

PEA- DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS  
ESCOLA POLITÉCNICA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



## PEA 500

### ***LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS EM LINHAS RETICULADAS SUBTERRÂNEAS DE DISTRIBUIÇÃO DA ELETROPAULO***

ORIENTADORES : Carlos Barioni  
Nelson Kagan

COORDENADOR : Carlos Tahan

ALUNOS : Fernando Garcia Cavada  
Daniel Zanolini Figueiredo

## ÍNDICE

1. Objetivos do Projeto .....	pág. 1
2. Descrição do projeto .....	pág. 1
2.1 Resultados esperados .....	pág. 1
3. Etapas do projeto .....	pág. 2
4. Introdução .....	pág. 3
5. Cabos de potência .....	pág. 4
5.1 Introdução .....	pág. 4
5.2 Generalidades .....	pág. 4
5.2.1 Seções transversais de Construções típicas de Cabos de Potência .....	pág. 5
5.2.2 Tensão no isolamento .....	pág. 7
5.2.3 Temperatura máxima admissível dos condutores .....	pág. 8
5.2.4 Componentes básicos do cabo .....	pág. 8
5.2.4.1 Condutores .....	pág 8
5.2.4.2 Blindagem do condutor .....	pág 11
5.2.4.3 Isolação .....	pág 13
5.2.4.4 Blindagem da Isolação .....	pág. 14
5.2.4.5 Capa Metálica .....	pág. 16
5.2.4.6 Armações .....	pág. 16
5.2.4.7 Cobertura .....	pág. 16
5.3 Descrição dos cabos mais encontrados em linhas de distribuição subterrâneas .....	pág 17
5.3.1 Cabos com isolação de papel impregnado .....	pág.17
5.3.2 Cabos a gás .....	pág. 20
5.3.3 Cabos com isolação extrudada .....	pág.23
6. O processo da falha em um cabo .....	pág.35
7. Métodos de Localização de faltas .....	pág . 38
7.1 Métodos Clássicos de Localização de faltas .....	pág. 38

7.1.1 Pontes de Corrente contínua .....	pág . 38
7.1.1.1 Ponte de Wheatstone .....	pág. 38
7.1.1.2 Ponte de Murray .....	pág.39
7.1.1.3 Ponte de Varley .....	pág.40
7.1.2 Pontes de corrente Alternada .....	pág. 41
7.2 Métodos modernos de localização de defeitos .....	pág. 41
7.2.1 Método transgradiente usando fonte de corrente contínua .....	pág. 43
7.2.2 Método transgradiente usando fonte de corrente alternada .....	pág. 44
7.2.3 Reflectometria .....	pág.45
7.2.3.1 Considerações práticas .....	pág.46
7.2.3.2 método do Decaimento .....	pág.48
7.2.3.3 método do Impulso de Corrente .....	pág. 51
7.2.3.4 Reflectometria no domínio do tempo .....	pág. 52
7.2.3.4 Reflectometria do arco .....	pág.54
7.2.4 Método do decaimento ou de livre oscilação .....	pág 56
7.2.5 Métodos Acústicos .....	pág. 58
8. Condições de realização dos ensaios .....	pág. 59
8.1.1 Método .....	pág. 60
9. A experiência da Eletropaulo .....	pág. 64
9.1.1. Teste dos cabos .....	pág. 66
9.1.2 Pré-localização .....	pág. 66
9.1.3 Localização do Defeito “ Pin Point “ .....	pág. 67
10. Estudo de casos da Eletropaulo .....	pág 68
10.1 Caso no circuito Paula Souza.....	pág.69
10.2 caso Circuito BAN 315 .....	pág 70
11 O futuro da localização na Eletropaulo .....	pág . 71
12. Conclusão .....	pág. 72
Bibliografia .....	pág. 75

Anexo 1 .....	pág.77
Anexo 2 .....	pág 83

## 1.OBJETIVOS DO PROJETO

Os objetivos do projeto podem ser sub-divididos em :

- Estudar as técnicas de localização de defeitos das redes em sistemas de distribuição subterrânea . Os alunos participarão do levantamento do estado da arte e da avaliação do resultado de testes que comprovem a eficácia do sistema adotado .
- Estudar e desenvolver a metodologia para a redução dos tempos de localização de defeitos e para o reestabelecimento da melhor confiabilidade do sistema.
- Acompanhar e participar do desenvolvimento de técnicas que visam diminuir o número de falhas e os riscos de segurança .

## 2. DESCRIÇÃO DO PROJETO

Este é um projeto, que está sendo desenvolvido pela ELETROPAULO, com finalidade de apurar melhores técnicas de identificação de defeitos em linhas reticuladas de distribuição subterrânea, melhorando o tempo de correção e beneficiando o consumidor. O método deverá permitir, também, o reconhecimento do estado operacional da rede de distribuição subterrânea para o estabelecimento de planos de manutenção .

A interação com a indústria nacional, principalmente com os fabricantes de Transformadores submersíveis e Cabos de potência , é fundamental, para que possamos estabelecer limites aos ensaios de campo.

### 2.1. Resultados esperados:

- Estudo dos cabos utilizados na distribuição subterrânea da Eletropaulo .

- Familiarização com os métodos de Localização de falhas subterrâneas e estudo em particular do sistema adotado pela Eletropaulo
- Espera-se elaborar um relatório contendo o estado da arte na utilização de técnicas de localização de defeitos;
- Familiarização com equipamentos para testes de cabos subterrâneos;
- Estabelecimento de parâmetros limites de solicitação de técnicas de localização de defeitos;

### **3. ETAPAS DO PROJETO**

O projeto será dividido em várias etapas. No âmbito do trabalho de formatura, vislumbra-se a participação nas seguintes atividades:

- i. Levantamento bibliográfico do estado da arte: Esta etapa consiste em levantarmos uma pesquisa bibliográfica sobre o tema em questão; Em primeiro lugar serão estudadas técnicas de localização de defeitos em geral em redes subterrâneas . Em seguida será estudada a técnica adotada pela Eletropaulo e também os cabos utilizados na distribuição subterrânea .
- ii. Estudo dos tipos de cabos utilizados em redes de distribuição .
- iii. Participação em Workshops.
- iv. Especificação e aquisição dos equipamentos: Especificação dos equipamentos de localização de defeitos da rede para o laboratório móvel, equipamentos portáteis e softwares. Neste âmbito o projeto deve apoiar a especificação, acompanhar o recebimento e os teste de comissionamento dos

- mesmos, bem como, avaliar a adequação dos equipamentos já existentes na Eletropaulo para localização de falhas na rede subterrânea ;
- v. Acompanhamento de ensaios de localização de defeitos na rede reticulada da Eletropaulo para definição de melhorias no sistema ,e identificação do melhor método a ser utilizado e verificação da possibilidade de implantação na rede da ELETROPAULO.

#### **4. INTRODUÇÃO**

Frequentemente encontra-se o problema de localizar a posição exata de uma falha em um cabo da distribuição. Estas falhas frequentemente ocorrem em momentos extremamente inoportunos e causam um grande número de inconveniências aos clientes dos serviços prestados pelas empresas de Distribuição de Energia Elétrica .

Em geral as redes subterrâneas reticuladas se encontram nas regiões centrais das grandes cidades , portanto a empresa prestadora do serviço deve rapidamente encontrar e isolar a falha e restaurar o serviço elétrico. Os métodos de localização utilizam indicadores da falha, tais como radares , detetores acústicos ou combinações destes. Pesquisas realizadas indicam que submetendo sistemas de cabos envelhecidos à surtos excessivos reduzem drasticamente a vida útil do cabo , ou seja , cabos envelhecidos são fortes candidatos às falhas , sendo portanto extremamente importante para este trabalho , o estudo do envelhecimento dos cabos .

Desta maneira , a indústria desenvolveu métodos mais sofisticados que reduzissem o stress em sistemas envelhecidos e também as tensões requeridas para executar a tarefa.

Algumas empresas de energia elétrica empregam nos seus sistemas de distribuição subterrânea arranjos tais que o desligamento de um alimentador primário não ocasiona a interrupção do

fornecimento porque os alimentadores remanescentes garantem o funcionamento correto do sistema . Mesmo assim a empresa deve trabalhar para recolocar este alimentador em funcionamento porque a eventual falha neste alimentador pode acarretar na interrupção do fornecimento de energia para os consumidores .

Muitos fatores influenciam no sucesso da localização de um defeito em um cabo . O conhecimento do processo da falha em um cabo , dos tipos de cabos utilizados na rede , a metodologia de localização empregada , a topologia do circuito , as condições em que o ensaio de localização deverá ser feito e principalmente a experiência do profissional de localização de defeitos são fatores de extrema importância .

Em muitos casos a localização de um defeito pode levar muito mais tempo do que o necessário se algum destes fatores não for levado em conta . Este trabalho abrangerá de forma teórica e também experimental ( caso da Eletropaulo ) todos estes fatores para que as conclusões obtidas não sejam afetadas pela falta de análise ou conhecimento de qualquer um destes fatores .

## **5. CABOS DE POTÊNCIA**

### **5.1 - Introdução**

Este capítulo analisa os cabos empregados em Linhas de Distribuição subterrânea, do ponto de vista das normas aplicáveis, construção, utilização e instalação.

Abordamos aqui, todos os tipos de cabos utilizados pela ELETROPAULO, assim teremos todas as informações básicas normalmente utilizadas no desenvolvimento dos estudos de localização de defeitos em linhas de distribuição subterrânea.

### **5.2 - Generalidades**

Devido a complexidade e variedade dos cabos utilizados em linhas de distribuição subterrâneas, abordaremos aqui algumas das principais características técnicas e construtivas destes cabos elevando-se em conta as características mais importantes para o estudo de localização de defeitos .

### **5.2.1 - Seções Transversais de Construções típicas de Cabos de Potência**

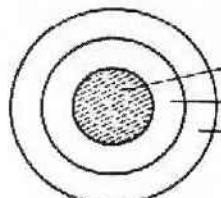
Na **figura 1** estão ilustrados seções transversais típicas de construções de cabos de potência e os mesmos são designados da mesma maneira:

- Unipolar: 1 x S
- Multipolar: N x S
- Multiplexado: N x 1 x S,

Onde:

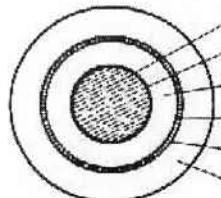
N = nº de condutores

S é a seção transversal dos mesmos.



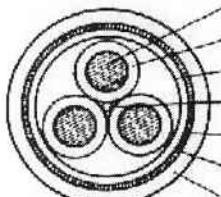
- 1 - CONDUTOR
- 2 - ISOLAMENTO
- 3 - COBERTURA

A - CABO UNIPOLAR 0,6/1 kV



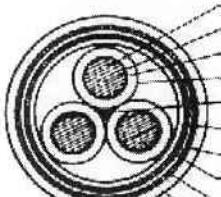
- 1 - CONDUTOR
- 2 - BLINDAGEM DO CONDUTOR
- 3 - ISOLAMENTO
- 4 - BLINDAGEM DA ISOLAMENTO: PARTE SEMICONDUTORA
- 5 - BLINDAGEM DA ISOLAMENTO: PARTE METÁLICA
- 6 - COBERTURA

B - CABO UNIPOLAR A CAMPO RADIAL 8,7/15 kV



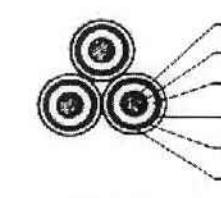
- 1 - CONDUTOR
- 2 - ISOLAMENTO
- 3 - CAPA INTERNA
- 4 - ENCHIMENTO INTERNO
- 5 - ACOLCHOAMENTO
- 6 - ARMAÇÃO COM FITA
- 7 - COBERTURA

C - CABO TRIPOLAR A CAMPO NÃO RADIAL 1,8/3 kV



- 1 - CONDUTOR
- 2 - BLINDAGEM DO CONDUTOR
- 3 - ISOLAMENTO
- 4 - BLINDAGEM DA ISOLAMENTO: PARTE SEMICONDUTORA
- 5 - ENCHIMENTO INTERNO
- 6 - CAPA INTERNA SEMICONDUTORA
- 7 - BLINDAGEM METÁLICA
- 8 - CAPA DE SEPARAÇÃO
- 9 - ARMAÇÃO
- 10 - COBERTURA

D - CABO TRIPOLAR A CAMPO RADIAL, ARMADO 3,6/6 kV



- 1 - CONDUTOR
- 2 - BLINDAGEM DO CONDUTOR
- 3 - ISOLAMENTO
- 4 - BLINDAGEM DA ISOLAMENTO: PARTE SEMICONDUTORA
- 5 - BLINDAGEM DA ISOLAMENTO: PARTE METÁLICA
- 6 - COBERTURA

E - CABO MULTIPLEXADO A CAMPO RADIAL 8,7/15 kV

Figura 1 – Seções transversais de construções típicas de cabos de potência

## 5.2 .2- Tensão de Isolamento dos cabos

As características construtivas de um cabo, tais como a espessura de isolamento ou a existência ou não de blindagem semicondutoras são baseadas na tensão de isolamento do mesmo. Para isso devemos considerar:

- máxima tensão operativa do sistema;
- tempo previsto para a atuação da proteção;
- tensão suportável de impulso atmosférico.

Para a AEIC (Insulated Cable Engineers Association") e ICEA(Association of Edison Illuminating Companies) as tensões de isolamento são baseadas em níveis, como descrito abaixo, e são normalmente de 0,6 kV, 3kV, 5kV, 8kV, 15kV, 25kV, 35kV:

- Nível 100% : NA ( neutro aterrado) - Geralmente com o neutro diretamente aterrado tais que faltas para terra são eliminadas em tempo máximo de um minuto;
- Nível 133%: NI ( Neutro isolado) – Adotado em sistemas onde a falta possa ser eliminada em até uma hora. Tais sistemas apresentam neutro isolado ou aterrado por uma impedância;
- Nível 173% : Os cabos podem ser adotados em sistemas que não se enquadram nas categorias anteriores. ( tempo de desligamento infinito)

Geralmente nos sistemas de distribuição os cabos são de nível 100% ou 133%. A tensão de isolamento de um cabo deve ser igual ou imediatamente superior a tensão nominal da linha.

A ABNT designa a tensão de isolamento dos cabos por  $Vo/V$  dos quais são definidos:

- $Vo$ : Valor eficaz entre condutor e terra ou blindagem de isolação;
- $V$ : Valor da tensão entre condutores isolados.

Para tanto são consideradas três categorias:

- 1- Categoria A: Qualquer condutor fase que venha a ter contato com a terra é desligado do sistema em um minuto;
- 2- Categoria B: Abrange os sistemas que, sob condição de falta , são previstos para continuar operando com um tempo determinado ( não devendo exceder uma hora, porém suportando até 8 horas seguidas ou 125 horas em um ano) com uma fase a terra;
- 3- Categoria C: Abrange os sistemas que não se enquadram nas categorias A ou B.

### **5.2.3 – Temperatura máxima admissível dos condutores**

Estas temperaturas são características construtivas dos cabos e estão separadas por temperatura máxima do cabo a regime permanente ( Condições normais de funcionamento), temperatura máxima do cabo em regime de sobrecarga e temperatura máxima de um condutor em regime de curto-circuito.

### **5.2.4 – Componentes básicas do Cabo**

#### **5.2.4.1 Condutores**

Os cabos subterrâneos são fabricados com condutores de cobre ou alumínio que atendem as especificações :

- NBR 5111 – Fios de cobre nu de seção circular para fins elétricos;
- NBR 5118 – Fios de alumínio nu de seção circular para fins elétricos;
- NBR 6252 – Condutores de alumínio para cabos isolados;
- NBR 6880 – Condutores de cobre para cabos isolados.

Em relação ao encordoamento, os condutores padronizados pela ELETROPAULO podem ter a seguinte forma:

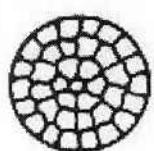
- Redondo normal : simples reunião de fios elementares, concentricamente , em forma de espiral, colocados sobre um fio central de igual diâmetro;
- Redondo compactado: Parecido com o redondo normal, porém após o encordoamento de fios elementares, o conjunto sofre um esmagamento que reduz o diâmetro final do condutor .A vantagem desta construção consiste na redução do diâmetro final do cabo, assim como, na forma mais arredondada do condutor. Quanto a desvantagem, há uma leve diminuição da flexibilidade;
- Setorial compactado: A construção é semelhante ao redondo normal, sendo que no final o cabo passa por um jogo de calandras que dão a forma setorial. Este tipo de cabos é utilizado na construção de cabos múltiplos ( 3 ou 4 condutores) com a vantagem de redução de diâmetro externo final;
- Redondo segmentado: Construção baseada na divisão do condutor em segmentos isolados entre si, de forma a melhor distribuir a densidade de corrente ao longo do condutor. Esta construção é destinada a cabos de seções superiores a  $500\text{mm}^2$  quando o efeito peculiar se torna apreciável e uma considerável economia de material pode ser obtida;
- Compressed: a corda completa, após o encordoamento, passa por uma máquina para um pequeno esmagamento que implique em uma redução do diâmetro inferior a 3%;

Na **Figura 2** observamos as seções transversais dos encordoamentos citados acima.

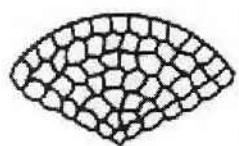
Além da forma, a classe do enrolamento também é importante para a elaboração do cabo. Ela determina o número de fios ideal para se atender a uma desejável flexibilidade do cabo. As normas ABNT determinam seis classes de encordoamento, cada uma prevendo um grau de encordoamento.



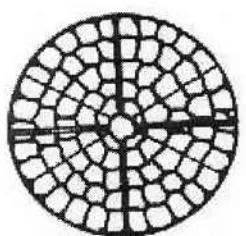
REDONDO NORMAL



REDONDO COMPACTADO



SETORIAL COMPACTADO



REDONDO SEGMENTADO

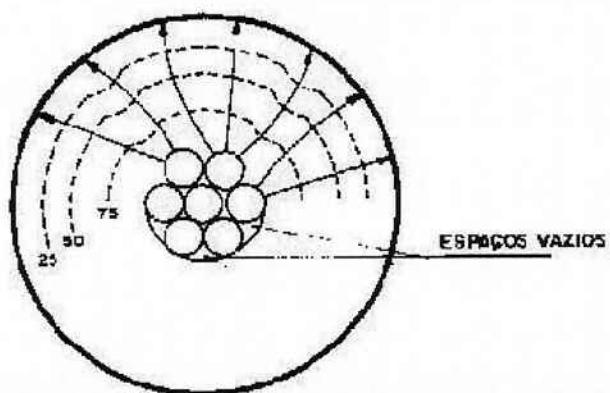
**Figura 2 Encordoamento dos condutores padronizados**

#### 5.2.4.2 – Blindagem do condutor

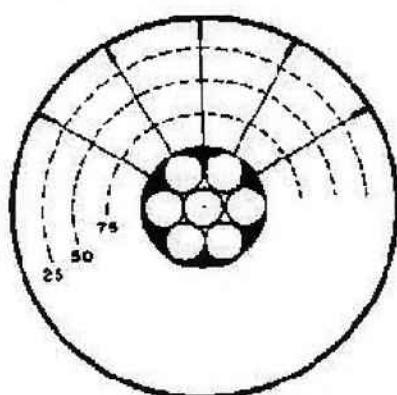
A superfície externa de um condutor encordoado não é regular, possuindo saliências e reentrâncias. A passagem de corrente elétrica no condutor implica no aparecimento de um campo elétrico que, devido às características construtivas mencionadas, possuem forma irregular, sendo mais concentrado em certos pontos e provocando, consequentemente, esforços elétricos excessivos que podem ser prejudiciais ao isolamento, ocasionando danos que diminuem a vida útil do cabo. Nos vazios entre condutor e cabo também pode haver a ionização do ar existente (efeito corona) que é altamente prejudicial ao condutor.

Para diminuir os problemas mencionados reveste-se o condutor com uma camada de material semi-condutor não metálico denominada blindagem semi-condutora do condutor, que deve estar em contato com a superfície interna do isolamento. Esta blindagem dá uma forma cilíndrica ao condutor, fazendo com que as linhas de campo elétrico sejam homogêneas e radialmente distribuídas no interior do cabo, impedindo consequentemente pontos em que os esforços elétricos sejam excessivos. (**Figura 3**)

A blindagem semi-condutora do condutor é obrigatória em tensão de isolamento acima de 1,8/3 kV (cabos com isolação de PE ou XLPE) ou 3,6/6 kV (cabos com isolação de papel impregnado e PR ou PVC).



Condutor sem blindagem



Condutor com blindagem

Figura 3 – Ilustração da Distribuição de Campo Elétrico nos cabos com e sem blindagem.

#### 5.2.4.3 – Isolação

Os cabos isolados utilizados nas redes de distribuição subterrânea podem ser divididos em dois tipos:

Cabos com isolamento estratificado (papel impregnado): são constituídos por fitas de papel aplicadas helicoidalmente sobre o condutor. Em seguida, os cabos são impregnados com óleo isolante, sendo revestidos com uma capa de chumbo (evita a migração do óleo e penetração da umidade. A forma helicoidal deve-se a necessidade do acondicionamento e instalação dos cabos. Só assim evita-se enrugamentos ou rachaduras no papel, fatores que afetariam a qualidade de isolação.

Os cabos de papel, tradicionais há mais de oitenta anos, são os mais confiáveis; porém, apresentam a desvantagem de limitar o desnível que pode ser considerado nas instalações. Relativamente aos cabos secos, também apresentam o inconveniente de exigir maiores tempos cuidados para execução das emendas e derivações.

Cabos com isolação extrudada: são aqueles que utilizam materiais sintéticos de boas propriedades dielétricas, aplicáveis pelo processo de extrusão. São essencialmente polímeros, que são substâncias que consistem de longas macromoléculas, formadas pelas união de pequenas moléculas ou grupos de moléculas. Estão divididos em termoplásticos ou termofixos.

Os termoplásticos são quebradiços ou duros para temperaturas normais, mas tornam-se plásticos a altas temperaturas. Utilizam-se como isoladores o cloreto de polivinila (PVC) e o polietileno linear (PE), que são facilmente obtidos, com custos inferiores aos dos termofixos, e facilmente colocados sobre o condutor através de uma simples extrusão; porém, sua estrutura molecular linear de longas cadeias de átomos que podem mover-se livremente em relação as demais quando a temperatura é aumentada. Conseqüentemente, a rigidez mecânica do termoplástico decai consideravelmente para temperaturas até 75° C e para temperaturas acima de 100° C, a deformação é significativa. Esta característica praticamente impediu a utilização de cabos com isolação de PVC nas redes subterrâneas de distribuição.

Os materiais termofixos, tais como o polietileno reticulado (XLPE) e a borracha etileno propileno (EPR) são polímeros sintéticos com grandes melhoramentos nas características térmicas, que são obtidas pela conversão da estrutura molecular linear e uma estrutura molecular multidirecional, tendo um grande nº de cross-links entre as cadeias moleculares. Esta estrutura rígida aumenta a resistência às deformações e a rigidez mecânica para temperaturas elevadas. Como consequência podemos ter situações de maiores temperaturas e correntes para os cabos com isolação estudada termofixa.

O polietileno XLPE é o material isolante predominante nos cabos de distribuição subterrâneos utilizados nos Estados Unidos e no Japão. O XLPE é normalmente obtido através de um processo químico de reticulação efetuados através da adição de pequenas quantidades de peróxido, que atuam como agente de reticulação.

A borracha etileno-propileno, utilizada em grande escala na Itália, é um compolímero de etileno e propileno com acréscimo de aditivos agentes de vulcanização, além de corantes. O EPR é um isolante termofixo muito complexo, formada através de uma combinação de cerca de quarenta materiais, mas sem ligações duplas de carbono, e com condições de possibilitar reticulação com o peróxido.

Cabos com isolação extrudada não são utilizados há tanto tempo como o de papel impregnado, mas o desempenho e as facilidades de utilização justificam o sucesso nas novas instalações.

#### **5.2.4.4 – Blindagem da isolação**

Quando uma tensão é aplicada entre um condutor e uma superfície aterrada plana ( ou entre dois condutores), a isolação é solicitada de uma forma não uniforme, gerando esforços elétricos tangenciais e longitudinais, que podem causar a deterioração do material dielétrico ocasionado falhas e riscos físicos ao ser humano. O controle destes esforços se dá através de um sistema de blindagem ao redor da isolação.

Nos cabos com isolação extrudada, a blindagem da isolação é constituída por uma parte não metálica e uma parte metálica. A parte não metálica é constituída por um material semicondutor que deve estar em íntimo contato com o isolamento, para evitar vazios entre a blindagem metálica e o isolamento, eliminando consequentemente que o ar contido nestes vazios seja ionizado. Esta blindagem semicondutora da isolação pode ser constituída de fitas de papéis, com compostos semicondutores, ou um composto semicondutor extrudado. A parte metálica para os cabos de isolação sólida extrudada consiste de fios e/ou fitas de cobre nu, ou estanhado, aplicados diretamente sobre a parte semicondutora.

As principais funções da blindagem da isolação nos cabos com isolação extrudada são:

- confinar o campo elétrico ao isolamento;
- obter no dielétrico uma distribuição de tensão elétrica de forma radial e simétrica, em torno do condutor, a fim de diminuir a possibilidade de descargas superficiais;
- proteger o cabo ligado às linhas aéreas ou sujeito a qualquer forma de influência mútua;
- reduzir a possibilidade de choque elétrico;
- limitar as interferências em circuitos de telecomunicações.

Para que a blindagem seja eficiente e corresponda às suas funções, deve atender ao seguinte:

- estar solidamente aterrada através de conexões de baixa impedância, obtendo-se um caminho para condução de correntes induzidas em caso de curto circuito;
- permanecer em contato constante com o isolamento;
- possuir seção adequada.

Nos cabos com isolação de papel impregnado também se considera a blindagem da isolação constituída por uma parte não metálica (fitas) e uma parte metálica, visando atender os requisitos mostrados anteriormente. A parte metálica ( capa metálica) nos cabos de papel deve atender requisitos complementares, conforme poderá ser observado no item a seguir.

#### **5.2.4.5 – Capa metálica**

Devido à natureza higroscópica do papel é essencial resguardá-lo do contato com a umidade, sendo imprescindível cobrir o núcleo do cabo logo após a impregnação, com um invólucro protetor completamente impermeável ao ar e à água.

A capa metálica pode ser constituída de chumbo, na forma de material puro ou liga, ou de alumínio.

#### **5.2.4.6 – Armações**

A armação utilizada para proteção mecânica dos cabos é feita com aplicação sobre o mesmo de:

- fitas metálicas planas (aço galvanizado, alumínio, aço inoxidável, bronze, etc.): utilizada quando os cabos são submetidos a esforços radiais;
- fitas metálicas corrugadas intertravadas;
- fios( aço galvanizado, bronze, cobre, alumínio...): empregadas quando o cabo é submetido a esforços de tração como no caso de cabos submarinos;
- trança de fios ( aço, nylon,algodão...)

#### **5.2.4.7 – Cobertura**

É a parte do cabo com constante contato com as condições ambientais. Sendo assim, tem como principal função dar proteção ao núcleo do cabo durante a sua instalação ( mecânica ou química). Para isso deve-se levar em consideração impermeabilidade, resistência a abrasão, rasgamento e impacto, inflamabilidade, baixa emissão de gases em uma eventual queima, etc..

Os principais materiais utilizados são:

- cloreto de polivinila ( PVC) – facilidade na fórmula. Permite uma temperatura de até 90°C
- polietileno termoplástico: possui péssima resistência a chama, porém uma excelente impermeabilidade, sendo ideal para ambientes submersos em água ;
- policloropreno (neoprene): boas características mecânicas e excelente resistência a chama e óleos que os tornam excelentes para coberturas de cabos utilizados em serviços pesados ( mineração e indústria em geral)
- polietileno clorossulfonado ( hypalon): resistente ao óleo, abrasão e chamas, além de baixo teor de fumaça.

### **5.3. Descrição dos cabos mais encontrados em Linhas de Distribuição Subterrâneas**

#### **5.3.1 Cabos com isolação de papel impregnado**

Este tipo de cabo têm sido utilizado pela ELETROPAULO desde 1903. Atualmente, eles são utilizados nos reticulados da região central de São Paulo ( com exceção da região do Itaim, onde são utilizados cabos com isolação extrudada)

Com o avanço da tecnologia, a estrutura dos cabos com isolação de papel impregnado vem sendo modificada evoluindo em suas características. Para este estudo daremos ênfase somente à estrutura atual.

- Composto impregnante

Hoje é utilizado pela ELETROPAULO um cabo com isolação impregnante, cujo o composto impregnante é não escoante. Estes cabos, assim como os cabos com composto impregnante escoante podem ser usados com desníveis de até 30 m.

- Condições operativas

A temperatura máxima do condutor em operação em regime permanente é função do composto escoante e do tipo construtivo do cabo. Em regime de sobrecarga a máxima temperatura admissível é igual a máxima temperatura do condutor acrescida de 3°C para compostos não escoante. Em regime de curto circuito a temperatura do condutor não deve ultrapassar a 200°C e a duração deste regime não deve ultrapassar 5 minutos.

- Condutor

Todos os cabos com isolação de papel impregnado, utilizado no sistema de distribuição da ELETROPAULO, apresentam os condutores constituídos por vários fios de cobre nu, sendo a formação circular simples, circular compactado, ou setorial.

- Blindagem

A blindagem do condutor deve ser obrigatoriamente constituída por fitas de papel semicondutor, aplicadas diretamente sobre o condutor, revestindo-o completamente.

- Isolação

Constituída por fitas de papel celulose aplicadas helicoidalmente de maneira uniforme e livres de dobras e rugas.

- Blindagem da isolação

Deve ocorrer obrigatoriamente nos cabos com tensão de isolação superior a 3,6/6kV e deve ser constituída por fitas de papel semicondutor aplicadas sobre a isolação revestindo-a completamente.

- Capa metálica

Deve estar presente para manter a estanqueidade ( evita a saída do material impregnante) Deve ser constituída de chumbo com espessura uniforme isenta de fissuras ou qualquer outro tipo de defeito

- Capa de separação

Os cabos padronizados possuem uma capa entre a capa metálica e a armação que é constituída por um composto termoplástico do tipo ST1 ou ST2, sendo o segundo obrigatório quando a temperatura máxima admissível do condutor em regime permanente é de 90 °C.

- Armação

Nos cabos instalados diretamente aterrados a ELETROPAULO padronizou a utilização de uma armação metálica constituída de fitas planas de aço de baixo carbono recozidas e revestidas de uma camada contínua e uniforme de zinco.

- Cobertura

Cobertura de composto termoplástico (PVC)(ST1 e ST2) com uma temperatura de regime de até 90°C.

- Identificação dos condutores isolados

Nos cabos multipolares, os condutores isolados, anteriormente à reunião devem ter uma identificação das fases por meio de uma fita de papel colorida aplicada sobre a isolação, obedecendo as seguintes cores:

- Vermelho, natural e azul para três condutores;
- Vermelho, natural, preto e azul para quatro condutores;

Por fora os cabos devem apresentar:

- nome do fabricante;
- número de secção dos condutores;
- tensão de isolamento;
- tipo de isolamento;

- ano de fabricação;
  - identificação das fases (1,2,3) para os cabos multiplexados.
- 
- Queima livre:

Este tipo de cabo é projetado para operar com queima livre, através da qual o ponto de defeito é isolado. Isto implica um seccionamento do cabo que continua com os dois trechos adjacentes alimentados pelas outras extremidades e, em consequência a alimentação dos consumidores não sofre descontinuidade.
  - Cabos padronizados
    - circuito em 20 kV ( reticulados da área central com exceção Riachuelo)
      - \* 3 x 1 x 2 / DAWG – LC: 323.879.1 – Cabo não armado, condutor de cobre, 25 kV, instalados em dutos utilizados nos ramais de circuitos primários
      - \* 3 x 500MCM – LC : 323.863.6 – cabo não armado, condutor de cobre, 25kV-NI, instalado em dutos, utilizado nos troncos dos circuitos primários.
      - \* 3 x 500MCM – LC: 323.882.2 – cabo não armado, condutor de cobre , 25kV, utilizado nos troncos dos circuitos da ETD Thomas Jeferson.
      - \* 3 x 1 x300mm<sup>2</sup> - LC:323.187.0 – cabo não armado, condutor de cobre 20/35kV, instalado no túnel da saída da ETD Brigadeiro, utilizado nos troncos dos circuitos primários.

### 5.3.2 Cabo a Gás

Devido as dificuldades encontradas no passado, a ELETROPAULO não têm utilizado este tipo de cabo nos reticulados subterrâneos Estas dificuldades foram geradas pela migração do composto de impregnação e consequente formação de “espaços vazios” na parte alta da linha e pressão excessiva na

parte baixa da linha ocasionando defeitos. Hoje, com a tecnologia dos cabos com isolação extrudada a ELETROPAULO dificilmente usará este tipo de cabo.

O cabo a gás é isolado com papel impregnado blindado com fitas metálicas e com capa de chumbo. O gás é distribuído em toda a extensão do cabo através de dois dutos formados por espirais metálicas, além de outro que serve para pôr em comunicação as luvas de emendas com o reservatório de gás. A finalidade do gás é evitar a formação de espaços vazios no interior do cabo e a blindagem contribui para manter a impregnação. O vazamento de gás é acusado por um dispositivo automático de alarme que opera quando a pressão do gás desce abaixo de um valor admissível.

Este tipo de cabo foi instalado em trechos de circuitos localizados na Av. Brigadeiro Luiz Antônio, Rua São Joaquim e Rua Tabatiguera.

Os cabos a gás utilizados pela ELETROPAULO são tripolares 25kV-NI, constituídos com três condutores de cobre setoriais, bitola 500MCM compactados. O gás utilizado nos cabos em apreço é o Nitrogênio. Abaixo podemos observar um corte transversal ilustrativo de um cabo a gás.

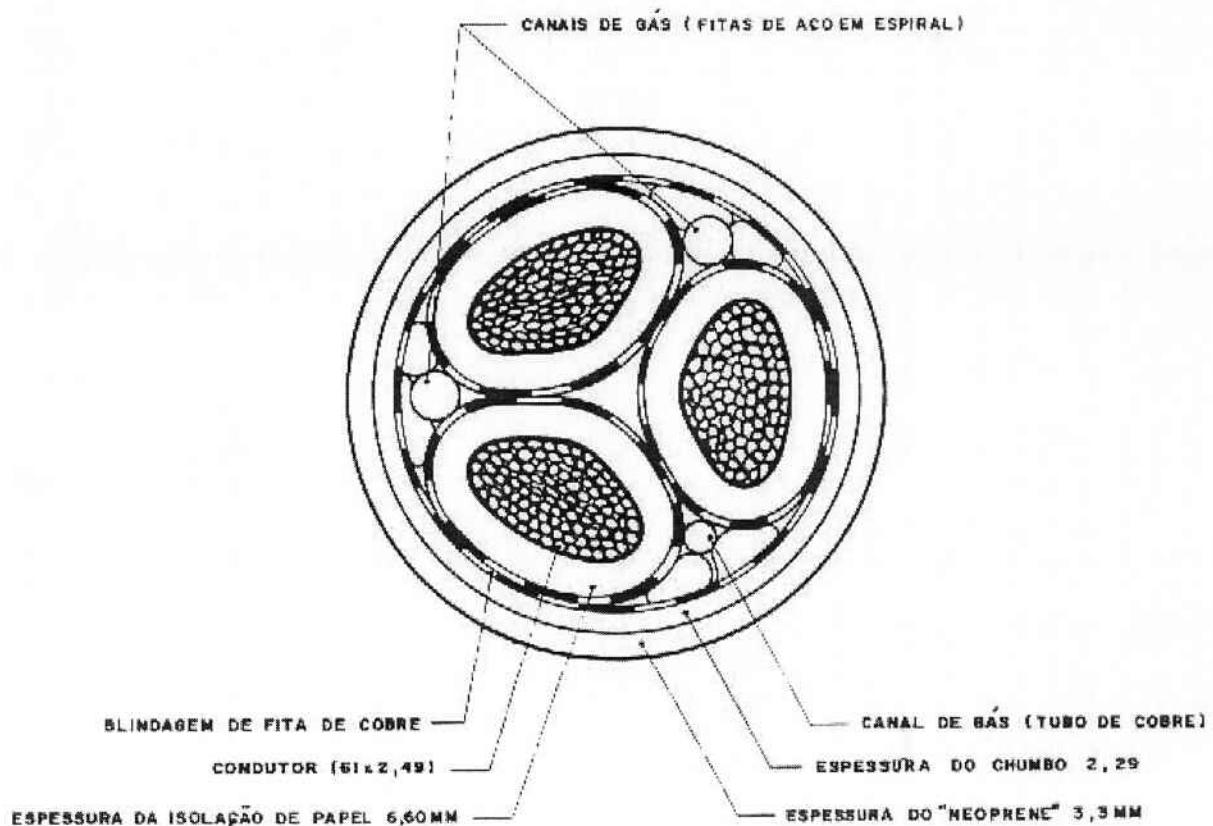
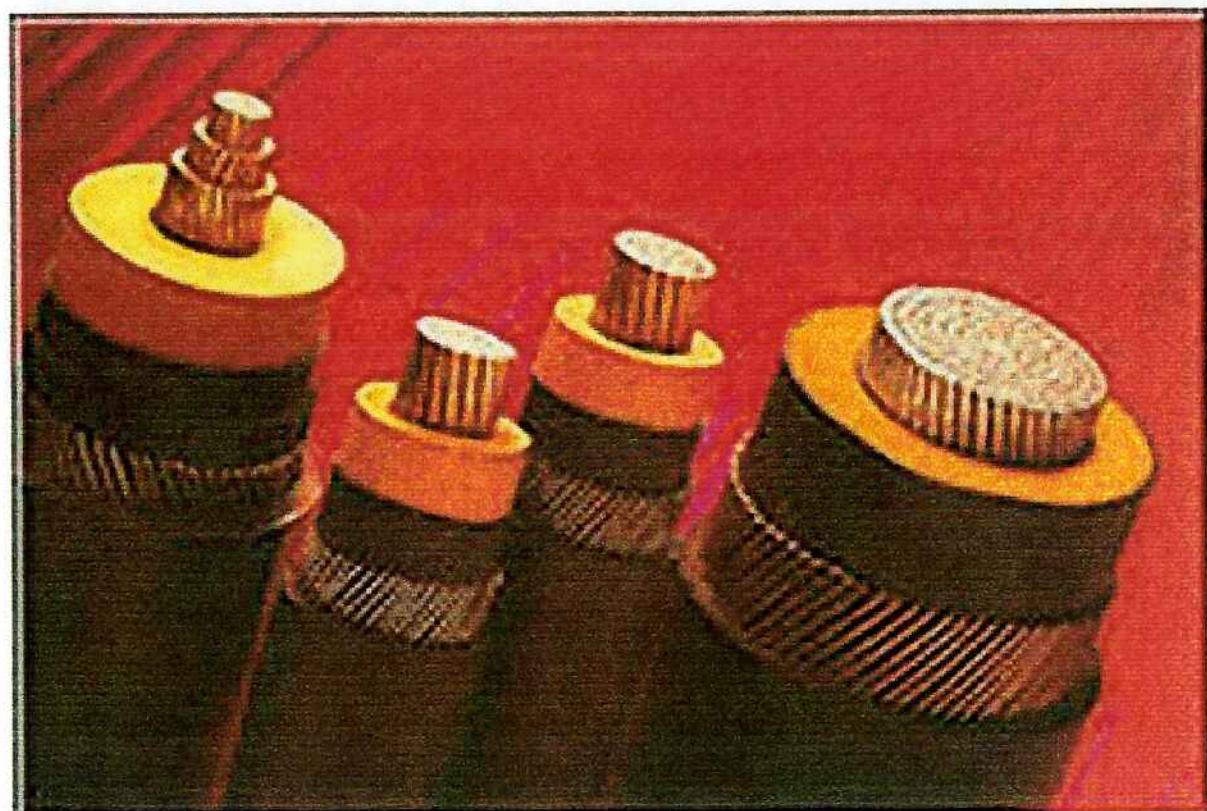


Figura 4 – Corte transversal de um cabo a gás

### 5.3.3 Cabos com isolação extrudada

Estes cabos estão sendo utilizados nas novas instalações da ELETROPAULO sendo que somente nas regiões dos reticulados centrais da cidade de São Paulo os mesmos não são considerados.



**Figura 5 – Exemplos de Cabo com isolação Extrudada**

- **Condições operativas**

As máximas temperaturas admissíveis nos condutores para os cabos com isolação sólida extrudada de EPR ou XLPE consideradas nos cabos padronizados pela ELETROPAULO, estão apresentados a seguir:

- regime permanente – 90°C;
- regime de sobrecarga – 130°C. A operação em sobrecarga não deve ultrapassar de 100 horas por ano segundo as normas NBR 6251, nem 500 horas durante toda a vida do cabo;

- em regime de curto circuito – 250°C com tempo máximo de 5 segundos.
- Condutor
  - Os condutores utilizados por estes cabos são predominantemente, condutores de cobre de seção circular, de formação simples, compactada. Os fios podem ser nus ou com revestimento metálico. Fios de cobre sem revestimento podem ser utilizados desde que os fabricantes garantam que as características mecânicas e elétricas dos cabos não sejam comprometidas.
  - A ELETROPAULO procurou empregar, tanto nos circuitos primários quanto nos secundários, cabos com seção circular compactada. Hoje pode-se observar este tipo de configuração para todos os tipos de cabos padronizados pela ELETROPAULO.
- Separador
  - Para cabos sem blindagem do condutor somente é obrigatório separador, entre o condutor e a isolação, para evitar a ocorrência de :
    - penetração acentuada da isolação sobre o condutor que dificulte a remoção da mesma;
    - interação química que possa provocar corrosão do condutor, aceleração de envelhecimento da isolação ou aderência entre condutor e isolação.
- Blindagem do condutor:
  - A blindagem do condutor deve ser empregada obrigatoriamente nos cabos com tensões de isolamento acima de 3,6/6kV, quando isolados com PVC ou EPR e acima de 1,8/3kV, quando isolados com PE ou XLPE a ser constituída por camada extrudada de composto termofixo. A espessura mínima da blindagem semicondutora, em um ponto qualquer é 0,4mm.
- Isolação

Deve-se utilizar isolação de EPR ou XLPE para utilização nos circuitos de média tensão e XLPE para utilização nos circuitos de baixa tensão podendo o cabo apresentar ou não cobertura. A definição para a alternativa a ser considerada, para ambos os casos de tensão é baseada somente no custo financeiro. Entretanto, cabos para algumas instalações específicas podem considerar premissas diferentes das anteriores, sendo que isto é exemplificado pelos cabos de baixa tensão utilizados nos barramentos ( câmaras e poços) que utilizam isolação EPR. Isto porque nas áreas de barramento os cabos geralmente são de grande bitola e qualquer ganho na flexibilidade é importante.

- **Blindagem da isolação**

A blindagem da isolação deve ser empregada, nos cabos com isolamento acima de 3,6/6kV, quando isolados com PVC ou EPR, e acima de 1,8/3kV, quando isolado com PE ou XLPE. Esta deve ser constituída de uma camada semicondutora extrudada e uma parte metálica.

A camada semicondutora extrudada deve apresentar uma espessura mínima igual a 0,4mm. Para os cabos com tensões de isolamento iguais ou superiores a 8,7/15kV, a blindagem do condutor, a isolação e a parte semicondutora da blindagem da isolação devem ser extrudadas simultaneamente (tríplice extrusão).

A parte metálica da blindagem da isolação serve como caminho de retorno para as correntes de curto circuito, sendo indispensável dimensionar o cabo de acordo com esta variável. Além disso deve ser constituída de uma camada concêntrica de fios de cobre amarrada ou não por fitas de cobre. Os fios e as fitas quando utilizadas, de cobre devem ser revestidos.

- **Reunião de cabos multipolares**

A ELETROPAULO somente emprega cabos multipolares com isolação sólida extrudada em circuitos de baixa tensão para utilizações específicas tais como, ligações de pequenos consumidores ou de cabos em fachadas.

- Capa interna

A capa interna, assim como os enchimentos, devem ser constituídos por materiais não higroscópicos, adequados à temperatura de operação do cabo e compatíveis com o material de isolação. Para os cabos multipolares com armação metálica padronizados pela ELETROPAULO a capa interna deve ser extrudada e espessura nominal de 1mm. Para os cabos multipolares sem armação metálica padronizados pela ELETROPAULO (baixa tensão) não se considera a capa interna , havendo apenas uma fita têxtil emborrachada de 0,4mm.

- Armação metálica

A armação metálica nos cabos seco padronizados pela ELETROPAULO somente é considerada para alguns cabos de baixa tensão, que são instalados diretamente aterrados e utilizados para alimentação de pequenos consumidores.

- Cobertura

Os cabos utilizdos pela ELETROPAULO utilizam coberturas de PVC do tipo ST2, para cabos de construção não bloqueada e cobertura de polietileno para cabos de construção bloqueada.

- Identificação dos condutores isolados

Nos cabos multipolares, os condutores isolados, anteriormente à reunião devem ter uma identificação das fases por meio de uma fita de papel colorida aplicada sobre a isolação, obedecendo a seguinte ordem:

- vermelho, natural e azul para três condutores;
- vermelho, natural, preto e azul para qutro condutores;

Externamente os cabos devem ser marcados convenientemente com os seguintes dizeres:

- nome do fabricante;
- número e seção dos condutores;

- tensão de isolamento;
  - ano de fabricação ;
  - identificação das fases(1,2,3) para os cabos multiplexados ( para cabos quadriplexados um dos cabos não deve apresentar número de identificação).
- 
- Curva de danificação dos cabos de baixa tensão
- O esquema para proteção contra sobrecorrentes dos cabos secundários com condutores de cobre e isolação sólida extrudada, baseia-se em limitadores de corrente. Estes limitadores de corrente devem operar anteriormente à danificação dos cabos e para tanto torna-se necessário conhecer a curva de danificação dos cabos, apresentada na **figura 6**. Também observamos na figura 6 as curvas de operação dos limitadores de corrente que mostram a corrente máxima que deve ser acionada o sistema de proteção do cabo.

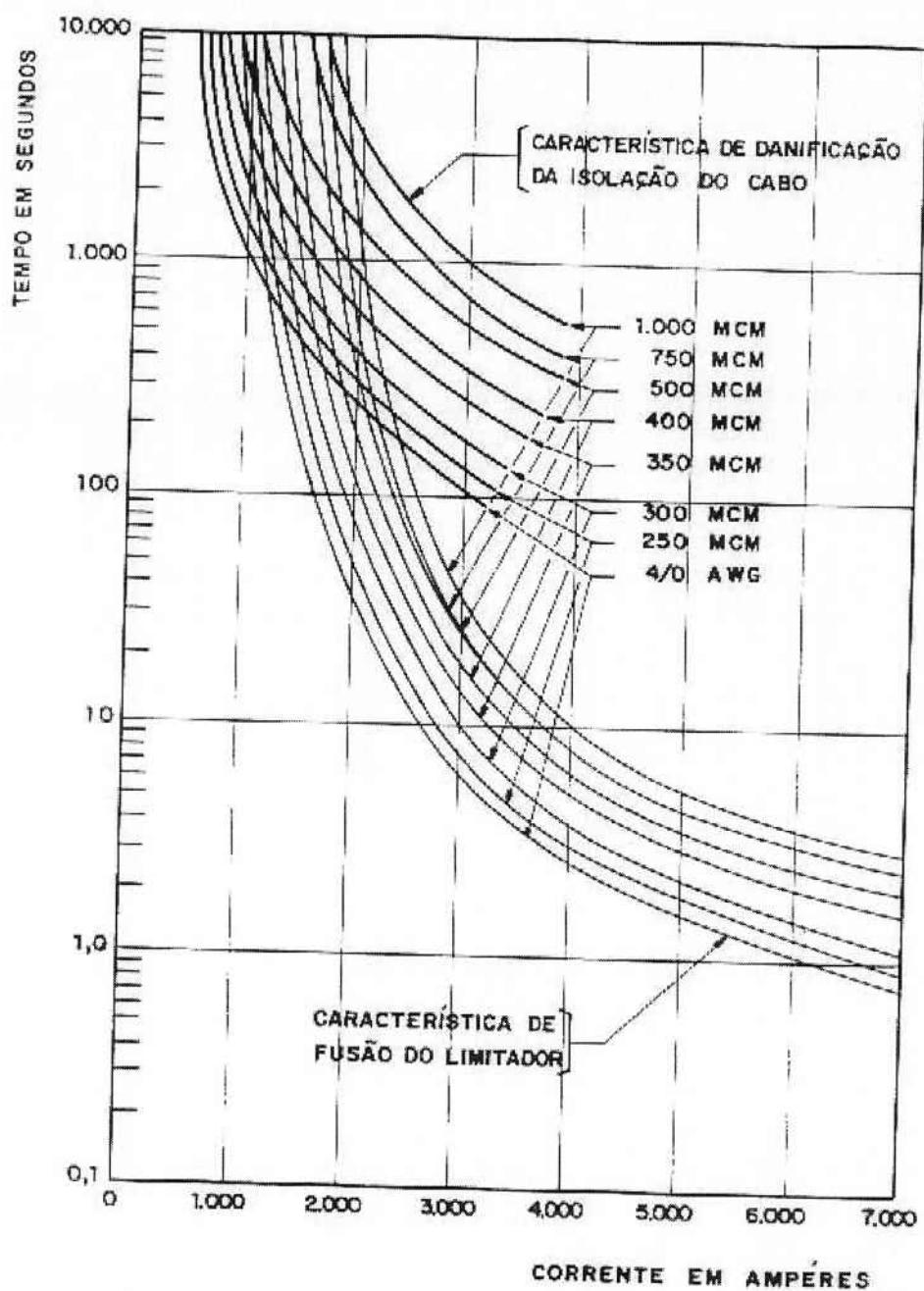


Figura 6 – Curva de danificação dos cabos de baixa tensão

- Cabos extrudados padronizados

Podemos observar nos reticulados subterrâneos um grande número de cabos com isolação extrudada

- Circuitos secundários: Não entraremos nos detalhes destes tipos de cabos, já que o estudo de localização de defeitos em linhas subterrâneas se restringe a circuitos primários, onde a localização é árdua devido a complexidade e dimensão dos reticulados.

Vale apenas citar que encontramos uma série de cabos com isolação extrudada em circuitos secundários, alimentando saídas de transformadores, poços de inspeção, derivações para consumidores como bancas de jornais, caixas eletrônicos, etc..

- Circuitos primários em 3,8Kv: Não se aplicam.
- Circuitos primários em 13,2 Kv:
  - 3 x 1 x 25 mm<sup>2</sup> - Cabos com condutor de cobre, isolação EPR ou XLPE, cobertura de PVC, utilizados em Santos para alimentação de Transformadores onde há dutos抗igos que impossibilitam cabos 3 x 1 x 70 mm<sup>2</sup>.
  - 3 x 1 x 70mm<sup>2</sup> - condutor de cobre, isolação EPR ou XLPE e cobertura de PVC, utilizados na alimentação de Transformadores de câmaras em circuitos radiais e em sistemas subterrâneos.
  - 3 x 1 x 240mm<sup>2</sup> - condutor de cobre, isolação EPR ou XLPE e cobertura de PVC utilizados nas saídas das estações transformadoras que alimentam redes aéreas em 13,2 Kv ou em redes subterrâneas alimentando diversas cargas.
- Circuitos primários em 20 Kv ou 23 Kv -
  - 3 x 1 x 240mm<sup>2</sup> - condutor de cobre, isolação EPR e cobertura de PVC, utilizados em saídas das estações transformadoras de distribuição de redes aéreas de 23 Kv.
  - 3 x 1 x 70mm<sup>2</sup>, 3 x 1 x 400mm<sup>2</sup> - Ambos com condutor de cobre, isolação EPR e cobertura de PVC, utilizados nos ramais dos circuitos primários do reticulado Bandeirantes.
- Circuitos primários em 34,5 Kv

- 3 x 1 x 70mm<sup>2</sup> - com condutor de cobre, isolação EPR e cobertura de PVC, utilizados nos ramais dos circuitos subterrâneos em 34,5 Kv.
- 3 x 1 x 240mm<sup>2</sup> - com condutor de cobre, isolação EPR e cobertura de PVC, utilizados nos troncos dos circuitos subterrâneos em 34,5 Kv, exceto BAN-305 e BAN 306 que alimentam o Hospital das Clínicas.
- 
- Dois exemplos de Cabos ( fabricados pela Pirelli ) com isolação extrudada assim como suas descrições

Os cabos de potência em média tensão da Pirelli são produzidos com grande tecnologia de ponta, que inclui uma linha de preparação de compostos com elevadas condições de limpeza, extrusoras contínuas em catenária com o processo de tríplice extrusão e um rigoroso sistema de garantia de qualidade que pôde ser observada em uma visita ao Site de Cabos e Fios Elétricos da Pirelli localizado em Santo André.. Isso resulta em um produto de altíssima confiabilidade, ideal para redes de distribuição até 35 kV.

#### 1- Cabo Voltalene ecolene fx3Uso Geral - NBR 7287 - 6 até 20kV

Os cabos de potência de média tensão (6 até 20kV) da Pirelli são fabricados com XLPE (polietileno reticulado) de altíssima pureza.. As linhas de extrusão contínua em catenária possibilitam a tríplice extrusão simultânea da blindagem do condutor, isolação e blindagem da isolação. Isso permite uma perfeita aderência entre as três camadas, resultando em um cabo de alta confiabilidade. O composto de PVC isento de chumbo, utilizado na cobertura, confere ao CABO VOLTALENE ECOLENE FX-3 a característica de resistência à chama e auto-extinção

- Descrição( de acordo com a **figura 7** ) :

**(1) CONDUTOR:**

Metal: fio de cobre nu, têmpora mole.

Forma: redonda e compacta.

Encordoamento: classe 2.

**(2) BLINDAGEM DO CONDUTOR:**

Camada de composto semicondutor.

**(3) ISOLAÇÃO:**

Composto termofixo XLPE.

**(4) BLINDAGEM DA ISOLAÇÃO:**

(4.1) Camada de composto semicondutor;

(4.2) Fios de cobre nu.

**(5) ENCHIMENTO CENTRAL**

**(6) FITILHO DE POLIESTER PARA IDENTIFICAÇÃO**

**(7) ENCHIMENTO EXTRUDADO OU PREFORMADO**

**(8) COBERTURA:**

Composto termoplástico de PVC SEM

**IDENTIFICAÇÃO:**

Cabo unipolar: cobertura preta.

Cabo tripolar: veias com isolações branca, preta e vermelha.

**TEMPERATURAS MÁXIMAS DO CONDUTOR:**

90 °C em serviço contínuo, 130 °C em sobrecarga e 250 °C em curto-circuito.

**NORMAS APLICÁVEIS:**

NBR 6880-Condutores de cobre para cabos isolados - padronização;

NBR 7286-Cabos de potência com isolação sólida extrudada de borracha etileno-propileno (EPR) para tensões de 1 a 35kV - especificação;

NBR 6244-Ensaio de resistência à chama para fios e cabos elétricos - método de ensaio.

#### APLICAÇÕES TÍPICAS:

Redes de distribuição subterrâneas e/ou aéreas em sistemas de concessionárias, indústrias, ligações de prédios residenciais e comerciais.

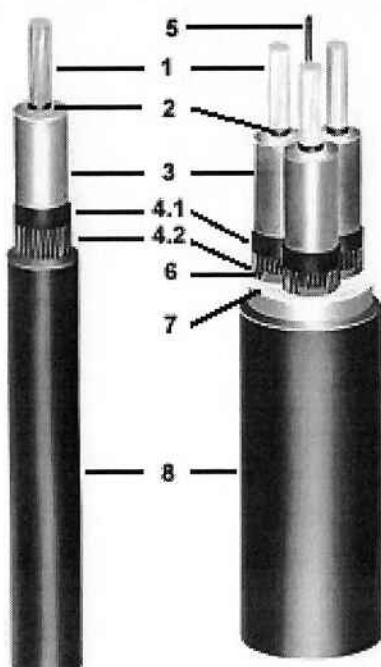


Figura 7

## 2- Cabo Eprotoanax Ecofix Fx3

Os cabos de potência de média tensão (6 até 35kV) da Pirelli são fabricados com EPR (borracha etileno-propileno) de altíssima pureza. As linhas de extrusão contínua em catenária possibilitam a tríplice extrusão simultânea da blindagem do condutor, isolação e blindagem da isolação. Isso permite uma perfeita aderência entre as três camadas, resultando em um cabo de elevada confiabilidade. O composto de PVC isento de chumbo, utilizado na cobertura, confere ao CABO EPROTENAX ECOFIX FX-3 a característica de resistência à chama e auto-extinção.

- Descrição ( de acordo com a **figura 8** )

### (1) CONDUTOR:

Metal: fio de cobre nu, têmpora mole.

Forma: redonda e compacta.

Encordoamento: classe 2.

### (2) BLINDAGEM DO CONDUTOR:

Camada de composto semicondutor.

### (3) ISOLAÇÃO:

Composto termofixo de borracha EPR.

### (4) BLINDAGEM DA ISOLAÇÃO:

(4.1) Camada de composto semicondutor

(4.2) Fios de cobre nu.

### (5) ENCHIMENTO CENTRAL

### (6) FITILHO DE POLIESTER PARA IDENTIFICAÇÃO

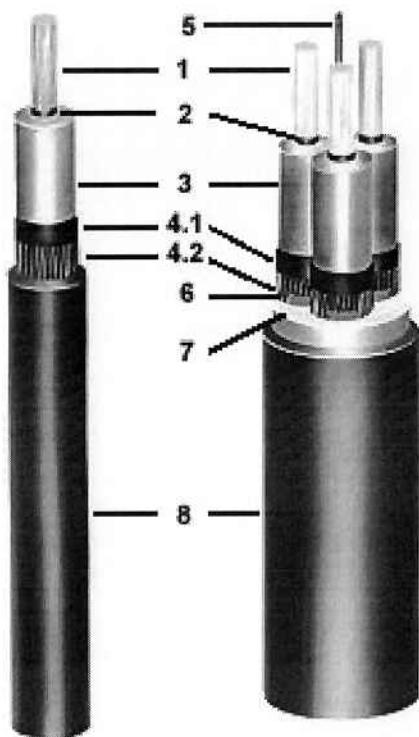
### (7) ENCHIMENTO EXTRUDADO OU PREFORMADO

### (8) COBERTURA:

Composto termoplástico de PVC SEM CHUMBO resistente à chama.

**APLICAÇÕES TÍPICAS:**

Redes de distribuição subterrâneas e/ou aéreas em sistemas de concessionárias, indústrias, ligações de prédios residenciais e comerciais.

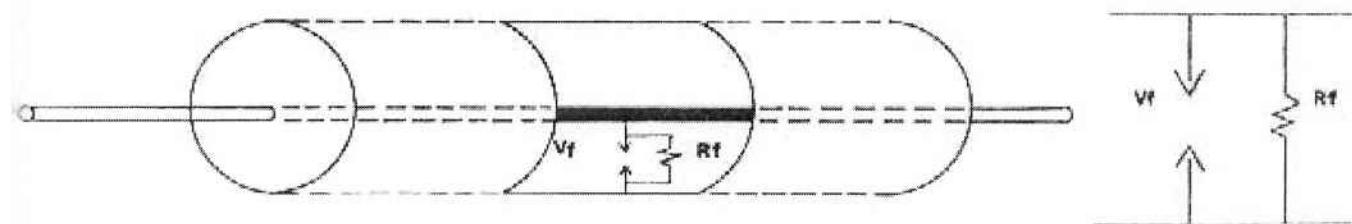


**Figura 8**

## 6 ) O Processo da Falha em um cabo

Para compreender como as falhas são encontradas, é necessário discutir as propriedades do processo da avaria. Todas as falhas podem ser representadas eletricamente por uma abertura desviada por uma resistência. Embora o circuito elétrico seja bastante simples, as grandezas podem variar em uma larga faixa de valores , a resistência pode variar de baixos valores a muitos megohms, e a tensão de avaria da abertura que varia de zero a muitos milhares dos volts.

Modelar o cabo com falta é muito importante para o estudo da localização de defeitos. Quando ocorre uma falha em um cabo , algumas parcelas do cabo são destruídas ( Este é local exato do defeito – **Figura 9** ) . Dependendo do tipo do cabo e a corrente de falha disponível no circuito, os danos no local da falha podem variar de pequenos danos locais a danos que comprometem o circuito inteiro .



**Figura 9 – Modelo do cabo em falta**

A classificação tradicional das falhas em resistência elevada ou baixa descreve somente a falha parcialmente. A aplicação bem sucedida de métodos de localização de falhas requer uma definição completa que descreva o estado dos condutores do cabo assim como a impedância da falha . Um esquema de classificação seria :

- Falha de Alta Resistência - a resistência elevada descreve o caso onde a impedância da falha é maior que 200 Ohms . Quando uma falha é de resistência elevada, o cabo suportará algumas aplicações de alta tensão antes que ocorra a falha . O cabo pode somente “prender” a tensão por uma fração de um microsegundo mas este será suficientemente longo gerar um surto transitório do tipo que pode ser útil em localizar da falha.
- Falha de Baixa Resistência - a resistência baixa descreve o caso onde a impedância da falha é menor que 200 Ohms . Quando uma falha é de resistência baixa o cabo geralmente não suportará nenhuma alta tensão. Toda a tensão aplicada é retornada imediatamente à terra e os transitórios não são gerados.
- Falha “Shunt “ - a falha Shunt descreve o caso onde o trajeto da falha é do condutor de alta tensão à terra , daqui a designação como uma falha da derivação. Frequentemente o condutores centrais e os neutros ficam intatos.
- Falha série - a falha série descreve o caso onde o condutor central , os neutros ou ambos são abertos.

Quando a tensão é aplicada a um cabo com falta , a parcela danificada do cabo começa a conduzir. O processo da condução é aleatório e depende da geometria da parcela com falta do cabo assim como das propriedades dos materiais presentes no local da falha. No caso da falha Shunt ou falha série o processo da condução não começa imediatamente; há um retardo de tempo estatístico. Este retardo de tempo pode se estender de dez nanosegundos a muitos microsegundos e depende muito da tensão excedente aplicada à abertura equivalente que modela a falha. Se o instrumento usar o tempo entre a aplicação da tensão e o tempo em que o transitório da avaria será observado primeiramente para determinar a distância à falha, os erros podem ser enormes .

Ocorre um outro fenômeno menos compreendido também. Se o tempo de subida para a alta tensão for demasiado lenta, a falha progride gradualmente em condução. Neste caso, um transitório da falha é gerado ainda, mas uma avaria não é observada de maneira ideal . A implicação deste processo lento da condução é que o transitório da falha não contém muito da energia de alta freqüência

necessária para a localização eficiente de uma falha. Da evidência empírica, está claro que como o tempo de subida da tensão da excitação excede o retardo de tempo estatística da avaria, há pouco efeito no índice da freqüência do transitório da falha.

Um outro fator importante que influencia a posição de falha é a impedância da falha. Quando a avaria ocorre, um arco no local da falha cria uma baixa impedância nesse ponto. Diversos ampéres devem passar através da falha para fazer sua impedância baixa o bastante para ser um refletor eficaz. Toda a corrente adicional acima deste nível abaixa a impedância porque a impedância do arco é uma função exponencial diminuindo com a corrente que o atravessa. A implicação prática é que a fonte de potência deve poder fornecer, no mínimo, a corrente suficiente no tempo requerido.

A análise dos transitórios de uma falha em uma localização de falha depende do fato que o arco tem uma impedância muito menor do que a impedância característica do cabo sob teste e que esta baixa impedância é mantida por um tempo adequado (menos do que 1 ms). Nos métodos de localização que utilizam de surtos, devemos supor que a impedância da falha é temporariamente próxima de zero e que o transitório reflete repetidamente para a frente e para trás entre a falha e a fonte de alimentação que introduz um arco no cabo com falha. Sustentar uma impedância baixa na falha é também fundamental ao método da reflexão do arco. Neste caso supõe-se que a impedância da falha está temporariamente perto de zero e que o pulso de TDR (Time Domain Reflectometry) reflete de volta da falha enquanto a fonte de alimentação usada induzir o arco na falha sustenta a impedância baixa por dez milissegundos.

Um método moderno de se localizar falhas é estabelecer em primeiro lugar uma área próxima ao defeito e em seguida obter de forma precisa onde realmente está. Temos tecnologias clássicas e modernas que serão detalhadas neste estudo. Utilizando uma boa combinação dos aparelhos aproveitando as qualidades de cada um deles, podemos confirmar precisamente onde está a falha, ou seja não existe nenhum método universal utilizado para qualquer tipo de falha. Por isso é imprescindível conhecermos todos os tipos de cabos e métodos possíveis de uma dada instalação.

O cuidado excessivo com a segurança também é fator indispensável para a localização de defeitos em linhas de distribuição subterrânea. O uso de equipamentos pode ser perigoso se o cabo defeituoso está exposto a gases inflamáveis. Cada equipamento deve estar devidamente aterrado, caso contrário aumenta-se muito o risco de acidentes no trabalho.

## 7. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

### 7.1 Métodos Clássicos de localização de defeitos

#### 7.1.1 Pontes de corrente contínua

##### 7.1.1.1.Ponte de Wheatstone

É o método potenciométrico mais simples para se conhecer a resistência de um condutor. A resistência do cabo é obtida em comparação com resistências já conhecidas.

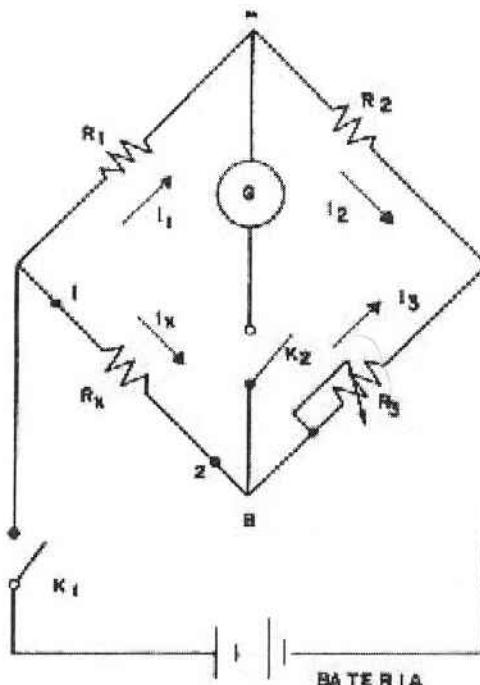


Figura 10 - Ponte de Wheatstone

Temos  $R_1$  e  $R_2$  fixas  $R_x$  desconhecida e  $R_3$  é ajustável até o galvâmetro indicar zero. Daí temos que  $R_1 \times R_3 = R_2 \times R_x$ .

#### 7.1.1.2. Ponte de Murray

Utiliza um cursor deslizante sobre fio, oferecendo um meio muito conveniente para localizar terras em cabos. O condutor de retorno é CB e é idêntico à AB com exceção que o primeiro não tem defeito à terra. Os dois condutores são interligados no ponto mais distante de B, que pode estar numa caixa de desconexão. O fio cursor deslizante é ligado na outra ponta do cabo. A distância de defeito poderá ser encontrada pela relação  $l' \times (L + (L-X)) = X \times l$ , onde  $L$  é o com do cabo ( **Figura 11** ) .

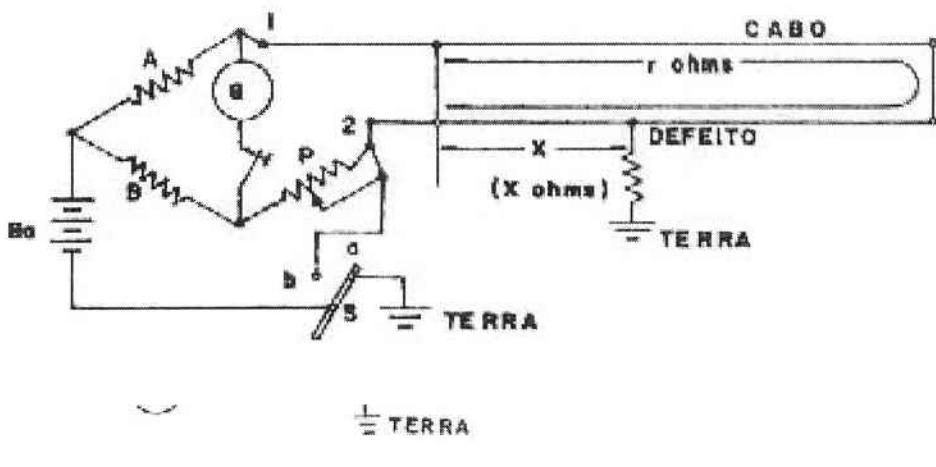
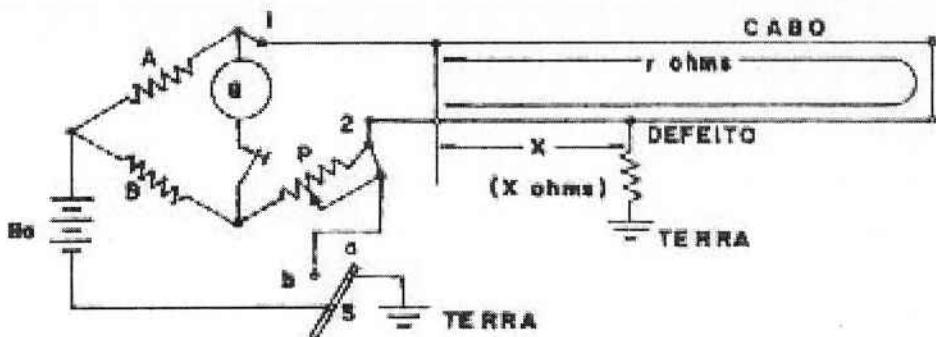


Figura 11 - Ponte de Murray

### 7.1.1.3 .Ponte de Varley

É a mais indicada para localizar defeitos de altas resistências. O galvanômetro e a bateria devem ocupar as posições mostradas de modo que a resistência do defeito não afete a medição e que as correntes espúrias não atrapalhem a medição (**Figura 12** ).



**Figura 12 - Ponte de Varley**

Seja  $X$  a dist até o defeito e  $x$  a resistênci9a até ele.

A e B são os dois braços de relação da ponte e p é o braço ajustável.

Temos:

$$x = (B \cdot r - A \cdot P) / (A + B) \quad \text{e} \quad x = r \cdot X / 2L, \text{ então,}$$

$$x = (2L \cdot B \cdot (r - A) \cdot P) / (r \cdot (A + B))$$

### **7.1.2.Pontes de Corrente alternada**

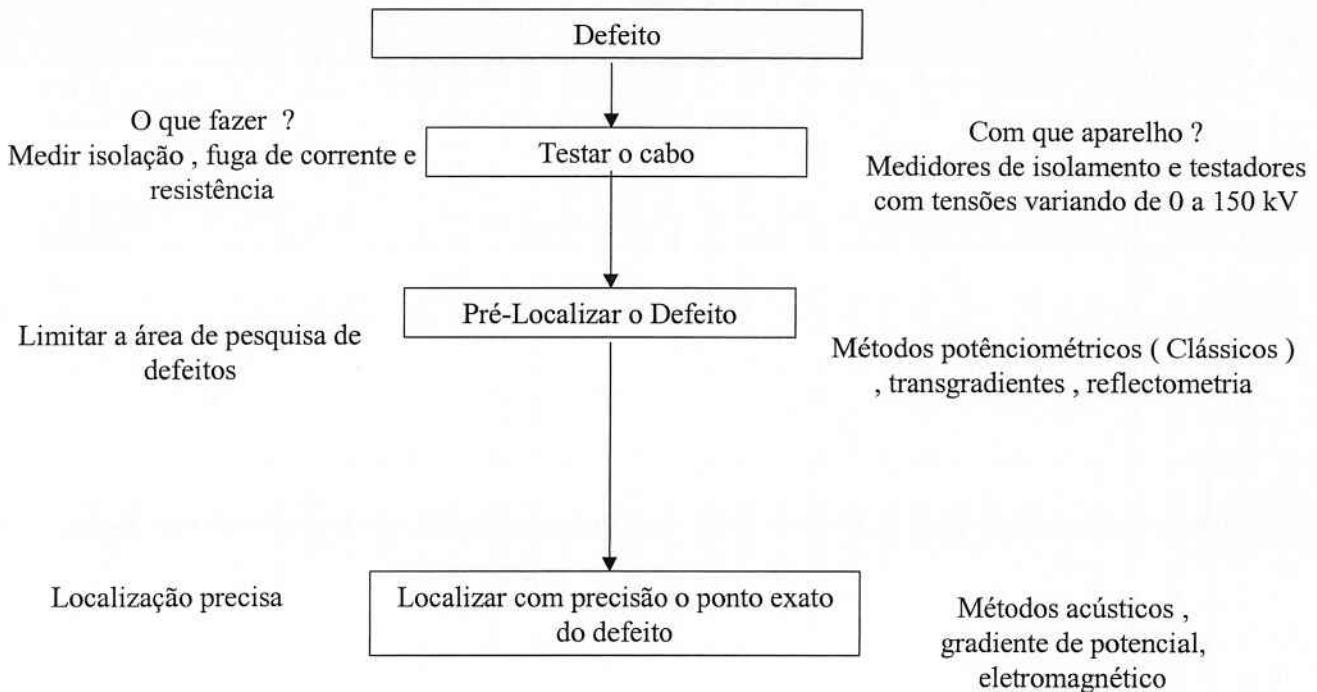
Este é o método indicado quando existe interrupção total do cabo. A distância do defeito pode ser achada através da medição de capacidade de uma fase boa e de uma ruim. Na ponte dois capacitores formam os braços adjacentes das pontes de Wheatstone. Sendo  $C_x$  a Capacitância desconhecida e  $C_s$  o capacitor padrão e  $R_1$  e  $R_2$  resistores conhecidos. Procura-se o equilíbrio moldando  $C_s$  e um dos resistores. Assim temos:

$$C_x = C_s \cdot R_2 / R_1.$$

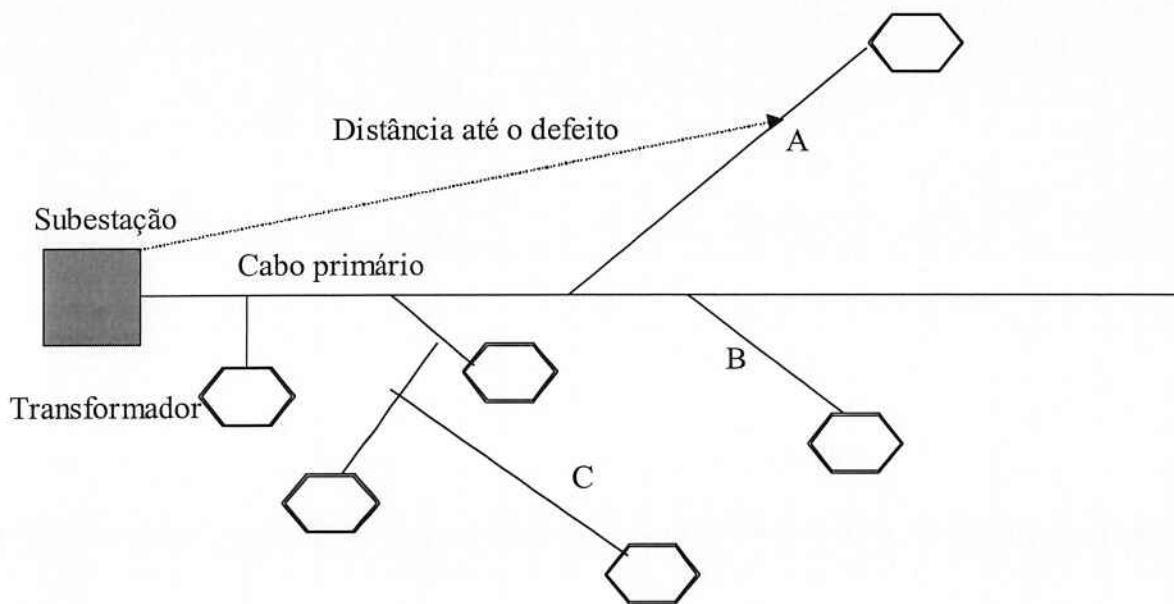
Os métodos clássicos de localização ainda são utilizados em alguns casos , embora os métodos modernos possibilitem a localização de faltas com maior facilidade , em muitos casos as empresas que possuem estes equipamentos não compram outros porque consideram os resultados obtidos com tais equipamentos satisfatórios .

### **7.2. Métodos Modernos de localização de defeitos**

Atualmente os métodos de localização de defeitos devem atender um resultado muito satisfatório quanto ao tempo e performance da localização. Sabendo os instrumentos possíveis podemos estruturar qual o método mais eficaz para cada operação e em cada caso específico .Nos métodos modernos de localização de defeitos é realizada uma pré-localização do defeito utilizando-se diversos métodos que podem determinar com precisão variável (dependendo do método utilizado) a localização do defeito .



Como podemos notar pela **figura 13** , através da pré-localização a distância até o defeito pode ser determinada , mas sua localização exata só pode ser encontrada após a utilização de métodos de localização precisa , uma vez que os defeitos podem estar nos pontos A,B ou C que estão à mesma distância do gerador .



**Figura 13**

#### 7.2.1. Método transgradiente usando fonte de corrente contínua

É usado um galvanômetro para medir curto-circuito entre condutor e capa , medindo a queda de tensão ao longo do cabo . Traçando-se um gráfico Tensão X Distância pode-se estimar onde está o defeito. A pré localização em sistemas com múltiplas derivações, se tornam difíceis para métodos de reflexão de pulso, sendo neste caso, interessante utilizar o método descrito abaixo:

Uma corrente de grande valor deve suprir o curto-circuito, sendo que esta corrente deverá ser mantida constante durante todo ensaio. Em sucessivas seções dos cabos, a alta corrente provoca queda de tensão, a qual deve ser mantida nas derivações, permitindo a localização da seção onde se encontra o defeito.

### **7.2.2. Método transgradiente usando fonte de corrente alternada.**

O problema de se localizar o pré defeito em cabos reticulados, quando o consumidor não pode ser desligado é algo bastante preocupante. Nestes casos o método de limpar os cabos não deve ser empregado devido às cargas dos consumidores estarem em paralelo. Além disso, os defeitos do tipo que se queimam e em seguida se isolam podem permanecer por um longo tempo e somente após uma medição de corrente os apontam.

Em algumas ocasiões o método “Cort e Teste” vem sendo utilizado, porém causa uma grande perda de tempo e dinheiro.

O método transgradiente de corrente alternada, faz uso da moderna técnica de armazenamento digital de informações, e o instrumento consta de uma caixa de memória que regista a forma de onda da voltagem de alimentação nos últimos dez ciclos. Normalmente são utilizados três instrumentos um na ponta outro no meio e outro no fim. A fase de defeito é regenerada através de um fusível ou do disjuntor. Quando a falha ocorre novamente, cada aparelho memorizará as últimas dez formas de onda, antes da interrupção.

As caixas de memória, serão em seguida investigadas com a ajuda de um osciloscópio e as características das tensões serão plotadas em um gráfico e as depressões na voltagem serão expressas em pontos idênticos no mesmo período.

O método é eficaz mesmo para defeitos transitórios e o que é melhor, causa o mínimo de perturbação para o sistema. A maior vantagem deste método é que não há a necessidade de desconectar os traços ao longo das alimentadoras, nem tampouco as cargas dos consumidores.

### 7.2.3. Reflectometria

O método da reflectometria na localização de defeito em cabos, tem localizado com sucesso defeitos em cabos subterrâneos com até 20 Km de comprimento e tem sido usado para localizar defeitos em cabos piloto de telefone, médias e altas tensões e linhas aéreas. Este método também pode ser utilizado com sistemas com derivações, mas neste caso um considerável conhecimento e malícia na interpretação do reflectograma são necessários, devido às múltiplas reflexões nos Têes de conexão. Trata-se de um método onde a localização de defeitos em linhas reticuladas requer experiência do operador.

Um pulso de corrente contínua da ordem de uns 50 Volts é injetado no cabo sob teste. Este pulso viaja até que encontra um descasamento de impedância tal como uma emenda reta, uma caixa de derivação ou um circuito aberto ou um curto-círcuito. O descasamento de impedância causa a reflexão no pulso, que retorna para o final do cabo e é recebido pelo aparelho de teste.

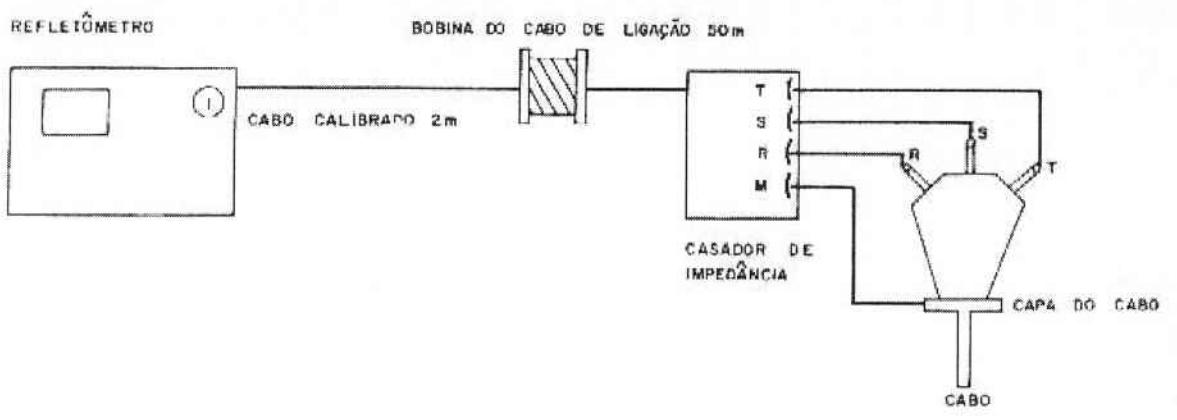
Este pulso é usado para disparar a base de tempo de um osciloscópio e, o pulso refletido é levado às placas de deflexão de um tubo de raios catódicos. As posições de descasamento, tais como emendas retas, caixas de derivação, e o defeito em si, irão aparecer em pontos onder a base de tempo é diretamente proporcional à posição linear do defeito em causa.

O tipo de defeito pode ser determinado por um pulso para cima com relação à base de tempo significando um circuito aberto, ou para baixo significando um defeito à terra.

A distância do descasamento devido ao defeito é obtida a partir do tempo decorrido e medido, em microssegundos, entre o pulso emitido e a recepção do pulso refletido. As velocidades aproximadas de propagação de tais pulsos em cabos de construções diferentes são conhecidas. Assim sendo, a distância do defeito em metros é o produto do tempo decorrido e a velocidade conhecida de propagação em metros por microssegundos. Como o pulso viaja para frente e para trás, é conveniente se usar metade do valor da velocidade de propagação. Além disso é sempre preferível se medir o tempo decorrido,

ambos ao defeito e ao lado mais distante do cabo, então permitindo que a distância seja medida, como uma parte proporcional do comprimento conhecido do cabo.

Uma vantagem do método de localização de defeitos por reflectometria é que não somente as terminações e defeitos aparecem no traçado, mas também as emendas retas, as emendas Têes de derivação,etc., e o resultado é visto de forma complicada no tubo de raios catódicos. Mesmo assim como prática e experiência, é possível se obter um resultado muito bom na cabo sob teste. . A **figura 14** mostra o esquema de ligação do reflectômetro .



**Figura 14 - Esquema de ligação do reflectômetro**

#### 7.2.3.1.Considerações práticas

- A resistência de defeito deve ser mantida à menor possível, e sempre abaixo da impedância característica do cabo a ser testado.
- A trilha de carbono do defeito deve ser cuidadosamente estabelecida e mantida estável. Os defeitos devem ser firmes de tal modo que os pulsos de baixa tensão encontrem um efetivo descasamento de impedâncias, e assim seja possível observar o ponto de defeito na tela do relectômetro.

- Casamento de impedâncias entre o gerador do reflectômetro e o cabo defeituoso deve ser feito sempre.
- Os cabos de ligação entre a saída do casador de impedâncias do reflectômetro e o cabo sob teste, devem ser de menor comprimento possível, e as suas conexões firmes e estáveis.
- Como praticamente todos os tipos existentes de reflectômetros dispõe de meios para comparar uma fase defeituosa com uma ou mais em bom estado, é sempre interessante se fazer isso. Para localizar o defeito, o método usado é o de superpor dois sinais, um da fase boa e outro da defeituosa, o que facilita sobremaneira a tarefa. Como os dois traçados são rigorosamente idênticos até o ponto de defeito, e daí divergem, esse ponto de divergência deve ser encarado como uma base para a contagem do tempo que os pulsos levam para chegar do gerador do reflectômetro na ponta do cabo, até o defeito.
- Alguns reflectômetros mais modernos dispõe do chamado método diferencial, onde é feita a compensação dos sinais das fases boa e ruim até o ponto do defeito. Todas as reflexões devidas aos Tês, emendas e derivações são canceladas através de um circuito híbrido, que só permite o aparecimento de um sinal diferente da linha horizontal de cancelamento, a partir do ponto do defeito. Essa técnica simplifica muito a pesquisa dos defeitos nos asos mais complexos, como das redes reticuladas.
- Alguns aparelhos dispõe de circuitos de memória ou de câmaras tipo “polaroide” que permitem a comparação de uma fase com ela mesma, ou seja antes e depois do defeito.
- Os mais modernos reflectômetros dispõe de microprocessadores internos que efetuam todos os cálculos necessários, e já dão a distância ao defeito em unidades de comprimento.
- Como os pulsos têm tendência de serem atenuados conforme o comprimento do cabo, para melhorar o desempenho do instrumental, é comum existir a possibilidade de se regular a largura desses pulsos do gerador.

- É extremamente importante que o envolvido esteja continuamente familiarizado com o uso dos aparelhos, pois a prática torna a pré-localização mais rápida e precisa.
- Defeitos de alta impedância ou do tipo “Flash” não podem ser localizados por essa técnica, pois a amplitude dos pulsos é insuficiente para provocar a ignição no ponto de falha. Nesse caso há a possibilidade de se usar a refletometria com a adoção de alguns artifícios.
- Para obtermos sucesso em cabos de redes reticuladas existe um artifício que ajuda muito, e pode ser utilizado desde que exista a possibilidade de se curto-circuitar as três fases à terra em pontos determinados. Essa técnica têm sido muito difundida e vêm sendo usada na ELETROPAULO com bastante êxito. Nos sistemas subterrâneos são conectadas a um cabo primário, várias câmaras transformadoras. Cada câmara transformadora com uma chave primária, que têm as três funções: ligar o trafo ao cabo alimentador, desligar completamente o cabo e aterrar as três fases do alimentador. A metodologia seguida é de ir se fechando indeterminadamente as chaves primárias para a posição “terra”, em pontos selecionados e observar na tela do reflectômetro se ainda persiste uma fase diferente das outras. As chaves a serem fechadas à terra devem estar em locais com distâncias a partir do gerador, um pouco inferior à distância calculada. Com essa pre-localização feita podemos aplicar os procedimentos de localização exata, na área em questão.

Existem algumas variações do método de reflectometria que podem ser enquadradas na mesma categoria, apesar de algumas diferenças nos métodos aplicados.

#### 7.2.3.2. Método do decaimento

No método do decaimento, existe uma fonte de tensão com uma impedância elevada em série com ela e o transitório da tensão no cabo é medido. Uma alta tensão é aplicada ao cabo que induz uma avaria na falha. Um transitório é gerado que viaje para a frente e para trás entre o local da falha e a fonte da tensão. O transitório da tensão é medido usando um dispositivo de tensão-acoplamento com uma resposta de freqüência adequada para resolver as bordas e parcelas da etapa do

transitório da tensão. A propagação do transitório ao longo dos condutores pode ser descrita em termos precisos. Uma expressão que descreve a transformada de Fourier da tensão na fonte de potência, includindo os primeiros termos refletidos N, é :

$$V_0(\omega, 0) = V_0(\omega) + V_{f\pi}(\omega) [1 + \alpha(0)] e^{-j\omega\tau_f - r(\omega)x} \sum_{k=0}^N [\alpha(0), \alpha(x)]^k e^{-r(\omega)2kx}$$

onde o termo  $g(w)$  é a constante de propagação complexa do cabo.

Algumas suposições simplificando podem ser usadas chegando-se à seguinte equação :

$$V_0(\omega, 0) = V_0(\omega) - 2V_0(\omega) e^{-j\omega\tau_f} \sum_{k=0}^N [-1]^k e^{-j\omega 2k\tau_f}$$

A transformada Inversa de Fourier dos primeiros termos é :

$$V_{\text{delay}}(t, 0) = \delta(t) - \delta(t - 2\tau_f) + \delta(t - 4\tau_f) - \dots$$

Como pode ser visto, esta é uma série alternada dos impulsos positivos e negativos deslocados de duas vezes pelo atraso de tempo à falha. Quando convoluciona-se estes termos, a tensão ideal aparece como uma onda quadrada que tem um período que é quatro vezes o tempo do atraso à falha ( **Figura 15** ).

A análise dos dados fornecidos pela reflectometria permitem realizar a pré-localização com uma precisão bastante boa variando de equipamento para equipamento. O próximo passo será a localização exata do defeito através de outros equipamentos que são utilizados efetivamente em campo. A intenção é que a pré-localização seja bastante precisa a ponto de diminuir o trabalho realizado em campo e também o tempo efetivo até a localização do defeito.

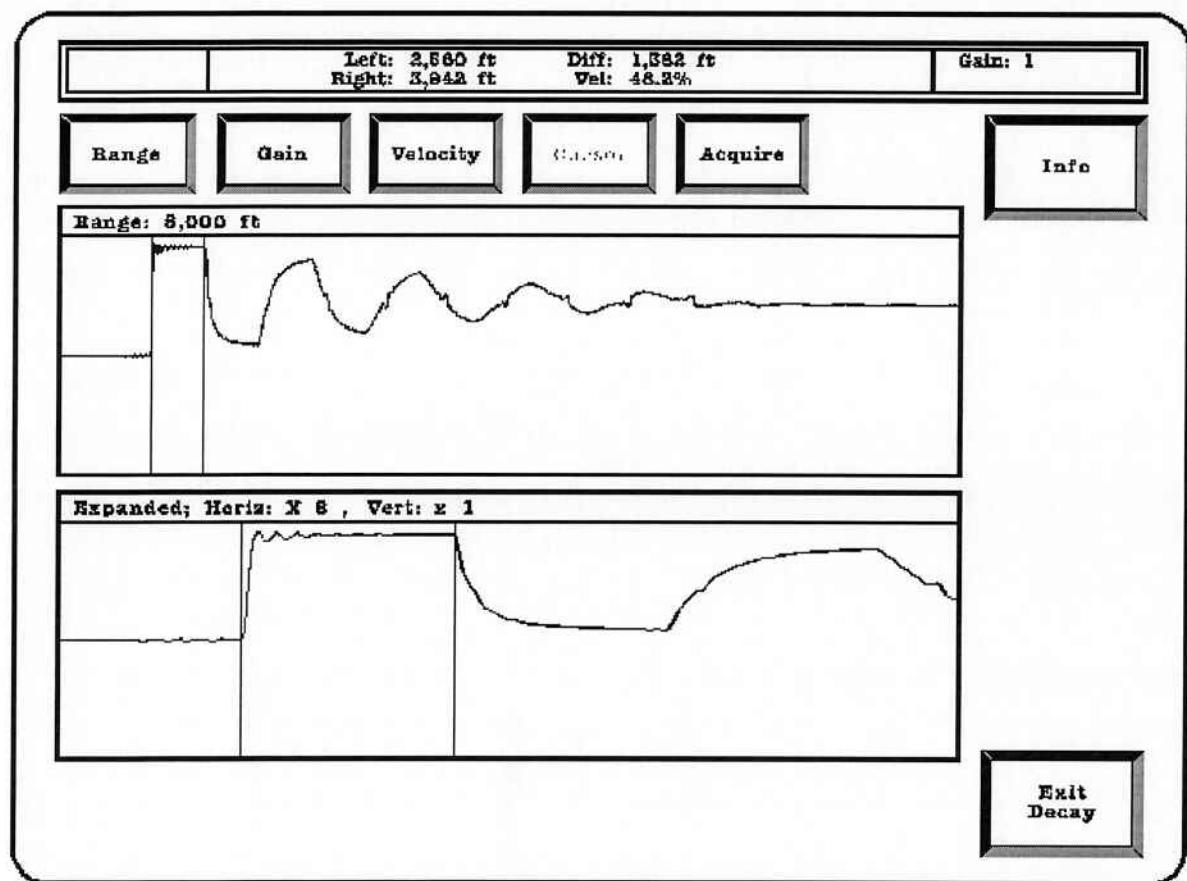


Figura 15 . Transitório de decaimento de voltagem gerado por falta em Cabo

### 7.2.3.3.Método do Impulso de Corrente

No Método do Impulso de Corrente, o gerador do impulso não tem nenhuma impedância intencional colocado em série com ele e a corrente transitória no cabo é medida. Um gerador de surto aplica uma alta tensão ao cabo sob teste que induz uma avaria no cabo. O transitório viaja para a frente e para trás entre o gerador do surto e a falha. O transitório é medido usando um transformador de corrente com uma resposta de freqüência adequada para resolver somente as bordas do transitório de corrente. Este método usa uma teoria similar àquela discutida na descrição precedente do método do decaimento. A diferença básica é que este método usa o transitório da corrente atual induzido no cabo ao invés do transitório da tensão. A expressão para o transitório da corrente é a mesma descrita previamente para o método do decaimento as tensões estiverem substituídas com as correntes e os coeficientes de reflexão da tensão estiverem substituídos com os coeficientes de reflexão das correntes. Adotando-se algumas simplificações temos a equação :

$$I_{\text{corrente}}(t, 0) = \delta(t) + \delta(t - 2\tau_f) + \delta(t - 4\tau_f) + \dots$$

Esta série de impulsos positivos é similar ao exemplo de transitório da tensão porque cada impulso é deslocado do outro duas vezes pelo atraso de tempo à falha. A diferença é quando estes termos do atraso são convolucionados da etapa, a forma de onda da corrente ideal aparecem como uma onda em forma de escada .

Para detectar o transitório de corrente , um transformador de corrente de alta freqüência é usado. Este transformador responde somente às bordas de subida da corrente. Deve-se anotar que neste caso o gerador do impulso tem uma tempo de subida rápido e a corrente da excitação será observada também na gravação do transitório ( **Figura 16** ).

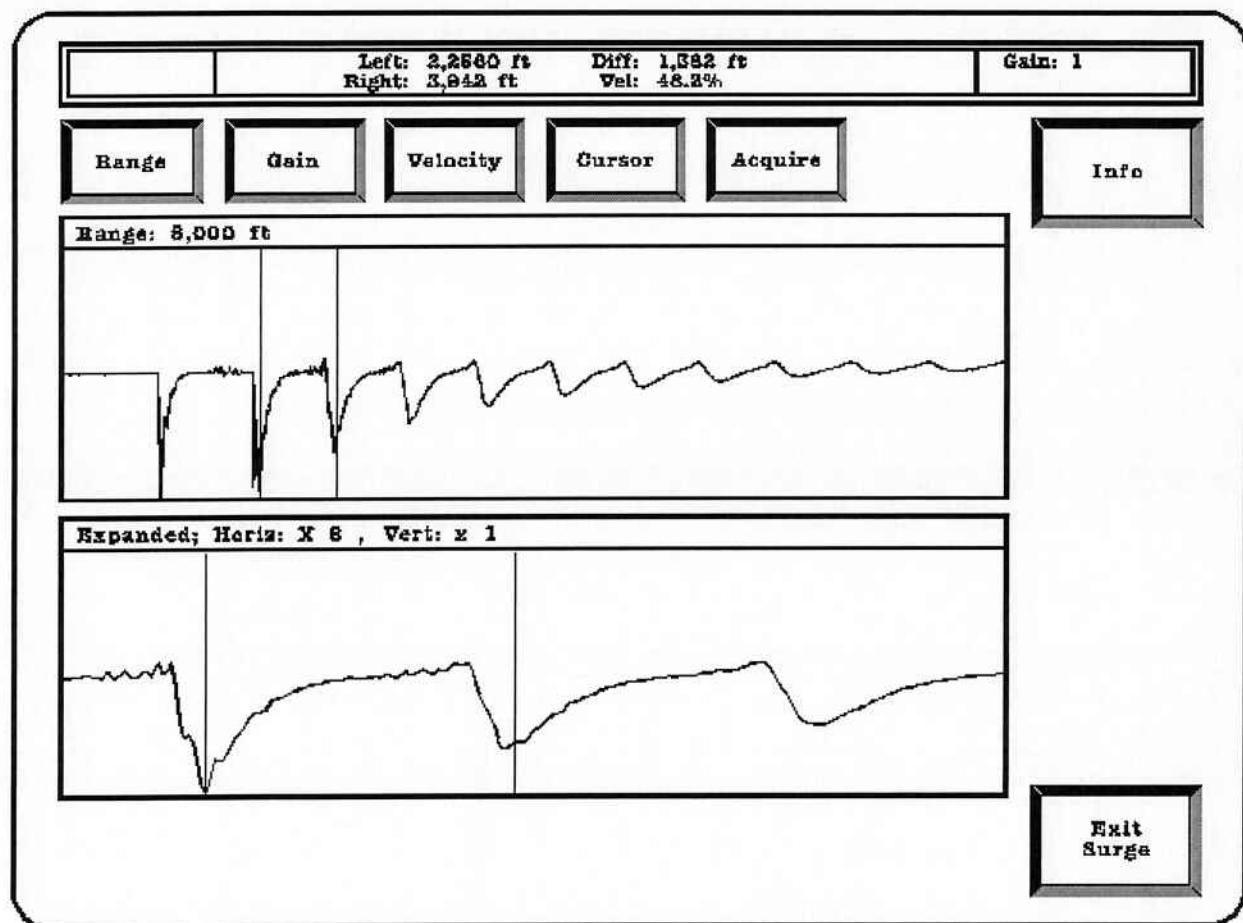


Figura 16 . Transitório de Impulso de Corrente gerado por falta em Cabo

#### 7.2.3.4. Reflectometria no Domínio do Tempo

A teoria que cerca a propagação de sinais eletromagnéticos nos cabos é muito complexa e uma explanação completa não faz parte do escopo deste projeto . Os dois aspectos mais importantes da teoria são a velocidade da propagação e a impedância característica. Quando um pulso é aplicado a um cabo, o pulso viajará ao longo dele com uma velocidade chamada a velocidade da propagação. Saber a velocidade da propagação no cabo ajuda ao operador interpretar os resultados da medida nos termos da distância à falha. Cada cabo de potência tem sua própria velocidade e os erros feitos ao supor uma velocidade para um cabo traduzirão, na proporção direta, em erros em encontrar a falha. A outra

propriedade importante de um cabo é a sua impedância característica . Quando um pulso de tensão é aplicado a um cabo, viajará ao longo dele. Junto com o pulso de tensão haverá um pulso de corrente correspondente que se propague também ao longo do cabo na mesma velocidade. A relação do pulso de tensão, v, o pulso de corrente , i, e a impedância característica,  $Z_0$  é :

$$Z_0 = \frac{v(t, x)}{i(t, x)}$$

onde x está uma posição ao longo do cabo e do t é tempo. Quando uma descontinuidade da impedância é encontrada ao longo do comprimento do cabo, alguma energia é refletida de volta. Usando o aparecimento de um pulso refletido e a velocidade da propagação no cabo, o operador pode localizar a falha ( **Figura 17** ). As falhas mais facilmente detectáveis com este método são falha série de alta resistência e a falha shunt de baixa resistência .

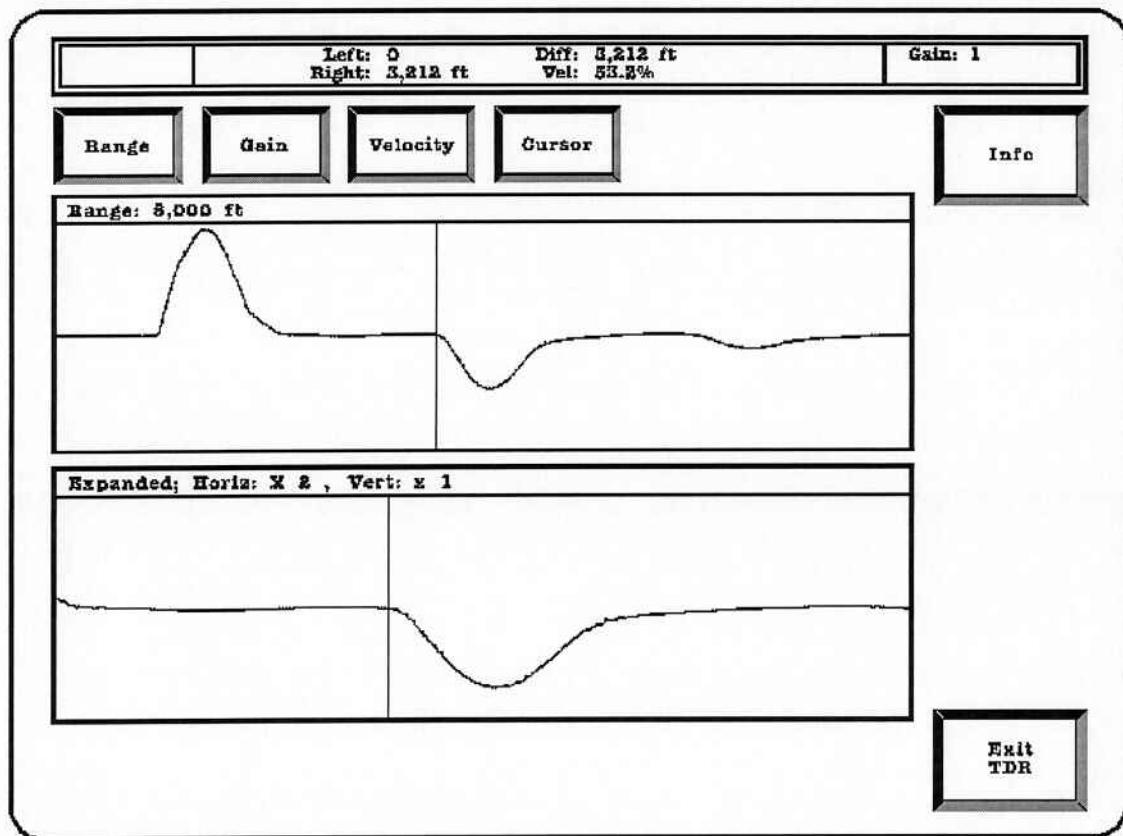


Figura 17

#### 7.2.3.5. Reflectometria do Arco

O teste da reflexão do arco é similar a TDR, utilizado também para falhas de alta resistência. Um equipamento auxiliar pode ser usado para converter a impedância da falha em um curto-circuito. Uma vez que a impedância da falha é convertido em um curto-circuito, a falha será facilmente identificável usando métodos padrão de TDR.

Durante o teste da reflexão do arco, o cabo tem um surto de alta tensão aplicado a ele. Este surto de alta tensão tem uma forma de onda especial relacionada a esta aplicação. A forma da onda é oscilatória e tem a forma de uma senóide exponencial. A finalidade desta forma de onda é estender o tempo que o arco está atuando de modo que a reflexão possa ser observada na tela de TDR. TDRs especializados foram desenvolvidos que são capazes de capturar os pulsos de TDR que refletem do

arco momentâneo criado durante o surto. O benefício desta técnica é a sua simplicidade na interpretação. Os pulsos indicados na tela de TDR são os tipos padrão vistos normalmente em um TDR. A falha aparece como uma deflexão descendente significativa e é identificada prontamente. Além disso, o traço de TDR antes da aplicação da tensão é indicado também na tela que torna mais simples e uniforme distinguir a mudança que ocorre no traço de TDR quando a impedância da falha é convertida em um curto-circuito. Outra vantagem adicional de usar a reflexão do arco é que minimiza a tensão do teste necessária para encontrar a falha. Essencialmente, o cabo sob o teste comporta-se como um dispositivo da proteção do surto . ( **Figura 18** )

Todos os métodos de reflectometria baseam-se em reflexões de pulsos , sejam eles de tensão ou corrente . As diferenças entre estes métodos possibilitam a localização de tipos diferentes de defeito e fazem com que cada destes métodos possa ser aplicado em casos diferentes . A reflectometria é o método mais utilizado atualmente para a pré-localização e as características de cada um destes reflectômetros depende dos fabricantes e de cada caso .

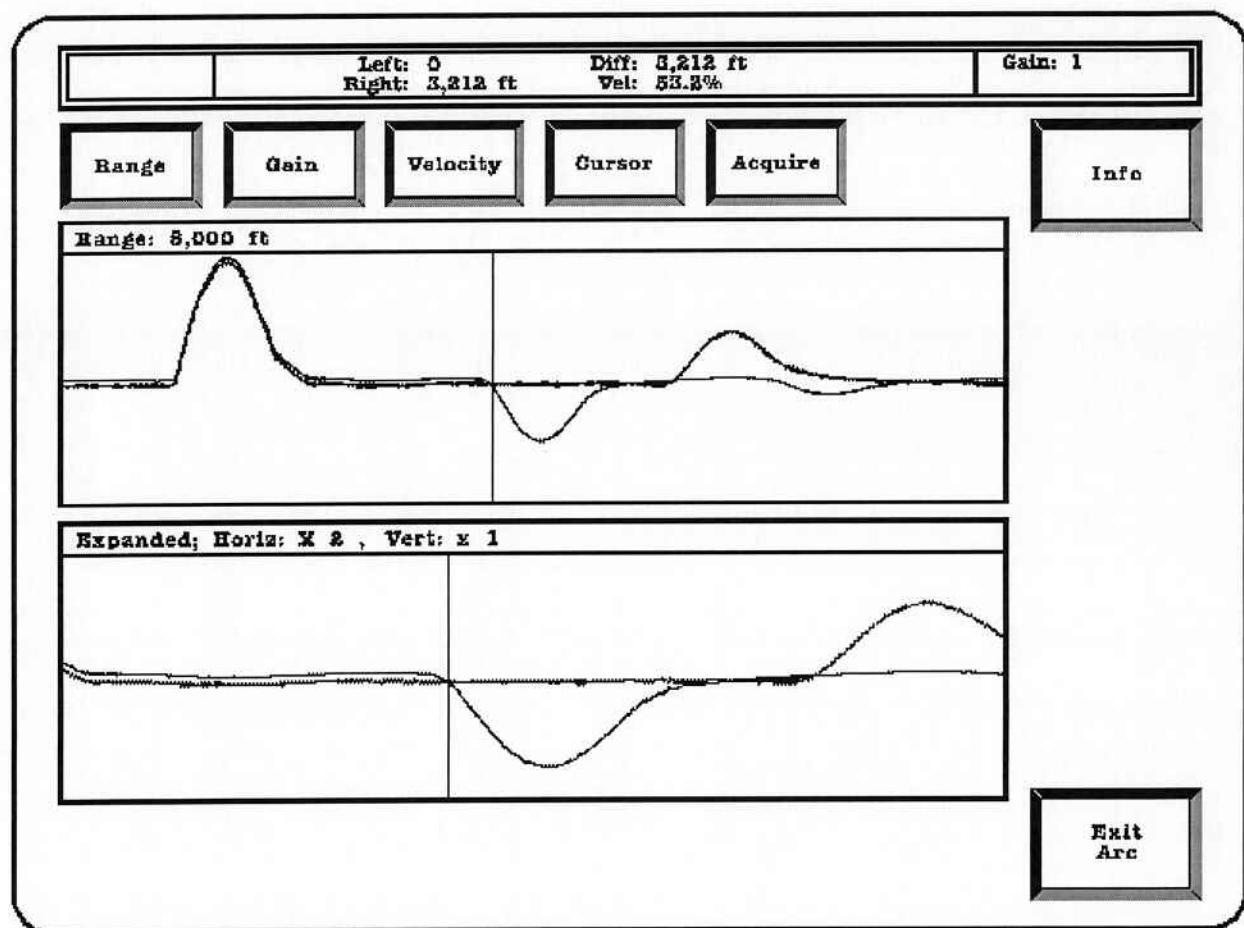


Figura 18

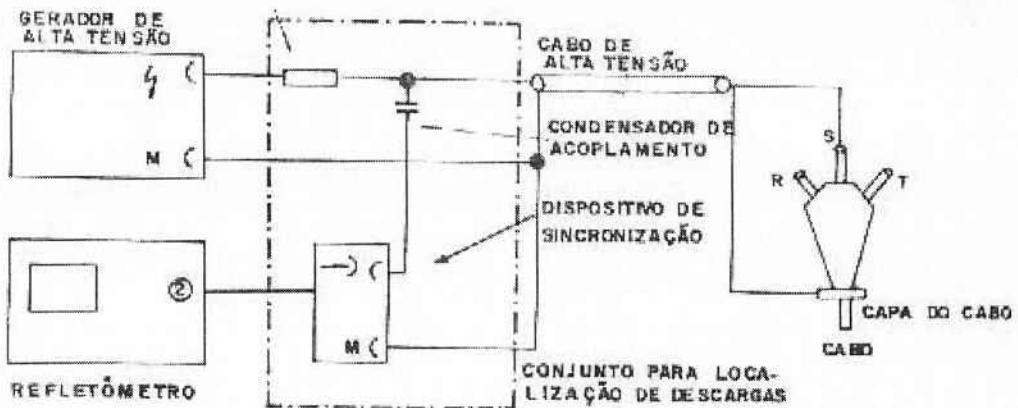
#### 7.2.4. Método de sincronização ou de livre oscilação

Este método é adequado para localização de defeito de alta impedância ou tipo “flash” que são aqueles defeitos tipo arco em cabos de alta tensão. Tais defeitos são frequentemente localizados emendas ou terminações. A experiência com este método tem mostrado que os defeitos mencionados aqui podem ser localizados com precisão de 10 a 20 metros.

Um osciloscópio pode ser utilizado para a localização de defeitos em conjunto com um aparelho descarregador de ondas de choque normalmente existentes com os aparelhos para testes elétricos, sendo o método chamado de sincronização ou oscilação. A unidade de descarga das ondas de choque ou de teste de alta tensão é ligada como mostrado na figura abaixo e o osciloscópio, chaveado para o modo de operação externo, recebe um pequeno sinal da tensão derivado da alta tensão do cabo via um divisor capacitivo. Se o gerador de ondas de choque é utilizado, a cada instante que ele arca, o osciloscópio mostra uma figura representando a onda refletida de volta, a partir do defeito, e a oscilação amortecida representando as subsequentes re-reflexões desta onda entre o defeito e a resistência, inserida para este propósito.

Neste método, o cabo defeituoso que precisa ter um valor de isolação bom é carregado por meio de um aparelho de teste de alta voltagem até que se obtenha o arco no ponto de defeito. O arco gerado num defeito representa um curto-círcuito para a carga do cabo que se propaga do ponto de descarga como uma onda caminhante em direção a ambos os lados do cabo de potência com uma velocidade de propagação que é a típica para este cabo. Através de uma resistência de alto valor para este caso (pelo menos 10 vezes a impedância característica do cabo), a onda caminhante para o início do cabo irá retornar para o defeito com a mesma polaridade e será novamente recebida pelo arco que ainda está presente. A oscilação prossegue do ponto de defeito até o final do cabo e esta não é usada para medição.

Este processo continua até que a energia da carga tenha sido dissipada pela atenuação do cabo. Então, resulta uma descarga com a forma de onda de uma oscilação amortecida. Uma vez que o traçado é somente visível instantaneamente, quando o gerador da onda de choque descarrega, é muito difícil de interpretar a olho nu e é muito interessante se usar uma fotografia como ajuda para o diagnóstico. A figura 19 mostra o esquema de ligação .



ESQUEMA DE LIGAÇÃO DOS INSTRUMENTOS PARA APLICAÇÃO DO  
MÉTODO (APARELHOS MONTADOS DENTRO DE UMA UNIDADE MÓVEL).

**Figura 19 - Esquema de ligação .**

### 7.2.5. Métodos Acústicos

Para simplificar a tarefa da localização da falha , a indústria desenvolveu os dispositivos acústicos que permitem a localização exata da localização da falha e facilitam bastante esta tarefa em casos como dificeis onde o cabo é enterrado profundamente ou não há a possibilidade de se alcançar os cabos fisicamente . Os detetores acústicos mais simples são geofones seguidos por um amplificador. Estes dispositivos trabalham bem se o operador for experimentado em sua operação.. Isto requer uma técnica de experimentação-e-erro , além disso, quando um operador inexperiente usa estes dispositivos, o tempo para localizar a falha aumenta mais. Outros equipamentos mais avançados detectam o surto no cabo e mede o tempo entre o surto e a recepção do pulso acústico produzido pela falha. Medir este atraso de tempo permite que o instrumento indique uma distância à falha.

## **8. CONDIÇÕES DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS**

Os ensaios de localização de defeitos podem ser feitos em tensão contínua , alternada ou em uma nova alternativa o VLF ( Very Low Frequency ) . A aplicação de cada um destes tipos de ensaios depende das características do circuito em questão e cada empresa de distribuição adota um tipo de regime de ensaio ( Ver anexo 1 ). O VLF atualmente é a alternativa mais pesquisada atualmente devido á suas características de localização e também diagnóstico de cabos .

### **8.1. VLF ( Very Low Frequency )**

Este é um metodo baseado no princípio de que pontos fracos em cabos isolados produzem descargas parciais .Localizando-se a origem destas descargas , é possível determinar onde se encontram os cabos ou acessórios danificados . As informações obtidas nas inspeções realizadas após a substituição destas partes e componentes são armazenadas em um banco de dados , compondo também uma parte importante do sistema de diagnóstico . Isto confere ao método a possibilidade de realizar a localização de falhas e também o diagnóstico . Estes dados relacionam as condições dos circuitos ( inclusive condições de instalação ) à magnitude e à densidade das descargas parciais neles encontradas . Assim são criadas regras para a interpretação destes resultados em medições futuras , possibilitando a previsão do estado dos circuitos quando submetidos a determinadas condições . Esta característica em particular é muito importante neste projeto da Eletropaulo , uma vez que a previsão do estado dos cabos permite que algumas manutenções preventivas sejam feitas , evitando que ocorra falta de energia em locais onde a rede de distribuição de energia seja subterrânea .

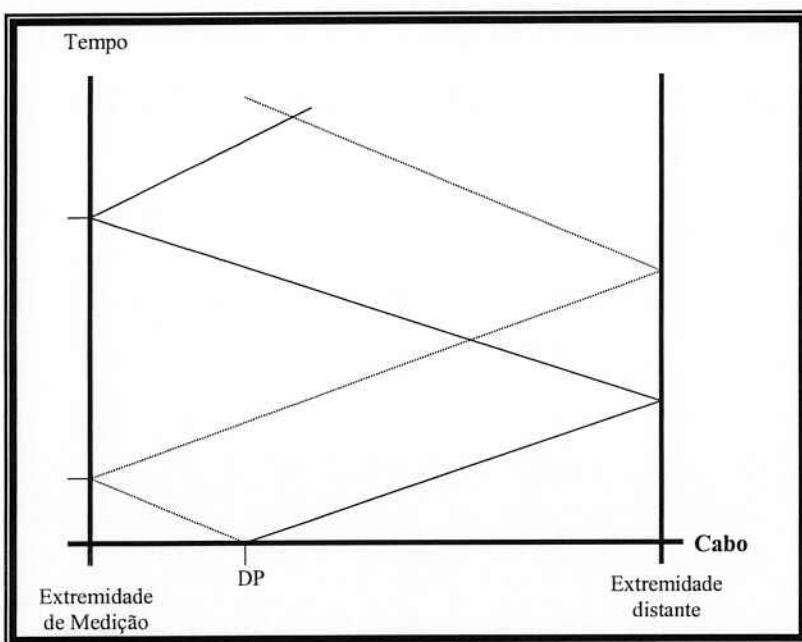
Este método teve seu início na década de 80 , a partir da necessidade de uma ferramenta de diagnóstico das linhas subterrâneas dos Países Baixos , compostas principalmente de cabos trifásicos isolados em papel com uso de 40 a 60 anos . Desta maneira a substituição desta rede antiga deveria ser feita levando-se em conta a idade dos cabos e as condições a que eles estão submetidos . A importância da avaliação das consequências do

envelhecimento dos cabos pode ser notada na taxa mais baixa de defeitos que ocorrem em cabos novos ( com menos de 15 anos ) em relação a cabos envelhecidos .

A aplicação deste método pode estimular as concessionárias a adotar este método de ensaio como parte da rotina diária de manutenção de linhas subterrâneas . A substituição dos pontos fracos detectados a partir de uma medição simples pode evitar defeitos imprevistos , melhorando assim a confiabilidade do sistema e proporcionando economia em manutenção .

### 8.1.1 . Método

Um gerador de VLF ( 0,1 Hz ) isento de descargas é usado para energizar o circuito sob teste , enquanto um equipamento de medição é conectado às terminações do cabo . As fontes de tensão de teste de 0,1 Hz podem ser facilmente montadas e são relativamente fáceis de serem transportadas , de modo que testar grandes capacitâncias como sistemas de cabos no campo não apresenta problemas( **Figura 20** ) . A localização da origem de descargas parciais detectadas é calculada com base no princípio de tempo de propagação de onda ( diferença de tempo entre o pulso emitido e o refletido ) .



**Figura 20**

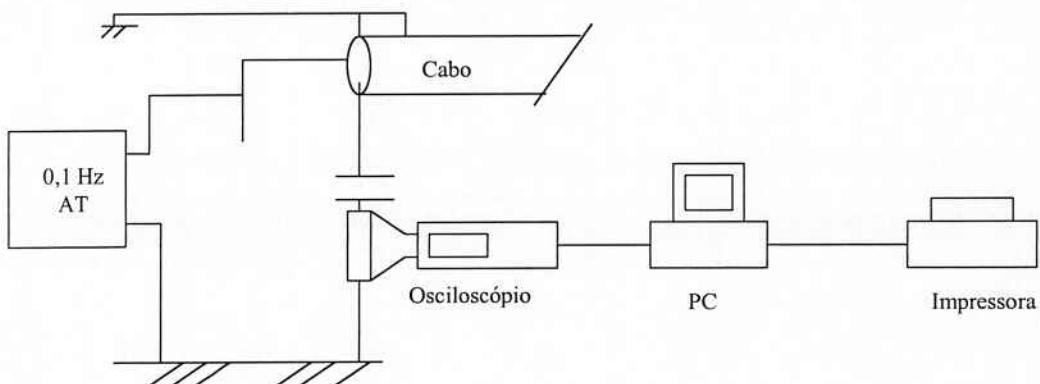
Quando uma descarga parcial ocorre dois pulsos percorrem o cabo o cabo em direções opostas . Um deles vai diretamente para a extremidade de medição , onde será detectado . O outro dirige-se à extremidade oposta , é refletido e também encaminhado à extremidade de medição , onde chegará com uma certa diferença de tempo ( que pode ir de nanossegundos a microssegundos) . Conhecendo-se esta diferença de tempo , mais a velocidade do pulso no cabo pode-se calcular a localização da descarga parcial .

Para poder determinar a condição atual de sistemas de cabo de média voltagem, foi desenvolvido um sistema diagnóstico baseado em medidas de descargas parciais. Este sistema localiza manchas fracas. O método é um teste diagnóstico não destrutivo que avalia a condição de um sistema de cabos envelhecidos inclui suas juntas e terminações. O local e a severidade de defeitos são determinadas. O cabo testado pode ser devolvido em serviço até manutenção marcada ou substituição pode ser levada a cabo. Com este método, podem ser focalizadas só manutenção de cabo e substituição nas manchas fracas. Os custos de manutenção serão reduzidos significativamente, enquanto a confiança do sistema de cabo aumentará.

Na prática é necessário desconectar o circuito do cabo e energizá-lo com o uso de um gerador separado de alta tensão , o qual apresenta algumas vantagens , como o fato de poder ser fabricado isento de descarga . Além disto permite que se executem testes em qualquer nível de tensão ( dentro da faixa do gerador ) , naturalmente sem que a isolação seja solicitada em demasia . Dependendo das circunstâncias as tensões de ensaio variam de 1 Uo a 2 Uo .

Para reduzir a potência do gerador ( corrente capacitativa do Cabo ) e , consequentemente , reduzir o seu peso e tamanho , foram desenvolvidos dois geradores de frequência muito baixa ( VLF ) , de 0,1 Hz . Um deles é capaz de energizar um circuito de até 12 kV<sub>eff</sub> , enquanto o outro(pode gerar um máximo de 41 kV<sub>eff</sub> . Circuitos com até 6 Km de comprimento podem ser medidos por estes geradores sem quaisquer restrições . Se necessário , os mesmos equipamentos podem executar ensaios de tensão em circuitos de até 16 Km , dependendo da capacidade dos cabos .

Sinais de ruído têm comportamento muito semelhante ao dos pulsos de descarga parciais , cuja medição é a base do sistema de diagnóstico apresentado . Para evitar que estes sinais atrapalhem as medições , é preciso que as conexões sejam feitas cuidadosamente , de modo que os níveis de ruído sejam minimizados . A **figura 21** ilustra esquematicamente o arranjo .



**figura 21**

Não apenas as conexões inadequadas influenciam os sinais medidos , mas o próprio cabo pode afetar os pulsos de descarga , dispersando-os ao longo de sua extensão . Isto é, à medida que viaja pelo cabo , o pulso vai ganhando em comprimento e perdendo em amplitude , até o ponto de não poder mais ser detectado . Este efeito limita o comprimento do cabo que pode ser detectado . Este efeito limita o comprimento do cabo que pode ser diagnosticado . Dependendo do nível de ruído, os circuitos podem ser diagnosticados com medições por um lado ( até 4 Km ) ou com duas medições consecutivas , uma em cada lado ( até 6 Km ) .

Para avaliar a condição do cabo como um todo , e não apenas um segmento particular que apresente mais problemas que o restante do circuito , é essencial registrar numerosas descargas parciais . A medição de cada sinal fornece a magnitude e a localização da descarga parcial correspondente . As informações de todos os registros são reunidas no que chamamos de " mapa de descargas " ( **Figura 22** ), onde cada descarga é representada por um ponto . Esse mapa é base para o diagnóstico das condições do circuito .

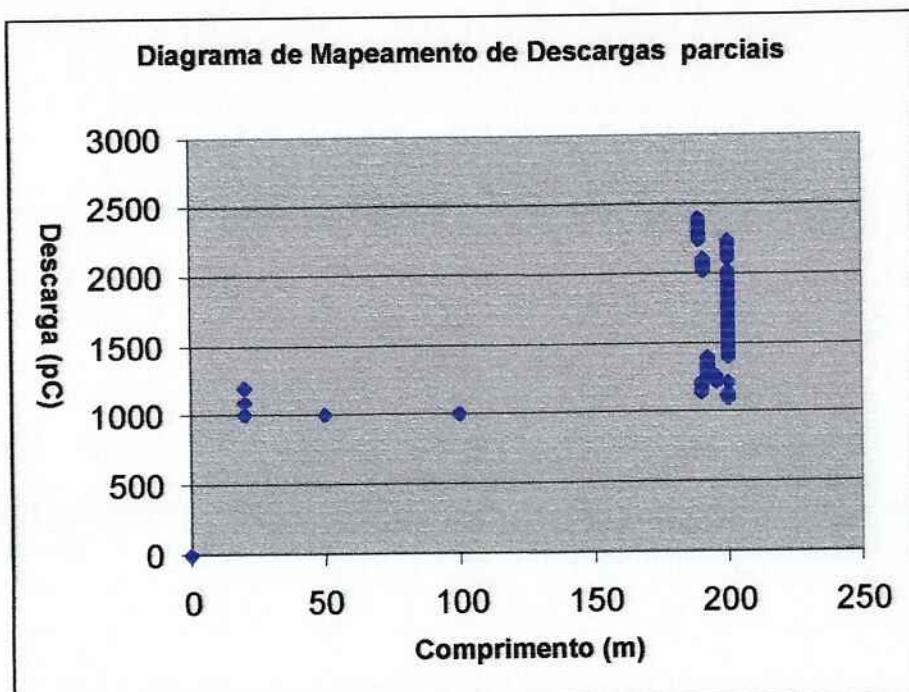


figura 22

Conhecer o tipo de acessório ou cabo utilizado é essencial para que possa aconselhar ou não a sua substituição. Essa informação combinada com as do mapa de descargas, resulta em recomendações, as quais são também baseadas em inspeções visuais realizadas em muitos acessórios e pequenos trechos de cabos substituídos.

Embora inicialmente o VLF tenha sido utilizado em cabos isolados em papel-chumbo, é possível diagnosticar da mesma forma cabos com isolação polimérica, ou até mesmo em circuitos mistos.

A utilização do método VLF por parte da Eletropaulo ainda depende da realização de mais testes particularmente em sua rede reticulada subterrânea. As especificações dos fabricantes destes equipamentos apresentam diversas diferenças teóricas (levantadas neste trabalho) que necessitam da comprovação em campo, particularmente no reticulado da Eletropaulo.

## 9. A EXPERIÊNCIA DA ELETROPAULO

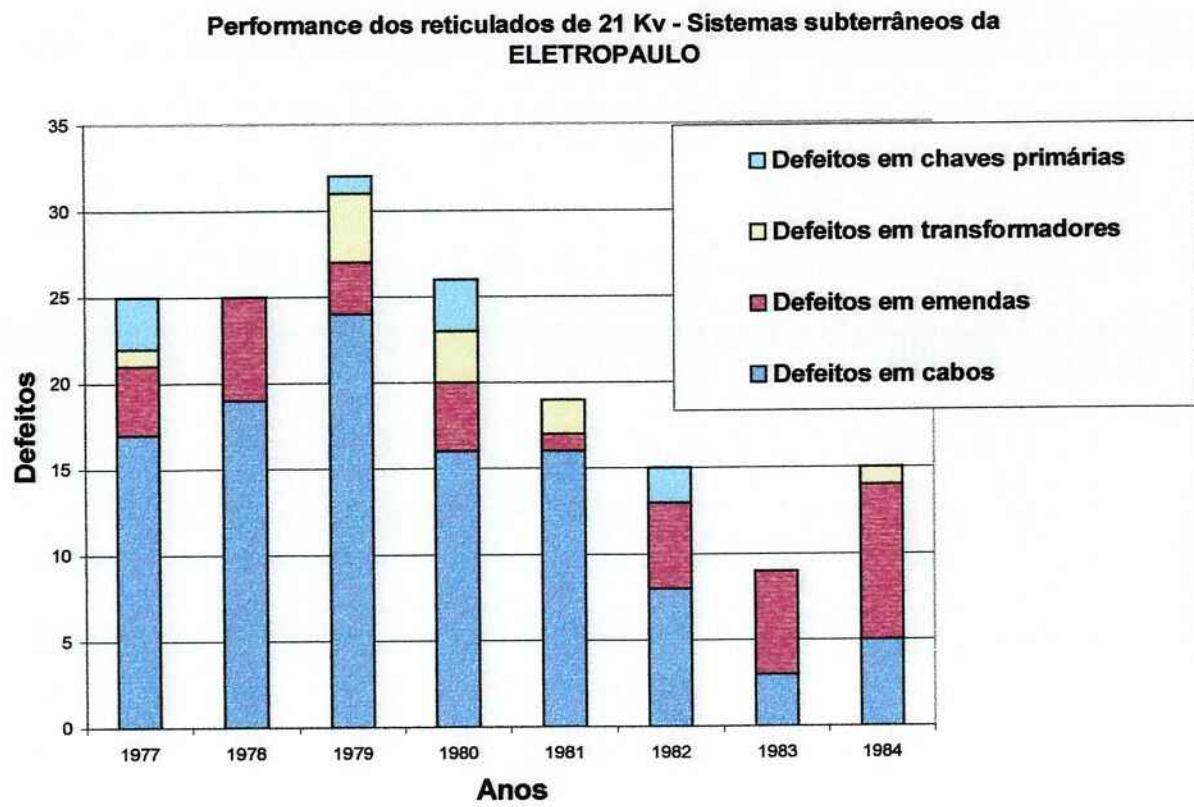
No passado ( até há uns 40 anos atrás ) , os defeitos eram localizados abrindo-se as emendas nos poços de inspeção , confinando-se os defeitos . Isso era seguido nos defeitos de resistência nula até alguns Megoms , desde que os medidores de isolação os apontassem . Ocasionalmente , se usavam pontes de corrente contínua de baixa e alta tensões e pontes de capacitância , mas os resultados de forma geral eram precários .

Logo após foram introduzidos os primeiros aparelhos de geradores de alta tensão com tensões de corrente contínua de teste igual a 30 kV , passando-se sistematicamente a utilizá-los . No entanto , os defeitos tinham que ser pesquisados ao longo da rota através do patrulhamento sistemático em todos os poços de inspeção . Para isto era necessário o esgotamento de água de todos os poços de inspeção ao longo do itinerário do cabo . Havia defeitos que levavam vários dias para serem descobertos e em alguns casos o defeito se manifestava novamente .

### 9.1. Metodologia atual na Eletropaulo

A rede da eletropaulo é uma das mais complexas do mundo. É composta em sua maioria por cabos XLPE . Apesar de sua complexidade , os circuitos não costumam ser extensos ( em média medem 12 Km no primário ) e também possuem o reticulado do secundário com redes bastante curtas . Este é motivo pelo qual a ELETROPAULO realiza os testes de localização de falhas apenas no primário dos circuitos porque eles são curtos e além disto não há necessidade da realização de ensaios no secundário já que a informação de falha passada pelo consumidor é suficiente para se localizar o defeito nas redes de extensão curta do secundário . Os testes são realizados em tensão contínua de 21kV a 42 kV dependendo do circuito envolvido . Apesar destes ensaios parecerem mais destrutivos para os cabos , a alternativa dos ensaios em VLF ainda parecem experimentais e têm demonstrado resultados ainda

insatisfatórios em ensaios no circuito da ELETROPAULO . Na figura 21 podemos ver um gráfico com os defeitos mais comuns na rede da Eletropaulo .



**Figura 23**

A metodologia utilizada atuamente pela ELETROPAULO para a localização de falhas tem 3 etapas bastante distintas : Teste do cabo , Pré-Localização , Localização do Defeito ( “Pin Point “ ) que serão descritas a seguir .

### **9.1.1. Teste dos Cabos**

Nesta etapa inicial , uma metodologia bastante parecida com a reflectometria no domínio do tempo é empregada .Os transformadores são desconectados do circuito , caso contrário as tensões de teste não poderão ultrapassar os 21 kV e em muitos casos esta tensão de teste não é suficiente para a detecção da falha . Em tensões crescentes que podem chegar a 21kV ou 42 kV dependendo do circuito os cabos referentes aos circuitos de alimentadores são testados na subestação utilizando um equipamento localizado dentro de uma Van .

Duas grandezas são medidas , a corrente de fuga e a tensão . Se a tensão do cabo não subir ou a corrente de fuga ultrapassar aproximadamente 1mA o cabo aquele cabo pode possuir um defeito . Desta maneira pode-se isolar os circuitos de alimentadores com defeito , e pré-localizar defeitos apenas nos alimentadores que possam possuir defeito .

### **9.1.2. Pré-localização**

A pré-localização determina uma região de probabilidade maior onde o defeito pode se localizar . Esta configuração está desativada nos equipamentos da ELETROPAULO e esta etapa hoje em dia se restringe a uma pré-localização através desconectáveis localizados no circuito através dos quais pode-se desconectar uma parte do circuito e determinar se a falha está antes ou depois deste desconectável . Estes desconectáveis nem sempre estão presentes nos circuitos e sua pré-localização restringe-se à divisão de duas áreas (Antes ou depois do desconectável ) de possibilidade de localização do defeito . A pré-localização pode simplificar bastante a tarefa de localização de defeitos , principalmente em circuitos complexos . Esta pré-localização pode ser feita utilizando-se todos os métodos aqui citados . Alguns equipamentos modernos permitem até mesmo a escolha de qual método será utilizado para a localização de defeitos .

### **9.1.3. Localização do Defeito ( “Pin Point “ ) .**

Após a detecção aproximada do defeito , pulsos são injetados no cabo e um operador vai a campo para a localização exata da falha através de um equipamento que se chama X35 que se utiliza de métodos acústicos e captação de ondas eletromagnéticas . A utilização destes métodos é explicada pelo fato de que nem sempre é possível ter acesso aos cabos que muitas vezes estão enterrados a uma certa profundidade . Percorrendo o cabo com defeito o X35 pode detectar ruídos ou ondas eletromagnéticas causados pelas descargas parciais na região das falhas . A utilização deste equipamento requer bastante experiência pois nem sempre o equipamento pode captar os sinais resultantes da falha .

Alguns dos recursos utilizados pela Eletropaulo são :

- Pontes de corrente contínua e alternada
- Testadores de Isolação de 500 V , 1000 V , 2500 V e 5000 V
- Testadores/queimadores/localizadores por ondas de choque
- Detectores balísticos de de impulso de corrente
- Testador Hyptronics
- Reflectômetro
- Gerador de Áudio 220 W
- Equipamento X35 de localização Pin Point por métodos acústicos e eletromagnéticos

O estudo destes recursos e da metodologia empregada pela eletropaulo mostra de que maneira a empresa emprega os recursos apresentados teoricamente neste trabalho . Os profissionais que realizam a localização de defeitos utilizam um gerador de tensão que gera pulsos nos cabos afetados . Os métodos de pré-localização ( Reflectometria , método transgradiente ) não são utilizados . Os testes dos cabos apenas determinam que fase( cabo ) do alimentador pode estar com defeito . A localização propriamente dita será realizada pelo equipamento X35 .

Estas características se explicam pelo fato do reticulado da eletropaulo não ser extenso ( Pode-se aplicar pulsos apenas da origem dos alimentadores ) , os cabos são enterrados profundamente em alguns casos ( não há acesso aos cabos tendo-se que utilizar o X35 ) , o secundário tem ramos bastante curtos ( não há necessidade de se localizar defeitos no secundário ) .

Estas características confirmam o levantamento teórico realizado de que a metodologia empregada depende bastante de cada caso . Por exemplo a inexistência de um sistema de pré-localização poderia ser mais grave se o reticulado da Eletropaulo tivesse linhas no primário mais extensas do que 12 Km ou ainda suas linhas no secundário fossem mais compridas . O relato de casos ocorridos nas redes da Eletropaulo realizado a seguir demonstra como a metodologia é praticada .

## **10. ESTUDO DE CASOS DA ELETROPAULO**

A metodologia empregada pela ELETROPAULO pode ser verificada no estudo de alguns casos ocorridos em sua rede . As vantagens e desvantagens do método utilizado também podem ser verificadas .

### **10.1. Caso no Circuito Paula Souza**

Neste caso ocorrido no circuito de Paula Souza ocorreu o desligamento da fase azul às 20:41 do dia 16 de outubro . Primeiramente foram desligadas as chaves primárias . Então foram realizados testes nas três fases onde verificou-se que a tensão no subiu na fase azul , ou seja , esta era a fase defeituosa . As outras fases não apresentavam defeito pois as tensões e correntes estavam dentro dos limites estabelecidos . À localização ( Pin Point ) iniciou-se no dia 17 de outubro sendo localizado o defeito na fase azul . Após o reparo as chaves primárias são fechadas e os transformadores são testados com tensão de 21 kV ( limite aceitável do transformador ) . Não sendo encontrado defeitos os protetores são normalizados e o circuito é colocado para funcionar novamente .

A rapidez para se encontrar o defeito é determinada pela extensão do circuito e também pelo número de defeitos encontrados . Como foi citado anteriormente , quanto mais rapidamente for encontrado o defeito menores as chances de que outro circuito tenha defeito e o fornecimento de energia elétrica para o consumidor seja interrompido . Pode-se notar neste caso que a pré-localização não foi realizada passando-se diretamente da fase de teste dos cabos para a fase de localização Pin Point do defeito no cabo . Este circuito tem 12 Km de extensão aproximadamente e possui um desconectável a 6 Km de extensão . Neste caso foi utilizado o desconectável para descobrir se o defeito estava antes ou depois do desconectável . Em seguida a equipe da Eletropaulo foi a campo detectar onde estava precisamente o defeito .

<b>Circuito Paula Souza - PSO 202</b>		<b>39 CTS</b>
<b>16/10/99</b>		
<b>20h 41 m</b> Desligamento - Instantâneo Fase azul		
<b>20h 55m</b> Início bloqueio de chaves primárias		
<b>17/10/99</b>		
<b>3h 55m</b> Concluído bloqueio de chaves		
Testes Fase azul - Tensão não subiu		
Fase vermelha - 42 Kv - 1m - 0,5mA		
Fase branca - 42Kv - 1m - 0,5mA		
<b>7h 00m</b> Início da localização de defeito		
Testes de tensão		
Ondas de choque Fase azul 10 Kv		
<b>11h 05m</b> Defeito localizado visualmente no poço 284		
Emenda dupla Fase azul:explodida		
<b>15h às 16h 50m</b> Reparo total		
Teste 42 Kv - 1m - 0,98mA		
<b>18h 40m às 19h 32m</b> Chaves primárias fechadas		
<b>18/10/99</b>		
<b>Até 1h</b> Testes das CTs 21 Kv - 1m - 1,2mA		
<b>1h 28m</b> Religado		
<b>2h 50m</b> Protetores normalizados		

## 10.2. Caso Circuito BAN 315

Neste caso o procedimento padrão foi repetido diversas vezes . Em muitos casos , após a realização do reparo são feitos testes novamente para que se constate se ainda há defeitos . Neste caso em específico o procedimento é repetido 3 vezes até que não se encontre mais defeitos no circuito . É importante lembrar que a aplicação sucessiva de pulsos no cabo pode danificá-lo .

Os casos apresentados permitem concluir que a metodologia empregada é quase sempre a mesma : Teste dos cabos , pré-localização ( através dos desconectáveis ) e localização Pin - Point . Em muitos casos até mesmo depois de se localizar exatamente a posição do defeito , têm - se dificuldade de visualizar o defeito para que o reparo possa ser feito . A equipe da eletropaulo já se deparou com casos em que mesmo após a localização do defeito dias se passaram até que o reparo pudesse ser feito .

A utilização dos equipamentos de localização pode ser prejudicada por fatores determinados pelo próprio circuito tais como poços de inspeção cheios de água , defeitos não visíveis no cabo , envelhecimento dos cabos , entre outros . A experiência do profissional de localização permite que os equipamentos possam ser utilizados de maneira que funcionem de maneira satisfatória mesmo sob condições adversas .

Também neste caso a pré-localização não é realizada . Após serem feitos testes nos cabos para determinar a fase com defeito , a localização precisa do defeito já é iniciada .

A aquisição de aparelhos que permitam esta pré-localização facilitará o trabalho em campo da equipe da Eletropaulo . Mesmo assim deve-se saber que a pré-localização nem sempre é aplicável em circuitos reticulados . Dependendo do número de ramificações do reticulado , a informação da distância apenas não é muito relevante . Teria que se procurar em todas as ramificações com distâncias iguais às aquelas encontradas pelo sistema de pré-localização e novamente o trabalho dependeria da experiência do profissional em interpretar as informações obtidas .

**RELATÓRIO DE DEFEITO NO CIRCUITO BAN-315**

<b>DATA</b>	<b>DESCRÍÇÃO DO EVENTO</b>	<b>HORÁRIO</b>	<b>TEMPO ENTRE EVENTOS</b>	<b>TEMPO ACUMULADO</b>
21/Dez	Saiu de operação. Círcuito entregue pelo despacho	14:28 h 16:00 h	***** 01:32 h	***** 01:32 h
	Início dos testes. Testado sem defeito. Tentativa sem sucesso de religamento	18:30 h 20:00 h	2:30 h 01:30 h	4:02 h 5:32 h
22/Dez	Círcuito entregue pelo despacho. Não houve a autorização da EPTE para posicionar caminhão teste	00:00 h	4:00 h	9:32 h
		Houve deslocamento da parte da turma para o condomínio da rua Ariqueme(Boaçava), onde foi localizado defeito na base fusível (rede aérea)		
	Início dos testes Detectado defeito na fase azul	08:10 h	08:10 h	17:42 h
	Localizado defeito no plugue de conexão da fase azul no PI-3190	15:50 h	7:40 h	25:22 h
	Defeito reparado. Refeito os testes. Detectado defeito na fase branca.	18:10 h 18:15 h	2:20 h 00:05 h	27:42 h 27:47 h
23/Dez	Localizado defeito no PI 3289. Defeito no TBB da fase branca e no plugue de conexão da fase azul	20:18 h	26:33 h	54:20 h
24/Dez	Defeito reparado. Refeito os testes. Detectado defeito na fase branca.	2:15 h	6:03 h	60:23 h
	Efetuado novo teste: Localizado defeito na fase branca	2:55 h	0:40 h	61:03 h
	Localizado defeito no PI 3169 no TBB	8:00 h	5:05 h	66:08 h
	Reparado o defeito	9:30 h	1:30 h	67:38 h
	Efetuado o teste. Sem defeito	9:40 h	0:10 h	67:48 h
	Religado o circuito	10:45 h	1:05 h	68:54 h

## **11. O FUTURO DA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NA ELETROPAULO**

Após a fase de estudos teóricos , participação de workshops , estudos e especificação de equipamentos junto aos fabricantes ( exemplo de especificação no anexo 2 ) a ELETROPAULO optou pela compra de um equipamento de localização que agrega as técnicas de pré-localização citadas neste texto . Os ensaios continuarão a ser realizados em tensão contínua porque este não tem-se demonstrado um problema relevante no caso da Eletropaulo , no que se refere à destruição de cabos durante testes de localização de defeitos . Enquanto os testes em campo com métodos de ensaio em VLF não se demonstram efetivamente mais precisos e menos destrutivos que os outros regimes de ensaios de localização de defeitos , esta parece ser uma alternativa por enquanto teórica e bastante mais cara que os métodos tradicionais (Anexo 1 ). A compra deste novo equipamento será seguida de testes em campo para a comprovação de todos os benefícios que a pré-localização pode trazer . Como foi dito anteriormente , nem sempre estas técnicas podem ser aplicadas ( dependendo do circuito em questão ) ou muitas vezes nem sempre elas são eficazes se a topologia do circuito não for favorável .

O benefício futuro será de que em todos os casos e circuitos onde a pré-localização puder ser utilizada o tempo de localização do defeito e de restabelecimento de serviço será bastante diminuído . Quando os testes confirmarem que o VLF realmente apresenta tantos benefícios no campo quanto os apresentados em laboratório , os futuros equipamentos de localização e principalmente os de diagnóstico de cabos poderão utilizar o VLF .

## **12. CONCLUSÃO**

A localização de defeitos em linhas subterrâneas reticuladas envolve diversos fatores tais como os tipos de cabos utilizados , metodologia de localização empregada e experiência do profissional de localização. Tão importante quanto os equipamentos utilizados é maneira como estes são empregados e as situações em que isto acontece . O trabalho de localização de defeitos pela Eletropaulo restringe-se ao primário porque a sua rede reticulada secundária apresenta cabos de extensão curta e os próprios consumidores podem ajudar no processo de localização . A falta de um processo de pré-localização nos equipamentos da eletropaulo faz com que este processo fique restrito à utilização de desconectáveis

presentes em alguns de seus circuitos . Após a compra destes equipamento a pré-localização poderá ser realizada em alguns casos diminuindo bastante o tempo para a localização de um defeito na linha .

Todos os métodos citados neste trabalho têm as suas vantagens e desvantagens , por exemplo a reflectometria do arco é mais aplicada para localizar falhas série de alta resistência e a falha shunt de baixa resistência . A utilização ou não de cada um dos métodos depende da decisão da empresa de distribuição de energia sobre a conveniência ou não de se utilizar determinado método diante dos tipos de falhas mais comuns apresentados em seu reticulado . Esta escolha envolve características econômicas ( dependendo do método utilizado , o equipamento pode ser muito mais caro ) , características do tipo de localização a ser realizado ( com diagnóstico ou não ), do tipo de cabo utilizado na rede e de seu tempo de utilização e até mesmo o fato do profissional que realiza a localização estar ou não acostumado com determinado método e ter experiência . Atualmente muitos equipamentos permitem a escolha do método a ser utilizado dando flexibilidade ao profissional de localização de defeitos . Apesar disto , ainda não existe um equipamento que permita a um profissional sem experiência localizar todos os tipos de defeito . Todos estes métodos podem ser aplicados com tensão de alimentação contínua , alternada ou em VLF ( Very Low Frequency ) , sendo que a Eletropaulo continuará a utilizar o método de ensaio em corrente contínua .

Como resultado de todos os estudos realizados e da análise do sistema atual da ELETROPAULO pode-se compreender que o melhor sistema de localização é aquele que traga maior rapidez e se aplique perfeitamente às condições impostas pelo circuito . No caso atual da ELETROPAULO , a compra de um novo equipamento permitirá a pré-localização , mas o “Pin-Point “ continuará a ser realizado da maneira que é realizado atualmente , e este sistema atenderá perfeitamente as necessidades de localização atuais da ELETROPAULO . Não existe o melhor método de localização de defeitos em linhas reticuladas subterrâneas e sim o método que mais se adeque aos diversos tipos de casos enfrentados pela empresa de distribuição de energia elétrica .

O trabalho alcançou o objetivo referente à localização de defeitos em linhas subterrâneas reticuladas . A influência de todos os fatores importantes para o processo tais como as variedades de cabos utilizados , os métodos

de localização , o estudo da metodologia de localização utilizada pela Eletropaulo , e dos benefícios futuros resultantes da aquisição do equipamento foram considerados . O acompanhamento dos casos em campo não foram possíveis porque não é permitido que alguém de fora da Eletropaulo acompanhe estes testes , e mesmo após a aquisição deste novo equipamento , os testes não poderiam ser acompanhados . A análise de casos práticos da Eletropaulo permitiu o entendimento de como a teoria poderia ser aplicada na prática . Apesar do presente projeto estar terminando com a aquisição de um equipamento de localização pela Eletropaulo e com a futura utilização de métodos de pré-localização , o projeto como um todo é um projeto de pesquisa e desenvolvimento da Eletropaulo e será concluído com aquisição de um equipamento que permita o diagnóstico de linhas subterrâneas , sabendo que a procura por métodos cada vez mais eficientes e adequados nunca deve cessar , buscando cada vez mais melhorar o tempo e eficiência na localização e diagnóstico de defeitos em linhas reticulares subterrâneas de distribuição .

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Steiner, J.P., Weeks, W.L., "Advanced Cable Fault Locator," Final Report, EPRI EL-6765, March 1990, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif.
- [2] Gail, P.F., "Cable Fault Location by Impulse Current Method," Proc. IEE, Vol. 122, No. 4, April 1975, pp. 403-408.
- [3] Komoda, M., Kawashima, T., Arakane, M., Aihara, M., Fujiwara, Y., "Development of a Current Detection Type Cable Fault Locator," Conference Record 90 WM 248-5 PWRD, IEEE Winter Power Meeting, Atlanta Georgia, Feb., 1990.
- [4] Gnerlich, H.R., "Fault Locating: What's the Effect on the Cable?" Electrical World, Vol. 204, No. 6, June, 1990, Supplemental Section, pp. S6.
- [5] Hartlein, R.A., Harper, V.S., Ng, H.W., "Effects of Voltage Impulses on Extruded Dielectric Cable Life," IEEE Trans. on Power Delivery, Volume 4, No. 2, April 1989, pp. 829-841.
- [6] Weeks, W.L., Diao, Yi Min, "Wave Propagation Characteristics in Underground Power Cable," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-103 pp. 2816-2825, Oct 1984.
- [7] Diao, Yi Min, "Propagation of Wideband Signals in Power Cables," Ph.D. Thesis, Purdue University, School of Elec. Eng., West Lafayette, Ind., Dec., 1984, chapters 2-3.

[8] Steiner, J.P., "Digital Measurement of Partial Discharge," Ph.D. Thesis, Purdue University, School of Elec. Eng., West Lafayette, Ind., May, 1988, chapter 3.

[9] Heinhold / Stubbe, "Power cables and their Application – Part 1  
Siemens Aktiengesellschaft, 1993

[10] Heinhold / Stubbe, "Power cables and their Application – Part 2  
Siemens Aktiengesellschaft, 1993

[11] Brunheroto, Plácido Antônio, "Estudo técnico de Distribuição de Energia Elétrica,  
ELETROPAULO, Setembro, 1990

[12] Cicarelli, LD, "Estudo da Capacidade de corrente dos cabos subterrâneos,  
Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1991

[13] Bach, Robert, Creutz, Peter, Kulkner, Wilfred, Kreft, Karl-Heinz, Oldehoff, Heiko, Ritter, Gerorg, "Testes de tensão para cabos de média tensão", Transmition & Distribution International, pág 50,51 e 52, Dec, 1993.

[14] Horn Filho, Ernesto, "Técnicas de Localização de Defeitos em cabos de Energia – A Experiência na Eletropaulo", 1986.

## ANEXO 1

### TESTES DE TENSÃO PARA CABOS DE MÉDIA TENSÃO

A seguir descrevemos testes em cabos de média tensão que serviram para demonstrar a confiabilidade operacional de sistemas reticulados que envolvem este tipo de cabo, além de tentar evitar interrupções durante a operação.. Os resultados foram satisfatórios para cabos com isolamento de papel impregnado, mas falharam para cabos em polietileno e XLPE.

Estes testes podem ser feitos em linhas recém instaladas para se verificar possíveis falhas de transporte ou instalação ou para recomissionamento de um sistema de cabos.

Para cabos com isolação de papel impregnado, um teste em corrente contínua foi estabelecido para a monitoração da confiabilidade operacional de um sistema de cabos. Este teste revelou falhas incipientes com uma alta confiabilidade e melhor, sem danificar consideravelmente o cabo. Entretanto, este teste não é adequado para cabos com isolação de plásticos, pois pontos fracos ruins não podem ser detectados mesmo usando níveis de tensões altos. Assim não se conseguiu excluir o risco de haver danos consideráveis para a rede.

Desde então tem se procurado um método que estabeleça um equilíbrio harmonioso entre a eficiência no teste de tensão de um cabo com isolação plástica e sua preservação. Assim o objetivo deste capítulo é investigar a adequabilidade de testes de tensão para cabos isolados em PE, XLPE e em papel impregnado, usando testes comparativos de laboratório no campo.

#### Tipos de teste de tensão

- VLF 0,1 Hz voltagem senoidal e voltagem de onda quadrada cosenoidal.

A vantagem de uma fonte de voltagem de teste com a freqüência de 0,1 Hz sobre uma fonte de 50 Hz, corrente alternada, é que a potência reativa necessária é de 500 vezes menor. As fontes de tensão de teste de 0,1 Hz podem ser facilmente montadas e são relativamente fáceis de transportar, de modo que, testar grandes capacitações no campo não apresentam problemas.

Para o teste em laboratório usou-se um sistema capaz de testar curtos comprimentos de cabos ( 6 a 10m) com até 100 KV. Para o campo, também já se tem um equipamento disponível com fonte senoidal de 0,1 Hz, mas com tensão de saída limitada em 33 Kv.

- Voltagens oscilantes

Voltagens oscilantes podem ser produzidas economicamente no campo usando uma fonte de teste normal de corrente contínua, um spark gap (centelhador) gatilhado e um choque de alta voltagem. O cabo a ser utilizado no teste serve como um capacitor e é carregado com uma unidade de teste de tensão contínua e em seguida descarregado via centelhador gatilhado, no choque. O pulso de voltagem resultante que oscila simetricamente ao redor do ponto zero (1 a 12 Khz), tem que ser repetido muitas vezes para um teste.

Deste modo tensões de teste de altos valores podem ser criadas com facilidade no campo. Isso qualifica esse tipo de voltagem para testar cabos de alta tensão.

- Teste com voltagem de corrente contínua e com 50 Hz (60Hz)

Para testes no campo com voltagem de corrente alternada na faixa da freqüência industrial, um sistema de ressonância, com um conversor de freqüência e resistores indutivos têm sido obtidos comercialmente ao invés de um sistema de ressonância; para estes testes um transformador convencional foi usado no laboratório para produzir alta voltagem em 50 Hz. A voltagem c.c incluída nos testes para propósitos de comparação, foi produzida no laboratório com a retificação de uma alta tensão de 50 Hz, ao invés de se usar sistemas de testes de campo convencionais.

De modo a se investigar a habilidade dos vários tipos de voltagens para revelar pontos fracos com “water – trees” em cabos em XLPE, comprimento de 6m, obtidos de dois cabos em XLPE de 10 Kv, envelhecidos pelo uso no campo, foram usados:

**Cabo A** –“Vented trees” na camada semicondutora interna avançamento em até 65% da isolação.

Cabo envelhecido em operação por cerca de doze anos;

**Cabo B:** “Vented trees” na camada semicondutora externa avançando até 85% da isolação. Cabo envelhecido na operação por cerca de onze anos.

De modo a se obter o valor da resistência dos cabos XLPE envelhecidos em serviço, os cabos A e B foram submetidos aos tipos de voltagem na forma de testes de resistência residual.

- Cabo A:

- 1- Voltagem de teste V/V<sub>0</sub>
- 2- Voltagem de 50Hz
- 3- Onda quadrada VLF cosenoidal com 95 % de precisão
- 4- VLF senoidal – Voltagens oscilantes
- 5- Máximo valor especificado
- 6- Mínimo No de corpos de prova
- 7- Voltagem c.c.

- Cabo B:

- 1- Voltagem de teste V/V<sub>0</sub>
- 2- Voltagem de 50Hz
- 3- Onda quadrada VLF cosenoidal com 95 % de precisão
- 4- VLF senoidal – Voltagens oscilantes

- 5- Máximo valor especificado
- 6- Mínimo No de corpos de prova
- 7- Voltagem c.c.

Os resultados dos testes em cabos com isolação XLPE envelhecidos em serviço mostraram que altos níveis de tensão eram necessários para revelar pontos de “water-trees” aparecendo nos cabos A e B. (níveis muito maiores que os aceitáveis no campo).

Impressionante no entanto, é a confirmação que mesmo usando níveis de testes altos, não se pode detectar defeitos de water-trees em cabos XLPE, com voltagens de teste de corrente contínua.

Também não se observou nenhum tipo de dano accidental causado pelos testes. No entanto, na forma de testes de degrau de voltagem, não é claro em que voltagem o processo de disruptão começa e quanto tempo leva para que a disruptão ocorra.

#### **Testes em cabos isolados com papel impregnado.**

Uma falha típica num cabo isolado com papel impregnado é a penetração de umidade no dielétrico devido a danos ou corrosão da capa metálica. Então, corpos de prova de cabos isolados em papel impregnado com falhas feitas artificialmente foram testados com os vários tipos de voltagens.

Todos os tipos de voltagens alternativas, usando os níveis de tensão e tempos de duração indicados, são capazes de detectar esse tipo de falha com níveis de tensões menores que os usados nos testes com c.c. Portanto, há uma grande restrição, pois a voltagem de ressonância de c.a. só é adequada para se testar curtos comprimentos de cabos isolados em papel impregnado, devido a não ser possível o ajuste da ressonância do circuito ressonante.

## Conclusões

As seguintes conclusões podem ser tiradas destes testes :

- Pontos fracos em falhas incipientes em cabos em XLPE podem não ser detectados com testes de voltagem c.c mesmo se elevando muito a tensão;
- Testes de tensão com os tipos alternativos de tensão (VLF senoidal, onda quadrada cosenoidal 50 Hz <sup>“c</sup> e voltagens oscilantes) são em princípio adequados para detectar falhas em cabos PE/XLPE.
- Usando os níveis de teste (voltagem 50 Hz c.a , 2Vo; VLF; 3Vo; voltagens oscilantes 4Vo) é imediatamente possível detectar falhas incipientes;
- Danos menos sérios de cabos em PE/XLPE poderiam ser detectados com níveis de testes mais elevados, mas com um maior risco de danos posteriores e o perigo de disruptões indesejáveis em cabos que ainda estejam em boas condições de operação.
- A extensão da duração do teste discutida aqui, de 30 min, para os testes de tensão de 50 Hz c.a e de tensão VLF, para 60 min é recomendada. Isso se aplica paraticularmente para os testes em sistemas de cabos em XLPE, envelhecidos em serviço;
- Falhas típicas de cabos isolados em papel impregnado podem ser detectadas com os tipos alternativos de voltagens, mesmo com níveis de tensão de teste inferior ao estabelecido pela norma VDE para testes com c.c.
- Para o campo, particularmente aos cabos de isolação plástica, o VLF de 0,1Hz com onda quadrada cosenoidal é o mais indicado. Isto se deve aos resultados obtidos em baixa voltagem de início de descargas parciais ( obtém-se velocidades de crescimento dos canais relativamente elevadas). O tempo recomendado é de 60 min com nível de tensão de 3Vo .

Para acompanhar sistemas de cabos XLPE recentemente instalados, as medições de descargas parciais com voltagens oscilantes ou com impulso de tensão unipolar representam a possibilidade de se obter um resultado com respeito à qualidade do trabalho de instalação.

Porém, a medição de descargas parciais no campo, ainda está passando por um momento de desenvolvimento, sendo que os resultados obtidos até aqui devem obter uma grande melhora para tornar o diagnóstico de cabos uma etapa efetiva do dia a dia do profissional de Distribuição de Energia elétrica por vias subterrâneas.

## ANEXO 2

- Sistema Hitec 2000 – Seba\_KMT

Todo o sistema localiza-se dentro de uma Van .



O sistema prevê :

- Segurança
- Facilidade de operação
- Proteção do cabo.

A unidade de controle do sistema é o coração da caminhonete.



Inovações:

- Menu via toque na tela
- Automatização dos processos de medida
- Funções de ajuda “ context-sensitive “
- Instrumentos Virtuais
- BUS System
- possibilidade para definir direitas de acesso às funções e aos limites do parâmetro, dependendo da tarefa e do know-how dos usuários .

Características da Linha :

- instrumento Kabellux® 2000 de reflexão do pulso é o membro novo da série bem sucedida de Kabellux®.
- O indicador simultâneo de todas as três fases
- TFT/ VGA visor colorido
- Alta resolução e acurácia
- Alto alcance dinâmico pra medidas à longa distância
- Uma fonte de potência na tecnologia do conversor de freqüência é usado.
- Reduzidas dimensões e peso permite uma integração em veículos pequenos

- Duas modalidades da operação : Falha-relacionado as maneiras apropriadas da medição e das funções necessárias são escolhidas automaticamente de acordo com os tipos diferentes de falhas e Função-relacionadas o usuário escolhe o teste virtual no seu próprio o equipamento .
- Os dados medidos podem ser armazenados ou imprimidos( A tensão do teste , curvas da reflexão do pulso e outros dados relevantes do cabo )
- Opcionalmente, funções importantes são remotamente controláveis para um aumento na segurança e na eficiência.

# Technical Data: HiTec 2000

Pre-location	Standard	Option
<i>Pulse reflection</i>		
Measuring mode	Direct, difference, comparison, impulse-current, voltage relaxation, arc stabilization	
Inputs	L1, L2, L3 simultaneous display	
Range	0...160 km	
Sampling rate	100 MHz	
Resolution	0,2 m	
Accuracy	± 0,2 %	
Display	640 x 480 VGA color	
Memory	Internal: 35 / External: PC	PC-Software LuxView 2000
Interfaces	Printer: Centronics PC: RS 232	
<i>Arc-stabilization (activ)</i>		
Voltage (DC)	0 ... 32 kV	
Total power	1840 J	3040 J

## Pinpointing

<i>Acoustic reception</i>		
Voltage (DC)	0...2 / 4 kV (1200 J) 0...8 / 16 / 32 kV (1200 J)	2400 J 2400 J
Repetition rate	2 - 6 sec. adjustable	2 - 6 sec. adj.
<i>Step voltage</i>		
Voltage (DC)	0...5 kV	
Current	0,5 A	

## HV-test

Voltage [DC]	0...70 kV	0...80 kV
Current	100 mA (Is) / 10 mA (In)	
Voltage [VLF]		0...± 52 kV cos <sup>2</sup>
Max. Capacity		5 µF

## Fault modification

Voltage	0..10 kV DC 0...200 V AC	0..32 kV DC
Current	1,5 A DC 30 A <sub>eff</sub> AC	

## Audio-frequency

Frequency	240, 480, 982 Hz	9820 Hz
Power	500 W	
Impedance Matching	automatic	

## Connections

HV-cable	50 m, 3-phase 70 kV	50 m, 3-phase 80 kV
Mains	50 m via slip-ring	
Earth	50 m	
Auxiliary earth	10 m	
Coax-cable		50 m, 3-phase for pulse reflection

Technical data subject to change without notice.



▼ 1 Seba Dynatronic

E-mail: [seba-dynatronic@sebadyn.de](mailto:seba-dynatronic@sebadyn.de)

Seba Dynatronic<sup>®</sup> Mess- und Ortungstechnik GmbH  
Dr.-Herbert-Iann-Str. 6; D-96148 Baunach Germany  
Tel.: +49 9544 68-0; Fax +49 9544 2273