TESE
353

# PROTEÇÃO DIFERENCIAL LONGITUDINAL POR FIO PILOTO

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

FRANCISCO DUARTE DE OLIVEIRA

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

# PROTEÇÃO DIFERENCIAL LONGITUDINAL POR FIO PILOTO

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

TESE SUBMETIDA À ESCOLA FEDERAL DE ITAJUBÁ
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS

FRANCISCO DUARTE DE OLIVEIRA

ITAJUBÁ, MG - BRASIL

FEVEREIRO - 1983

Ministério da Educação e Cultura

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

# A N E X O  I

## PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 040 de 28/01/83, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "Proteção Diferencial Longitudinal por Fio Piloto"

apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registros Acadêmicos) a expedição do título de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração de Sistemas de Potência satisfeitas as demais exigências regimentais à FRANCISCO DUARTE DE OLIVEIRA.

Itajubá, 01 de fevereiro de 1983.

1º Examinador
Engº. Demósthenes de Souza Paixão
LIGHT

2º Examinador
Profº. Paulo Sergio Pereira - EFEI

3º Examinador
Profº. Marcio Antonio Curi
Orientador

4º Examinador

# AGRADECIMENTOS

- À Centrais Elétricas de Santa Catarina, que tem proporcionado as condições necessárias para um melhor aperfeiçoamento técnico-profissional.

- Aos Engºs. Milton De Haro Antunes, Sérgio Mündel Lacerda, José Fernando de Souza Fonseca, Afonso Celso Correa Dias, Mário Shiguenari Kawata e José da Silva Neto, pelo incentivo no desenvolvimento da Tese.

- Ao Profº Márcio Antonio Curi pela valiosa orientação.

- Aos meus pais, que não mediram esforços para a minha formação.

- A minha esposa Ivone, e meus filhos Christiano e Eleonora, pela compreensão dispendida.

# R E S U M O

Este trabalho tem como objetivo analisar os problemas que decorrem da utilização da proteção diferencial longitudinal por fio piloto, bem como fornecer um roteiro para estudo de viabilidade e aplicação desta proteção.

A proteção diferencial longitudinal por fio piloto é recomendada para proteção de linhas de transmissão relativamente curtas e cabos subterrâneos de energia.

Neste trabalho são levantadas todas as influências a que estará sujeita esta proteção, sendo fornecidas as expressões para cálculo de elevação do potencial de malha de terra, tensões induzidas, influência da blindagem do Cabo Piloto, tensões compostas e, influência do cabo de terra no circuito da Linha de Transmissão.

São apresentados também os equipamentos para minimizar tais influências: reator de drenagem, transformador de neutralização e transformador de isolamento, etc.

Finalmente apresenta-se os resultados de um estudo feito empregando este tipo de proteção a ser implantado num sistema de 138kV.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

# ÍNDICE

CAP. 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Situação Atual e Perspecticas Futuras para Aplicação da Proteção por Fio Piloto.

1.2 – Comparação com outros tipos de Proteção, mostrando suas vantagens e desvantagens.

CAP. 2 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL LONGITUDINAL POR FIO PILOTO

2.1 – Operação por Oposição de Tensão.

2.2 – Operação por Circulação de Corrente.

CAP. 3 – INFLUÊNCIAS A QUE ESTARÁ SUJEITO O CABO PILOTO DURANTE FALHAS NO SISTEMA ELÉTRICO

3.1 – Elevação do Potencial da Malha de Terra das Subestações.

3.2 – Tensões Induzidas.

3.3 – Circulação de Corrente pela Blindagem do Cabo Piloto.

3.4 – Tensões Compostas.

CAP. 4 - DISPOSITIVOS DE LIMITAÇÕES DAS INFLUÊNCIAS EM CABO PILOTO

4.1 - Transformador de Neutralização.

4.2 - Reator de Drenagem.

4.3 - Transformador de Isolamento.

4.4 - Cabo Piloto.

4.5 - Relé de Supervisão e Acessórios.

CAP. 5 - APLICAÇÃO PRÁTICA DA PROTEÇÃO LONGITUDINAL POR FIO PILOTO

5.1 - Dados do Sistema.

5.2 - Considerações Gerais.

5.3 - Características das Linhas.

5.4 - Tensão Induzida Longitudinalmente no Fio Piloto.

5.5 - Verificação do Fator de Blindagem devido ao Cabo Pára-Raios.

5.6 - Elevação do Potencial nas Subestações .

5.7 - Conclusão.

CAP. 6 - CONCLUSÕES FINAIS

BIBLIOGRAFIA

Escola Federal de Engenharia Biblioteca Itajubá

# S I M B O L O G I A

BR - Bobina de Restrição
BO - Bobina de Operação
A,B - Disjuntores
VA - Tensão no Relé da Subestação A
VB - Tensão no Relé da Subestação B
er - Elevação de Potencial de um determinado ponto externo à malha de terra da subestação em relação ao terra remota
et - Elevações de potencial total
I - Corrente de falta, monofásica
R - Resistência de terra
eg - Diferença entre a tensão "et" e a tensão "er"
$\rho$ - Resistividade do solo ( m.ohms )
r - Raio do hemisfério equivalente da malha de terra
p - Ponto qualquer fora da malha de terra
x - Distância do ponto "p" ao centro do hemisfério equivalente da malha de terra
Y - Distância do ponto "p" ao limite do hemisfério
VG - Volume do hemisfério equivalente
V - Volume da esfera
$A^-$ - Área da malha de terra
h - profundidade dos eletrodos de aterramento da malha de terra
$A^+$ - Área das faces laterais dada pela profundidade dos eletrodos de aterramento
AG - Área efetiva da estrutura de aterramento
$A\bar{G}$ - Área aproximada da malha de terra
$A_1, A_4$ - Áreas das faces menores do paralelepípedo formado pela malha de terra
$A_2, A_3$ - Idem. Faces laterais
S - Superfície equivalente da esfera
K - Fator de assimetria

Ept - Elevação do potencial de terra

Eptas - Tensão assimétrica de elevação do potencial de terra

RM - Resistência de malha de terra

Zm - Impedância mútua

$Z_1, Z_2$ - Impedância equivalente dos elementos protetores do cabo piloto, representados nos extremos do mesmo

$V_{1z}, V_{2z}$ - Tensões nas impedâncias $Z_1$ e $Z_2$

i - Corrente no cabo piloto (induzida)

$E_n$ - Tensão induzida no cabo piloto em condições normais de operação

TI - Transformador de Isolamento

RN - Reator de Neutralização

TN - Transformador de neutralização

RD - Reator de Drenagem

f - Frequência

IN - Corrente nominal da linha de transmissão

E induzida - Tensão induzida no cabo piloto, quando ocorre um curto-circuito na linha de transmissão

K - Fator de blindagem

De - Profundidade equivalente da corrente de retorno pela terra

d - Distância entre os condutores e cabo piloto

a - Distância entre o cabo piloto e o condutor de energia

T - Fator que converte a $\rho$ em Siemens

$\ell$ - Comprimento do cabo piloto

$C_{1T}$ - Capacitância da linha de transmissão para o solo

$C_{2T}$ - Capacitância do cabo piloto para o solo

C - Capacitância entre a linha de transmissão e o cabo piloto

$i_c$ - Corrente induzida em C

$i_1$ - Corrente induzida que circula em $Z_1$

$i_2$ - Corrente induzida que circula em $Z_2$

$E_1$ - Tensão induzida elétrica em $C_{1T}$

$E_2$ - Tensão induzida elétrica em $C_{2T}$

Et - Tensão de influência composta ou total

$C_1$ - Capacitor do "tap" central do TI

$Z_{1E}$ - Impedância equivalente de sequência positiva

$Z_{0E}$ - Impedância equivalente de sequência zero

$Z_{1L}$ - Impedância de sequência positiva da LT

$Z_{0L}$ - Impedância de sequência zero da LT

F.P. - Fio Piloto

LT - Linha de Transmissão

Ep - Elevação do Potencial da terra da subestação em relação ao Terra Remoto

e - Potencial do equipamento de supervisão em relação ao Terra Remoto

VM - Vão Médio

$Z_{KK}$ - Impedância própria do cabo pára-raios

$Z_{K3}$ - Impedância mútua entre o condutor 3 e 0 cabo pára-raios

$Z_{K6}$ - Impedância mútua entre o condutor 6 e o cabi pára-raios

$Z_{KT}$ - Impedância mútua entre o cabo pára-raios e cabo piloto

$Z_{6T}$ - Impedância mútua entre o condutor 6 e o cabo piloto

$Z_{3T}$ - Impedância mútua entre o condutor 3 e o cabo piloto

$I_1$ - Corrente de curto-circuito monofásico de sequência positiva

$I_0$ - Corrente de curto-circuito monofásico de sequência zero

$X_v$ - Fator a ser utilizado na Figura 9 da Norma VDE 0228, para obtenção da indutância mútua

$M_c$ - Indutância mútua entre cabo piloto e o condutor de energia, obtido da Norma VDE 0228

$Z_0$ - Impedância de sequência zero do condutor

$Z_G$ - Impedância de sequência zero do cabo pára-raios

M - Impedância mútua entre o cabo pára-raios e o condutor

z - Impedância de sequência zero para um vão de cabo pára - raios

m - Impedância mútua entre o condutor e o cabo pára-raios , para um vão de LT

ra - Resistência de aterramento da estrutura da LT

$I_G$ - Corrente de curto-circuito monofásico que circula no cabo guarda

$I_M$ - Corrente de curto-circuito monofásico que circula pela' resistência equivalente de malha de terra

$I_T$ - Corrente de curto-circuito monofásico que circula pelas estruturas da LT

$I_c$ - Corrente de curto-circuito monofásico total

$V_1, V_2$ - Elevação de potencial da (s) malha (s) de terra

A, A', B, B' - Pontos de potencial zero em relação a elevação de potencial da subestação

$Z_{LADDER}$ - Impedância equivalente das estruturas e cabo guarda da LT

$Z_{ep}$ - Valor de impedância concentrada pelo qual circula $I_G$

$Z_{eq}$ - Impedância equivalente do paralelo entre $Z_{LADDER}$, RM e $Z_{ep}$.

ZP - Impedância primária dos transformadores

$Z_S$ - Impedância secundária dos transformadores

$Z_T$ - Impedância terciária dos transformadores

# CAP. 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS PARA APLICAÇÃO DA PROTEÇÃO POR FIO PILOTO.

Muito pouco tempo atrás no Brasil, apenas nas grandes capitais era encontrado este tipo de proteção.
A razão disto é que em tais cidades, o consumo de energia elétrica é muito grande, com taxas normais de crescimento o que significa que a cada ano uma nova quantidade, relativamente grande, de energia deverá ser adicionada ao mercado.
A característica de concentração de carga nestes grandes centros urbanos leva a situação de subestações interligadas próximas uma das outras.

Nestas distâncias pequenas a aplicação da proteção convencional encontra algumas dificuldades' como o ajuste e a coordenação dos relés.
Uma vez que o número de cidades de grande porte vem crescendo, é de se esperar que as mesmas venham a se deparar com os mesmos problemas com relação a instalação de subestações nas suas áreas urbanas.

Assim, podemos esperar que o campo de aplicação da proteção longitudinal por fio piloto aumente cada vez mais.
Além deste aspécto, é real o fato de que hoje em dia os padrões de qualidade e confiabilidade, representados por melhores níveis de tensão e frequência e pela continuidade na alimentação da carga são objetos de grande estudos e inves-

timentos a fim de minimizar as consequências sócio econômica que sempre trazem as prolongadas faltas de energia.
(OBJETIVO PRINCIPAL DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA. FORNECIMENTO CONTÍNUO DE ENERGIA ELÉTRICA DE BOA QUALIDADE).
Com isto as empresas de energia elétrica, passam a estudar e implantar técnicas cada vez mais sofisticadas, de proteção, controle e supervisão.
Face ao exposto podemos dizer que qualquer sistema de proteção a ser projetado, terá de considerar acima de tudo, além dos requisitos básicos, o aspécto econômico do serviço a ser prestado pela concessionária de energia elétrica.

Conclui-se então que a proteção longitudinal por fio piloto é uma solução que está ganhando bastante aceitação, para solução de proteção de linhas curtas e cabos subterrâneos de energia.

## 1.2 - COMPARAÇÃO COM OUTROS TIPOS DE PROTEÇÃO, MOSTRANDO SUAS VANTAGENS E DESVANTAGENS.

Existem 03 (três) formas básicas para proteção de linhas de transmissão e sub-transmissão.
| Ver Refs. 1, 2, 3, 4, 5 e 6 |

1.2.1 - Proteção por relés de sobrecorrente (simples ou direcionais).

1.2.2 - Proteção por relés de distância.

1.2.3 - Proteção por releamento piloto.

1.2.3.1 - Fio Piloto

a) com relés de distância
b) com relés diferenciais

1.2.3.2 - Onda Portadora (carrier)

a) comparação de fases
b) comparação direcional

1.2.3.3 - Microondas

Com referência ao tipo de proteção a ser empregado podemos citar:
Devemos propor equipamentos o mais confiável possível, verificar a qualidade da instalação e propor ainda que seja realizado serviço de manutenção periódica.
O sistema de proteção é tanto mais seletivo quanto melhor ele destingue entre situações

que requeiram e as que não requeiram (ou sejam retardadas) operações de retirada de serviço de equipamentos ou linhas, seja devido a defeito temporário ou permanente.
Um sistema de proteção também deve ser seletivo no sentido de ser capaz de retirar do serviço o mínimo de equipamento, ou apenas o equipamento afetado pelo distúrbio.
Esta condição nem sempre é possível ou desejada e depende muito da configuração do sistema.
A velocidade de atuação é uma condição evidente, minimizando sempre que possível, os efeitos do distúrbio.
A boa sensibilidade do sistema de proteção levará este a operar dentro de uma gama mínima de variação das condições específicas para as quais tenha sido ajustado.
O objetivo principal de um sistema de proteção é a retirada de serviço de equipamento defeituoso, de maneira tão rápida quanto possível.
Concluímos então que os requisitos de um sistema de proteção são:

1 - Confiabilidade

2 - Seletividade

3 - Velocidade

4 - Sensibilidade

5 - Economia

### 1.2.1 - Proteção por Relés de Sobrecorrente

A proteção por relés de sobrecorrente é uma proteção não muito sofisticada.
De uma forma geral os relés são simples: Eletromecânicos ou Estáticos; necessitando apenas, de uma grandeza atuante

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ

que é a corrente secundária de um transformador de corrente.

Esta proteção responde a um aumento da corrente acima de um valor pré-ajustado.

Esses relés podem ser direcionais ou não. Os direcionais tem as mesmas características dos relés de sobrecorrente acrescido de uma unidade direcional e esta atuação dependerá de duas grandezas: a de polarização (ou referência) e a de atuação (corrente).

**Vantagens:**

a - A proteção por sobrecorrente é a mais simples e a menos dispendiosa se compararmos com as demais proteções.

b - Não necessita de relés de supervisão.

c - Não necessita de equipamentos auxiliares para o seu desempenho.

d - Quando não direcionais, não necessitam de fonte de polarização, transformador de potencial.

e - É muito utilizada como proteção de retaguarda local para outros tipos de proteção.

**Desvantagens:**

a - Menor confiabilidade que as proteções por releamento piloto e distância.

b - Quando não direcionais, é aplicado somente em sistemas radiais.

c - Menor precisão de atuação, que a proteção por fio piloto, grande dificuldade de se coordenar com outros relés quando as linhas são de comprimento muito reduzido, principalmente a unidade instantânea, devido a mínima diferença de níveis de curto circuito.

1.2.2 -Proteção por Relés de Distância

A proteção por relés de distância depende de duas grandezas distintas para atuarem. Essas grandezas são corrente e tensão, razão pela qual podem ser expressos em termos de reatância, admitância e impedância. Este compara tensão e corrente no seu ponto de aplicação.

A proteção por relés de distância garante tempos de desligamento bastante curtos e, como sua proteção é por zonas, garante ainda a proteção das barras e linhas vizinhas nos seus respectivos tempos de ajuste.

**Vantagens:**

a - Menos dispendiosa e mais simples que a proteção por fio piloto.

b - Não necessita de auto-proteção.

c - Os relés de impedância ou OHM indicados para proteção de fase, em linhas de comprimento médio.

d - Os relés de reatância, são indicados particularmente para proteção, em linha de comprimento curto, onde a resistência tem valor operacional em relação à indutância e os arcos voltaícos não podem ser desconsiderados.

e - Relé de admitância ou MHO, são bastante indicados na proteção de linhas longas, sujeitas à sérias oscilações. São inerentemente direcionais e quase não são afetados por oscilações do sistema que não caracterizam uma falta.

Desvantagens:

a - Os relés de impedância, são pouco sensíveis às oscilações do sistema e exigem adicionalmente uma unidade direcional.

b - Os relés de reatância, são bastante afetados pelas oscilações e também exigem adicionalmente unidade direcional.

c - Os relés de admitância ou MHO, são bastante afetados pela resistência de arco voltaico.

d - Quando utilizados em linhas curtas, há dificuldade de fazer coordenação com os outros relés adjacentes do sistema.

e - Alto erro de medida, devido a classe de precisão dos TC's e TP's.

1.2.3 - Proteção por Releamento Piloto.

O princípio fundamental do funcionamento dos relés com canal piloto baseia-se no intercâmbio de informações entre os relés existentes em ambas as extremidades do trecho de linha a ser protegido e, dependendo do canal a ser adotado.
Esses sistemas poderão ser divididos nos seguintes tipos:

**1.2.3.1** - Com Fio Piloto

**1.2.3.2** - Onda Portadora

**1.2.3.3** - Micro-Ondas

1.2.3.1 - No sistema de relés para proteção das linhas de transmissão utilizando fio piloto, é aplicado o princípio idêntico ao relé diferencial, sendo que os sinais de comando são transmitidos por fio piloto, aéreo ou não, para abertura simultânea dos disjuntores das extremidades da linha.

**Vantagens:**

a - De fácil aplicação por ser proteção do tipo diferencial e não necessita de coordenação com trechos de linhas adjacentes.

b - Cobertura total, (100%) no circuito que é envolvido pelas proteções como um único conjunto, ou seja, estável para faltas externas e extremamente sensível para faltas internas à zona de proteção.

c - Devido ao princípio de equilíbrio utilizado quer seja de corrente ou de tensão, os relés operarão simultaneamente num tempo de (20ms a 50ms) para faltas dentro da zona protegida.

d - Utiliza-se apenas um relé por terminal.

e - Proteção de linhas com alta confiabilidade onde as vezes, torna-se impraticável o ajuste de relés de sobrecorrente, distância ou outro tipo de proteção.

f - Para linhas curtas, releamento de fio piloto torna-se a mais econômica forma de releamento de alta velocidade, de desligamento.

g - O fio piloto pode ser utilizado simultâneamente, para outras finalidades / tais como telefone, alarme, controle , etc.

Desvantagens:

a - É uma proteção mais complexa, sofisticada e mais dispendiosa que as proteções de sobrecorrente, distância, etc... [ Ref. 5 ]

b - Como o esquema opera como um conjunto unitário, é necessário utilizar supervisão para acusar curto circuito e/ou abertura do fio piloto, ou seja, verificar a continuidade elétrica do fio piloto.
Qualquer abertura ou curto no fio piloto, causadas por faltas ou ajustes externos, provocará mal funcionamento do sistema de proteção.

c - A influência do sistema de potência sobre o fio piloto, como por exemplo: tensão induzida e elevação do potencial da malha de terra poderá exigir a aplicação de filtros, transformadores de neutralização, reatores de drenagem, etc.

1.2.3.2 - Onda Portadora

Uma corrente de onda portadora carrier, com frequência entre 30 e 330 KHz, é transmitida na própria linha de transmissão, superposta a corrente de frequência industrial, 60Hz.
Esta corrente em alta frequência

é a que leva as informações de um a outro terminal da LT.
Para que isto aconteça são necessários utilizar bobina de bloqueio, capacitores de acoplamento, transmissor, receptor para transmissão e recepção do sinal.
Devido a pequena faixa de frequência utilizada, há disponibilidade de poucos canais.

Vantagens:

a - Pode ser utilizado para grandes distâncias.

b - Utiliza os próprios condutores das linhas de transmissão para teleproteção, medição e telecomunicação, entre os terminais do circuito protegido.

c - Como temos abertura simultânea nos extremos das LT's, poderemos ter um sistema de religamento altamente desejável.

Desvantagens:

a - Não pode ser utilizado em pequenas distâncias pela dificuldade de ajustes dos relés a ele acoplados.

b - Uma interferência no canal carrier pode produzir uma saída falsa no receptor.

c - Para corrigir tais imprevistos é necessário usar sistemas adicionais, como ' sistema permissívo de sub-alcance ou canal carrier duplo.

d - O espéctro de frequência é limitado,ou seja, pode saturar as faixas especificadas para esse tipo de utilização, enquanto no fio piloto não existe esse / problema, podendo ser utilizados tantos canais para comando e proteção ' quantos forem necessários, bastando para isso aumentar o número de pares no cabo telefônico (usado para proteção ' por fio piloto).

e - A proteção por onda portadora tem limitações quanto a sua transmissão por cabos subterrâneos em virtude de atenuação do sinal.

1.2.3.3 - Microondas

O releamento piloto por microondas é um sistema rádio que exige visibilidade direta entre as torres repetidoras.
É bastante oneroso, justificando se onde os outros sistemas não são aplicáveis, e principalmente se outros serviços são exigidos' (telecomando, telemedição, teleproteção, telecomunicações, etc.

Sua faixa de frequência possibilita utilizar até 900 canais.

**Vantagens:**

a - Pode ser utilizado para proteger distâncias maiores que a proteção por fio piloto.

b - Além da proteção por relés, pode ser usado para controle supervisivo e dados em alta velocidade para entrada em computador.

c - Propagação através do espaço livre. Não é afetado por defeitos na linha de transmissão ou mudanças.

d - Possibilita grande intercâmbio de informações, simultaneamente como por exemplo num controle supervisivo, devido a larga faixa de frequência especificada para esta utilização.

e - É completamente independente das LT's.

**Desvantagens:**

a - Muito mais dispendioso que o fio piloto em distâncias relativamente pequenas.

b - Mais susceptível à atuações indevidas

pela interferência de sinais estranhos, como ruído espúrio gerado, um pulso extra, severas perturbações atmosféricas, etc.

c - Exige visibilidade direta entre as torres repetidoras.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ B M

## CONCLUSÃO DO CAP. 1

A proteção longitudinal por Fio Piloto constitui o melhor tipo de proteção com desligamento simultâneo dos disjuntores terminais.

Portanto, permite religamento automático de alta velocidade, podendo-se carregar o sistema de transmissão mais aproximadamente de seu limite de estabilidade, promovendo-se máximo retorno de investimento.

É a forma mais adequada para proteção de linhas aéreas curtas e cabos subterrâneos de energia.

# CAP. 2 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL LONGITUDINAL POR FIO PILOTO.

## INTRODUÇÃO:

O princípio de funcionamento da proteção diferencial longitudinal por fio piloto é o mesmo de um relé diferencial, ou seja, opera quando o vetor diferença de duas ou mais grandezas elétricas semelhantes exceder uma quantidade pré-determinada. Por isso, dizemos que releamento piloto é uma adaptação dos princípios do Releamento Diferencial.
Existem basicamente dois princípios de operação de linhas por fio piloto: |Ver Refs. 4,5|

a - Operação por Oposição de Tensão

b - Operação por Circulação de Corrente

## 2.1 - OPERAÇÃO POR OPOSIÇÃO DE TENSÃO

O sistema de proteção opera de maneira tal que, quando em situação normal ou de curto circuito externo ao trecho protegido, as tensões no fio piloto estarão com os sentidos opostos e consequentemente nenhuma corrente passará pela bobina de operação do relé passando somente pela bobina de restrição. Figs. (1a) e (1b)
Já quando o curto circuito for interno ao trecho, tensões com o mesmo sentido aparecerão no fio piloto e consequentemente, teremos corrente passando pela bobina de operação do relé.

Em relação ao fio piloto propriamente dito, duas condições de operação podem surgir:

- Fio Piloto Aberto

- Fio Piloto Curto-Circuitado

Se o fio piloto estiver aberto, o relé ficará bloqueado de dar o disparo caso haja algum defeito na linha protegida.
Caso o fio piloto esteja em curto, o relé funcionará como um relé de sobrecorrente, podendo operar para corrente de carga.

Ilustração:

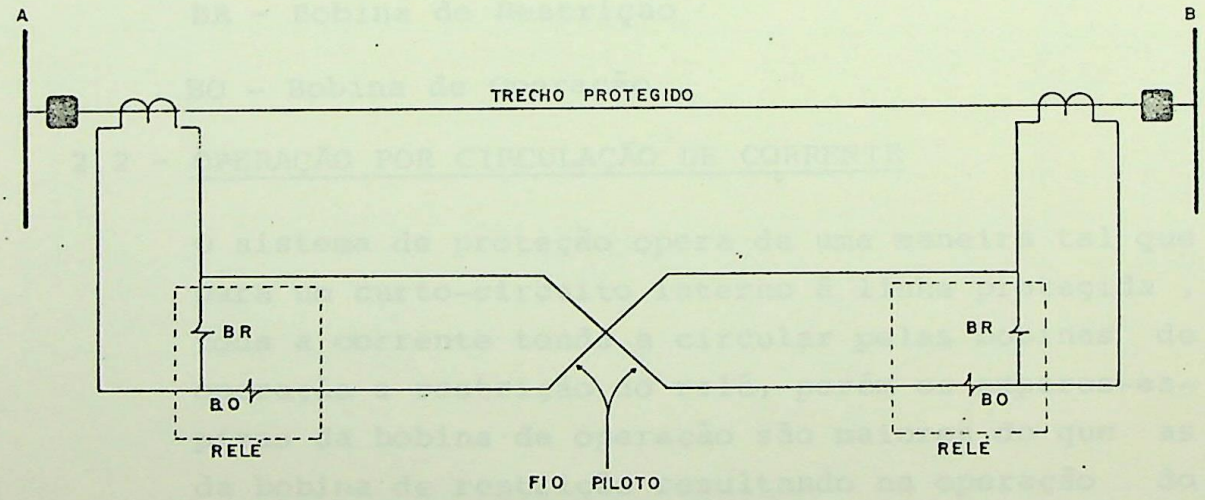
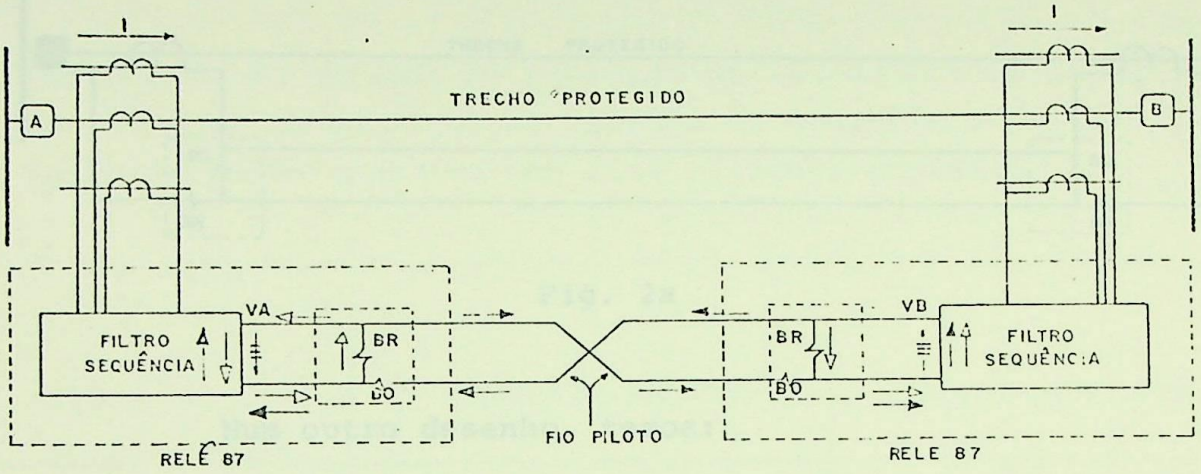



Fig. 1a

BR - Bobina de Restrição

BO - Bobina de Operação

Num desenho mais completo temos:




Curto Circuito Interno

Curto Circuito Externo

Tensão

Fig. 1b

BR - Bobina de Restrição

BO - Bobina de Operação

## 2.2 - OPERAÇÃO POR CIRCULAÇÃO DE CORRENTE

O sistema de proteção opera de uma maneira tal que para um curto-circuito interno à linha protegida , toda a corrente tende a circular pelas bobinas de operação e restrição do relé, porém os amperes-espiras da bobina de operação são maiores do que as da bobina de restrição resultando na operação do relé. Fig. 2a,2b.

Da mesma maneira duas condições podem surgir. Quando o fio piloto estiver aberto as duas bobinas ( operação e restrição ) estarão ligadas em série e nessa circunstância o relé operará. Caso o fio piloto esteja em curto a bobina de operação também estará em curto e o disparo pelo relé será bloqueado.

Ilustração:

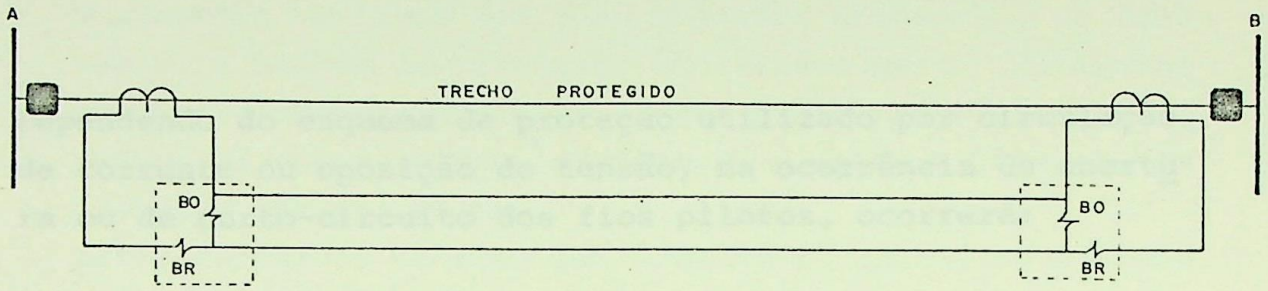
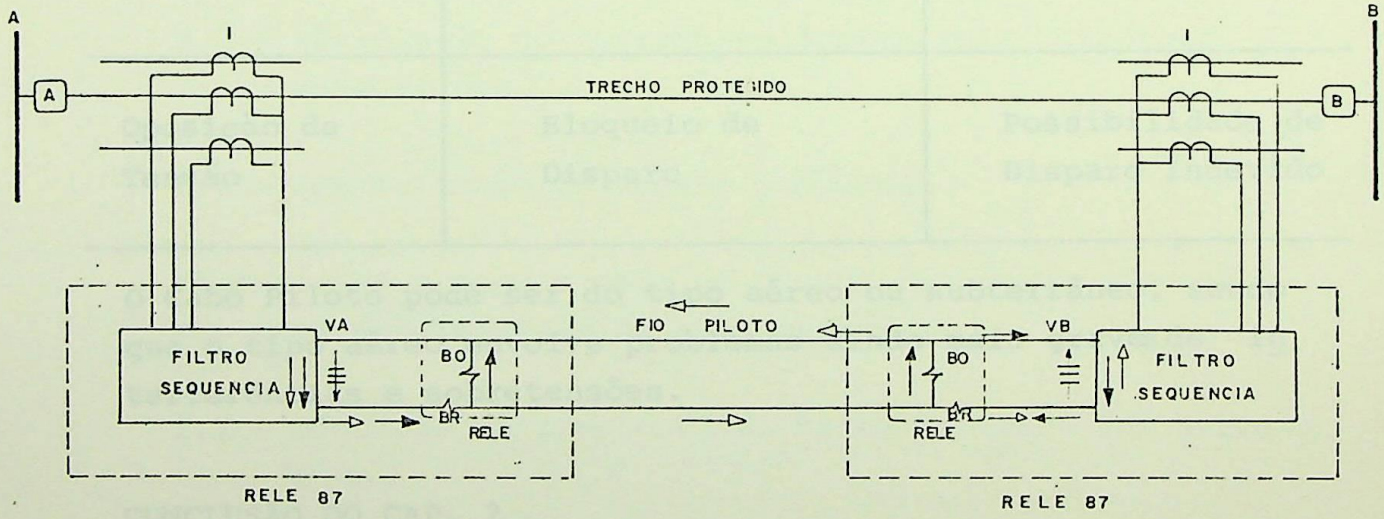



Fig. 2a

Num outro desenho, temos:




Curto Circuito Interno

Curto Circuito Externo

Tensão

Fig. 2b

BR - Bobina de Restrição

BO - Bobina de Operação

## R E S U M O

Dependendo do esquema de proteção utilizado por circulação de corrente ou oposição de tensão, na ocorrência de abertura ou de curto-circuito dos fios pilotos, ocorrerá:

| TIPO | CIRCUITO ABERTO | CURTO-CIRCUITO |
|---|---|---|
| Circulação de Corrente | Possibilidade de Disparo Indevido | Bloqueio de Disparo |
| Oposição de Tensão | Bloqueio de Disparo | Possibilidade de Disparo Indevido |

O Cabo Piloto pode ser do tipo aéreo ou subterrâneo, sendo que o tipo aéreo envolve problemas ainda mais graves de interferências e sobretensões.

CONCLUSÃO DO CAP. 2

Dos equemas piloto existentes, circulação de corrente e oposição de tensão, o mais simples e econômico para a aplicação específica é o tipo circulação de corrente. [ Ref. 5 ]

# CAP. 3 - INFLUÊNCIAS A QUE ESTARÁ SUJEITO O CABO PILOTO DURANTE FALHAS NO SISTEMA ELÉTRICO.

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os fenômenos, e também os processos utilizados para determinação das grandezas dos mesmos, aos quais poderão estar sujeitos os pares de fios que compõe o cabo utilizado na proteção por fio piloto.
Estes fenômenos ocorrem por ocasião de falhas no sistema elétrico onde esta proteção está aplicada e são basicamente os seguintes:

3.1 - Elevação do potencial da malha de terra das subestações.

3.2 - Aparecimento de tensão induzidas.

3.3 - Circulação de corrente elétrica pela blindagem do cabo piloto.

3.4 - Aparecimento de tensão compostas.

Descreve-se a seguir cada um desses fenômenos e os métodos para determinação de suas grandezas.

## 3.1 - Elevação do potencial da Malha de Terra das Subestações.

O aumento do potencial de terra resulta quando uma falta para a terra no sistema elétrico, causa um fluxo de corrente intenso pela malha de terra da subestação, através da resistência de contato de terra, e pelo neutro do transformador.
Portanto, uma corrente ao passar pela malha de terra da subestação durante um curto cicuito monofásico, faz com que o potencial de terra local aumente consideravelmente, em relação a um ponto remoto de terra e, desta forma apresenta-se longitudinalmente entre os condutores e a terra.

A elevação do potencial de terra é então proporcional a quantidade de corrente de falta retornando através da malha de terra e do valor da resistência da malha de terra da subestação, isto é, inerente a cada subestação em particular e, função da configuração elétrica do Sistema Elétrico.

Este aumento de potencial aparece, também, nas imediações da subestação, decrescendo exponencialmente a medida que vai se afastando da subestação, dependendo da constituição do terreno e da configuração da Malha de Terra (constante de tempo-RL). [Ver Ref. 6]

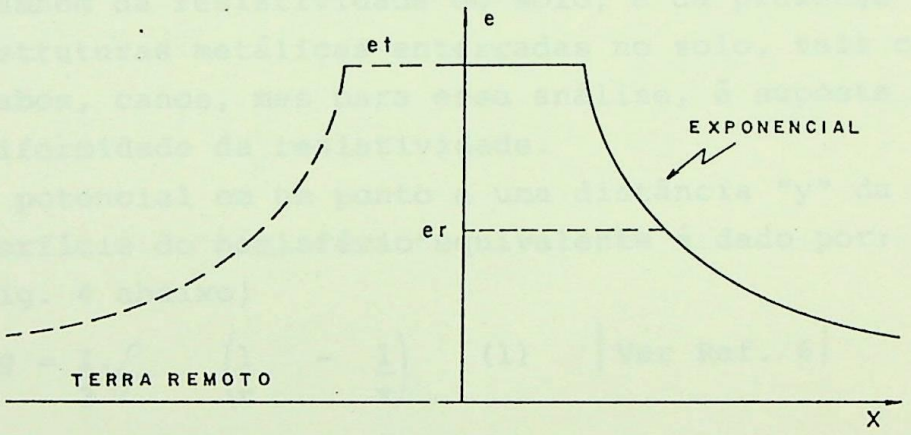



Figura 3 - Aumento do potencial da Malha de Terra da subestação.

Para análise da distribuição do potencial externamente à malha de terra da subestação, toma-se o comportamento do potencial normalizado em relação à máxima elevação, em função da distância a partir do limite da estrutura da Malha de Terra.

Esse comportamento é dado pela relação: $\left[\frac{er}{et}\right]$ sendo

$er = I.R. \left[\frac{er}{et}\right]$.

onde:

er = elevação do potencial de um determinado ponto externo à malha de subestação em relação ao terra remoto.

et = elevação do potencial total.

I = corrente de falta - 1 Ø.

R = resistência de terra.

A distribuição da elevação do potencial externo à malha de terra é função da área malha de terra e da distância, conforme figura 3 .
A distribuição do potencial é bastante dependente, também da resistividade do solo, e da presença de estruturas metálicas enterradas no solo, tais como cabos, canos, mas para essa análise, é suposta a uniformidade da resistividade.
O potencial em um ponto a uma distância "y" da superfície do hemisfério*equivalente é dado por:
(Fig. 4 abaixo)

$$eg = \frac{I.\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x}\right) \quad (1)$$ | Ver Ref. 6 |

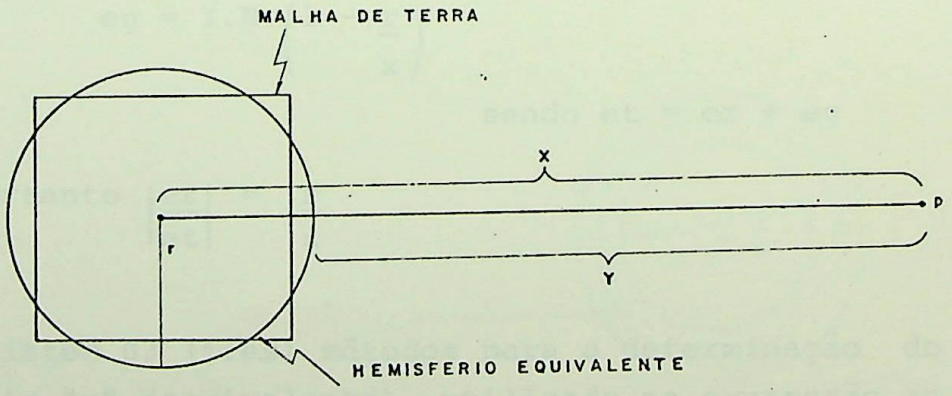



Fig. 4

Aproximação para o cálculo da elevação de potencial.

Sendo:

* Metade de uma esfera. As figuras 5 e 6 esclarecem melhor o uso do termo "hemisfério". A Distribuição de Potencial na malha de terra é hemisférica.

I = Corrente de retorno pela malha de terra com a Ocorrência de curto circuito ($3I_0$) (A)

$\rho$ = Resistividade do solo (m.ohms)

x = Distância do ponto "p" ao centro do hemisfério (m)

y = x - r distância do ponto "p" ao limite do hemisfério (m)

A queda total em potencial "et" fora do ponto, $x = \infty$

De (1) $et = \dfrac{I.\rho}{2.\pi.r}$ (2)

De (1) e (2)

$$\frac{eg}{et} = 1 - \frac{r}{x} \quad (3)$$

Como a elevação de potencial total da malha real é et = I.R.

De (3) $eg = et\left(1 - \dfrac{r}{x}\right)$

$$eg = I.R\left(1 - \frac{r}{x}\right)$$

sendo et = er + eg

portanto $\left|\dfrac{er}{et}\right| = \dfrac{r}{x}$

Existem 03 (três) métodos para a determinação do raio "r" (equivalente), utilizado na expressão anterior, para uma determinada Malha de Terra.

A) - <u>1º MÉTODO</u> (Fig. 5)

Calcula-se o volume VG = A x h

$A^-$ = Área da malha de terra

h = Comprimento dos eletrodos de aterramento

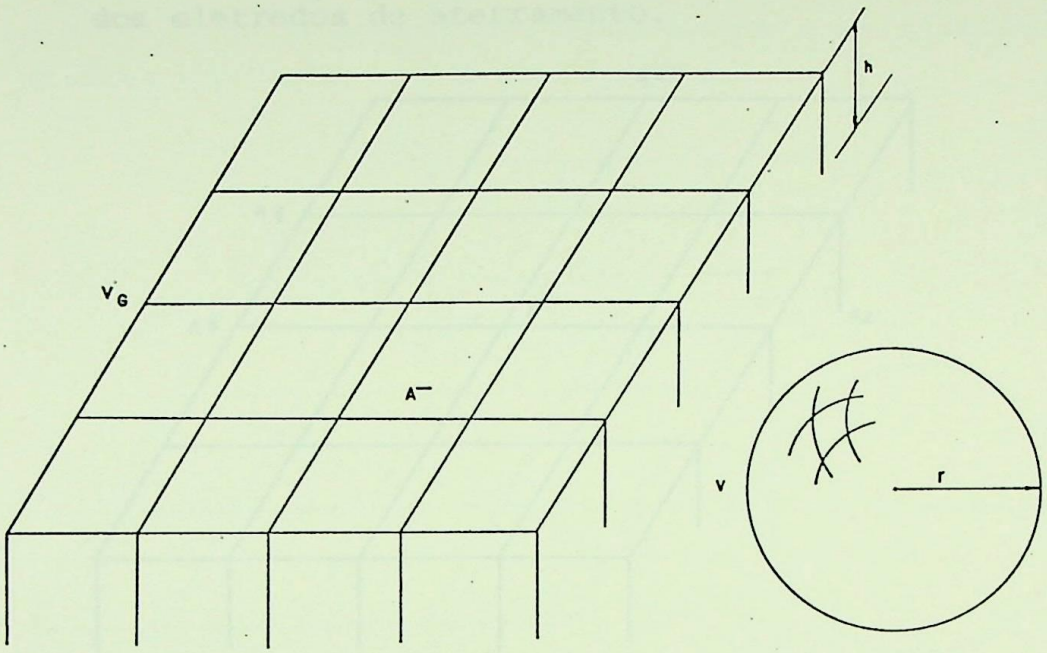



Fig. 5 - 1º Método de Aproximação

O raio do hemisfério do volume equivalente é dado por:

$$V_G = \frac{V}{2}$$

$$V = \frac{4}{3} . \widetilde{\Pi} . r^3$$

$$VG = \frac{2}{3} . \widetilde{\Pi} . r^3$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 . V_G}{2 . \widetilde{\Pi}}}$$

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

B) - 2º MÉTODO (Fig. 6)

Calcula-se a área efetiva da estrutura de aterramento $AG = A^- + A^+$

$A^-$ = Área da Malha de Terra

$A^+$ = Área das faces laterais dada pela profundidade dos eletrodos de aterramento.

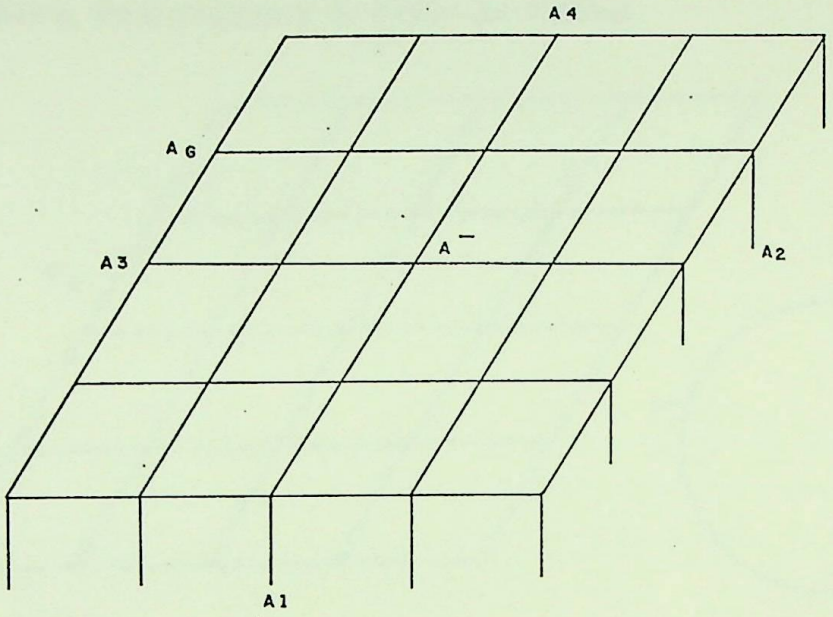
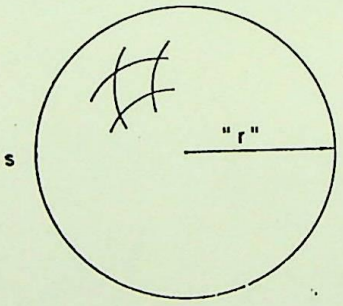



Fig. 6 - 2º Método de aproximação.




O raio do hemisfério de superfície equivalente é dado por:

$$A^+ = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

$$A_G = \frac{S}{2}$$

$$S = 4.\pi.r^2$$

$$A_G = 2.\pi.r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{A_G}{2.\pi}}$$

C) - 3º MÉTODO: (Fig. 7)

Toma-se a área da malha
O hemisfério de superfície equivalente é um círculo de área equivalente à área da malha.

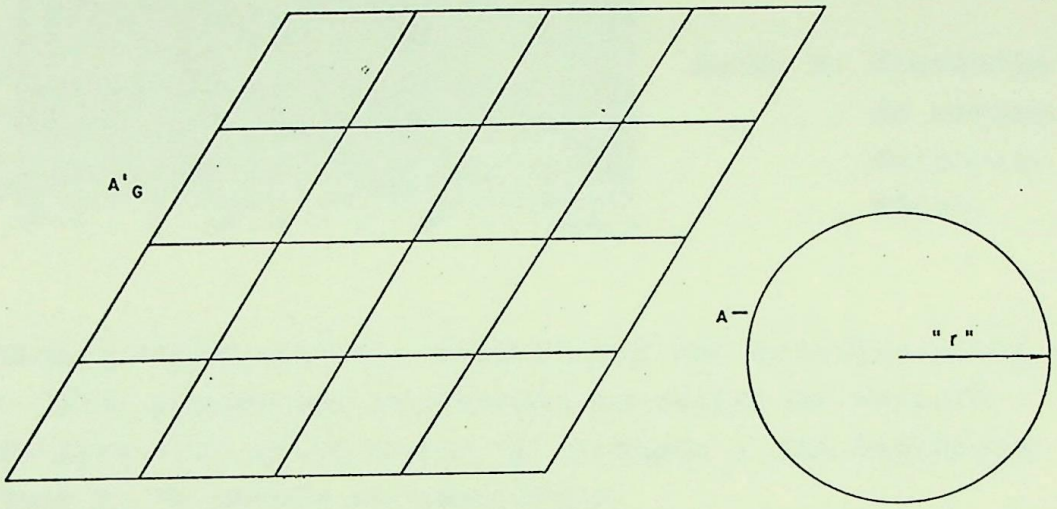



Fig. 7 - 3º Método de Aproximação

$A = A'G$

$A = \pi . r^2$

$A'G = \pi . r^2$

$r = \sqrt{\frac{A'G}{\pi}}$

Para as malhas não muito pequenas, os métodos que se aplicam melhor são o 2º e 3º; e para as malhas pequenas o 1º método. [ Ref. 7 e 8]

O 2º método é um método de aplicação geral, sendo satisfatório para a maioria dos casos. [Ref. 7 e 8]

Portanto, como já foi mencionado, a elevação do potencial de Malha de Terra depende da resistividade do solo, onde a malha foi implantada.
A figura a seguir apresenta curvas dos valores de tensão nas vizinhanças, ( quando I = 1000A ) para uma distância "X" do centro do hemisfério, para vários valores de resistividade do solo. [Ver Ref. 6]

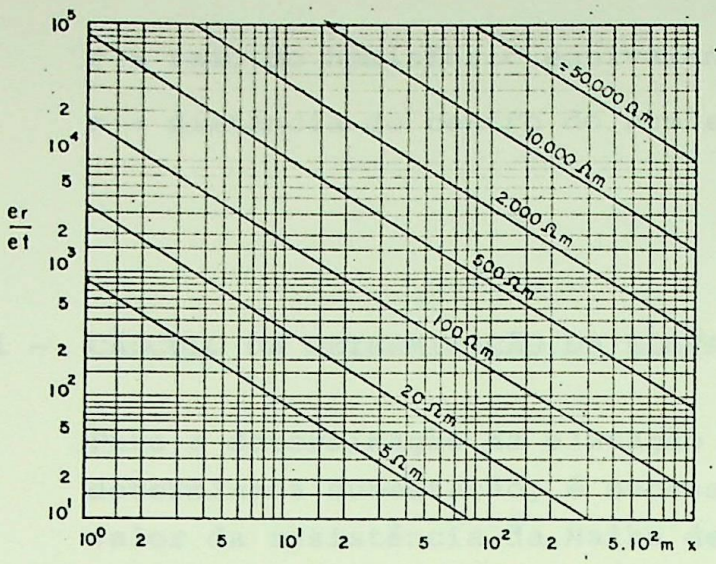



Fig. 8 - Potencial nas vizinhanças do hemisfério, quando I = 1000A.

Sendo X= distância do centro do hemisfério.

A figura 9 abaixo permite estabelecer com relativa precisão o valor percentual em relação ao centro do hemisfério do potencial em um ponto "p" situado a uma distância qualquer $\frac{X}{r}$, do centro do hemisfério.

Determina-se o terra remoto, lugar onde temos o potencial próximo a zero, ou seja, referência do potencial da subestação. [Ver Ref. 6]

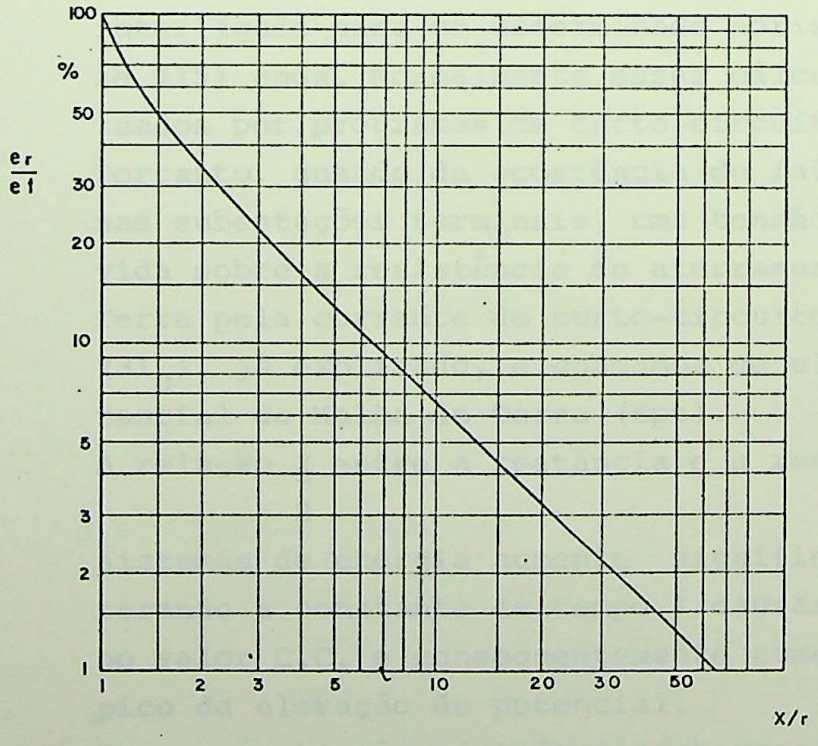



Fig. 9 - Potencial da superfície de Terra nas vizinhanças do hemisfério.

r = raio do hemisfério equivalente

x = distância do centro do hemisfério

### 3.1.1 - CÁLCULO DA DETERMINAÇÃO DA ELEVAÇÃO DE POTENCIAL

Para a determinação da elevação do potencial de uma determinada subestação, é necessário conhecermos o valor da resistência da Malha de Terra e o valor da corrente de curto-circuito.

O valor da resistência da Malha de Terra é obtido através de cálculo, conhecendo-se a resistividade das diversas camadas do solo.

Caso a subestação já exista, o valor da resistência da Malha de Terra é obtido, através de medições no local.

O valor da corrente de curto-circuito monofásico' (Icclø) é obtida através de cálculos considerando-se o sistema elétrico da concessionária e o sistema interligado para um determinado horizonte de quinze (15) anos. Normalmente esses cálculos já são efetuados por programas de curto-circuito em computador.

Portanto, quando da ocorrência de falta monofásica, nas subestações terminais, uma tensão será desenvolvida sobre a resistência de aterramento da Malha de Terra pela corrente de curto-circuito monofásico ($3I_0$), já explicado, e chamamos de elevação do potencial da Malha de Terra (Ept).

A relação $\frac{X}{R}$ entre a reatância e a resistência dos ' sistemas de energia aumenta significativamente (alterando a constante de tempo ) causando "off-set" no valor C.C. e consequentemente aumento no valor de pico da elevação de potencial.

Essa nova tensão assimétrica chamamos de (Eptas).

$Ept = I.R_M$

Ept = Elevação do potencial de terra

I = corrente de curto-circuito monofásico

RM = Resistência de Malha de Terra

$Eptas = Ept.k$

Eptas = Tensão assimétrica de elevação do potencial de terra (V)

I = Corrente de curto-circuito monofásico (AMPrms)

RM = Resistência de Malha de Terra ($\Omega$)

$k \cong 1,8$

Observação: No caso de termos as duas Malhas de Terra das SE's interligadas pelo cabo de cobertura ou cabao Pára-Raios, teremos uma redução no valor da elevação do potencial da Malha de Terra da SE.

Este fato pode ser constatado no capítulo 5.

## 3.2 - TENSÃO INDUZIDA

A corrente elétrica que circula pela linha de transmissão aérea ou cabo subterrâneo , faz surgir no (s) par (s) de fios do cabo piloto, tensões induzidas uma vez que os trajetos podem ser paralelos.

Estas tensões são:

a - Devido a indução magnética (Fig. 10)

A indução magnética que aparece nos pares de fios do cabo piloto, pode ocorrer através de circuito trifásicos não balanceados, ou uma falha de algum desses circuitos.

A influência é bastante forte, mesmo em caso de não ocorrência de falha na linha e depende, basicamente, do desbalanceamento, do conteúdo de harmônicas e dos valores de corrente na linha de transmissão.

A indução, além de fazer surgir uma tensão longitudinal ao cabo, pode fazer surgir um fluxo de corrente elétrica pelo cabo, devido a existência de um caminho para a terra, através do acionamento dos elementos protetores de aterramento, tais como transformador de neutralização, reator de drenagem, transformador de isolamento etc, ou devido ao desbalanceamento em relação à terra.

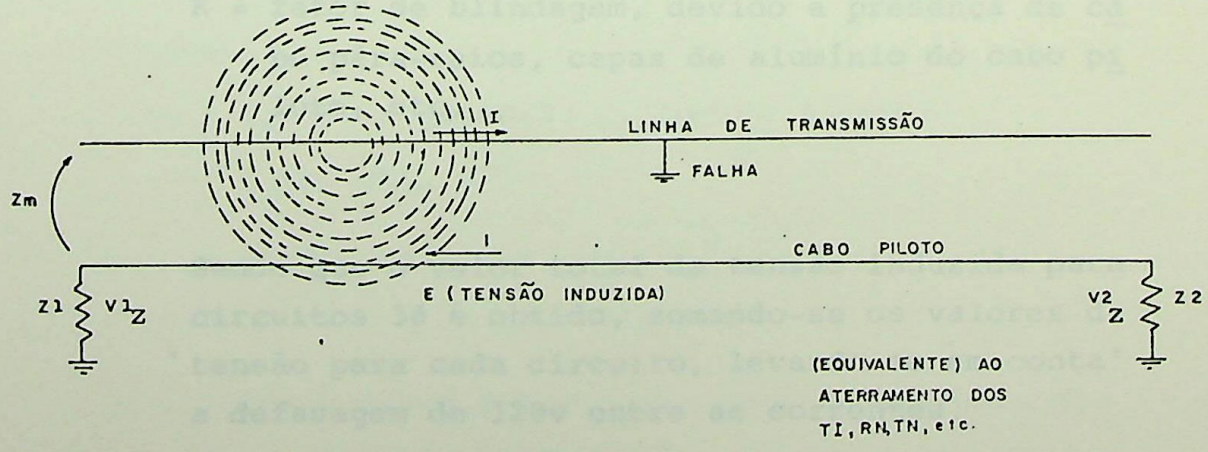



Fig. 10 - Indução Magnética

A corrente devido a existência de um caminho para a terra, através dos elementos protetores pode ser conhecida:

$$i = \frac{E}{Z_1 + Z_2}$$

$$V_{1_z} = \frac{E}{Z_1 + Z_2} \cdot Z_1$$

$$V_{2_z} = \frac{E}{Z_1 + Z_2} \cdot Z_2$$

Cálculo da Tensão Induzida

a - Cálculo da tensão induzida em 60 Hz em condições normais de operação

$E_n = j.w.\ell.I$

E induzida = $Zm.I.\ell.K$ (Volts) [Ver Ref.9]

Sendo:

f = frequência (Hz)

I = corrente nominal da linha de transmissão (A)

Zm= impedância mútua entre o cabo piloto e a linha de transmissão ($\Omega$/km)

$\ell$ = comprimento do paralelismo (km)

K = fator de blindagem, devido a presença de cabo pára-raios, capas de alumínio do cabo piloto, etc.

Sendo que o valor total da tensão induzida para circuitos 3Ø é obtido, somando-se os valores da tensão para cada circuito, levando-se em conta a defasagem de 120º entre as correntes.

b - tensão induzida por curto-circuito na linha de transmissão.

E induzida = Zm.I.$\ell$.K (Volts) [Ver Ref. 9 ]

I = corrente de curto-circuito entre uma das fases e a terra

f, Zm, $\ell$, K = mesmo que o item anterior.

Observações:

- o fator de blindagem K, geralmente é considerado igual a 1 caracterizando a situação mais desfavorável ( inexistência de blindagem ). Com blindagem ideal teríamos K = zero.

- o exemplo prático do capítulo 5 apresenta o cálculo do fator de blindagem considerando-se as características da LT tais como influências do cabo pára-raios e capa de alumínio do cabo piloto.

Para determinação da impedância MÚTUA entre os condutores e o cabo PILOTO temos 2 métodos:

1º Método:

De acordo com a 13ª seção da [ referência 9 ]

Onde:

$$Zm = 0{,}0593 + j0{,}0029 \cdot f \cdot \log \frac{De}{d} \quad (\Omega/Km)$$

[ Ver Rèf. 9 ]

sendo: $De = 659 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$

De: profundidade equivalente da corrente de retorno pela terra.

f = frequência (Hz)

d = distância entre os condutores e o cabo piloto

$\rho$ = resistividade do terreno ( $\Omega$ .m )

2º Método:

De acordo com a [ referência 10 ]

$$M_c = a \sqrt{\frac{T.f}{1000}}$$

Onde:

a = distância entre o cabo piloto e o condutor de energia ( fases )

f = frequência em Hz

$\rho$ = resistividade em $\Omega$ .m.

$$T = \frac{10^6}{\rho . 10^2} \cdot \mu \text{ Siemens/cm}$$

T = conversão de $\rho$ em unidade Siemens = $\upsilon = \frac{1}{\rho}$

Determinado o valor de $M_c$ utiliza-se o mesmo gráfico da figura 9 da referência 10, encontrando-se o valor da indutância mútua $M_c$ em $\mu$H/Km.

E induzido = Zm.I.$\ell$.K

f = frequência em Hz

$\ell$ = comprimento de paralelismo (Km)

I = corrente de curto circuito (A)

Zm =impedância mútua = $2.\pi.f.M_c$

K = considerar igual a 1, pior caso

Observação:

Nesta mesma referência tabela 20 encontramos vários fatores de redução em função de: tipo e bitola do cabo piloto a ser utilizada e da máxima tensão induzida. [Ver Ref. 11]
Desta maneira encontramos o fator de redução que deverá ser multiplicado pela tensão induzida, calculada.
Uma aplicação deste fator encontra-se no exemplo prático do capítulo 5.

b - Indução Elétrica (Fig. 11)

A indução elétrica também faz surgir no cabo piloto uma tensão induzida, e, nesse caso ela não é proporcional ao comprimento de exposição, (paralelismo).
Esse tipo de indução é crítico para pequenas distâncias físicas entre os circuitos, devido à capacitância existente entre eles.

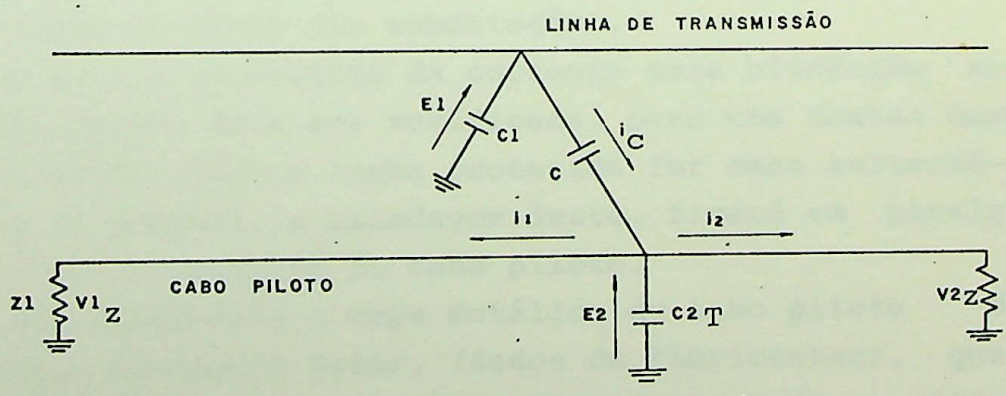



Fig. 11 - Indução Elétrica

Caso quizermos conhecer a corrente ($i_C$):

$$E_2 = \frac{E_1}{C_{2_T} + C} \cdot C$$

$$V_{1_z} = V_{2_z} = i_1 . Z_1 = i_2 . Z_2$$

$$Z_1 \text{ e } Z_2 \ll Z_m$$

$$i_c = (E_1 - E_2) WC = i_1 + i_2 \qquad \text{Sendo: } i_1 = i_2$$

$$i_c = \frac{E_1 - E_2}{2.\pi.f.c} \quad \text{| Ver Ref. 8 |}$$

## 3.3 - CIRCULAÇÃO DE CORRENTE PELA BLINDAGEM DO CABO PILOTO.

Como já foi mencionado, no item 3.2, a tensão induzida no cabo piloto, poderá fazer surgir um fluxo de corrente elétrica pelo cabo, devido ao acionamento dos reatores de drenagem, transformador de neutralização, transformador de isolamento, etc.

Com a finalidade de também reduzir-se as tensões induzidas no cabo piloto, é necessário aterrar pelo menos 2 pontos a blindagem do cabo que contém os fios pilotos, uma vez que esta blindagem não está ligada a Malha de Terra das subestações.

Com isso a circulação da corrente pela blindagem no cabo piloto deve ser verificada, para uma dessas duas situações. Caso a linha protegida for cabo subterrâneo de Energia, a blindagem deste, ficará em paralelo com a blindagem do cabo piloto.

Como normalmente a capa metálica do cabo piloto é substancialmente maior, (dados de fabricantes), que a impedância das capas dos cabos de energia, a corrente de falha para a terra, caso ocorra, circulará quase que integralmente pelas blindagens do cabo de energia.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ B M

## 3.4 - TENSÕES COMPOSTAS

Muitas vezes a tensão induzida ocorre simultaneamente com a elevação do potencial de terra da subestação, é a chamada "tensão de influência composta ou total", que pode ser determinada pela soma vetorial de:

$$\overline{E\ total} = \overline{E\ induzida} + \overline{Elevação\ Potencial (Eptas)}$$

$$|Et| = \sqrt{(Eind)^2 + (Eptas)^2}$$

CONCLUSÃO DO CAP. 3

O aparecimento destes fenômenos são prejudiciais e perigosos aos equipamentos da, proteção longitudinal por fio piloto e ao pessoal de manutenção e operação de subestações.

No próximo capítulo, são descritos todos os equipamentos utilizados para minimizar tais fenômenos.

# CAP. 4 - DISPOSITIVOS DE LIMITAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS EM CABO PILOTO.

Este capítulo tem como objetivo, descrever os equipamentos mais utilizados para minimizar os efeitos da influência a que estará sujeito o cabo piloto durante falhas no sistema elétrico: |Ver Ref.s 12, 13 14 e 15|

**4.1** - Transformador de Neutralização.

**4.2** - Reator de Drenagem.

**4.3** - Transformador de Isolamento.

**4.4** - Cabo Piloto.

**4.5** - Relé de Supervisão e Acessórios.

## 4.1 - Transformador de Neutralização

É um transformador constituído de 3 ou mais enrolamentos, para neutralizar os efeitos da elevação de potencial de malha de terra e/ou tensões induzidas. (Fig. 12)
O enrolamento primário é conectado entre o terra da subestação e um terra remoto.
Os demais enrolamentos (secundários) são conectados em série com os pares, do cabo piloto.

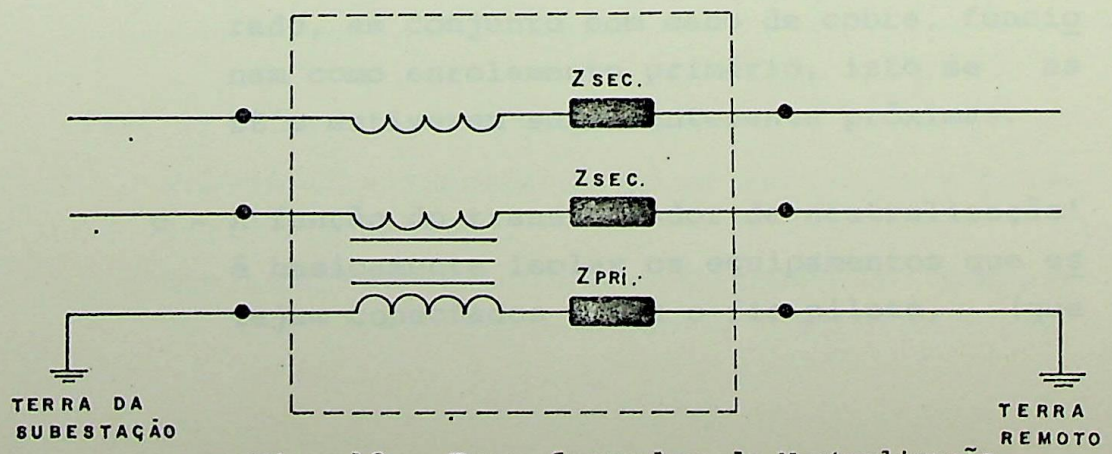



Fig. 12 - Transformador de Neutralização

Qualquer diferença de potencial entre a subestação e o terra remoto, aparece no enrolamento do primário e é induzida com polarização invertida nos enrolamentos secundários, neutralizando o aparecimento dessa diferença no circuito. |Ver Refs. 12 e 13|

Na prática sempre haverá uma diferença de tensão que não é neutralizada, denominada tensão remanescente.

Ele é construído para um par simples ou multipar e introduz uma baixa perda no sinal.

A distância que o terra remoto deve ficar do limite da subestação é específica para cada subestação em particular, e é determinado segundo o estudo da distribuição de potencial no item 3.1 do capítulo 3; elevação do potencial de malha de terra.

Observações:

a - As correntes devido ao desbalanceamento no par não são neutralizados pelo transformador de neutralização.

b - Um efeito de transformador de neutralização pode ser conseguido também pela interligação direta das malhas de terra das SE's, através de cabo de cobre nú, onde a blindagem dos pares que compõe o cabo piloto aterrado, em conjunto com cabo de cobre, funcionam como enrolamento primário, isto se as SE's estiverem suficientemente próximas.

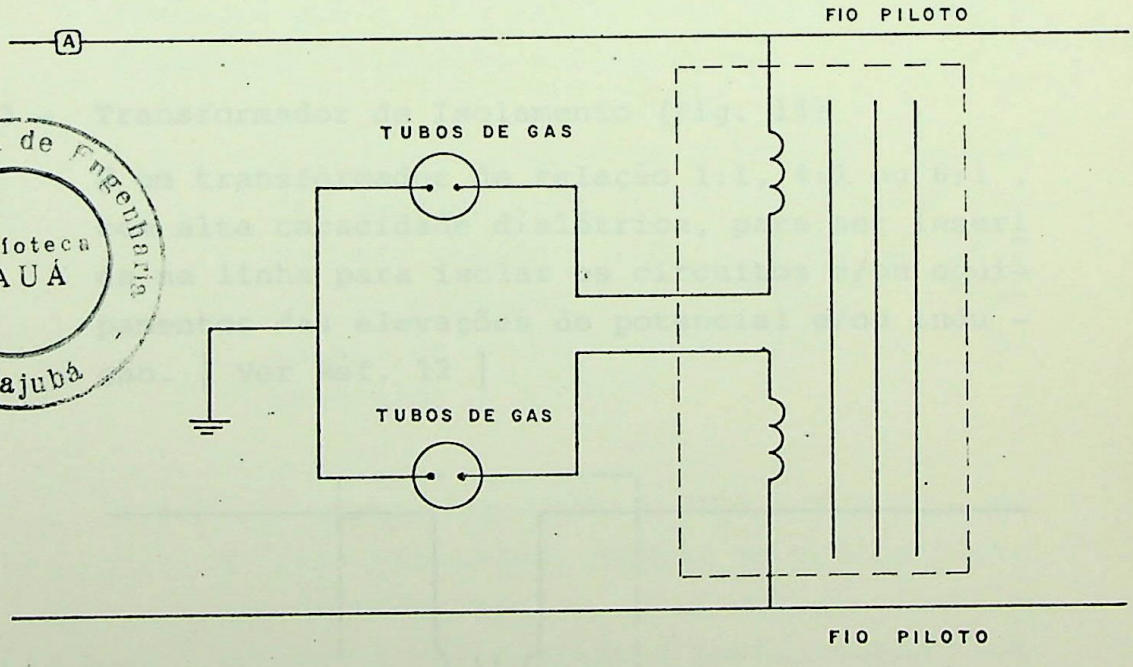
c - A função do transformador de neutralização é basicamente isolar os equipamentos que estejam conectados entre o fio piloto, (que

está no potencial do terra remoto), e os que estão na subestação, que por sua vez estão no potencial da subestação.

Dentre os equipamentos ou acessórios que necessitam desse tipo de conexão está o relé de supervisão, que será descrito posteriormente, item 4.4.

## 4.2 - Reator de Drenagem

Os reatores de drenagem oferecem proteção para sobretensões induzidas entre o par piloto e a terra, bem como, tensões induzidas entre os dois condutores do mesmo par. [Ver Refs. 12 e 14], Fig. 13 abaixo:




Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

Fig. 13 - Reator de Drenagem

Possui alta impedância de magnetização e baixa reatância de fuga.

Ele apresenta impedâncias de ordem de Dezenas de OHMS para correntes que se dirigirem à ter-

ra e impedância da ordem de dezenas de milhares de OHMS para correntes que circulam no sentido terminal A-terminal B. Assim o sinal do sistema de proteção não é drenado e o fio piloto não fica em curto circuito, para terra. O tubo de gás contém gases que se ionizam rapidamente e o reator de drenagem provoca a descarga simultânea de seus dois "gaps".

São utilizados como objetivo básico de drenar, simultaneamente, a corrente dos fios piloto para terra, quando a tensão induzida nos mesmos atinge valores que provocam a descarga dos tubos de gás.

Sua aplicação é necessária quando o isolamento do fio piloto e o transformador de isolamento estiverem sujeitos ao risco de serem danificados pelas tensões induzidas.

Seus terminais deverão estar ligados entre o fio piloto e o terra remoto.

4.3 - Transformador de Isolamento (Fig. 14)

É um transformador de relação 1:1, 4:1 ou 6:1 , com alta capacidade dielétrica, para ser inserida na linha para isolar os circuitos e/ou equipamentos das elevações de potencial e/ou indução. | Ver Ref. 12 |

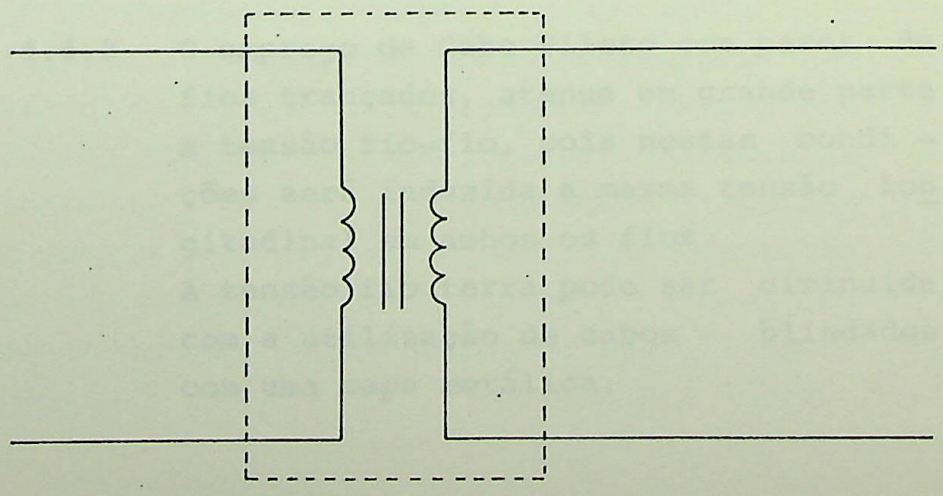


Fig. 14 - Transformador de Isolamento

A diferença de potencial é confinada entre os seus enrolamentos e o seu núcleo não é excitado, não permitindo a sua saturação, como acontece nos transformadores neutralizadores, protegendo assim eletricamente os relés diferenciais utilizados na proteção por fio piloto.
Ele é construído para servir a apenas um par, e sua função básica é isolar eletricamente os relés de proteção da elevação do potencial e/ou tensões induzidas.
O mesmo se encontra na área de malha de terra da subestação, ou seja no potencial da subestação.

## 4.4 - Cabo Piloto

Gostaríamos aqui de apresentar algumas características que o cabo piloto deve possuir para ajudar a minimizar as influências.

4.4.1 - O isolamento do cabo piloto é função das tensões para terra que o mesmo suportará devido a indução e as diferenças de elevação de potencial das malhas de terra e do equipamento de proteção.

4.4.2 - O emprego de Cabo Piloto com pares de fios trançados, atenua em grande parte a tensão fio-fio, pois nestas condições será induzida a mesma tensão longitudinal em ambos os fios.
A tensão fio terra pode ser diminuida com a utilização de cabos blindados com uma capa metálica.

Na prática a blindagem do cabo piloto pode reduzir até 70%, o efeito da indução magnética.

4.4.3 - Para que a redução da indução, seja efetiva, torna-se necessário aterrar a blindagem em pelo menos 02 (dois) pontos, externos às subestações interligadas.
Não se recomenda ligar a blindagem às malhas de terra das SE's devido aos elevados valores de corrente que poderão nela circular por ocasião de um curto circuito fase-terra.
Corrente estas originárias das diferenças nas elevações de potencial das Malhas de Terra das SE's.

4.4.4 - A blindagem também poderá ficar danificada caso um dos pontos da mesma seja ligado a uma das Malhas e o outro à Terra remota.

4.4.5 - Os valores típicos de capacitância e impedância totais que limitam o comprimento do fio piloto são respectivamente 0,75$\mu$F e 2000$\Omega$.

4.5 - Relé de Supervisão e demais Acessórios
O relé de supervisão e demais acessórios não seria praticamente um equipamento que minimizaria os efeitos causados pelas influências citadas no capítulo 3, mas de suma importância para o perfeito desempenho desta proteção. Como não tem um capítulo especial para um tratamento destes, serão abordados aqui, neste item.

4.5.1 - Os relés de supervisão tem como finalidade promover a contínua supervisão do circuito piloto acusando, através do anunciador de subestação os seguintes defeitos: curto circuito entre os fios do par, abertura do circuito, ligações à terra e reversão de fios.

Promover o disparo do disjuntor de extremidade oposta em condições de falhas interna (transferências de disparo).

Este equipamento destinado a supervisionar continuamente os fios piloto, existe normalmente em duas versões, uma das quais envia sinais distintos para curtos, interrupções, ou cruzamento nos circuitos dos fios piloto.

A outra versão envia o mesmo sinal para todos os tipos de falta.

A unidade de alimentação do equipamento de supervisão pode ser feita em corrente alternada. Porém, a supervisão normalmente é feita em corrente contínua, permanentemente aplicada ao par piloto.

Na ocorrência de um curto circuito no par piloto, a corrente de supervisão em C.C., aumentará no terminal da fonte, decrescendo no outro terminal, acarretando o alarme nos respectivos extremos do fio piloto. Se ocorrer abertura do par piloto a C.C. será nula, provocando o acionamento do alarme associado.

Para isso, o capacitor localizado no tap central do transformador de isolamento apresenta impedância infinita para a corrente contínua de supervisão, direcionando o fluxo de corrente para o caminho desejado. | Ver fig. 15 |

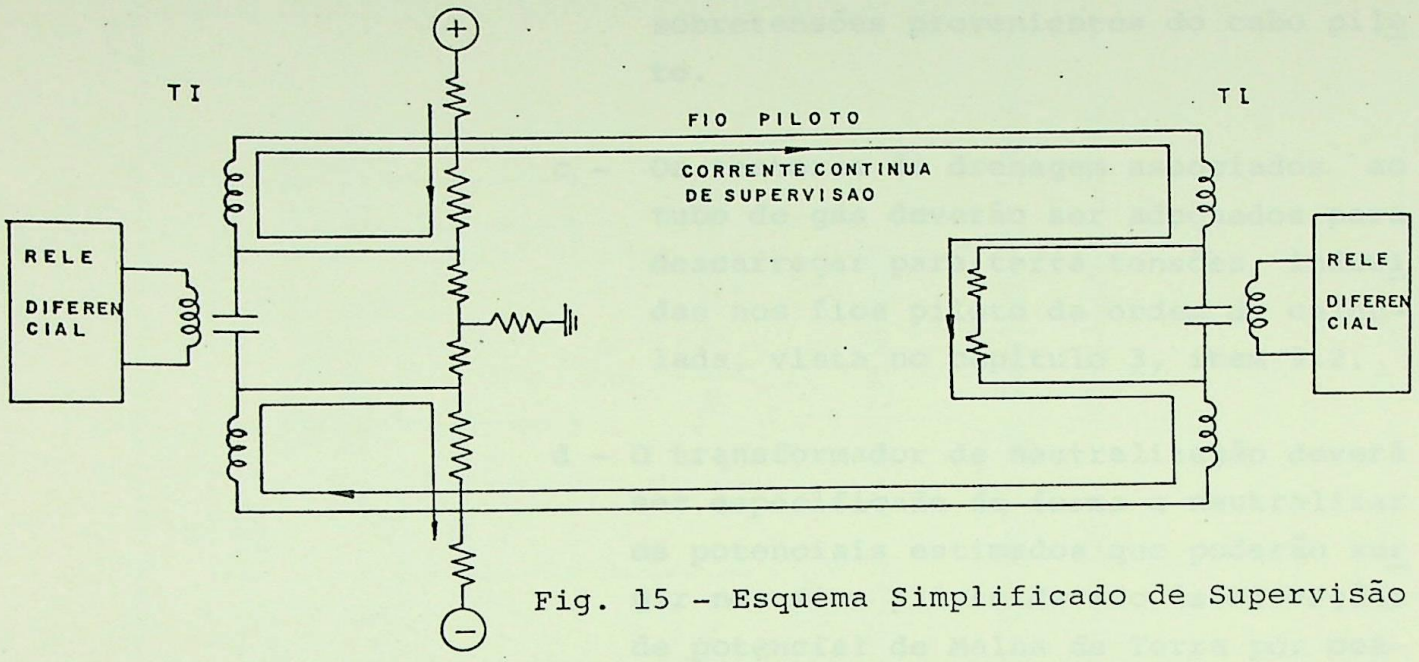



Fig. 15 - Esquema Simplificado de Supervisão

4.5.2 - Acessórios-como acessório principal devemos citar o dispositivo de testes, cuja finalidade é manter um controle rígido dos relés de proteção.
Outros acessórios fica dependendo dos fabricantes deste tipo de proteção,que deverão ser analizados quando no julgamento das propostas.

Ainda com referência ao capítulo 4, temos algumas observações a tecer:

a - Os relés de supervisão, dispositivos de testes, transformador de isolamento deverão ser instalados nos painéis na Casa de Comando da subestação.

b - O transformador de neutralização, reatores de drenagem e tubo de gás deverão ser instalados em cabines especiais, isolados dos demais painéis devido a possibilida

de de exposição destes equipamentos às sobretensões provenientes do cabo piloto.

c - Os reatores de drenagem associados ao tubo de gás deverão ser adequados para descarregar para terra tensões induzidas nos fios piloto da ordem da calculada, vista no capítulo 3, item 3.2.

d - O transformador de neutralização deverá ser especificado de forma a neutralizar os potenciais estimados que poderão surgir nos fios piloto devido às elevações de potencial de Malha de Terra por ocasião dos curtos monofásicos.

e - A figura 16, mostra um esquema completo das ligações dos equipamentos citados neste capítulo. Ver Refs. 12, 13 e 14

## CONCLUSÃO DO CAP. 4

Com a instalação desses equipamentos os fenômenos descritos no capítulo 3, são minimizados, garantindo dessa maneira o perfeito funcionamento e desempenho desta proteção e, segurança para o pessoal de manutenção e operação.

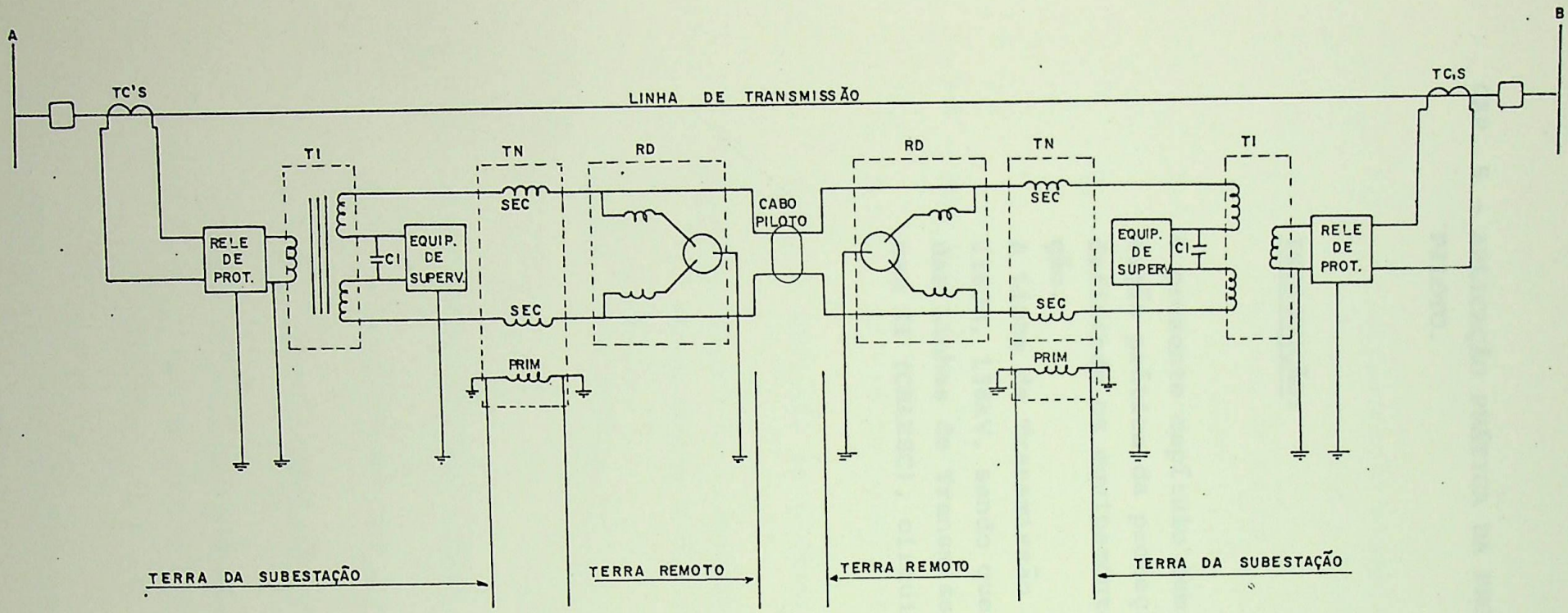



FIG. 16 - ESQUEMA COMPLETO COM TODOS OS EQUIPAMENTOS

$C_1$ = o capacitor $C_1$ localizado no tap central do transformador de isolamento apresenta impedância infinita para corrente contínua de supervisão, confinando-a no fio piloto.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ E.V.

# CAP. 5 - APLICAÇÃO PRÁTICA DA PROTEÇÃO LONGITUDINAL POR FIO PILOTO.

## INTRODUÇÃO:

O presente capítulo tem como objetivo, mostrar uma aplicação prática da proteção longitudinal por fio piloto , definindo os equipamentos necessários para esta proteção.

A Linha de Transmissão em estudo tem comprimento de 1160m, 138kV, sendo que os dados técnicos foram obtidos das Linhas de Transmissão Blumenau (ELETROSUL) - Blumenau II (CELESC), circuito duplo.

## 5.1 - DADOS DO SISTEMA

5.1.1 - Configuração simplificada do sistema que envolve Blumenau-ESUL e Blumenau II.

5.1.2 - Níveis de curto circuito.

5.1.3 - Resistência de aterramento das subestações.

5.1.4 - Extensão das linhas.

## 5.2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

5.2.1 - Níveis de potencial.

5.2.2 - Elevação de potencial e tensão induzida.

5.2.3 - Função do transformador de isolamento, dos reatores de drenagem e dos reatores de neutralização.

5.2.4 - Fio Piloto.

## 5.3 - CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS

5.3.1 - Comprimento das linhas.

5.3.2 - Determinação do vão médio.

5.3.3 - Valores das Impedâncias própria do cabo pára-raios e mútuas entre circuitos, cabo piloto e cabo pára-raios.

## 5.4 - TENSÃO INDUZIDA LONGITUDINALMENTE NO FIO PILOTO

5.5 - VERIFICAÇÃO DO FATOR DE BLINDAGEM DEVIDO AO CABO PÁRA-RAIOS

5.6 - ELEVAÇÃO DE POTENCIAL NAS SUBESTAÇÕES (Ep)

5.6.1 - Cálculo Simplificado.

5.6.2 - Caso Real.

5.7 - CONCLUSÕES DO CAP. 5

## 5.1 - DADOS DO SISTEMA

### 5.1.1 - Configuração do Sistema em estudo (Fig. 17)

OBS.: Todas as impedâncias desta configuração estão na base de 100 MVA.

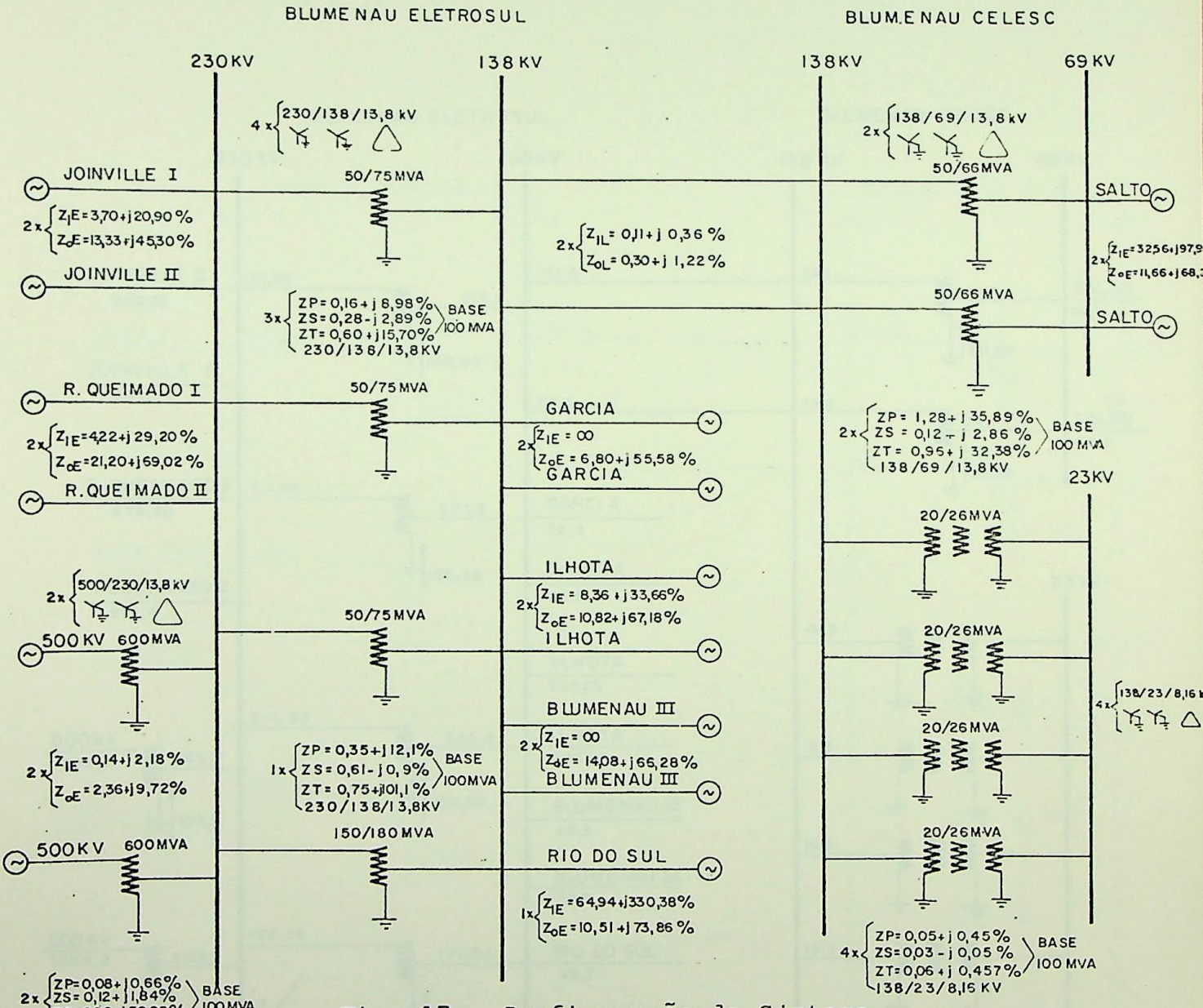



Fig. 17 - Configuração do Sistema

### 5.1.2 - Níveis de Curto Circuito

Valores referentes a configuração acima e que correspondem ao ano de 1992, que foram processadas em computador, programa PECO. | Ver Ref. 21|

5.1.2.1 - Curto circuito monofásico na barra de 230kV da SE Blumenau - ELETROSUL. (EM MVA) (Fig. 18)

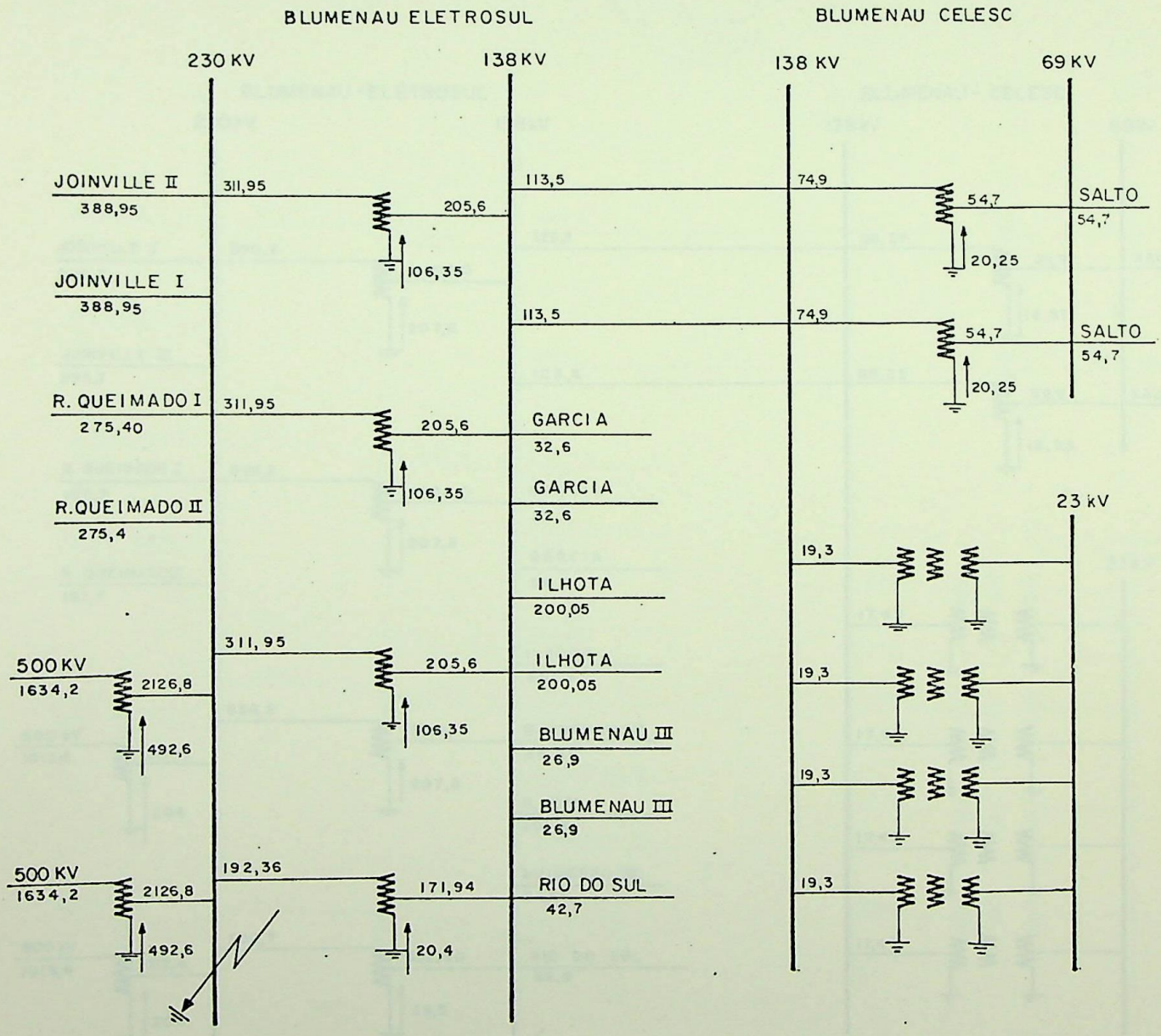



Fig. 18 - Diagrama com as contribuições de curto-circuito do sistema em estudo.

5.1.2.2 - Curto circuito monofásico na barra de 138kV da SE Blumenau - ELETROSUL. (EM MVA) (Fig. 19)

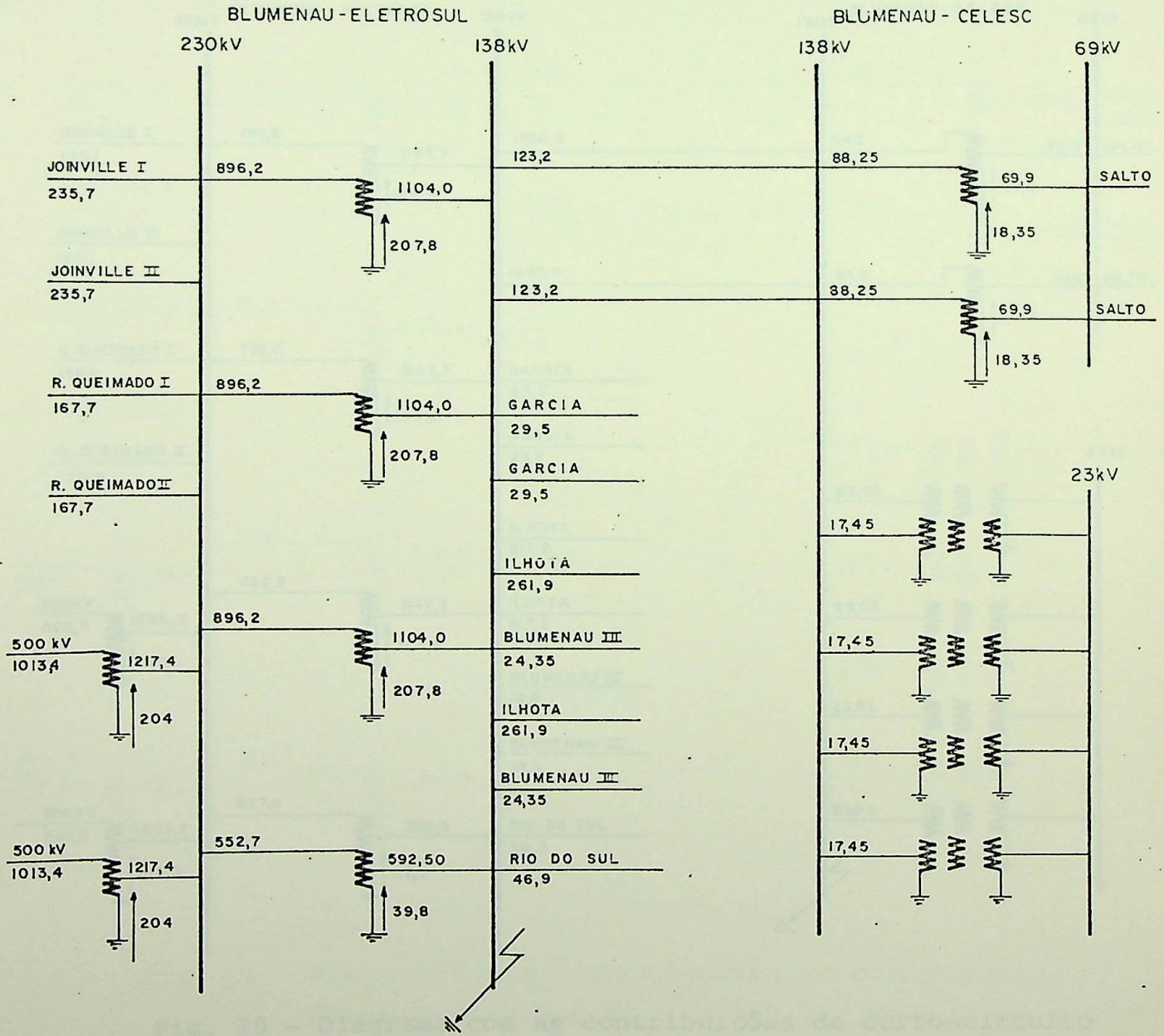



Fig. 19 - Diagrama com as contribuições de curto-circuito do sistema em estudo.

5.1.2.3 - Curto circuito monofásico na barra de 138kV da SE Blumenau II - CELESC. (EM MVA) (Fig. 20)

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

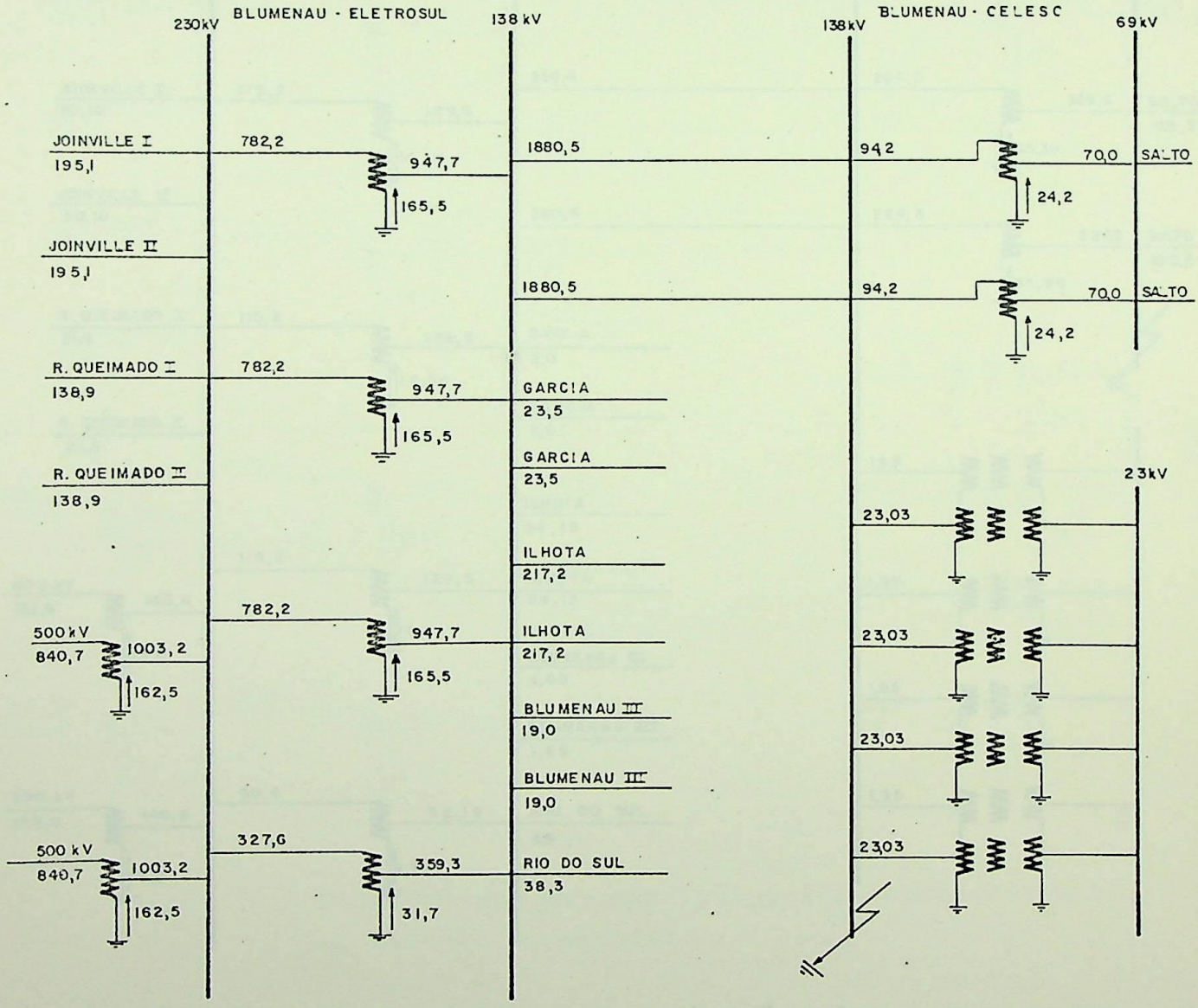



Fig. 20 - Diagrama com as contribuições de curto-circuito do sistema em estudo.

5.1.2.4 - Curto circuito monofásico na barra de 69kV da SE Blumenau II - CELESC. (EM MVA) (Fig. 21)

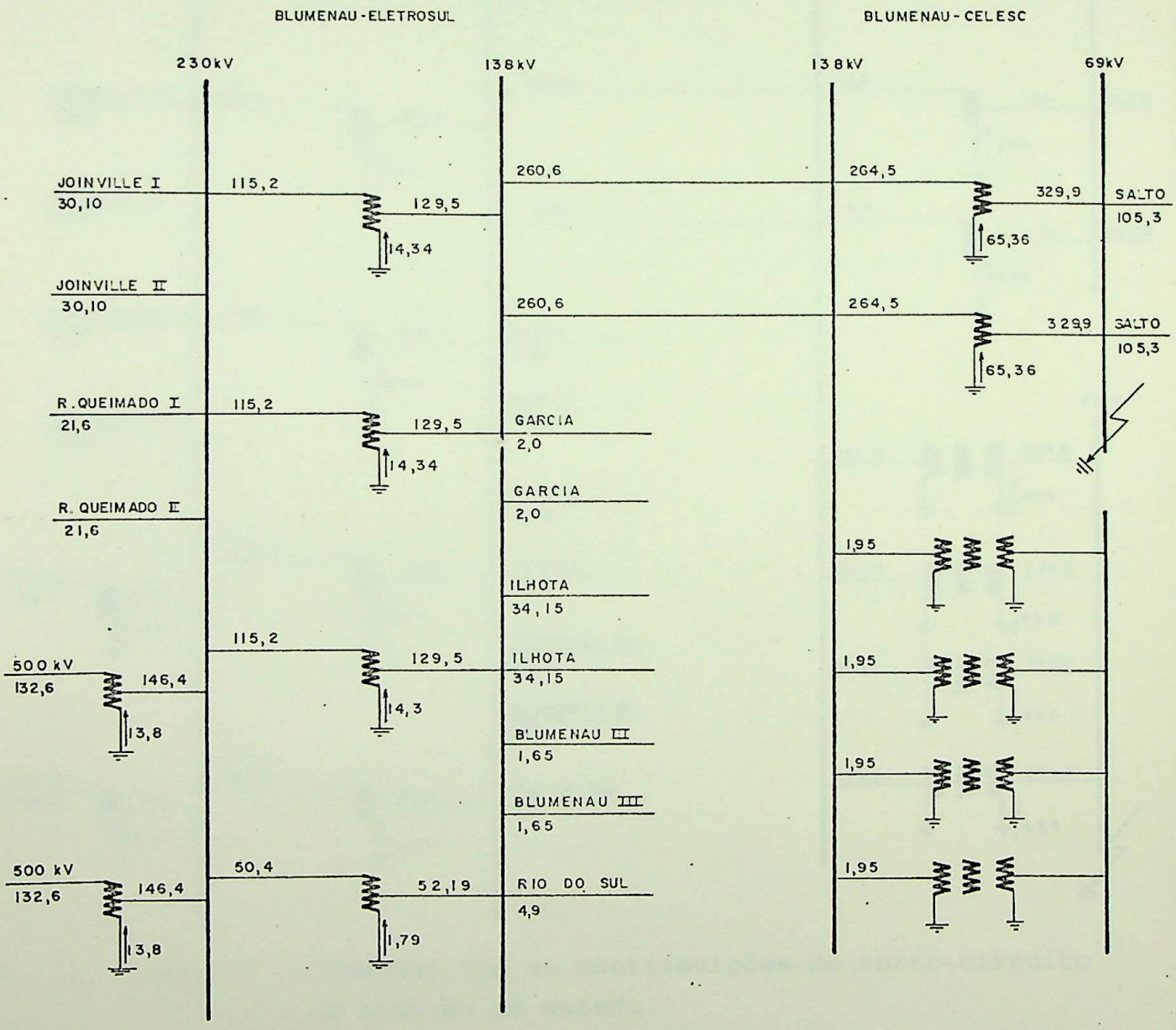



Fig. 21 - Diagrama com as contribuições de curto-circuito do sistema em estudo.

5.1.2.5 - Curto circuito monofásico na barra de 23 kV da SE Blumenau II - CELESC. (EM MVA) (Fig. 22)

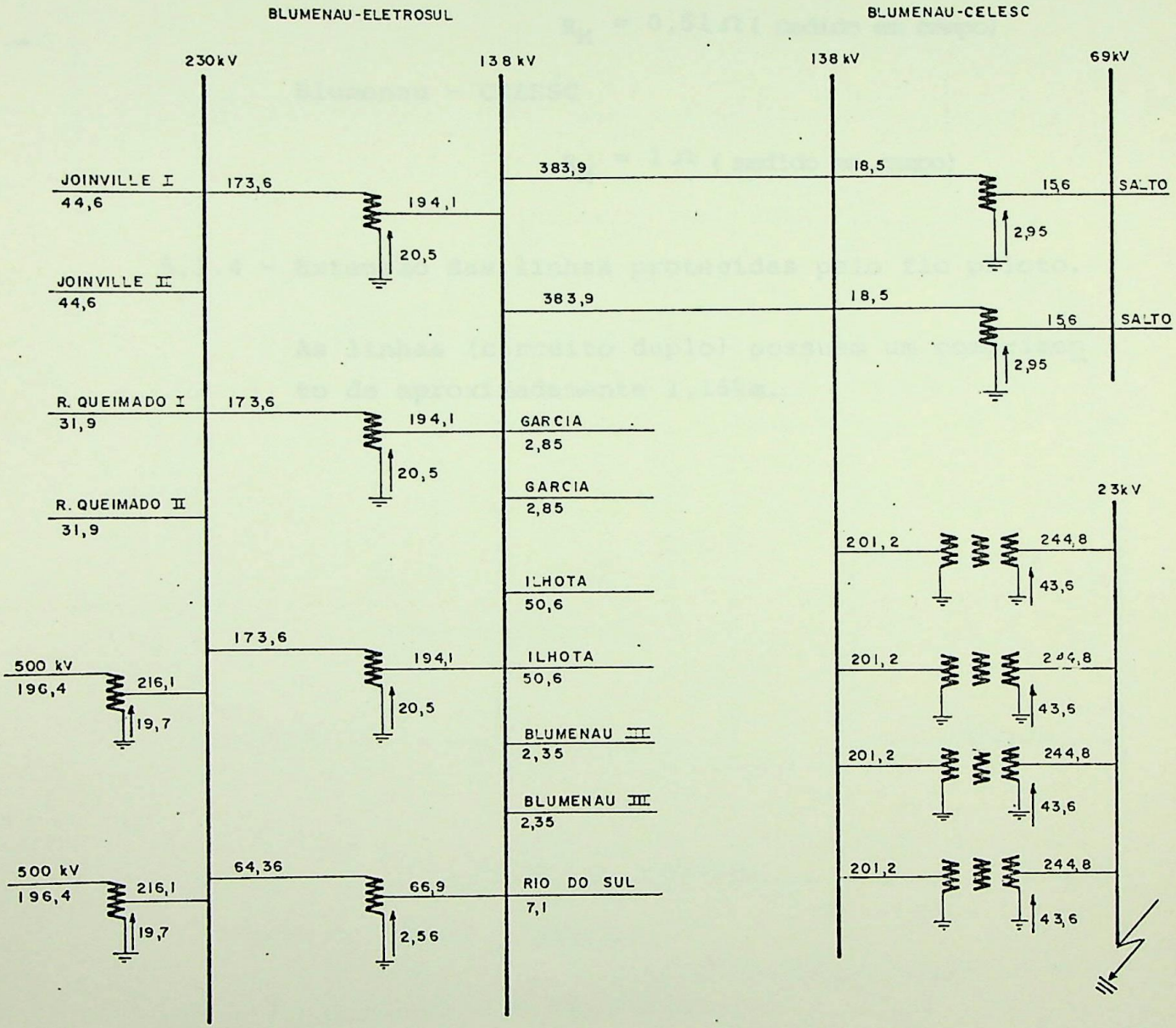



Fig. 22 - Diagrama com as contribuições de curto-circuito do sistema em estudo.

5.1.3 - Resistência de aterramento das Subestações.

Blumenau - ELETROSUL

$$R_M = 0,51\,\Omega \text{ ( medido em campo)}$$

Blumenau - CELESC

$$R_M = 1\,\Omega \text{ ( medido em campo)}$$

5.1.4 - Extensão das linhas protegidas pelo fio piloto.

As linhas (circuito duplo) possuem um comprimento de aproximadamente 1,16km.

## 5.2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

### 5.2.1 - Níveis de Potencial. ( Fig. 23 )

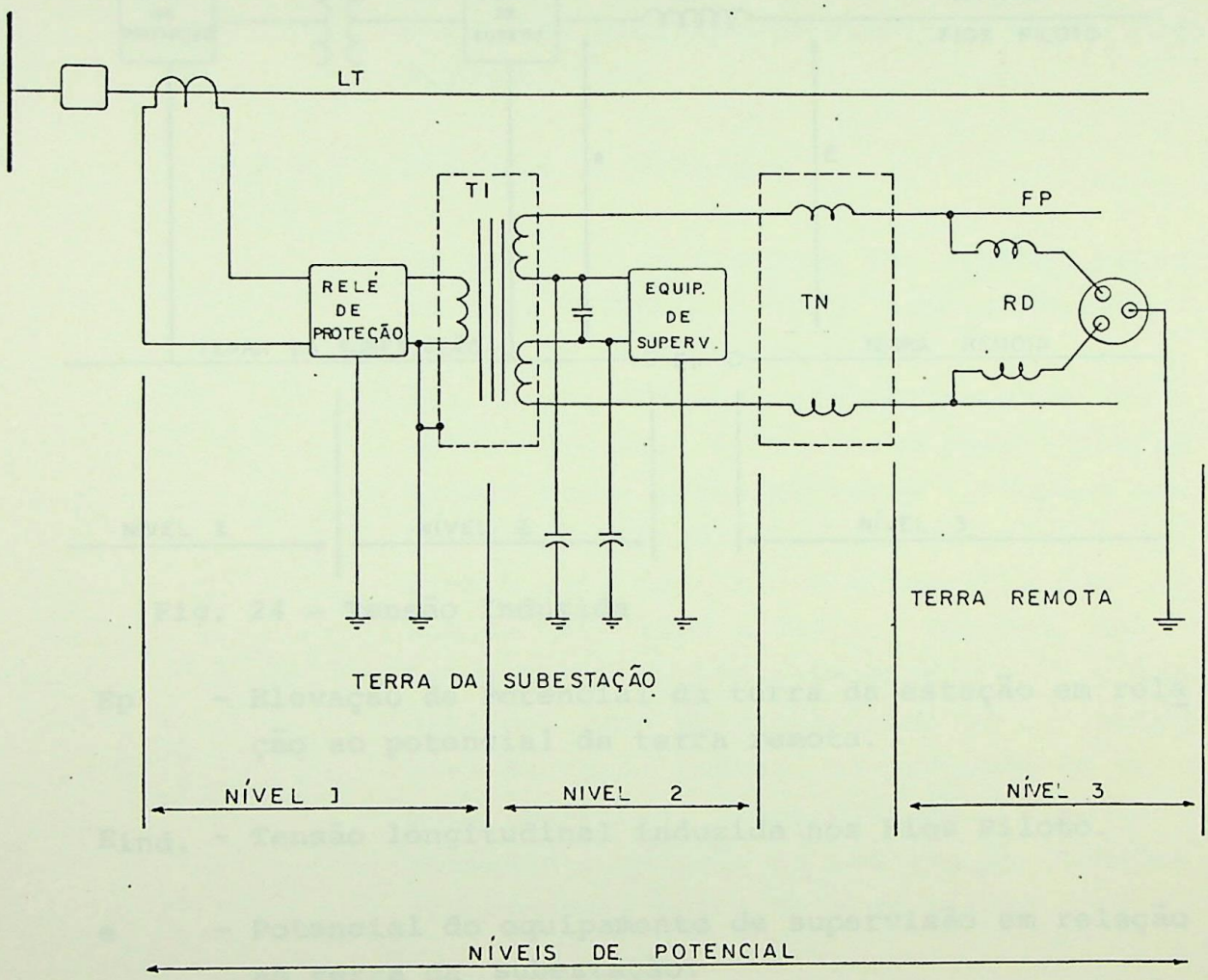



Fig. 23 - Níveis de Potencial

T.I - Transformador de Isolamento

T.N - Transformador ou Reator de Neutralização

R.D - Reator de Drenagem

F.P - Fio Piloto

5.2.2 - Elevação de Potencial e Tensão Induzida.
( Fig. 24 )

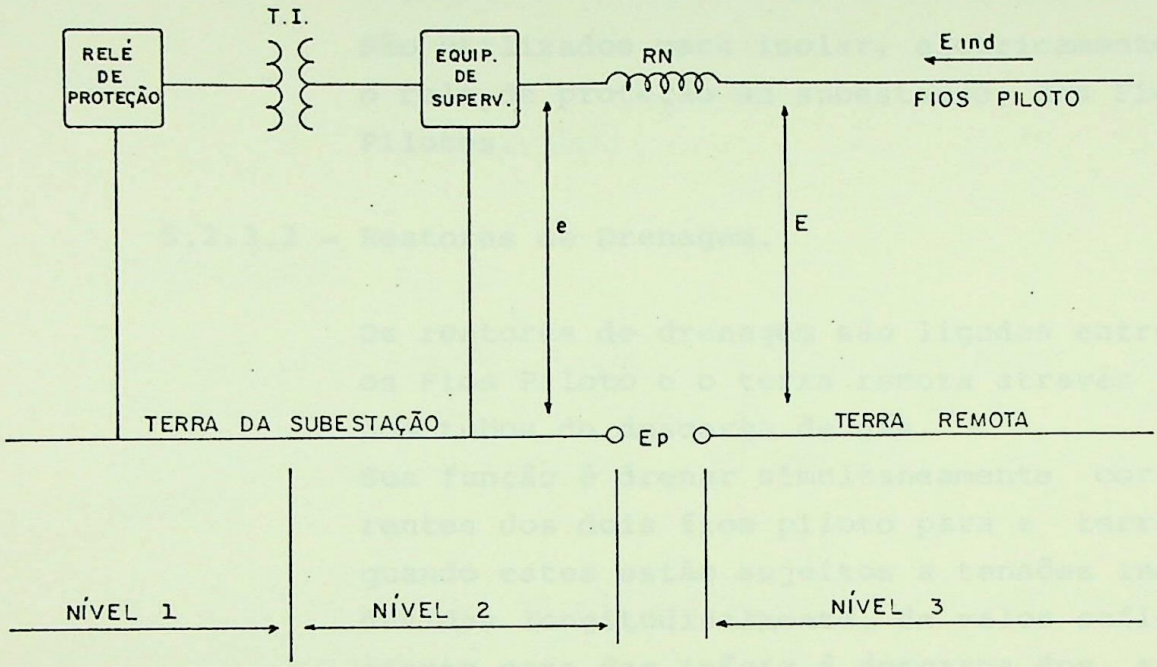



Fig. 24 - Tensão Induzida

Ep - Elevação de Potencial da terra da estação em relação ao potencial da terra remota.

Eind. - Tensão longitudinal induzida nos Fios Piloto.

e - Potencial do equipamento de supervisão em relação ao terra da subestação.

E - Potencial dos Fios Piloto em relaçao à terra remota.

Na figura acima, estamos considerando a utilização de fios piloto transpostos. Logo, a tensão transversal entre os fios é desprezível. |Ver Ref. 8|

O par de fios piloto está representado por um só condutor.

5.2.3 - Função do transformador de isolamento, dos reatores de drenagem e dos reatores de neutralização.

5.2.3.1 - Transformador de Isolamento.

São utilizados para isolar, eletricamente, o relé de proteção da subestação, dos Fios Pilotos.

5.2.3.2 - Reatores de Drenagem.

Os reatores de drenagem são ligados entre os Fios Piloto e o terra remota através dos tubos de descarga de gás.
Sua função é drenar simultaneamente correntes dos dois fios piloto para a terra quando estes estão sujeitos a tensões induzidas longitudinalmente, de valor suficiente para dar início à descarga dos tubos de gás (300 a 500V). Ver Ref. 15
Os reatores de drenagem mantém o potencial dos fios piloto próximo ao potencial da terra remota, na presença de tensões induzidas, proporcionando simultaneamente a redução na indução de tensões transversais entre os fios piloto.

5.2.3.3 - Reatores ou Transformador de Neutralização.

Com o objetivo de evitar que os Fios Piloto interliguem a terra das subestações com o terra remota, no caso de elevação de potencial das subestações, provocadas por curto circuito, fase terra, inserem-se reatores de neutralização nas ligações dos Fio Piloto nas estações.

Esta elevação de potencial aparece, então entre os terminais dos reatores de neutralização.
O potencial dos equipamentos ficará assim, próximo do potencial de terra das subestações, enquanto que o potencial dos fios piloto é mantido substancialmente no do terra remota.

Observações:

Os reatores de neutralização e de drenagem podem ser dispensados, mesmo em presença de elevações de potencial da terra da subestação e de tensões induzidas, quando:

a - O transformador de isolamento apresenta isolamento adequado.

b - Os fios piloto apresentam alto isolamento para a terra (cabos piloto de alta tensão).

c - Quando não existe equipamento de supervisão ou quando este estiver adequadamente isolado e protegido contra o problema das altas tensões.

5.2.4- Fio Piloto

5.2.4.1 - Normalmente utiliza-se, para fio piloto um cabo blindado com condutores transpostos bitola maior que 19 AWG. A transposição dos condutores tem por objetivo, em caso de proximidade dos mesmos com circuitos de energia, seja induzida a mesma tensão em ambos os fios do cabo, e a blindagem destina-se a limitar a tensão induzida no fio piloto.

Para que a redução da tensão seja efetiva, torna-se necessário aterrar a blindagem em pelo menos 02 (dois) pontos, externos às subestações interligadas.

Não é aconselhável ligar a blindagem às malhas de terra das SE's devido aos elevados valores de corrente que poderão nela circular por ocasião de um curto circuito fase-terra, (correntes essas originárias ' das diferenças nas elevações de potencial das malhas de terra das SE's).

A blindagem também poderá ficar danificada caso um dos pontos da mesma seja ligado a uma das malhas e o outro à terra remota.

5.2.4.2 - No que se refere a proteção do cabo, a tensão induzida não deve superar 60% da tensão de prova entre os condutores e a blindagem. [ Ver Ref. 6 ]

## 5.3 - CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS DE INTERLIGAÇÃO

### 5.3.1 - Comprimento das Linhas.

| | |
|---|---|
| Pórtico da SE Blumenau II - Estrutura 01 | = 60m |
| Estrutura 01 - Estrutura 02 | = 283m |
| Estrutura 02 - Estrutura 03 | = 197m |
| Estrutura 03 - Estrutura 04 | = 290m |
| Estrutura 04 - Estrutura 05 | = 250m |
| Estrutura 05 - Pórtico da ESUL | = 80m |
| Comprimento Total | =1160m |

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

### 5.3.2 - Determinação do Vão Médio das LT's

#### 5.3.2.1 - Iniciando da SE Blumenau II

$$V_{M1} = \frac{60 + 283 + 197 + 290 + 250}{5}$$

$$V_{M1} = 216m$$

#### 5.3.2.2 - Iniciando da SE Blumenau ELETROSUL

$$V_{M2} = \frac{80 + 250 + 290 + 197 + 283}{5}$$

$$V_{M2} = 220m$$

### 5.3.3 - Valores das Impedâncias Própria do Cabo Pára-Raios e Mútuas entre Circuitos, Cabo Pára-Raios e Cabo Piloto.

5.3.3.1 - Impedância Própria do Cabo Pára-Raios ( $Z_{kk}$ )

O cabo Pára-Raios é de Aço 5/16"Hs, logo:

$Z_{kk} = 4,351 + j1,563 \ \Omega/Km$

5.3.3.2 - Impedâncias Mútuas

Com o objetivo de verificar os efeitos da indução eletromagnética e das elevações nos potenciais das malhas de terra das SE's interligadas, efetuaremos a determinação das Impedâncias Mútuas entre os circuitos e o cabo pára-raios. A configuração para esta determinação, encontra-se a seguir:

Configuração do cabo contendo os Fios Piloto, em relação as estruturas das LT's.

( Fig. 25 )

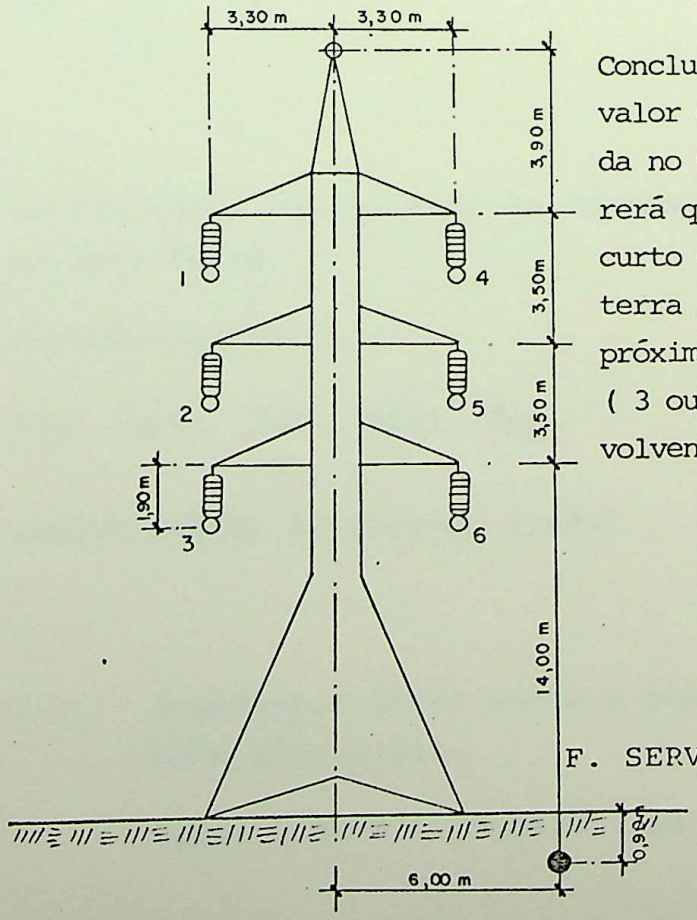
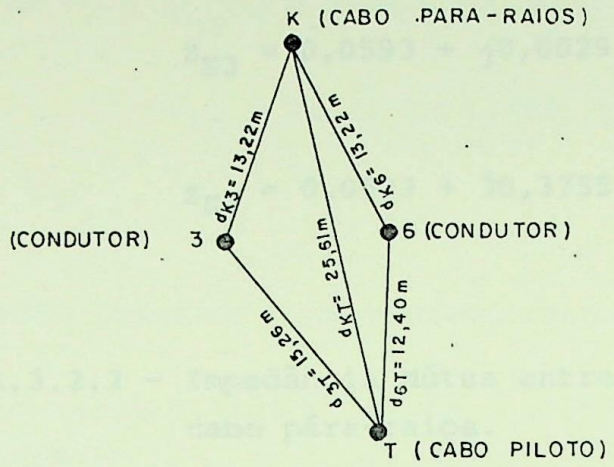



Fig. 25- Tipo de Estrutura utilizada

Conclui-se que o maior valor de tensão induzida no Cabo Piloto ocorrerá quando houver um curto circuito fase - terra no condutor mais próximo do Cabo Piloto ( 3 ou 6 ). Faltas envolventes.

CONFIGURAÇÃO SIMPLIFICADA




$$Z_M = 0,0593 + j0,0029 \times f \times \text{Log} \frac{De}{d} \quad (\Omega/Km)$$

e

$$De = 659 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (m)$$

Onde:

De = Profundidade equivalente da corrente de retorno pela Terra.

f = Frequência (Hz)

d = $d_{3T}$, $d_{6T}$, $d_{KT}$, $d_{K3}$, $d_{K6}$,

$\rho$ = resistividade do terreno ($\Omega$/m)

5.3.3.2.1 - Impedância Mútua entre o condutor 3 e cabo pára-raios.

$$Z_{K3} = 0,0593 + j0,0029 \times 60 \times \text{Log} \frac{De}{13,22}$$

$$De = 659 \sqrt{\frac{500}{60}} = 1902m$$

$$Z_{K3} = 0,0593 + j0,0029 \times 60 \times \text{Log} \frac{1902}{13,22}$$

$$Z_{K3} = 0,0593 + j0,3755 \ \Omega/Km$$

5.3.3.2.2 - Impedância Mútua entre o condutor 6 e cabo pára-raios.

$$Z_{K6} = Z_{K3} = 0,0593 + j0,3755 \ \Omega/Km$$

5.3.3.2.3 - Impedância Mútua entre o cabo pára-raio e o cabo piloto.

$$Z_{KT} = 0,0593 + j0,0029 \times 60 \times \text{Log} \frac{1902}{25,61}$$

$$Z_{KT} = 0,0593 + j0,3255 \ \Omega/Km$$

5.3.3.2.4 - Impedância Mútua entre o condutor 6 e cabo piloto.

$$Z_{6T} = 0,0593 + j0,0029 \times 60 \times \text{Log} \frac{1902}{12,40}$$

$$Z_{6T} = 0,0593 + j0,3803 \ \Omega/Km$$

5.3.3.2.5 - Impedância Mútua entre o condutor 3 e o cabo piloto.

$$Z_{3T} = 0,0593 + j0,0029 \times 60 \times \text{Log} \frac{1902}{15,26}$$

$$Z_{3T} = 0,0593 + j0,3646 \quad \Omega/Km$$

$$Z_{KK} = 4,351 + j1,563 \quad \Omega/Km$$

## 5.4 - Tensão Induzida Longitudinalmente no Fio Piloto

A tensão induzida é obtida a partir da seguinte expressão:

$$E = Z_m . I . \ell . K \quad |\text{Ver Ref. 9}|$$

ou

$$E = 2\pi f L_M . I . \ell . K$$

Onde:

$Z_M$ = Impedância Mútua entre os condutores indutor e induzido ( $\Omega$ /Km)

$\ell$ = Comprimento do trecho exposto à indução (m)

I = Corrente de curto no condutor fase com defeito para terra, no trecho exposto à indução.

K = Fator de blindagem devido à presença de cabo pára-raios, capas de alumínio, etc...

Como no caso o circuito é duplo, aplica-se a equação acima a cada circuito, para a determinação da tensão total induzida.

$$E_T = Z_{3T} . \ell . I_3 . K_1 + Z_{6T} . \ell . I_6 . K_2$$

Para a pior condição, ou seja curto no extremo da linha (BLU-II) $I_6 = I_3 = I$ e $K_1 = K_2 = K$

$$E_T = (Z_{3T} + Z_{6T}) . I . \ell . K$$

$K = 1$ (para a pior condição)

$$E_T = (Z_{3T} + Z_{6T}) . I . \ell . K$$

Como:

$\ell = 1,16$km

$I = 2 \times I_1 + Io = 2 \times 12,8895 + 11,8310 = 37,61$ pu nos dois circuitos. | Ref. 21 |

Logo:

$$I_3 = I_6 = I = \frac{37,61}{2} = 18,805\text{pu}$$

$I = 7867,44$A

$Z_{3T} = 0,0593 + j0,3646\ \Omega/\text{km}$

$Z_{6T} = 0,0593 + j0,3803\ \Omega/\text{km}$

$$E_T = \left[2\ (0,0593) + j\ (0,3803 + 0,3646)\right] 1,16 \times 7867,44$$

$$E_T = 0,7543\ \angle 80°,95' \times 1,16 \times 7867,44$$

$E_T = 6883,91$V

Se for utilizado cabo piloto com blindagem adequada, corretamente aterrada, essa tensão induzida ficará reduzida a aproximadamente 60% desse valor. | Ver referência 11 |

A seguir outro método para o cálculo da tensão induzida:

5.4.1 - Tensao Induzida longitudinalmente no Fio Piloto (outro método)

(Norma VDE 0228, Figura 9, parágrafo 23b) |Ver Ref. 10|

$$X_v = a\sqrt{\frac{T.\ f}{1000}}$$

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

Onde:

a - distância entre o fio piloto e o condutor.

f - frequência em Hz

$\rho$ - resistividade em $\Omega$ x m

$$T - \frac{10^6}{\rho \times 10^2}\ \mu \text{ SIEMENS/cm}$$

T - conversão de $\rho$ em outra unidade

$$\text{SIEMENS} = \sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$a = \sqrt{(12,10)^2 + (2,70)^2} \Rightarrow a = 12,40\text{m}$$

$\rho = 500\ \Omega$ x m

$$T = \frac{10^6}{500 \times 10^2} \qquad \sigma = 20\mu \text{ SIEMENS/cm}$$

$$X_v = 12,40\sqrt{\frac{20 \times 60}{1000}} \Rightarrow X = 13,58$$

$X_V$ = 13,58 ⇨ Fator com o qual se entra na figura 9 |Ver Ref. 10| , e na curva adequada se obtêm a indutância mútua em $\mu$H/Km

Logo:

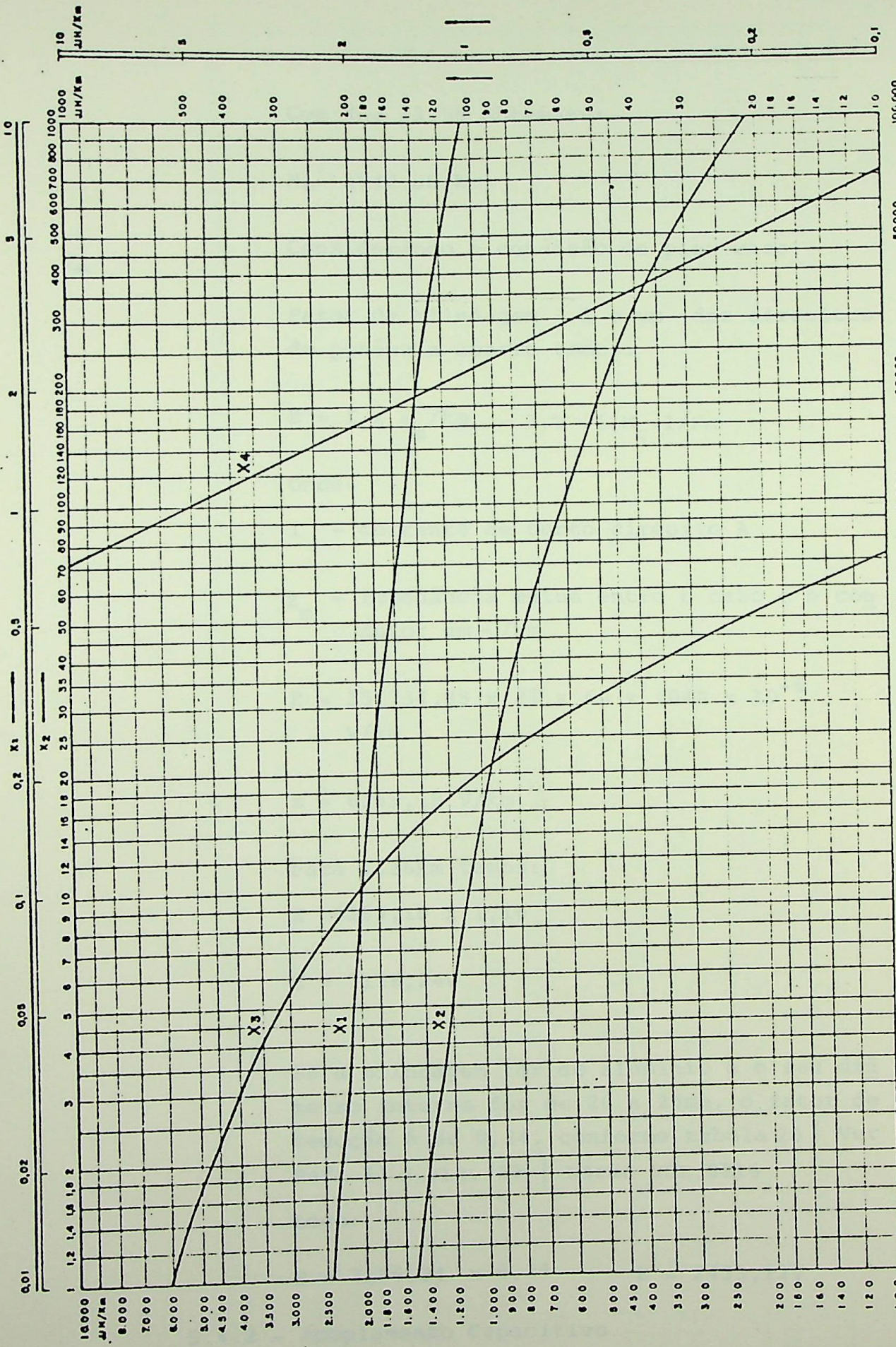



FIG.26 INDUTANCIA MUTUA
(FIGURA 9 DA NORMA VDE 0228)

Com $X_V$= 13,58 obtém-se:

$M_C$= 1040 $\mu$H/km

Considerando a condição de pior caso:

Fator de blindagem = 1 e um dos circuitos de potência aberto temos:

$E = I \times Z_m/km = 2.\pi .f.M_C.I/Km$

Onde:

I - corrente de curto circuito A

$Z_m$ - impedância mútua entre o cabo e o condutor em $\Omega$/km

$E = 15.734,88 \times 2\pi \times 60 \times 1040 \times 10^{-6}$ V/km

E = 6169,18 V/km

Para 1,16km temos:

E =6169,18 x 1,16

E = 7156,24V

Se a blindagem for de alumínio e o seu diâmetro interno for de 20 a 25mm, o fator de redução é de 0,34, conforme tabela 20 | Ver Ref. 11 e Fig. 27 | Norma VDE 0816

Logo:

E = 7156,24 x 0,34 E = 2433,12V

5.4.2 - Acoplamento Capacitivo

Por falta de dados este item não foi calculado.

Tafel 20

Höchstwerte des Reduktionsfaktors

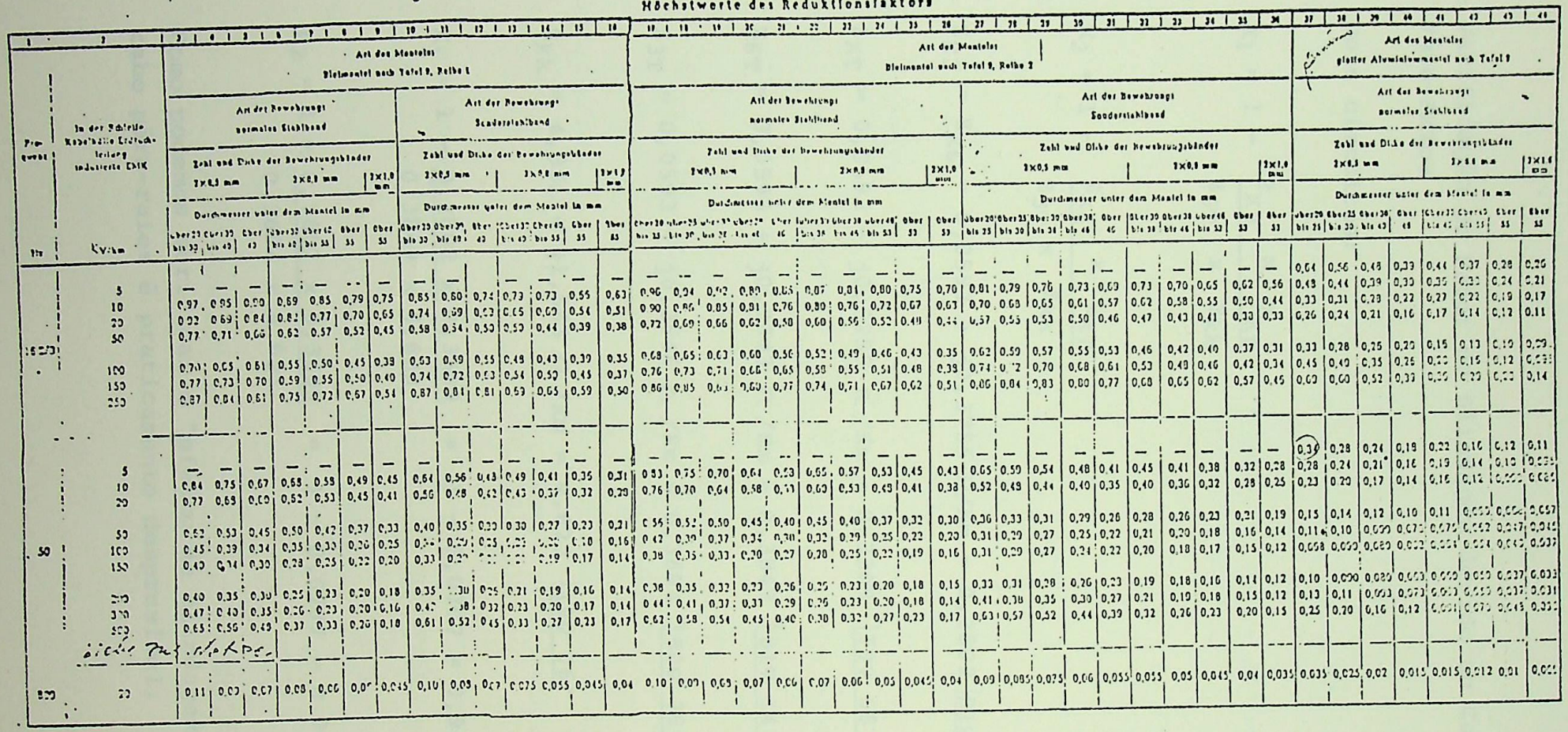


Fig. 27 - Fator de Redução ( Tabela 20 da Norma VDE 0816)

5.5 - Verificação do Fator de Blindagem devido ao Cabo Pára-Raios

Dois circuitos:

$$K_1 = 1 - \frac{Z_{K3} \times Z_{Kt}}{Z_{6T} \times Z_{kk}}$$

$$K_2 = 1 - \frac{Z_{k_6} \times Z_{kT}}{Z_{3T} \times Z_{kk}}$$

$Z_{K3} = Z_{K6} = 0,0593 + j0,3755\ \Omega/Km = 0,3802 \lfloor \underline{81º\ 03'}$

$Z_{KT} = 0,0593 + j0,3255\ \Omega/Km = 0,3309 \lfloor \underline{79º\ 68'}$

$Z_{6T} = 0,0593 + j0,3803\ \Omega/Km = 0,3849 \lfloor \underline{81º\ 14'}$

$Z_{3T} = 0,0593 + j0,3646\ \Omega/Km = 0,3694 \lfloor \underline{80º\ 76'}$

$Z_{kk} = 4,351 + j1,563\ \Omega/Km = 4,623 \lfloor \underline{19º\ 76'}$

$$K_1 = 1 - \frac{0,3802 \times 0,3309}{0,3849 \times 4,623} = 1 - 0,0707 = 0,9293$$

$$K_2 = 1 - \frac{0,3802 \times 0,3309}{0,3694 \times 4,623} = 1 - 0,0737 = 0,9263$$

Como podemos verificar o "efeito de blindagem" do cabo pára-raios é praticamente desprezível.

## 5.6 - Elevação de Potencial nas Subestações (Ep)

### 5.6.1 - Cálculo Simplificado

#### 5.6.1.1 - Curto circuito 1Ø em BLU-ESUL.

a - Dentro da Malha de Terra.
(Figs.28 e 29 )

No 230kV

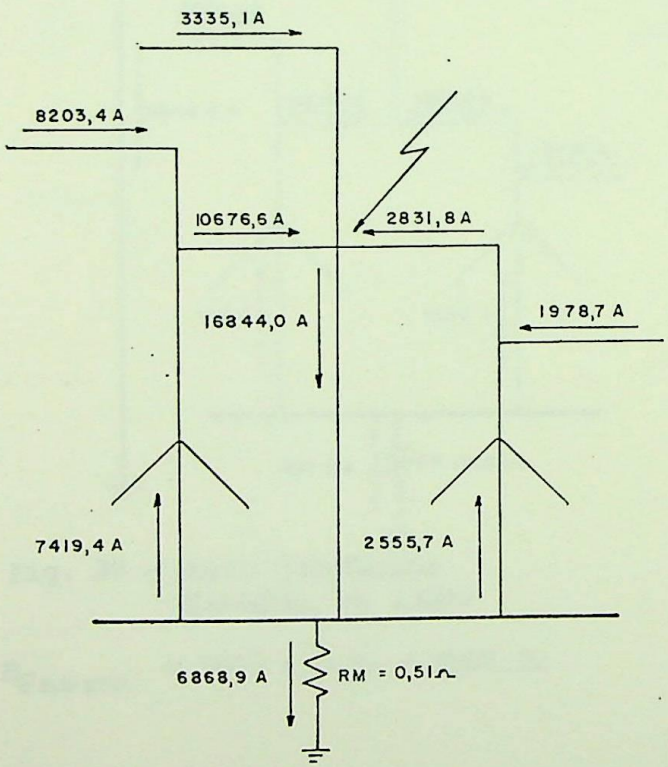



Fig. 28-Curto-Circuito
BLU-ESUL, no 230kV

No 138kV

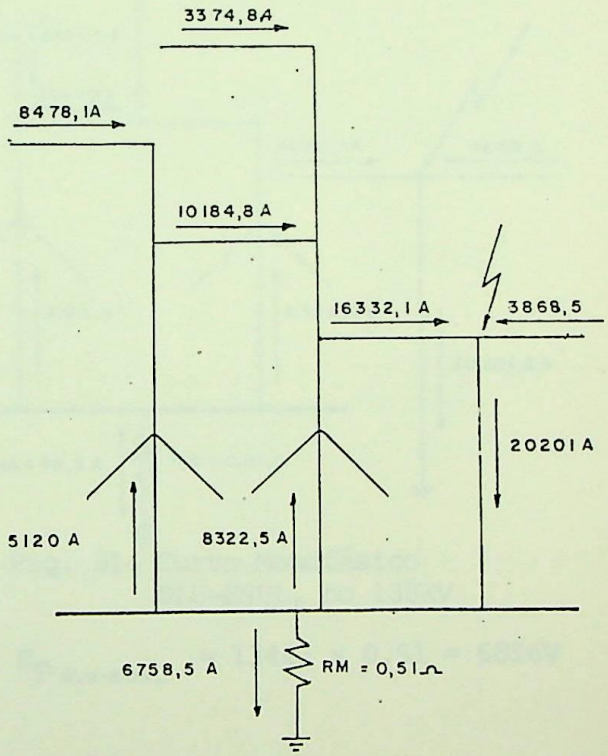



Fig. 29-Curto Monofásico
BLU-ESUL, no 138kV

$Ep_{BLU-ESUL} = 6868,9 \times 0,51 = 3503,2V$

$Ep_{BLU-ESUL} = 6758,5 \times 0,51 = 3447V$

$Ep_{BLU-II} = 886,3 \times 1 = 886,3V$

$Ep_{BLU-II} = 1336,5 \times 1 = 1337V$

b - Fora da Malha de Terra.
(Figs. 30 e 31)

No 230kV

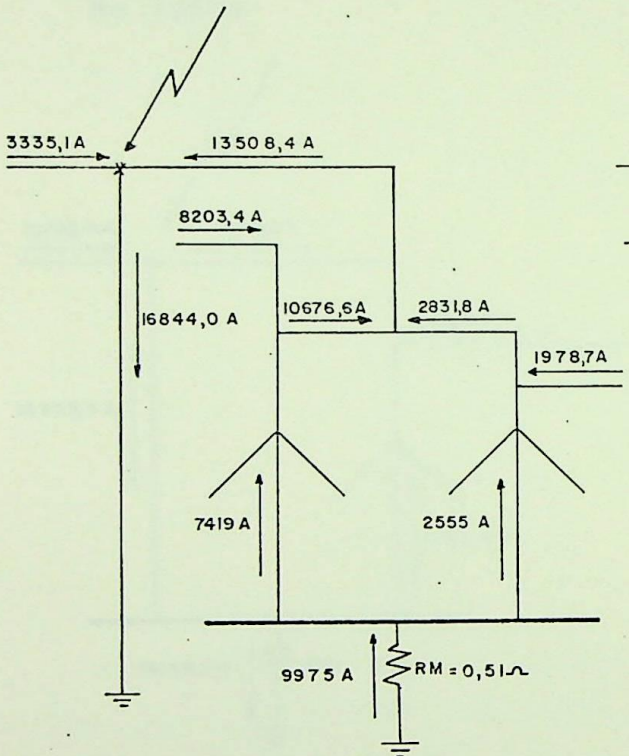



Fig. 30 - Curto Monofásico BLU-ESUL, no 230kV

$Ep_{BLU-ESUL}$ = 9975 x 0,51 = 5087,3V

$Ep_{BLU-II}$ = 886,3 x 1 = 886,3V

No 138kV

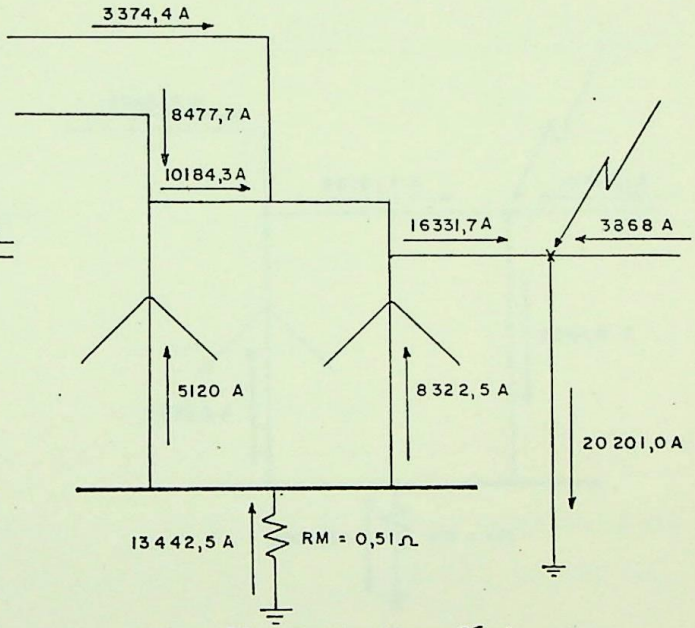



Fig. 31- Curto Monofásico BLU-ESUL, no 138kV

$Ep_{BLU-ESUL}$ = 13443 x 0,51 = 6856V

$Ep_{BLU-II}$ = 1336,5 x 1 = 1337V

5.6.1.2 - Curto $I_{1\emptyset}$ em Blumenau II - CELESC.

a - Dentro da Malha de Terra.

( Figs. 32 e 33 )

No 138kV

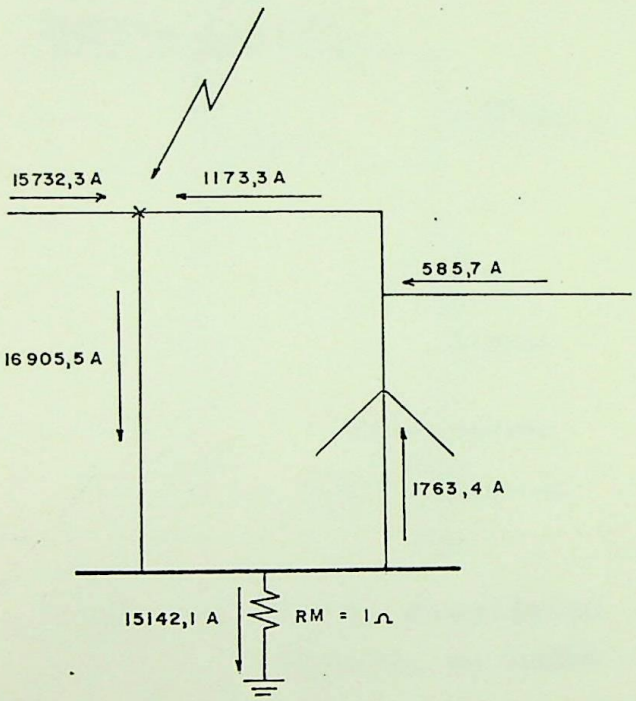



Fig. 32 - Curto Monofásico BLU-II, no 138kV

No 69kV

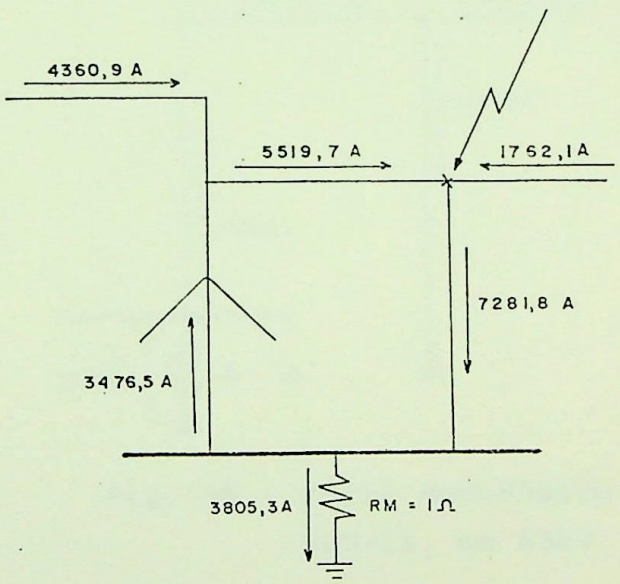



Fig. 33- Curto Monofásico BLU-II, no 69kV

$E_{p\,BLU-II}$ = 15142,1 x 1 = 15142,1V

$E_{p\,BLU-E}$ = 3805,3 x 1 = 3805,3V

$E_{p\,BLU-ESUL}$ = 10708,4 x 0,51 = 5460V

$E_{p\,BLU-ESUL}$ = 1817,3 x 0,51 = 927V

b - Fora da Malha de Terra

( Figs. 34 e 35 )

No 138kV

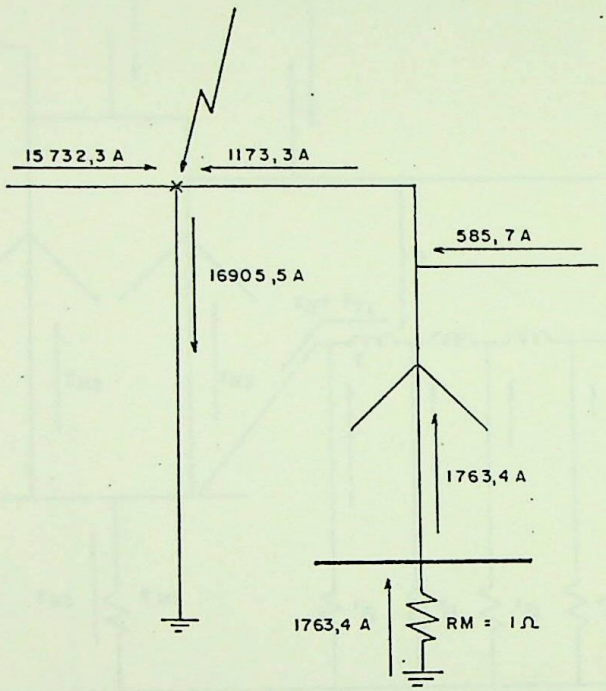



Fig. 34 - Curto Monofásico BLU-II, no 138kV

No 69 kV

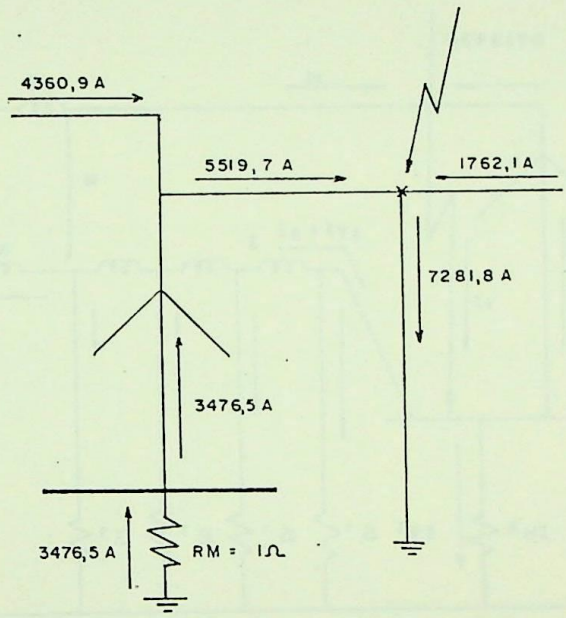



Fig. 35 - Curto Monofásico BLU-II, no 69kV

$E_{p_{BLU-II}} = 17634 \times 1 = 1763,4$

$E_{p_{BLU-II}} = 3476,5 \times 1 = 3476,5V$

$E_{p_{BLU-ESUL}} = 10708,1 \times 051 = 5461,1V$

$E_{p_{BLU-ESUL}} = 1817,3 \times 0,51 = 927V$

No método acima não foi considerado a corrente nos cabos pára-raios pertencentes às LD's, que partem das subestações que de certa forma influenciariam, diminuindo a elevação de potencial de malha de terra. A seguir, os cálculos fazendo a referida consideração.

5.6.2 - Caso Real (incluindo os aterramentos) |Ver Ref. 17|

5.6.2.1 - Circuito equivalente de sequência zero.

( Fig. 36 )

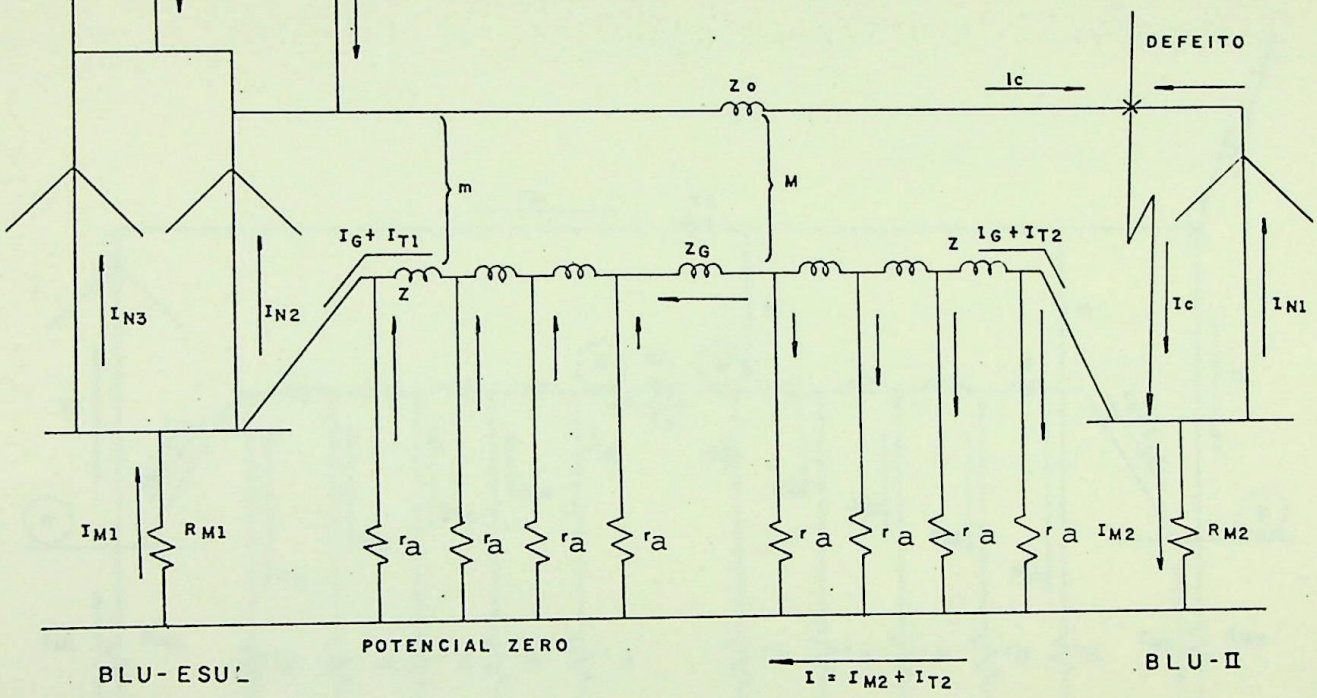



Fig. 36 - Diagrama de Sequência zero

Onde:

$Z_o$ - Impedância de sequência zero do condutor.

$Z_G$ - Impedância de sequência zero do cabo pára-raios (para todo o trecho entre as duas SE's).

M - Impedância mútua entre o cabo pára-raios e o condutor (para todo o trecho entre as duas SE's).

Z e m - Valores para um vão de cabo pára-raios.

$r_a$ - Resistência de aterramento da estrutura da LT.

5.6.2.2 - Determinação do circuito equivalente de sequência zero do item anterior.

Para chegarmos àquela configuração partimos do seguinte esquema: ( Fig. 37 )

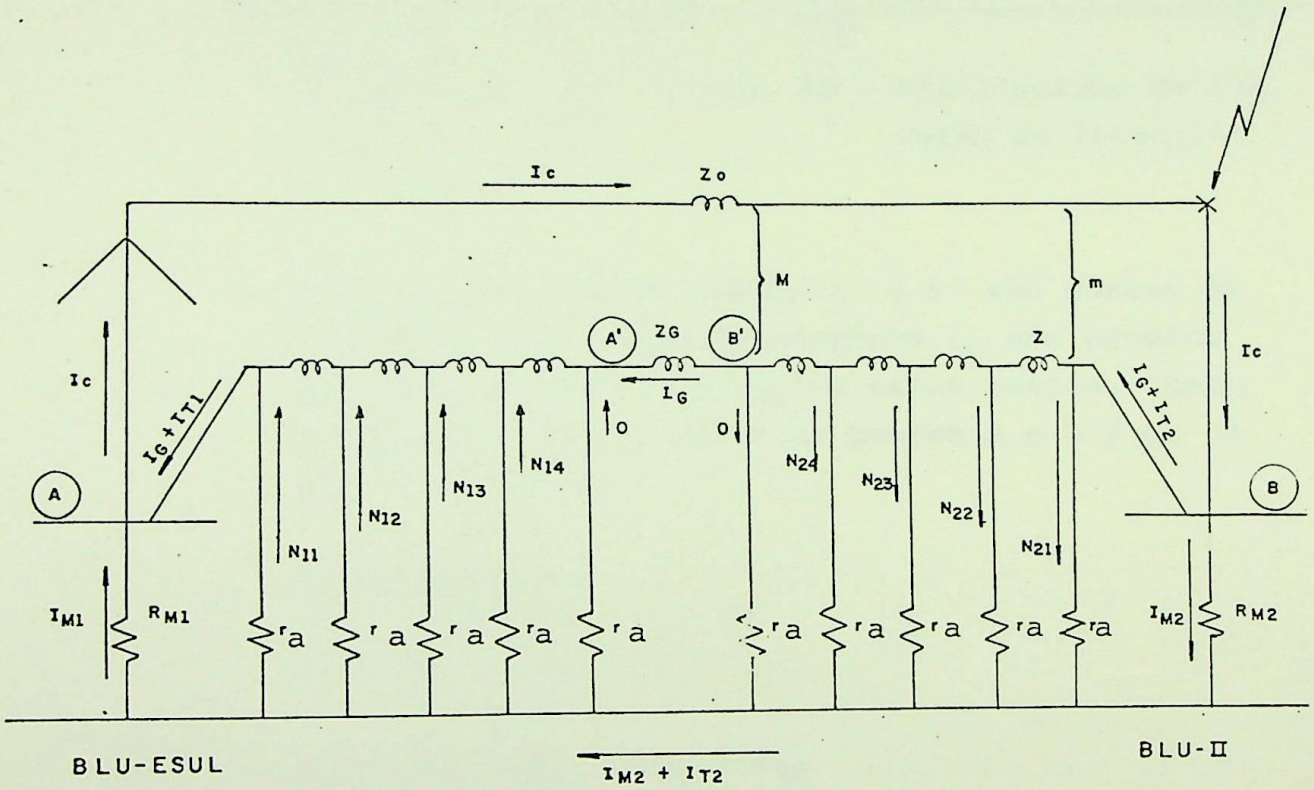



Fig. 37 - Diagrama de Sequência zero.

Se observarmos o esquema acima veremos que pelo sentido de circulação das correntes teremos uma elevação de potencial ($V_2$) de sentido positivo na SE Blumenau II - CELESC e uma elevação de potencial ($V_1$) de sentido negativo na SE BLU-ESUL.

| Ver Ref. 17 |

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Graficamente podemos representar:

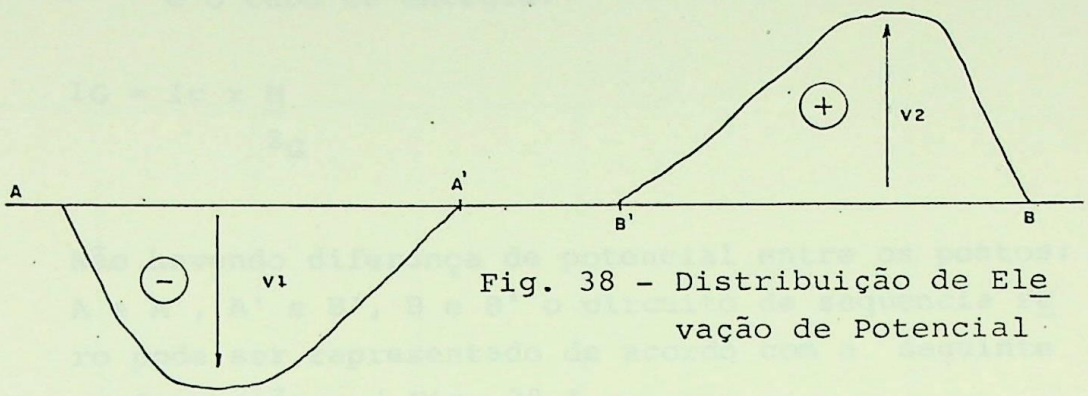



Fig. 38 - Distribuição de Elevação de Potencial

Como se verifica os pontos A' e B' são pontos de potencial zero. Conseqüentemente $I_G$ não provoca diferença de potencial entre esses pontos, como também não provoca entre os pontos A e A'/ ou B e B'. ( Fig. 38 )

Na SE BLU-ESUL:

$$Ic = I_{M1} + I_{T1} + I_G$$

$$I_{T1} = N_{11} + N_{12} + N_{13} + N_{14}$$

Na SE BLU II - CELESC.

$$Ic = I_{M_2} + I_{T2} + I_G$$

$$I_{T2} = N_{21} + N_{22} + N_{23} + N_{24}$$

$Z_G$ = Impedância do cabo pára-raios

M = Impedância mútua entre o cabo pára-raios e o cabo de energia.

Z = Impedância de um vão do cabo pára-raios.

m = Impedância mútua de um vão do cabo pára-raios e o cabo de energia.

$$I_G = I_c \times \frac{M}{Z_G}$$

Não havendo diferença de potencial entre os pontos: A e A', A' e B', B e B' o circuito de sequência zero pode ser representado de acordo com a seguinte configuração: ( Fig. 39 )

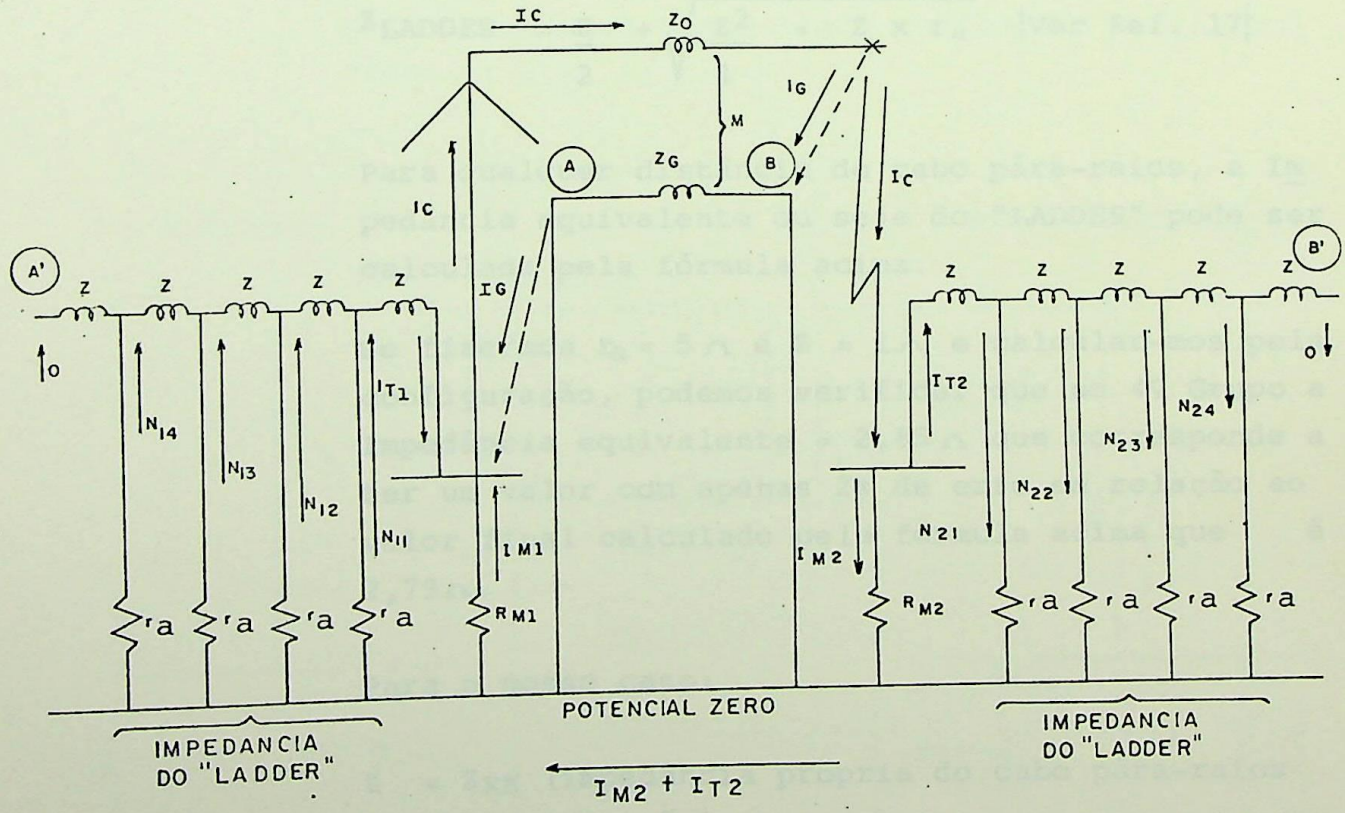



Fig. 39 – Diagrama de Sequência zero

5.6.2.3 - Determinação da Impedância do "LADDER" ($Z_{LADDER}$)
A impedância do "LADDER" é representada:
(Fig. 40)

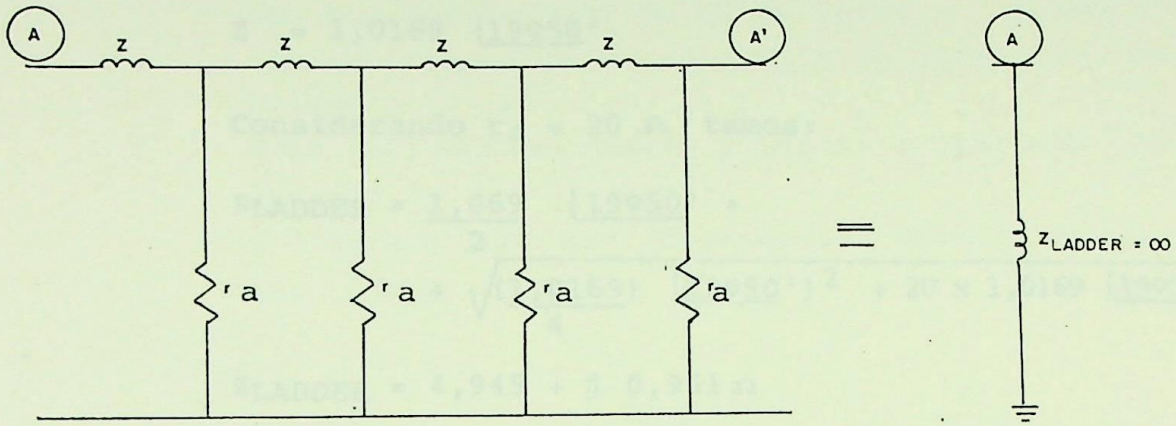



Fig. 40-Equivalente do Ladder

$$Z_{LADDER} = \frac{Z}{2} + \sqrt{\frac{Z^2}{4} + Z \times r_a}$$ |Ver Ref. 17|

Para qualquer distância de cabo pára-raios, a Impedância equivalente ou seja do "LADDER" pode ser calculada pela fórmula acima.

Se fizermos $r_a = 5\,\Omega$ e $Z = 1\,\Omega$ e calcular-mos pela configuração, podemos verificar que no 4º Grupo a Impedância equivalente = $2{,}85\,\Omega$ que corresponde a ter um valor com apenas 2% de erro em relação ao valor final calculado pela fórmula acima que é $2{,}79\,\Omega$.

Para o nosso caso:

$Z = Z_{KK}$ (impedância própria do cabo pára-raios por vão).

$r_a$ = resistência do pé de Torre.

Como:

$Z_{KK} = 4{,}351 + j1{,}563\ \Omega/Km.$

Vão Médio = $V_{M2}$ = 220m = 0,22Km

$Z = (4,351 + j1,563) \times 0,22\ (\Omega)$

$Z = 0,9571 + j\ 0,3438\ \Omega$

$Z = 1,0169\ \lfloor 19°50'$

Considerando $r_a = 20\ \Omega$ temos:

$$Z_{LADDER} = \frac{1,069}{2}\ \lfloor 19°50' + \sqrt{\left(\frac{1,0169}{4}\right)\ \lfloor 19°50'^{2} + 20 \times 1,0169\ \lfloor 19°50'}$$

$Z_{LADDER} = 4,945 + j\ 0,961\ \Omega$

$Z_{LADDER} = 5,037\ \lfloor 11°\ \Omega$

Substituindo a impedância distribuída do "LADDER" pela impedância concentrada do "LADDER" ($Z_{LADDER}$) temos: ( Fig. 41 )

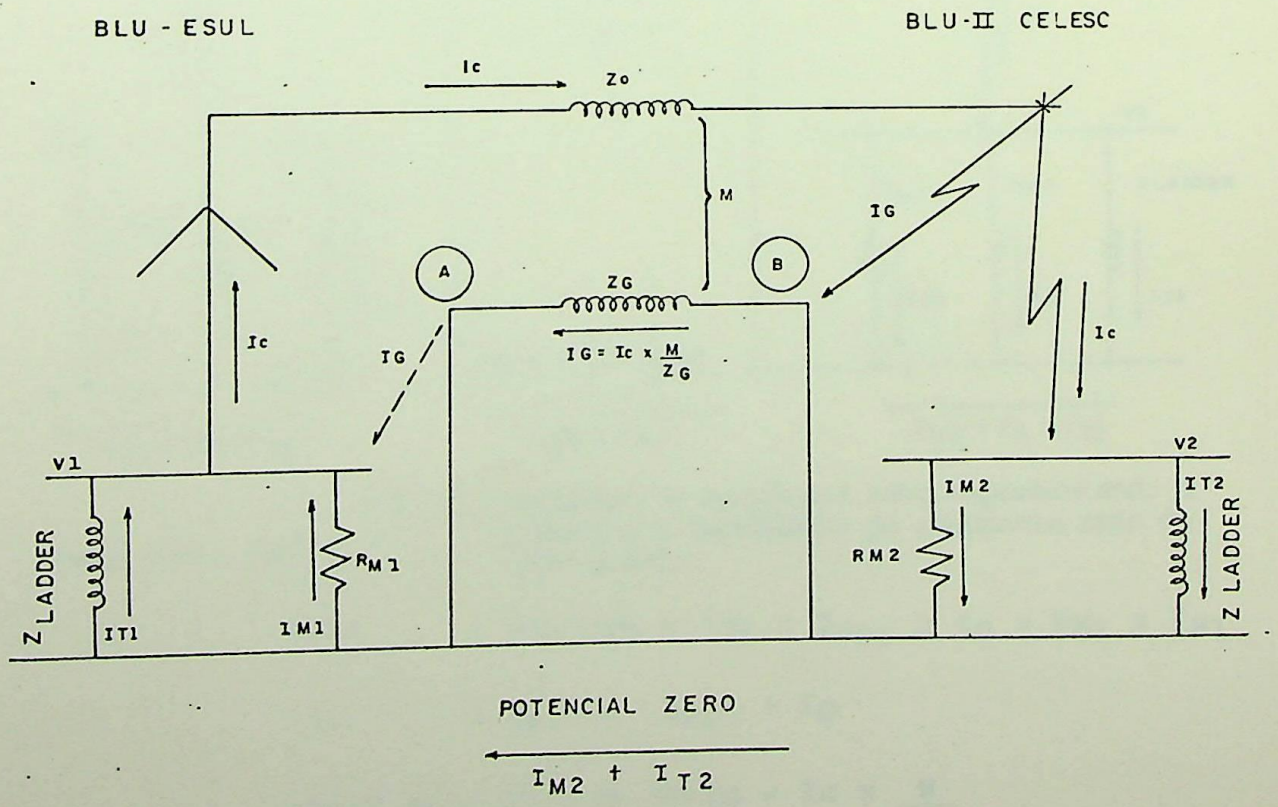



Fig. 41-Diagrama de Sequência zero representando o LADDER.

5.6.2.4 - Determinação das Impedâncias $Z_{cp1}$ e $Z_{cp2}$. Essas impedâncias são valores concentrados pelos quais circula $I_G$, em cada uma das SE's. São calculadas de tal forma que quando ligadas em paralelo com as impedâncias: Malha de Terra e "LADDER" não modifiquem as tensões $V_1$ e $V_2$ (elevação de potencial).

Suas influências nesses potenciais aparecem em seguida.

O diagrama pode ser representado da seguinte forma: ( Fig. 42 )

BLU-ESUL BLU-II

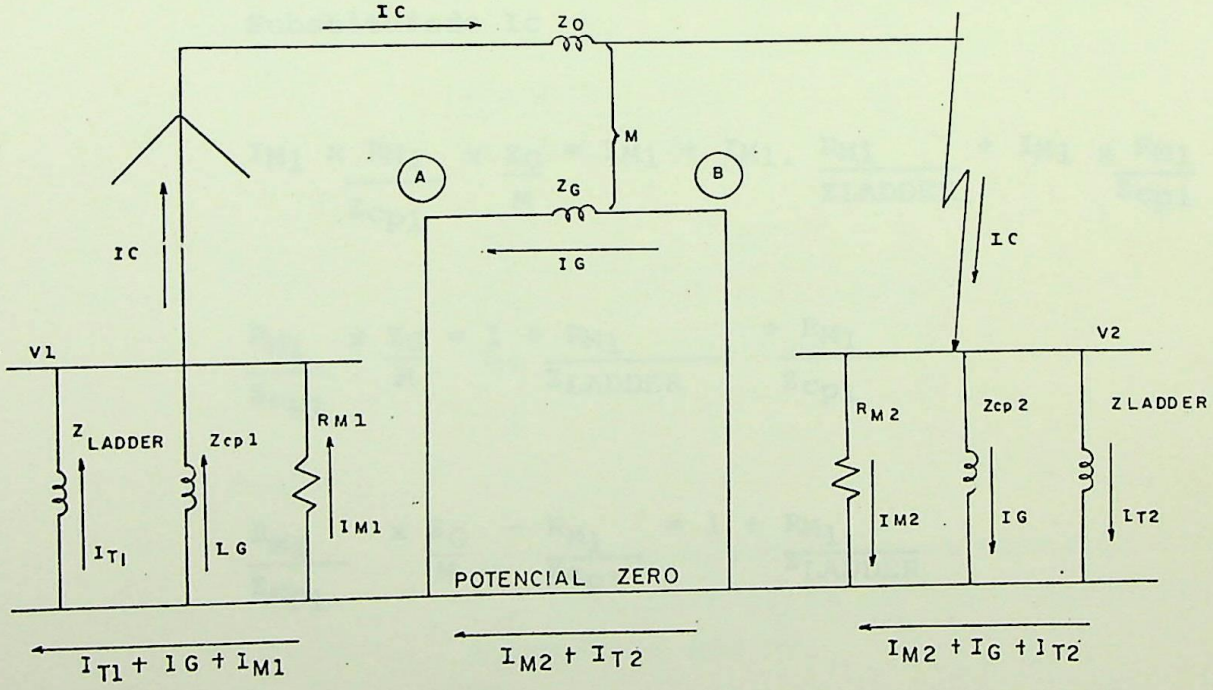



Fig. 42- Diagrama de sequência zero representando o LADDER e a impedância de sequência zero do cabo guarda.

Ver Ref. 17

$$V_1 = Z_{LADDER} \times I_{T1} = Z_{cp1} \times I_G = R_{M1} \times I_{M1}$$

$$Ic = I_{M1} + I_{T1} + I_G$$

$$I_G \times Z_G = Ic \times M \Rightarrow I_G = Ic \times \frac{M}{Z_G}$$

$$I_{T_1} = I_{M_1} \times \frac{R_{M_1}}{ZLADDER}$$

$$I_G = I_{M_1} \times \frac{R_{M_1}}{Z_{c_{p1}}}$$

$$Ic = I_G \times \frac{Z_G}{M} = I_{M1} \times \frac{R_{M_1}}{Z_{c_{p1}}} \times \frac{Z_G}{M}$$

$$Ic = I_{M1} + I_{M1} \times \frac{R_{M_1}}{ZLADDER} + I_{M_1} \cdot \frac{R_{M_1}}{Z_{cp1}}$$

Substituindo Ic

$$I_{M_1} \times \frac{R_{M_1}}{Z_{c_{p1}}} \times \frac{Z_G}{M} = I_{M1} + I_{M_1} \cdot \frac{R_{M1}}{ZLADDER} + I_{M1} \times \frac{R_{M_1}}{Z_{cp1}}$$

$$\frac{R_{M_1}}{Z_{c_{p1}}} \times \frac{Z_G}{M} = 1 + \frac{R_{M_1}}{Z_{LADDER}} + \frac{R_{M_1}}{Z_{c_{p1}}}$$

$$\frac{R_{M_1}}{Z_{c_{p1}}} \times \frac{Z_G}{M} - \frac{R_{M_1}}{Z_{c_{p1}}} = 1 + \frac{R_{M_1}}{Z_{LADDER}}$$

$$\frac{R_{M_1}}{Z_{c_{p1}}} \left( \frac{Z_G}{M} - 1 \right) = 1 + \frac{R_{M_1}}{Z_{LADDER}}$$

$$\frac{R_{M_1}}{Z_{c_{p1}}} = \frac{1 + \dfrac{R_{M_1}}{Z_{LADDER}}}{\dfrac{Z_G}{M} - 1}$$

$$\frac{R_{M1}}{Z_{cp1}} = \frac{\frac{Z_{LADDER} + R_{M1}}{Z_{LADDER}}}{\frac{Z_G - M}{M}}$$

$$\frac{R_{M1}}{Z_{cp1}} = \left(\frac{Z_{LADDER} + R_{M1}}{Z_G - M}\right) \times \frac{M}{Z_{LADDER}}$$

$$\frac{1}{Z_{cp1}} = \left(\frac{Z_{LADDER} + R_{M1}}{Z_G - M}\right) \times \frac{M}{Z_{LADDER} \times R_{M1}}$$

$$Z_{cp1} = \frac{1}{\left(\frac{Z_{LADDER} + R_{M1}}{Z_G - M}\right) \frac{M}{Z_{LADDER} \times R_{M1}}}$$

$$Z_{cp1} = \frac{Z_G - M}{\left(\frac{Z_{LADDER} + R_{M1}}{Z_{LADDER} \times R_{M1}}\right) \times M}$$

$$Z_{cp1} = \frac{Z_G - M}{\frac{M}{R_{M1}} + \frac{M}{Z_{LADDER}}}$$

Onde:

$M$ = Impedância mútua entre os cabos da linha e o cabo pára-raios de todo trecho entre BLU-ESUL e BLU II.

$R_{M1}$ = Resistência de Malha de Terra da SE BLU-ESUL.

$Z_G = Z_{KK}$ x comprimento da linha.

Comprimento = $\ell$ = 1,16 km

$M = 0,0593 + j0,3646 \ /km = Z_{3T}$

$M = (0,0593 + j0,3646) \times 1,16$

$M = 0,0688 + j0,4229 = 0,4285 \ |\underline{86°76'}$

$R_{M1} = 0,51$

$Z_G = (4,351 + j1,563) \times 1,16$

$Z_G = 5,0472 + j\ 1,8131 = 5,363 \ |\underline{19°76'}$

$$Z_{cp1} = \frac{(5,0472 + j\ 1,8131) - (0,9688+j0,4229}{\frac{0,0658 + j\ 0,4229}{0,51} + \frac{0,4285 \ |\underline{86°76'}}{5,037 \ |\underline{11°}}}$$

$$Z_{cp1} = \frac{4,9784 + j\ 1,3902}{0,1349 + j0,8292 + 0,08507 \ |\underline{69°76'}}$$

$$Z_{cp1} = \frac{5,16886 \ |\underline{15°60'}}{0,1349 + j0,8292 + 0,02944 + j0,079817}$$

$$Z_{cp1} = \frac{5,16886 \ |\underline{15°66'} = 5,16886 \ |\underline{15°60'}}{0,16434 + j\ 0,9090 \quad 0,92374 \ |\underline{79°75'}}$$

$Z_{cp1} = 5,5956 \ |\underline{-64°15'}$

Para calcular $Z_{cp2}$ o procedimento é o mesmo do cálculo de $Z_{cp1}$.

Logo:

$$Z_{cp2} = \frac{Z_G - M}{\frac{M}{R_{M2}} - \frac{M}{Z_{LADDER}}}$$

Onde:

$R_{M2} = 1\,\Omega$

$Z_G$, M e $Z_{LADDER}$ - são os mesmos usados no cálculo de $Z_{cp1}$.

$$Z_{cp2} = \frac{(5,0472 + j\,1,8131) - (0,0688 + j\,0,4229)}{(0,0688 + j\,0,4229) + \frac{0,4285\ \angle 86°76'}{5,0375\ \angle 11°}}$$

$$Z_{cp2} = \frac{4,9781 + j\,1,3902}{0,0688 + j\,0,4229 + 0,08506\ \angle 69°76'}$$

$$Z_{cp2} = \frac{5,16886\ \angle 15°60'}{0,0688 + j\,0,4229 + 0,02943 + j\,0,0798}$$

$$Z_{cp2} = \frac{5,16886\ \angle 15°60'}{0,09823 + j\,0,5027} = \frac{5,16886\ \angle 15°60'}{0,5122\ \angle 98°94'}$$

$$Z_{cp2} = 10,091\ \angle -63°34'\ \Omega$$

5.6.2.5 - Determinação das Impedâncias equivalentes: (Fig. 43 )

$Zeq_1$ e $Zeq_2$

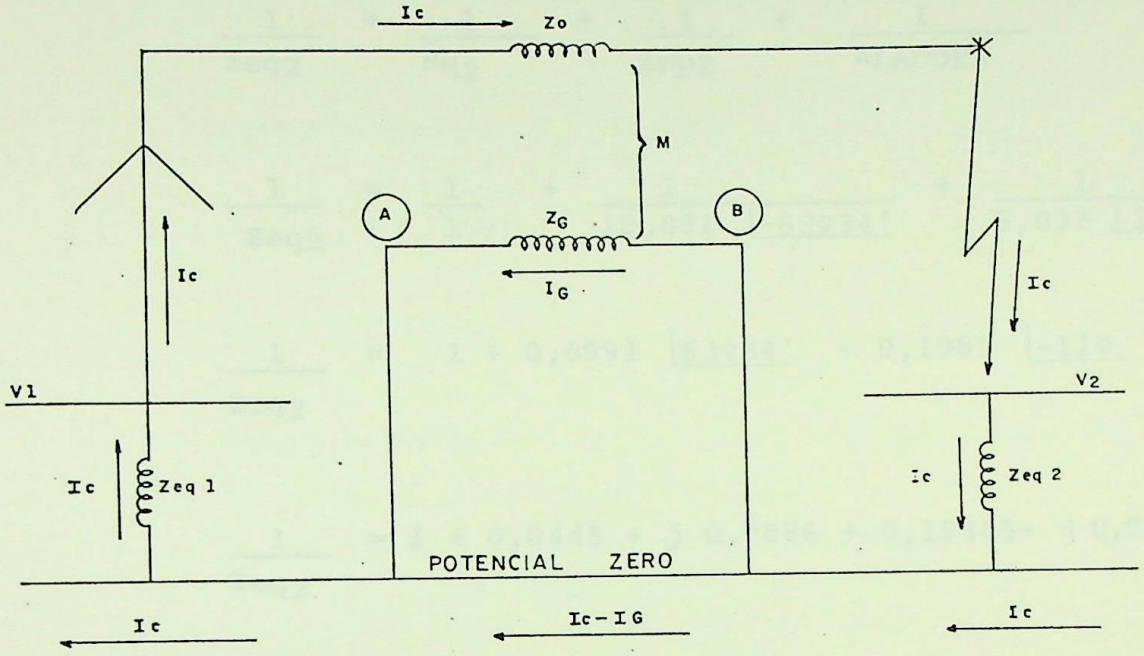



Fig. 43 - Diagrama Final - equivalente de sequência zero

$$\frac{1}{Z_{eq1}} = \frac{1}{R_{M1}} + \frac{1}{Z_{cp1}} + \frac{1}{Z_{LADDER}}$$

$$\frac{1}{Z_{eq1}} = \frac{1}{0,51} + \frac{1}{5,5956 \lfloor -64°15'} + \frac{1}{5,037 \lfloor 11°}$$

$$\frac{1}{Z_{eq1}} = 1,96078 + 0,17871 \lfloor 64°15' + 0,1985 \lfloor -11°$$

$$\frac{1}{Z_{eq1}} = 1,96078 + 0,07792 + j0,1608 + 0,19485 - j0,0379$$

$$\frac{1}{Z_{eq1}} = 2,23355 + j\ 0,1229 = 2,2369 \lfloor 3°15'$$

$$Z_{eq1} = \frac{1}{2,2369 \lfloor 3°15'} = 0,447 \lfloor -3°15'$$

$Zeq_1 = 0,447\,\Omega$

$$\frac{1}{Zeq_2} = \frac{1}{R_{M_2}} + \frac{1}{Zcp_2} + \frac{1}{Z_{LADDER}}$$

$$\frac{1}{Zeq_2} = \frac{1}{1} + \frac{1}{10,091\ \lfloor -63°34'} + \frac{1}{5,037\ \lfloor 11°}$$

$$\frac{1}{Zeq_2} = 1 + 0,0991\ \lfloor 63°34' + 0,1985\ \lfloor -11°$$

$$\frac{1}{Zeq_2} = 1 + 0,0445 + j\,0,0886 + 0,19485 - j\,0,0378$$

$$\frac{1}{Zeq_2} = 1,2394 + j0,0507 = 1,2404\ \lfloor 2°34'$$

$$Zeq_2 = \frac{1}{1,2404\ \lfloor 2°34'} = 0,806\ \lfloor -2°34'$$

$Zeq_2 = 0,806\,\Omega$

5.6.2.6 - Cálculo da elevação de potencial.

$V_1 = Ic \times Zeq_1$

$V_2 = Ic \times Zeq_2$

Na SE Blumenau - ELETROSUL

$V_1 = Ic \times Zeq_1$

$Ic = 10708,4A$

$Zeq_1 = 0,447\,\Omega$

$V_1 = 10.708,4 \times 0,447 \Rightarrow V_1 = 4787V$

Na SE Blumenau II - CELESC

$V_2 = Ic \times Zeq_2$

$Ic = 15142,1A$

$Zeq_2 = 0,806\,\Omega$

$V_2 = 15142,1 \times 0,806 \Rightarrow V_2 = 12204,6V$

## 5.7 - CONCLUSÕES DO CAP. 5

5.7.1 - Os cálculos anteriores de tensão induzida longitudinalmente no fio piloto e elevação do potencial de malha de terra, mostram que os valores são tão consideráveis que poderão danificar os equipamentos de proteção e representar perigo para a segurança dos operadores terminais.

5.7.2 - Considerando os valores encontrados para as elevações de potencial das subestações e para a tensão induzida nos fios piloto devemos minimizar o problema adotando as seguintes soluções:

a - Utilizar transformador de neutralização em cada SE, com o objetivo de limitar as elevações de potencial das SE's quando ocorrer um curto circuito monofásico.
No caso (EP= 13kV), não é aconselhável o uso de reatores de neutralização pois os mesmos são fabricados para tensões de até 4kV e para 01 (um) par piloto. |Ver Ref. 13|

b - Utilizar transformador de isolamento em cada SE, para isolar eletricamente o relé dos fios piloto.

c - Utilizar reator de drenagem, associando a tubo gás, em cada SE, devido ao elevado valor de tensão induzida.
A blindagem do cabo que contém os fios piloto deve ser aterrada pelo menos 2 pontos, a fim de reduzir indução de tensões nos fios piloto.
Entretanto é desaconselhável aterrar a blindagem à malha de terra das SE's, tendo em vista a possibilidade de circulação de altas correntes

de curto circuito pela blindagem, podendo danificá-la.

5.7.3 - Estes equipamentos são imprescindíveis para o bom desempenho da proteção diferencial longitudinal , bem como propiciar a instalação do relé de supervisão, mantendo a proteção sempre vigilante.

5.7.4 - Salientamos que estes equipamentos, ou seja, o transformador de isolamento, transformador de neutralização e o reator de drenagem devem ser instalados fora da casa de comando e em cubículo de alvenaria. O percurso do par piloto entre o cubículo e o painel (relé diferencial longitudinal) deve ser feito em duto de PVC.

CAP. 6

CONCLUSÕES FINAIS

1. - A proteção por fio piloto não é ainda uma proteção que podemos dizer usada em grande escala como as proteções por sobrecorrente ou distância.
Porém, como já mencionado ela encontra um campo de atuação muito importante que é o das linhas aéreas de pequeno comprimento, ou em cabo isolado, para o qual este tipo de proteção apresenta melhor desempenho.

2. - Conforme ficou demonstrado a proteção por fio piloto apresenta vantagens em relação aos outros tipos de proteção em todas aquelas áreas de aplicação citadas, mesmo que tenhamos um aumento no custo da instalação com a utilização de reatores de drenagem, transformador de neutralização, etc...,para minimizar os fenômenos tais como; tensões induzidas, elevação de potencial da malha de terra das subestações, etc...

3. - Neste trabalho procuramos apresentar as principais implicações relacionadas com este tipo de proteção, apresentando também os métodos até agora utilizados para solucioná-las.

4. - Pelos envolvimentos expostos certamente muitos outros estudos deverão ser realizados buscando o aperfeiçoamento deste tipo de proteção, os quais serão apoiados principalmente na experiência operacional e medição de campo obtidos dos sistemas já implantados.

Acreditamos que o futuro da tecnologia será a utilização de relés diferenciais para todos os tipos de proteção, uma vez que novos desenvolvimentos de equipamentos de medição e transmissão de sinais (por exemplo fi

bras óticas), determinarão a utilização desses relés. |Ver Ref. 20|

5. - Com relação aos equipamentos necessários a proteção por fio piloto, julgamos de extrema importância incentivar a indústria nacional a fabricá-los, uma vez que apresenta sempre entraves de ordem econômica e interferências nos cronogramas das obras.

6. - Esperamos que este trabalho elucide os pontos principais sobre relés de proteção por Fio Piloto.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

BIBLIOGRAFIA

1. Mason C. Russel - El Arte y La ciencia de La Protec cion for relevadores compania Editorial Continental, S.A., México
Primeira edición en espãnol: Junio 1971.

2. Caminha, Amadeu Casal - Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos, Editora Edgard Blü-Cher Ltda, 1977, SP.

3. Queiroz, G.A. - Proteção por relés Queiroz G.A. São Paulo - Mai 1976.

4. Gec, Measurements - The General Eletric Company Limited of England.
Protetive Relays Aplication Guide, 1975.

5. Applied - Westinghouse Eletric Corporation Applied Protective Relaying Relay - Instrument Division Coral Springs, Florida - 33060
Second Printing - 1979.

6. A. Pesonen, J. Kattelus e P. Alatalo - Earth Potencial rise and Telecomunication Lines.
A. Pesonen, J. Kattelus e P. Alatalo Cigré nº 36-04.

7. IEEE Transation on power Apparatus and Systems - The isolation concept for protection of wire Line facilities Enterine Electric power Stations. IEEE Transations on power Apparatus and Sistems, vol. Pas 95, nº 4, July/August 1976.

8. IEEE Transaction on power Apparatus and Systems - A guide for the Proctection of wire Line Comunications facili ties serving Electric power Stations. IEEE Transations on power Apparatus and Systems, vol. Pas 85, nº 10 October, 1966.

9. Electrical Transmission and Distribution Reference Book - Electrical Transmission and Distribution reference Book. Edited by central Station Engineers of the Westinghouse Corporation.

10. VDE - VDE (Verein Deutscher Elektrotec- hiker) Publications nº 0228/ 4.6516. Juli 1975.

11. VDE - VDE (Verein Deutscher Elektrotec- hiker) nº 0816.

12. AIEE Committe e Report - Protection of Pilot - wire Relay Circuits
AIEE Committe e Report - June 1959 (Ripeinted from 58-1190) 59-6.

13. E.J. Bonnesen - The Application of Neutralizing Transformers for rise Station Ground Protection.

14. Hendrickson, A.R. Capret - Drainage reator Protection of Pilot wire Circuits, December 1958.

15. By E.A. Baumgartner, Gulf States Utilitiesco - Transient Protection of Pilot wire Cables is Essential for reliable Operation.

16. M.A. Bostwick - Dependable Pilot - wire Relay Operation M.A. Bostwick - December 1953.

17. S.T. Sobral and H.J. Katzer - Ground Potencial Rise and Related Problems - S.T. Sobral and H.J. Katzer - CIGRÉ - 1978.

18. José Aurélio Moreno Leon - Sistemas de Aterramento - Érico do Brasil Comércio e Indústria Ltda 1978.

19. Clark, Edith - Circuits Analysis of a.c power Systems - vol. I e II.

20. Curi, Márcio Antonio - Notas de aula Curso de Proteção de Sistemas Elétricos - Curso Pós-Graduação - E.F.E.I - 1979

21. Philadelphia Electric Company - Peco - Network Fault Analysis Program Outubro/80