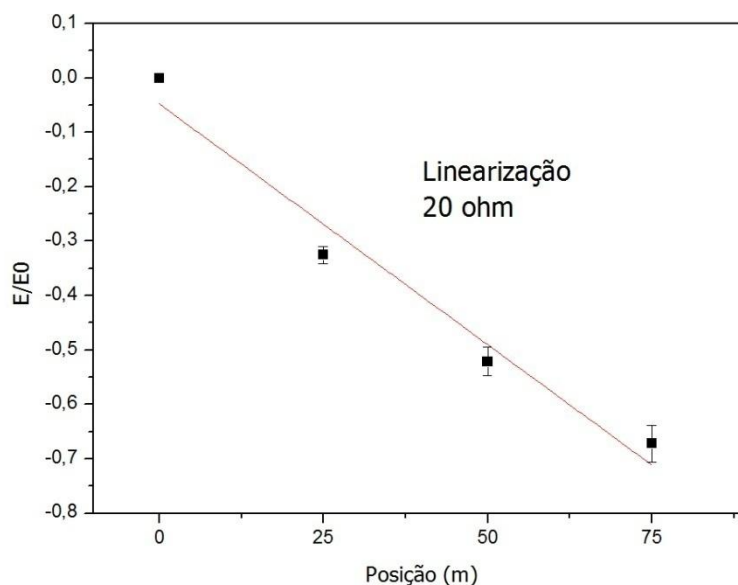


FIGURA 47 – GRÁFICO DE SIMULAÇÃO DA ENERGIA AO LONGO DO CABO XLPE-E COM RESISTÊNCIA DA CAMADA SEMICONDUCTORA IGUAL A 20 OHM.

O que se pode observar através da linearização, é que os pontos divergem da reta, ou seja, o equacionamento para o modelo proposto não está de acordo com a equação (54). Lembrando que os dados utilizados para a montagem dos gráficos foram obtidos através da simulação, os resultados não deveriam apresentar divergência do modelo matemático, o que mostra que a atenuação não possui comportamento linear.

No gráfico da Figura 48 pode-se observar a relação da atenuação com a resistência da camada semicondutora. No gráfico, o eixo vertical está mostrando a razão da energia do pulso em quatro pontos ao longo do cabo com a energia do pulso de entrada.

Observa-se que a razão  $E/E_0$  diminui com o aumento da resistência, e como  $E_0$  permanece constante, visto que a energia do pulso de entrada não é alterada, conclui-se que a energia do pulso que chega aos pontos (25, 50 e 75 m) diminui com o aumento da resistência.

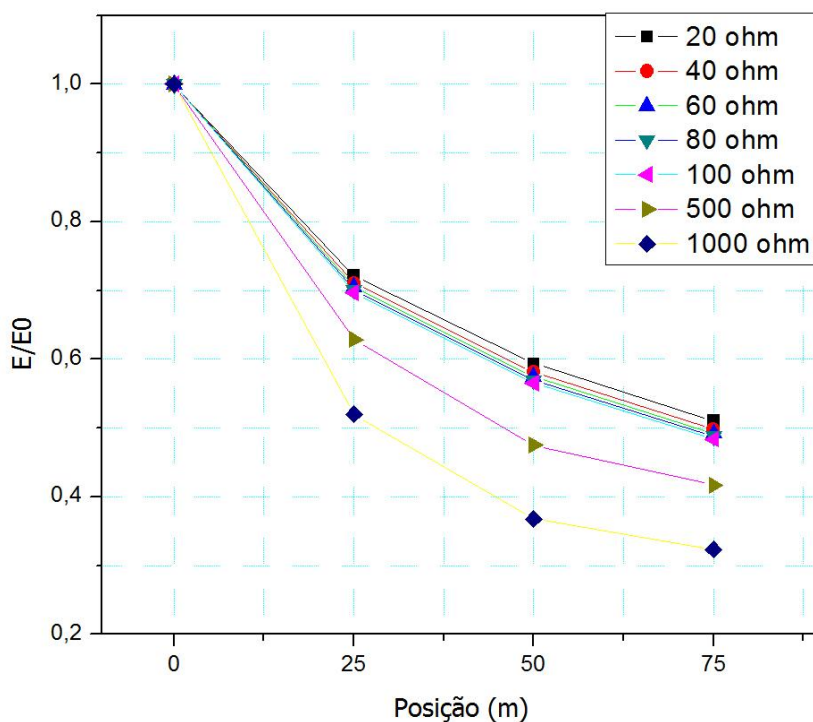


FIGURA 48 – COMPARAÇÃO DA ATENUAÇÃO AO LONGO DO CABO PARA DIFERENTES VALORES DE RESISTÊNCIA.

Conforme comentado anteriormente sobre o primeiro pulso da simulação mostrada na Figura 46, ocorre uma maior atenuação no início da viagem do pulso através do cabo. Esse fenômeno pode ser constatado através da Figura 49 onde é mostrado o gráfico da espectroscopia simulada do cabo. Pelo gráfico verifica-se o comportamento da energia do pulso com a frequência onde a área sob a curva de cada linha, representa a energia de cada pulso [30].

Na entrada do cabo, ponto 0 m, o pulso possui maior energia o que é representado no gráfico pela linha amarela. Verifica-se que logo após esse ponto ocorre a maior atenuação, visto que ao entrar no cabo o pulso possui várias componentes de alta frequência as quais são atenuadas mais acentuadamente nos primeiros 10 m de cabo, da linha amarela até a linha azul, e posteriormente deixarão de influenciar na atenuação.

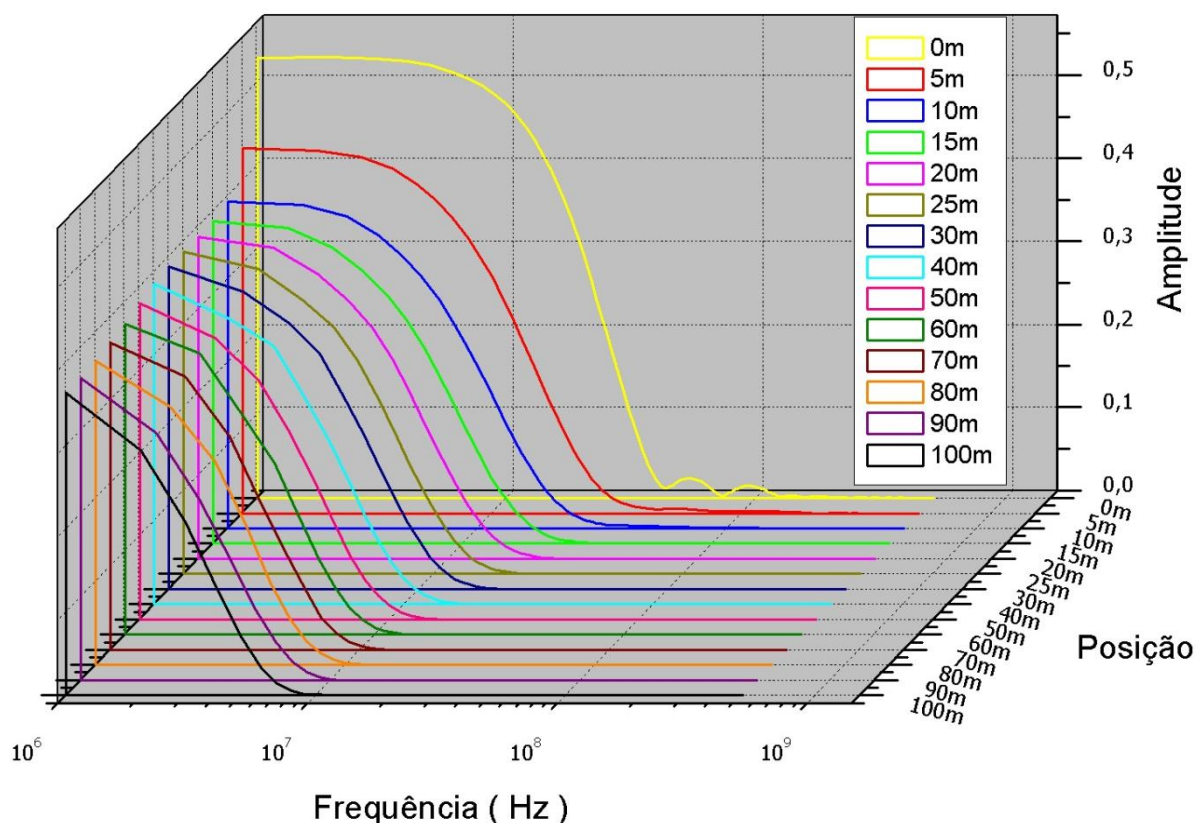


FIGURA 49 – ESPECTRO EM PONTOS DIFERENTES DO CABO, MOSTRANDO A ATENUAÇÃO DAS COMPONENTES DE FREQUÊNCIA.

No gráfico da Figura 49 após a linha azul (10 m) o pulso não mais possui várias componentes de alta frequência e a dissipação de energia não é tão acentuada.

Pode-se concluir através do gráfico da Figura 49, o qual mostra o comportamento ao longo dos 100 metros do cabo para um pulso de alta frequência, que a atenuação aumenta em função da frequência [30,31].

Outra forma de analisar o comportamento dissipativo para diferentes valores de frequência ao longo do cabo é mostrada no gráfico da Figura 50. Esse gráfico foi obtido da simulação com o modelo proposto do cabo com resistência elétrica das camadas semicondutoras de  $100 \Omega$ . O gráfico mostra o espectro de atenuação que é uma característica do cabo.

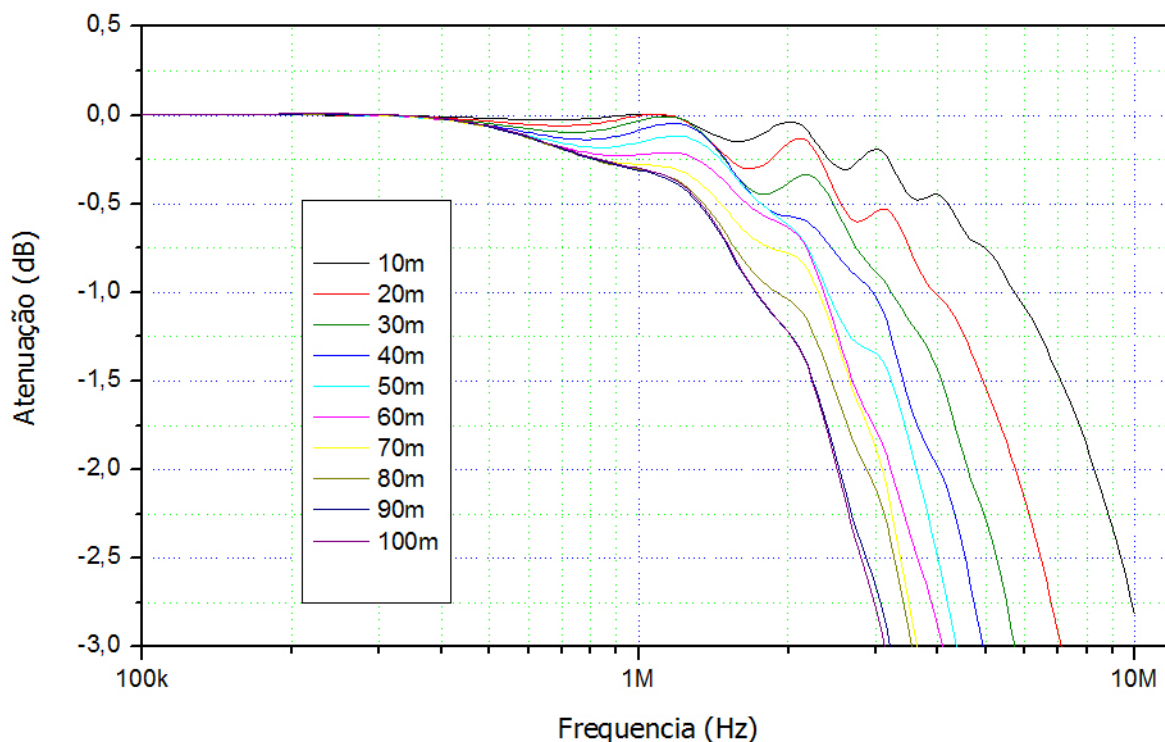


FIGURA 50 – ESPECTRO DE ATENUAÇÃO SIMULADO PARA UM CABO COM RESISTÊNCIA DAS CAMADAS SEMICONDUTORAS DE 100  $\Omega$ .

A atenuação (dB – decibel) mostrada no eixo vertical é obtida fazendo dez vezes o logaritmo da razão entre a energia do pulso nos pontos ao longo do cabo pela energia do pulso de entrada. Logo, pode-se observar que quando as linhas do gráfico atingem -3 dB, a energia do pulso no ponto em que a medida foi realizada é a metade da energia do pulso de entrada. O valor de frequência em que o pulso atinge -3 dB é a frequência de corte.

O que se pode concluir com o espectro de atenuação do cabo, de 100 kHz a 10 MHz, é que com o aumento da distância em relação ao início do cabo, o valor da frequência de corte diminui, por exemplo, á 10 m do início do cabo a frequência de corte é de aproximadamente 10 MHz enquanto que a 100 m do início do cabo a frequência de corte diminui para aproximadamente 5 MHz. Portanto verifica-se que a constante de atenuação depende da frequência.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados das refletometrias realizadas nos cabos isolados envelhecido em campo não estão de acordo com os resultados obtidos nas simulações utilizando o modelo de elementos distribuídos clássico.

O cálculo da constante de propagação complexa com as características do cabo envelhecido, o qual apresentou a constante de atenuação próxima a unidade, também mostra que o modelo clássico não explica o resultado obtido na refletometria do cabo envelhecido.

O modelo proposto o qual prevê a existência de resistências elétricas nas regiões de separação entre o dielétrico e o condutor central do cabo, e entre o dielétrico e a blindagem apresentou concordância dos resultados das simulações com as refletometrias obtidas dos cabos envelhecidos. Essas resistências podem representar a associação da resistência apresentada pelas camadas semicondutoras com as resistências apresentadas pelos mecanismos de degradação.

Os resultados dos cálculos das resistências por unidade de comprimento dos materiais das camadas semicondutoras, realizados com o resultado das resistividades elétricas medidas, mostram que esses valores apresentam pequena contribuição no fenômeno, sendo predominante a resistência apresentada pelos mecanismos de degradação como a oxidação. Esta hipótese é confirmada pelos resultados das simulações e refletometrias no cabo novo o qual não apresenta o comportamento dispersivo.

Os resultados das simulações com o modelo proposto mostraram que a atenuação aumenta proporcionalmente à resistência que representam as camadas semicondutoras e mecanismos de degradação. Também, observou-se que a atenuação é função da frequência o que não acontece no modelo clássico

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Qualquer cabo que possua as mesmas características observadas no cabo XLPE-E, poderá ser representado pelo modelo de elementos distribuídos proposto na dissertação.

Dessa forma a obtenção de um modelo matemático que expresse o comportamento da constante de atenuação em função da posição ao longo do cabo faz-se necessária para a aplicação eficaz da refletometria no domínio do tempo.

## REFERÊNCIAS

- 1 DUBICKAS, V. **Development of on-line diagnostic methods for medium voltage XLPE power cables**. Stockholm, 2009.
- 2 AGENCIA DE NOTÍCIAS, ESTADO DO PARANÁ. Disponível em: [www.agenciadenoticias.pr.gov.br/modules/news/article.php?storyid=21794](http://www.agenciadenoticias.pr.gov.br/modules/news/article.php?storyid=21794). Acesso em: 16/07/2009.
- 3 BRESSAN, B. N. **Desenvolvimento de Sistema e Metodologia Para Avaliar a Influência da Temperatura em Medidas de Tensão de Retorno em Cabos Isolados em XLPE**. Curitiba, 2009.
- 4 PAPAZYAN, R.; ERIKSSON, R. **Calibration for Time Domain Propagation Constant Measurements on Power Cables**. IEEE, Fevereiro de 2002.
- 5 Lage, R. O. **Processamento e Caracterização do Polietileno Reticulado por Silano**. Rio de Janeiro, Fevereiro de 2007.
- 6 OLIVEIRA, R. **Processamento e caracterização do Polietileno Reticulado por Silano**. Rio de Janeiro, Fevereiro de 2007.
- 7 HEINRICH, R. et al. **Broadband Measurement of the Conductivity and the Permittivity of Semiconducting Materials in High Voltage XLPE Cables**. Thecnical University Berlin.
- 8 BIALEK, T. **Evaluation and Modeling Of High-Voltage Cable Insulation Using a High-Voltage Impulse**. Mississippi, February de 2005.
- 9 DUBICKAS, V. et al. **Cables Diagnostics With On-Voltage Time Domain Reflectometry**. Royal Institute of Technology.
- 10 EDMINISTER, J. A. **Circuitos elétricos**, 2ª Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.
- 11 PAPOULIS, A. **Signal Analysis**. McGraw-Hil Book Company. New York, 1984.
- 12 WENTWORTH, S. M. **Fundamentos de Eletromagnetismo com Aplicações em Engenharia**. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- 13 ULABY, F. T. **Eletromagnetismo para Engenheiros**. 1ª ed. Boockman, dezembro de 2006.
- 14 MUGALA, G.; ERIKSSON, R. **Comparing Two Measurements Techniques for High Frequency Characterization of Power Cable Semiconducting and Insulating Materials**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 31 July 2005.
- 15 MUGALA, G.; ERIKSSON, R. **Measurements Technique for High Frequency Characterization of Semi-Conducting Materials in Extruded Cables**. Vol. 11, Nº 3, June 2004.

- 16 ARAUJO, F. O. **Detecção de Falta a Terra No Serviço Auxiliar em Corrente Contínua Das Subestações de Energia Elétrica.** Florianópolis, Setembro de 2004.
- 17 OPPENHEIM, A. V.; WILLISKY, A. S.; YOUNG T. I. **Signals and Systems.** Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1983.
- 18 GEBS, A. B. **Reflection Coefficient Applications in Test Measurements.** Belden Electronics Division. September 12, 2009.
- 19 WAGENAARS, P. et al. **Estimation of Transmission Line Parameters for Single-core XLPE Cables.** Beijing, China, 24 April, 2008.
- 20 KOWALSKI, M. E. **A Simple and Efficient Computational Approach to Chafed Cable Time-Domain Reflectometry Signature Prediction.** Stinger Ghaffarian Technologies (SGT), Inc. NASA Ames Research Center.
- 21 NBR 6251, **Cabos de Potência com isolamento sólida extrudada para tensões de 1 a 35kV,** ABNT, Rio de Janeiro 2006.
- 22 VAKILAN, M. et al. **Investigation of PD Signal Propagation Characteristics in XLPE Cables.** International Conference on Power System Technology – POWERCON. November 2004.
- 23 VAKILIAN, M. **Semiconducting Layer as an Attractive PD Detection Sensor of XLPE Cables.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, Nº 4; August 2006.
- 24 TILDEN, D. M. **Measuring Controlled-Impedance Boards with TDR.** MILLER FREEMAN INC., 1992.
- 25 CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: an introduction.** 6ª ed. John Wiley & Sons: University of Utah, 2003.
- 26 HALL, C. **Polymer Materials.** Macmillan Education Ltd, 1989.
- 27 DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J. C. **Electrical Degradation and Breakdown in Polymers.** London, 1992.
- 28 STEENNIS, E. **Water Treeing the behaviour of water trees in extruded cable insulation.** 2ª ed. Kema, 1989.
- 29 HASHEMINEZHAD, M. et al. **Direct Introduction of Semicon Layers in XLPE Cable Model.** International Conference on Power System Technology, 2006 IEEE.
- 30 HIO NAM, O; BLACKBURN, T.R.; PHUNG, B. T. **The Effect of Insulation Loss and Semi-Conducting Layers on Pulse Propagation Behavior of Power Cables.**
- 31 HIO NAM, O.; BLACKBURN, T.R.; PHUNG, B. T. **Investigation of PD Detection on XLPE Cables.** Australian, 2008.

## DOCUMENTOS CONSULTADOS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de bibliotecas. **Normas para apresentação de documentos científicos**. 2 ed. Curitiba, 2007. Editora: UFPR.

TEIXEIRA JUNIOR, M. D. R. **Cabos de Energia**. São Paulo: ArtLiber Editora, 2004.

BARTNIKAS, R.; SRIVASTAVA, K. D. **Power and Communication Cables – Theory and Applications**. New York: McGraw-Hill, 2000.

DENSLEY, R.J; BARTNIKAS, R.; BERNSTEIN, B. **Multiple Stress Aging of Solid Dielectric Extruded Dry-cured Insulation Systems for Power Transmission Cables**. *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 9, n. 1, p. 559-571, Jan. 1994.

EICHHORN, R.M. **Engineering Dielectrics – Electrical Properties of Solid Insulating Materials**, v. IIA. Baltimore: ASTM STP783, 1983.

STEINER, J. P.; REYNOLDS P. H.; WEEKS, W. L. **Estimating the Location of Partial Discharges in Cables**. *IEEE Trans. On Electrical Insulation*, Vol. 27, No. 1, Fev. 1992.

MCCORMICK, D.; ROSS, M. **Control of Coaxial Cable Propagation Delay for a Beam Phase Monitor**. Stanford University, Stanford: July 1993.

MCCORMICK, D. et al. **Thermal Stabilization of Low Level RF Distribution Systems at SLAC**. Stanford Linear Accelerator Center, 1993.

REIS, J. et al. **Characterization of Subscriber Local Loop By Measures Of Frequency Response and TDR**. XVIII IMEKO WORDS CONGRESS, Metrology for a Sustainable Development. September, 17 – 22, 2006, Rio de Janeiro.

ANDREWS, J. R. **Time Domain Reflectometry (TDR) and Time Domain Transmission (TDT) Measurement Fundamentals. November 2004**.

GRIFFITHS, L. A. et al. **The Invisible Fray: A Critical Analysis of the Use os Reflectometry for Fray Location**. *IEEE Sensor Journal*, VOL. 6, NO. 3, June 2006.

KANE, F. W. et al. **Applications of Time Domain Reflectometry to Landslide and Slope Monitoring**. Northwestern University Evanston, Illinois. September 5-7, 2000.

KIM, C. S. et al. **PD Characteristics of a Void between Semiconducting Layer and Insulating Layer**. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 1-5 2003, Nagoya.