

TESE

836

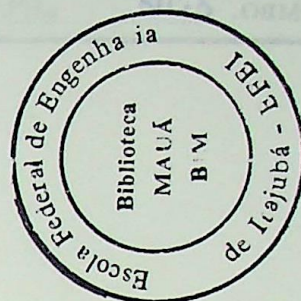
Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA  
NOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO - CONCEITUAÇÃO  
BÁSICA E ESTUDO DE UM CASO REAL**

**ANTONIO MARCIO LEMOS**

**ITAJUBÁ, FEVEREIRO DE 1996**

**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ - EFEI**



**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA  
NOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO - CONCEITUAÇÃO  
BÁSICA E ESTUDO DE UM CASO REAL**

**Autor: Antônio Márcio Lemos**

**Orientador: Manoel Eduardo Miranda Negrisoni, Dr. (EFEI)**

**Co-Orientador: Manuel Luis Barreira Martinez, MSC. (EFEI)**

Itajubá, fevereiro de 1996.

CLASS. 621.316.925(043.2)

CUTTI R. h555a

TOMBO. 836



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA  
EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO - CONCRETIZAÇÃO  
BASEADA EM ESTUDO DE UM CASO REAL

Autor: Antônio Márcio Lopes

Orientador: Marcelo Edson de Moraes Neto, MSc (ITA)  
Co-Orientador: Marcelo Luiz Faria de Moraes, MSc (ITA)

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA NOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO - CONCEITUAÇÃO BÁSICA E ESTUDO DE UM CASO REAL

Antônio Márcio Lemos

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.



Ministério da Educação e do Desporto  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ  
Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação "Análise da Influência da Interferência Eletromagnética nos Sistemas de Proteção - Conceituação Básica e Estudo de um Caso Real"

Autor: Antonio Márcio Lemos

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Resultado Médio: Conceito A, ou seja, aprovado

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 02 de Fevereiro de 1996.

Prof. José Carlos de Oliveira  
1º Examinador - UFU

Prof. Jamil Haddad  
2º Examinador - EFEI

Prof. Manuel Luis Barreira Martinez  
3º Examinador - EFEI

Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrizoli  
4º Examinador - EFEI - Orientador

## AGRADECIMENTOS

- A Deus, em primeiro lugar, por me dar a vida e a oportunidade de superar todos os momentos difíceis.
- Ao professor Dr. Nelson Eduardo Miranda Rogério, pela oportunidade e confiança depositadas.
- Ao professor Manoel Luis Batista Martins, pelas valiosas sugestões no desenvolvimento deste trabalho.
- A JP ELETRIC, representada por seu diretor engenheiro Ademir Carnevali Guimarães, por ter permitido o curso de pós-graduação com seu projeto de monitoramento, o que me permitiu desenvolver este trabalho integralmente de maneira profissional.
- Ao engenheiro e amigo Alexandre Moreira, pelas valiosas opiniões técnicas.
- A CFEI pela oportunidade.
- A todos aqueles que, de alguma forma colaboraram para o êxito deste trabalho.

À minha querida esposa Ozane  
e aos meus filhos, Bruno e  
Juliana pelo constante apoio.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pois sem Ele, seria impossível superar todos os momentos difíceis.

Ao professor Dr. Manuel Eduardo Miranda Negrisoli, pela oportunidade e confiança depositadas.

Ao professor Manoel Luis Barreira Martinez, pelas valiosas sugestões no desenvolvimento deste trabalho.

À JP ELETRIC, representada pelo seu diretor engenheiro Ademir Carnevalli Guimarães, por ter adotado o curso de pós-graduação como seu projeto de treinamento, o que me permitiu desenvolver este trabalho simultaneamente às atividades profissionais.

Ao engenheiro e amigo Armando Moreira, pelas valiosas opiniões técnicas.

A EFEI pela oportunidade.

A todos aqueles que, de qualquer forma colaboraram para o êxito deste trabalho.

## SIMBOLOGIA

- C - Capacitância parasita
- D - Distância entre partes condutoras
- Dm - Distância média entre condutores
- E - Campo elétrico
- f - Frequência
- FI - Fator de Impulso
- H - Campo magnético
- hg - Altura do condutor em relação a referência
- h - Ordem harmônica
- i - Corrente de descarga atmosférica
- $i_p$  - Valor de pico máximo da corrente
- I - Fonte de corrente impulsiva
- L - Indutância
- $L_b$  - Indutância da blindagem
- N - Número de registros
- $r_f$  - Resistência interna da fonte de tensão
- $r_c$  - Resistência de carga
- Ri - Resistência do varistor
- r - Raio do eletrodo
  - Raio do condutor
- R - Resistência de terra de um eletrodo
- $R_{BO}$  - Valor dc da espessura da blindagem
- S-10 - Taxa de crescimento média ( $di/dt$  expresso para o intervalo entre 10% e 90% do valor de pico da corrente)
- S-30 - Taxa de crescimento média ( $di/dt$  expresso para o intervalo entre 30% e 90% do valor de pico da corrente)
- ts - tempo de subida da frente de onda
- td - duração da descarga
- T-10 - duração da frente de onda (intervalo de tempo entre 10% e 90% do valor do pico da corrente)
- T-30 - duração da frente de onda (intervalo de tempo entre 30% e 90% do valor do pico da corrente)
- T - Constante de tempo

t - Espessura da blindagem do cabo

- Tempo

TAN-10 - Taxa de crescimento da frente de onda (tangente da frente de onda para o ponto referente a 10% da corrente de pico)

TAN-G - Taxa de crescimento máxima (di/dt máximo observado na frente de onda)

V<sub>f</sub> - Fonte de tensão

V<sub>i</sub> - Tensão interferente diferencial

V - Velocidade da luz

V<sub>EF</sub> - Tensão harmônica

V<sub>EFh</sub> - Valor eficaz da componente harmônica de ordem h

V<sub>sat</sub> - Tensão de saturação

V<sub>p</sub> - Máximo valor de tensão suportável de impulso

X - Distância da fonte interferente

X<sub>i</sub> - Reatância de magnetização

Z<sub>i</sub> - Impedância de aterramento de uma malha de terra

Z<sub>ij</sub> - Impedância mútua entre malhas de terra

Z<sub>o</sub> - Impedância de surto

Z<sub>B</sub> - Impedância da blindagem de cabo

α<sub>i</sub> - Constante de tempo

Φ - Fluxo de magnetização

λ - Comprimento de onda

μ - permeabilidade do meio

ρ - Resistividade do solo

σ - Condutividade

ω - Velocidade

Ψ<sub>sat</sub> - Fluxo de saturação

## RESUMO

Descargas atmosféricas diretas ou surtos atmosféricos induzidos são geralmente as principais causas de danos e/ou mau funcionamento dos equipamentos inseridos nos sistemas elétricos. Dentre eles podem-se destacar os relés de proteção, cuja operação indevida pode causar inúmeros transtornos e consequentes prejuízos.

É assustadora a constatação de que, em nosso país, problemas desta natureza sejam facilmente passíveis de ocorrer, pois recomendações ou critérios básicos são ainda simplesmente ignorados.

Atualmente, sendo a qualidade de energia um assunto destacado no contexto da engenharia elétrica, espera-se um aumento na preocupação com o controle de interferências eletromagnéticas.

Este trabalho visa mostrar, com base em interpretações físicas simples dos fenômenos eletromagnéticos aplicados a um caso real, os efeitos nocivos das tensões interferentes nos sistemas de proteção, bem como apresentar algumas técnicas para o controle de interferência eletromagnética (EMI).



# SUMÁRIO

		Pág.
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>1</b>
1.1	Aspectos Gerais	1
1.2	O Estado da Arte	1
1.3	A Motivação e a Estrutura da Dissertação	2
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>EFEITOS PRODUZIDOS PELAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>3</b>
2.1	Introdução	3
2.2	Distribuição de Potenciais	3
2.3	Características das Descargas Atmosféricas	5
2.4	Principais Parâmetros de Descargas Atmosféricas Aplicáveis a Estudos de Engenharia	9
2.5	Geração de Campos Elétricos e Magnéticos	13
2.6	Os efeitos sobre os Equipamentos	13
2.7	Conclusões	22
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>FORMAS DE REDUÇÃO DOS PROBLEMAS RELACIONADOS COM TENSÕES INTERFERENTES</b>	<b>23</b>
3.1	Introdução	23
3.2	Modos de Acoplamento	23
3.3	Critérios de Instalação	26
3.4	Conclusões	41
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>O PROBLEMA VIVIDO POR UMA GRANDE EMPRESA</b>	<b>42</b>
4.1	Introdução	42
4.2	Relato das Ocorrências	42
4.3	Testes Executados	43
4.4	Análise do Comportamento do Sistema Diferencial no Estado de Regime Permanente	46
4.5	Análise do Comportamento do Sistema Diferencial em Regime Transitório	49
4.6	Casos Processados	71
4.7	Análise dos Resultados dos Processamentos para o Regime Transitório	77
4.8	Conclusões	80
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS</b>	<b>103</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>BIBLIOGRÁFICAS</b>	
	<b>APÊNDICE 1</b>	
	O RELÉ KAB - Princípio de Operação	
	<b>APÊNDICE 2</b>	
	BANCO DE DADOS BÁSICO	

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO GERAL

#### 1.1 Aspectos Gerais

A qualidade do fornecimento de energia elétrica é comprometida, sempre que há interrupção do suprimento da energia elétrica.

A situação agrava-se à medida que tais interrupções sejam decorrentes de uma operação errática de determinados componentes que compõem o sistema elétrico, cuja confiabilidade deveria ser mantida a qualquer custo. A operação indevida de um relé de proteção, dependendo de sua função e localização, pode levar a um colapso no fornecimento da energia elétrica.

Dentre os motivos que podem causar a operação indevida de um relé, destacam-se aqueles relacionados com problemas de interferências eletromagnéticas (EMI). De um modo geral, todos os assuntos relacionados com fenômenos eletromagnéticos, transitórios, proteção contra surtos ou aterramento são tratados com certa aura de mistério. Em nosso país, contamos ainda com a dificuldade básica e séria de obtenção de literatura ou melhores informações relativas a tais assuntos, por se tratar de níveis de conhecimento muito especializados. Disso, resultam lacunas na formação profissional de nossos técnicos, as quais se tomam perceptíveis através da grande quantidade de problemas de difícil solução com que se deparam no dia a dia.

O trabalho proposto objetiva chamar a atenção dos projetistas para os problemas de EMI, quando da concepção de alguns esquemas de proteção. É necessário que, durante a fase de projeto, um mínimo de critérios básicos de controle da EMI seja adotado, principalmente em instalações onde fontes interferentes significativas poderão estar presentes.

#### 1.2 O Estado da Arte

Ao contrário de em outros países em que já se vêm desenvolvendo, desde a década de 60, análises de compatibilidade magnética, com vários trabalhos já publicados no IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, no Brasil estas análises iniciaram apenas em 1985, tendo sido publicados uns poucos trabalhos, por exemplo, os primeiros contidos nos anais do II Simpósio Franco-Brasileiro sobre Cálculo de Campos Elétricos e Magnéticos [1] realizado em 1989 e, mais recentemente, aqueles do compêndio de trabalhos do VI Encontro Regional Latino-Americano da CIGRÉ [2].

Em nosso país, a preocupação com o controle da interferência eletromagnética tem aumentado, entre outras razões, pela disseminação da automação, que exige sistemas elétricos confiáveis e imunes a EMI.

Enquanto nos países desenvolvidos os equipamentos já atendem às especificações normalizadas (FCC - Federal Communications Commission, CISPR - International Special Committee on Radio Interference, VDE - Verband Deutscher Elektrotechniker) no Brasil está se iniciando um processo de conscientização da indústria nacional para a execução dos testes de EMI/EMC.

O LIT/Inpe - Laboratório de Integração e Testes do Instituto Nacional de Pesquisas Especiais, em São José dos Campos, já possui a infra-estrutura necessária para a realização de alguns testes EMI/EMC, que são: suscetibilidade irradiada, emissão irradiada e conduzida e suscetibilidade conduzida. Conforme [3], ainda faltam ao LIT os equipamentos para testes de suscetibilidade a transientes elétricos de curta duração e alta tensão, nestes últimos enquadram-se as induções eletromagnéticas devido a surtos atmosféricos.

Estes testes estão sendo aplicados nos relés digitalizados de última geração e são executados conforme normas IEC 255-6/VDE 0435 - testes de tensão interferente de alta frequência, 2.5 kV, 1 MHz e IEC 255-5 - testes de Impulso de tensão - 5 kV, 1.2/50 $\mu$ s, 10.5 J.

Quanto aos métodos para cálculos computacionais das tensões interferentes, em pontos próximos às fontes impulsivas, podem ser destacados o dos momentos utilizados por Condetina em [4], e o já bastante conhecido método dos elementos finitos [5] muito utilizado nas análises de campos eletromagnéticos, conforme se pode observar nos trabalhos em [1].

Com respeito aos "Softwares" disponíveis, o nível dos trabalhos apresentados em [1] indica um enorme avanço nacional na tecnologia dos "softwares" para cálculos de campos eletromagnéticos e se prevê que, dentro de poucos anos, tenhamos disponíveis no Brasil, pacotes computacionais nacionais que utilizam tecnologia C.A.D, com desempenho equivalente aos "softwares" dos centros mais avançados.

### 1.3 A Motivação e a Estrutura da Dissertação

Os desafios para solução de problemas que requerem uma avaliação dos níveis da EMI, de difícil tratamento matemático, aliados a experiência vivida por este profissional, em uma siderúrgica de grande porte, foram decisivos para motivar este trabalho, que se apresenta desenvolvido de acordo com a seguinte estrutura:

- Capítulo II - Neste capítulo, apresenta-se toda uma conceituação básica para mostrar os problemas decorrentes de indução de tensões transitórias interferentes.
- Capítulo III - Neste capítulo, apresentam-se alguns critérios de instalação, com vistas a reduzir e/ou eliminar problemas relacionados com tensões interferentes.
- Capítulo IV - Este capítulo está voltado aos efeitos das tensões induzidas sobre os equipamentos e apresenta um problema vivido por uma grande empresa devido à indução de tensões interferentes em um sistema de proteção diferencial de barra. Para tanto, será utilizada para a análise, uma modelagem do sistema de proteção, na qual o fenômeno de indução elétrica estará relacionado apenas com diferenças de potencial elétrico entre partes condutoras. Como ferramenta computacional, será utilizado o programa Microtran para cálculos de transitórios eletromagnéticos.
- Capítulo V - Finalmente, apresentam-se as principais constatações e conclusões desta dissertação, bem como sugestões para futuras pesquisas.

## CAPÍTULO II

### EFEITOS PRODUZIDOS PELAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

#### 2.1 Introdução

A descarga atmosférica captada por um sistema de proteção em um prédio de controle de uma planta industrial, pode produzir vários efeitos, tais como: tensões transitórias induzidas nos cabos alimentadores, de medição, proteção e controle e nos componentes dos equipamentos elétricos instalados dentro do prédio, bem como tensões transitórias entre os condutores de descida e chapas metálicas, sempre caracterizadas por altos valores de picos.

Os equipamentos instalados em outros prédios também podem ser afetados desde que, entre eles exista um acoplamento que permita a transferência da corrente impulsiva. Nas plantas industriais este acoplamento normalmente é constituído pelas blindagens dos cabos de força e/ou controle, as quais, por vezes, estão aterradas nas duas extremidades.

A seguir, serão analisados, de forma sucinta, os principais efeitos decorrentes da incidência de descargas atmosféricas em um sistema de proteção predial típico. Os conceitos apresentados estão baseados no trabalho apresentado por Serqueira [6].

#### 2.2 Distribuição de Potenciais

A figura 1 ilustra, de modo simplificado, as principais partes de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

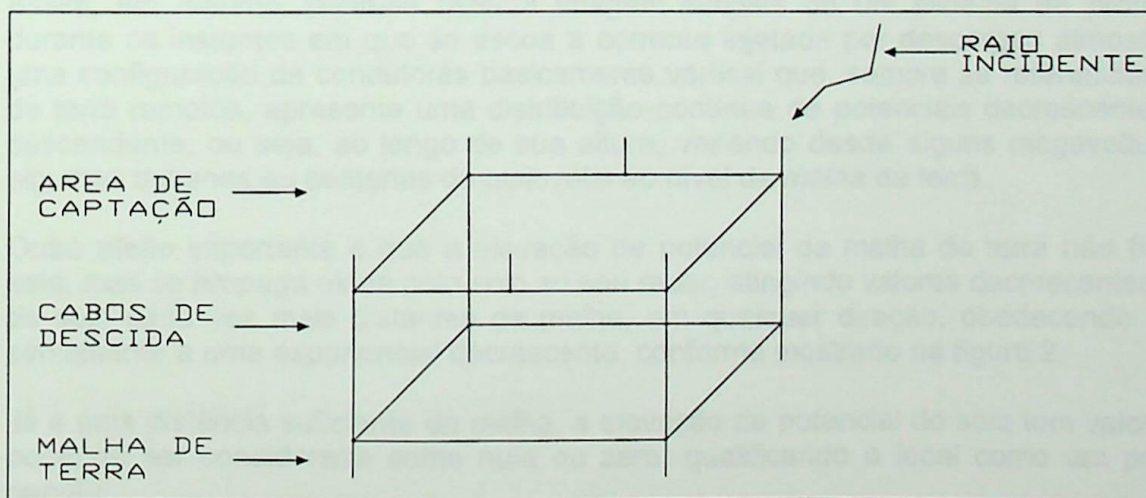


Fig.1 - Sistema de Proteção Predial

Em termos elétricos, o raio tem o comportamento de uma fonte de corrente. Isso significa que, ao incidir no topo de um sistema de proteção predial, ou seja, na ponta dos elementos captadores, o raio injeta uma quantidade de carga elétrica, a uma certa velocidade, através de uma determinada impedância para o solo, impedância esta formada por um amplo conjunto de elementos componentes, tais como:

- resistência e reatância indutiva dos captosres, dos cabos de interligação de topo e dos cabos de descida;
- resistência de aterramento da malha de terra ou do sistema de eletrodos de terra utilizado;
- reatância indutiva dos cabos da malha de terra, dos eletrodos de terra, etc.;
- reatâncias capacitivas de todas as partes metálicas energizadas pelo raio, ditadas pela configuração geométrica do sistema de proteção como um todo.

Como a descarga se comporta essencialmente como fonte de corrente, o potencial que a ponta do elemento captor atingido adquire, relativo a qualquer ponto do solo suficientemente afastado do sistema de proteção para que não sofra influência significativa (potencial de terra remoto), é determinado basicamente pelo produto da corrente injetada pelo raio e a impedância para terra oferecida pelo sistema de proteção (impedância de surto).

A rigor, essa impedância não se mantém constante ao longo do tempo de duração da descarga, devido a vários fatores, tais como: não linearidade das características elétricas do solo, efeitos de reflexão de onda ao longo do sistema de proteção, etc.

Frente aos valores usuais de impedância de surto resultantes nas instalações e a magnitude das correntes normalmente injetadas pelas descargas atmosféricas, chega-se, facilmente, à ordem de grandeza de megavolts, para as elevações de potencial elétrico atingidas nas partes mais altas dos sistemas de proteção, referidas a pontos de terra remotos.

Observa-se que a impedância do sistema de proteção não é concentrada, mas na verdade distribuída ao longo de todas suas diversas partes. Como a corrente do raio, injetada no topo do sistema de proteção, busca sua dissipação final através do escoamento para o solo, tem que percorrer em direção basicamente vertical todos os caminhos disponíveis para isso. Nesses percursos verticais, atravessando as impedâncias distribuídas do sistema, desenvolve diferenças de potencial ao longo deles.

Em sentido descendente, pode ser considerada como última parte componente da impedância total do sistema de proteção, a impedância da malha de terra, ou também chamada, impedância de aterramento. Em função dos valores usuais desta impedância e das correntes comumente injetadas pelos raios, podem resultar elevações de potencial da malha de terra da ordem de dezenas e até de centenas de quilovolts, em relação a pontos de terra remotos.

Assim, em resumo, pode-se fazer a imagem simples de um sistema de proteção predial, durante os instantes em que se escoam a corrente injetada por descargas atmosféricas, como uma configuração de condutores basicamente vertical que, sempre se referenciando a pontos de terra remotos, apresenta uma distribuição contínua de potenciais decrescentes no sentido descendente, ou seja, ao longo de sua altura, variando desde alguns megavolts no topo até algumas dezenas ou centenas de quilovolts ao nível da malha de terra.

Outro efeito importante é que a elevação de potencial da malha de terra não fica limitada a esta, mas se propaga ainda pelo solo ao seu redor, atingindo valores decrescentes para pontos do solo cada vez mais distantes da malha, em qualquer direção, obedecendo a uma curva semelhante a uma exponencial decrescente, conforme mostrado na figura 2.

Já a uma distância suficiente da malha, a elevação de potencial do solo tem valor desprezível, podendo ser considerada como nula ou zero, qualificando o local como um ponto de terra remoto.

Portanto, durante o escoamento das correntes das descargas atmosféricas, não somente os elementos aéreos que compõem o sistema de proteção, mas também os que constituem a malha de terra e até mesmo as partes do solo mais próximas e circunjacentes a esta tornam-se não equipotenciais.

Todas essas elevações ou diferenças de potencial descritas são fatores da máxima importância para qualquer instalação que abrigue equipamentos sensíveis.

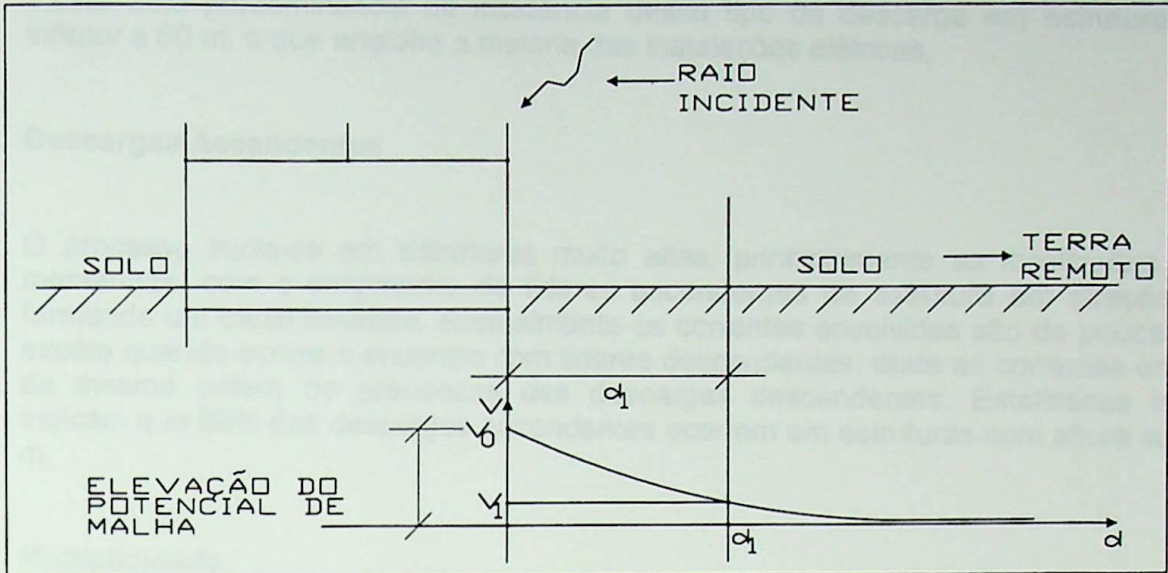


Fig.2 - Elevação do Potencial de Malha

### 3 Características das Descargas Atmosféricas

Na figura 3 é apresentada uma classificação básica para os tipos de descargas atmosféricas diferenciadas em função da polaridade das cargas elétricas das nuvens e direção de propagação do canal ionizado (leader).

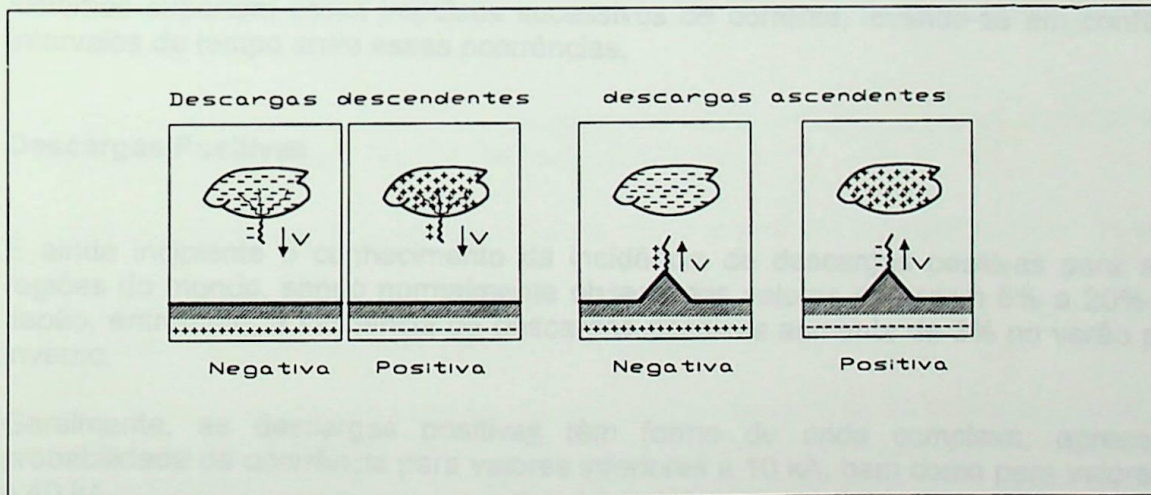


Fig.3 - Principais tipos de Descargas Atmosféricas

#### 3.1 Descargas Descendentes

Em face do elevado campo elétrico na base da nuvem, o processo inicia-se com o surgimento de um canal ionizado ("stepped leader"), que se ramifica em direção à terra. Com o desenvolvimento do líder descendente, o campo elétrico da superfície da terra aumenta gradativamente, propiciando o surgimento de líderes ascendentes no solo, principalmente se existirem objetos salientes.

Quando o líder descendente encontra um líder ascendente ou, na ausência deste, o solo, inicia-se o processo de neutralização das cargas elétricas através de um intenso impulso de corrente que percorre o canal aberto entre a nuvem e a terra.

Existe uma predominância de incidência desse tipo de descarga em estruturas com altura inferior a 60 m, o que engloba a maioria das instalações elétricas.

### 2.3.2 Descargas Ascendentes

O processo inicia-se em estruturas muito altas, principalmente as localizadas em topo de montanhas, com o surgimento de líderes ascendentes da estrutura em direção às nuvens, formando um canal ionizado. Normalmente as correntes envolvidas são de pouca intensidade, exceto quando ocorre o encontro com líderes descendentes, onde as correntes envolvidas são de mesma ordem de grandezas das descargas descendentes. Estatísticas internacionais indicam que 95% das descargas ascendentes ocorrem em estruturas com altura superior a 400 m.

### 2.3.3 Multiplicidade

É de conhecimento geral que as descargas descendentes negativas e as ascendentes negativas frequentemente ocorrem com uma repetição do processo inicial, isto é, o primeiro impulso de corrente ("first stroke") é seguido de impulsos sucessivos (subsequent "strokes"), na maioria das vezes utilizando o mesmo canal do primeiro impulso de corrente. A literatura sobre o assunto reporta que, em média, 45% das descargas ocorrem com um único impulso ("stroke"), variando de 76% (Suíça) a 13% (África do Sul), sendo que as descargas múltiplas apresentam uma média de três impulsos por descargas [7].

No dimensionamento das proteções contra descargas atmosféricas, é aconselhável que os sistemas suportem esses impulsos sucessivos de corrente, levando-se em conta também os intervalos de tempo entre essas ocorrências.

### 2.3.4 Descargas Positivas

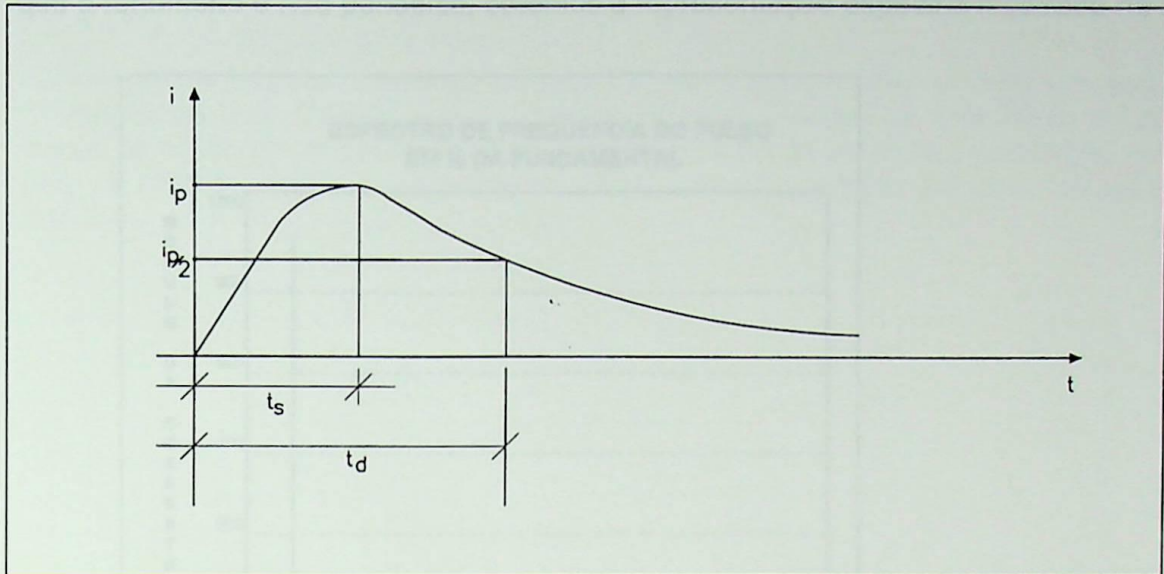
É ainda incipiente o conhecimento da incidência de descargas positivas para as diferentes regiões do mundo, sendo normalmente observados valores da ordem 5% a 20% do total. No Japão, entretanto, a incidência de descargas positivas aumenta de 3% no verão para 76% no inverno.

Geralmente, as descargas positivas têm forma de onda complexa, apresentando alta probabilidade de ocorrência para valores inferiores a 10 kA, bem como para valores superiores a 40 kA.

## 3.5 A Corrente de Descarga

Serão analisados, agora, alguns aspectos que permitem caracterizar razoavelmente a própria corrente injetada pela descarga atmosférica.

É usual considerar essa corrente variando no tempo, de forma simplificada, conforme a representação da figura 4.



**Fig.4 - Representação da Corrente de Descarga**

Nesta representação, a corrente  $i$  é medida em unidades ou dezenas de quiloampères e a escala de tempo é dada em microsegundos.

Ao tempo  $t_s$ , da ordem de alguns microsegundos, dá-se o nome de tempo de subida da frente de onda e ao tempo  $t_d$ , de algumas dezenas ou centenas de microsegundos, chama-se de duração da descarga.

Na realidade, a forma exata do pulso da corrente injetada por uma descarga atmosférica pode variar consideravelmente e na verdade nunca obedece exatamente a uma curva tão "didática", conforme será mostrado no item 2.4.

Entretanto, apesar das limitações da representação adotada, o pulso idealizado expressa as principais características dos pulsos reais, quais sejam:

- crescimento inicial da corrente de forma muito rápida até um valor máximo de pico  $i_p$ ;
- decréscimo gradual e relativamente mais lento da corrente até valores residuais desprezíveis, na ordem de 100 a 200 A [8].

A esse comportamento da corrente dá-se usualmente o nome de corrente impulsiva, em alusão remota à função Delta de Dirac, utilizada frequentemente nos estudos de teoria de circuitos para representar "impulsos", ou seja, um tipo idealizado de função que transfere uma certa quantidade de energia para um circuito em um tempo muito curto, idealmente zero.

Um fator de extrema importância quanto aos efeitos originados é o da ordem de grandeza do valor de pico das correntes injetadas pelas descargas atmosféricas, que pode variar desde algumas unidades até centenas de quiloampères.

Outro aspecto importante diz respeito à variação da corrente de descarga, no tempo.

Como os tempos do fenômeno são muito curtos e a variação das intensidades de corrente muito ampla, obtêm-se relações  $di/dt$  extremamente elevadas, o que traz sérias consequências, do ponto de vista dos efeitos indutivos provocados pelas correntes do raio, conforme será visto mais adiante.

Essas variações no tempo podem ser estudadas também sob outra forma, isto é, no domínio da frequência.

Aplicando-se a técnica da transformada de Fourier ao pulso idealizado de corrente de raio, já que o fenômeno é não periódico, obtemos a representação espectral mostrada na figura 5.

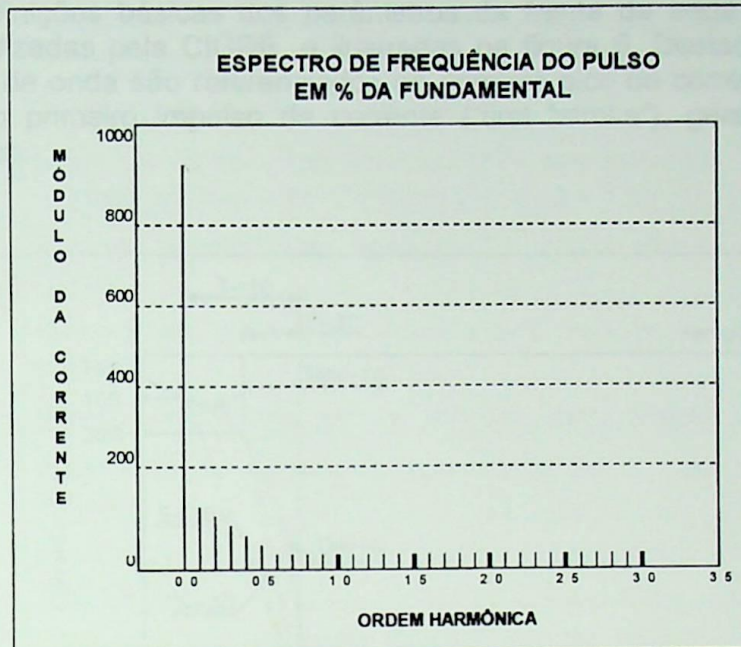


Fig.5 - Representação Espectral do Pulso de Corrente

Da observação da figura 5, pode-se concluir:

- A maior contribuição espectral se dá para a frequência zero ou corrente contínua e seu entorno. Logo, conclui-se que a maior parte da energia dos pulsos das descargas atmosféricas se concentra nas frequências mais baixas;
- Apesar de a figura mostrar até a 30ª ordem, a distribuição de frequência é contínua e, teoricamente, estende-se até frequências de valor infinito, com níveis de intensidade relativa decrescentes, o que é uma característica geral para qualquer tipo de pulso tratado pela transformada de Fourier.

Isso explica a grande potencialidade de interferência eletromagnética das elevadas correntes impulsivas do raio, que, mesmo na faixa já de algumas centenas de megahertz, ainda apresentam energia suficiente para ser detectada por equipamentos sensíveis como, por exemplo, receptores de telecomunicações.

Para essas frequências elevadas, os comprimentos dos canais de ar ionizado dos raios na atmosfera, ou dos próprios cabos e elementos do sistema de proteção, são suficientemente grandes em relação aos comprimentos de onda envolvidos, para atuarem como elementos irradiantes ou antenas de razoável eficiência, propagando a perturbação eletromagnética do raio, sob a forma de ondas planas, até distâncias da ordem de dezenas de quilômetros.



## 2.4 Principais Parâmetros de Descargas Atmosféricas Aplicáveis a Estudo de Engenharia

### 2.4.1 Definição dos Parâmetros de Frente de Onda

As definições básicas dos parâmetros da frente da onda são descritas a seguir, conforme normalizadas pela CIGRÉ, e ilustradas na figura 6. Destaca-se que todos os parâmetros da frente de onda são referenciados ao primeiro pico de corrente das descargas negativas, que, para o primeiro impulso de corrente ("first stroke"), geralmente não corresponde ao pico máximo.

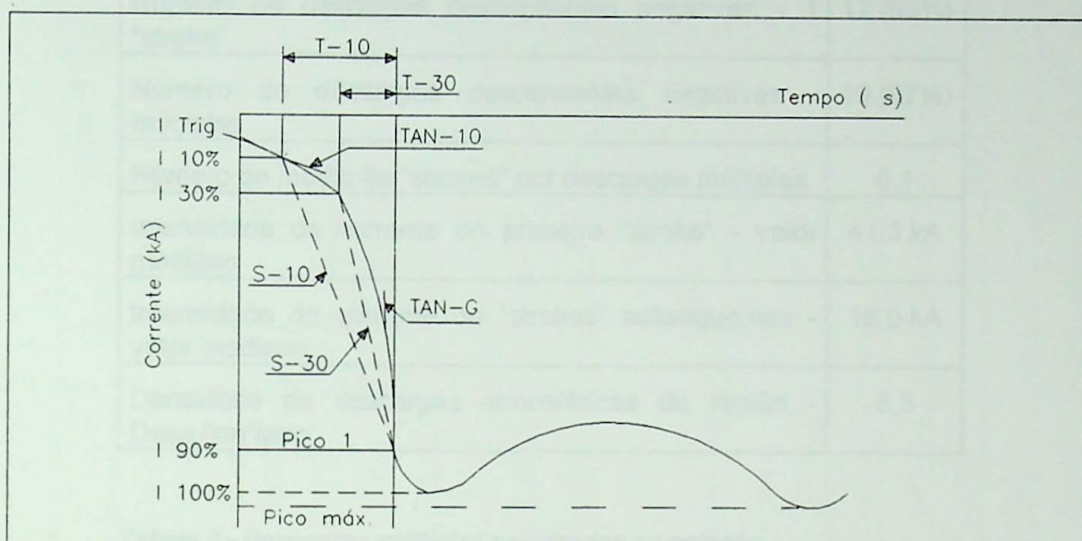


Fig.6 - Definição de Parâmetros da Frente de Onda

T-10: duração da frente da onda (intervalo de tempo entre 10% e 90% do valor do pico da corrente);

T-30: Duração da frente da onda (intervalo de tempo entre 30% e 90% do valor do pico da corrente);

TAN-10: Taxa de crescimento (tangente da frente de onda para o ponto referente a 10% da corrente de pico). Esse parâmetro foi introduzido com o objetivo de fornecer o valor da taxa de crescimento inicial ao qual os equipamentos (pára-raios) estão submetidos;

S-10: Taxa de crescimento média ( $di/dt$  expresso para o intervalo entre 10% e 90% do valor de pico da corrente);

S-30: Taxa de crescimento média ( $di/dt$  expresso para o intervalo entre 30% e 90% do valor de pico da corrente);

TAN-G: Taxa de crescimento máxima ( $di/dt$  máximo observado na frente de onda). É importante destacar que podem ser grandes os erros na determinação desse parâmetro. Dados publicados por Berger em 1975 (formas de onda traçadas manualmente) foram reprocessados pela CIGRÉ, utilizando as mesmas formas de onda digitalizadas por computador, apresentando, para o primeiro "stroke", valores de  $di/dt$  máximo duas vezes superiores àqueles anteriormente determinados.

A seguir, apresentam-se as tabelas I e II com os parâmetros das descargas atmosféricas obtidas pela CEMIG em recente pesquisa realizada na estação do Morro do Cachimbo, a 15 km de Belo Horizonte [9].

**Tabela 1 - Resumo dos Registros de descargas atmosféricas na Estação do Cachimbo**

Número total de descargas atmosféricas registradas	63
Número médio de descargas por ano	7
Descargas descendentes - confirmadas (registros fotográficos ou forma de onda)	27 (43%)
Incidência de descargas negativas	46 (73%)
Incidência de descargas positivas (82% das descargas positivas apresentaram correntes inferiores a 5 kA)	17 (27%)
Número de descargas descendentes negativas - 1 "stroke"	17 (63%)
Número de descargas descendentes negativas - múltiplas	10 (37%)
Número de médio de "strokes" por descargas múltiplas	6,1
Intensidade de corrente do primeiro "stroke" - valor mediano	41,3 kA
Intensidade de corrente de "strokes" subsequentes - valor mediano	16,0 kA
Densidade de descargas atmosféricas da região - Desc./km <sup>2</sup> /ano	5,5

**Tabela II - Descargas múltiplas registradas na estação**

DATA	Nº DE "STROKES"	TEMPO MÉDIO ENTRE "STROKES" (ms)	DURAÇÃO (ms)
14/02/89	3	56	117
11/10/90	3	67	134
17/03/92	14	70	911
17/03/92	3	41	83
10/03/93	3	56	114
10/03/93	5	64	255
28/12/93	9	*	*
20/01/94	9	*	*
20/01/94	7	*	*
20/01/94	5	*	*
Média	6,1	59	269

(\*) Defeito no equipamento de medir tempo entre "strokes"

Os resultados publicados em [9], além de ampliar o conhecimento sobre o comportamento dos raios no Hemisfério Sul, vêm contribuir com a tese de alguns pesquisadores de que as intensidades das descargas atmosféricas são mais elevadas em regiões tropicais.

Nas tabelas de III a VI, são feitas comparações dos resultados da CEMIG com aqueles obtidos em pesquisas semelhantes realizadas em outros continentes.

Tabela III - Resumo dos parâmetros relacionados com a frente da onda - Descargas atmosféricas descendentes negativas.

Dados - Cigré grupo 33 (Electra n° 69)										Dados da Cemig				
Parâmetros de frente de onda (ver fig. 6)	N	Unidades	Aproximação pela distribuição log normal		Percentagem de casos que excedem os valores tabelados			Parâmetros de frente de onda (ver fig.6)	N	Unidades	Aproximação pela distribuição log normal		Percentagem de casos que excedem os valores tabelados	
			$\mu$	$\sigma$ log	95%	50%	5%				$\mu$	$\sigma$ log	95%	50%
Primeiro "Stroke"							Primeiro "Stroke"							
T-10	80	$\mu$ S	4,5	0,25	1,8	4,5	11,3	23	$\mu$ S	5,6	0,15	3,2	5,6	9,9
T-30	80	$\mu$ S	2,3	0,24	0,9	2,3	5,8	23	$\mu$ S	3,0	0,17	1,6	3,0	5,7
TAN-10	75	kA/ $\mu$ S	2,6	0,40	0,6	2,6	11,8	23	kA/ $\mu$ S	3,3	0,22	1,4	3,3	7,6
S-10	75	kA/ $\mu$ S	5,0	0,28	1,7	5,0	14,1	23	kA/ $\mu$ S	5,6	0,14	3,3	5,6	9,5
S-30	73	kA/ $\mu$ S	7,2	0,27	2,6	7,2	20,0	23	kA/ $\mu$ S	8,0	0,13	4,9	8,0	13,1
TAN-G	75	kA/ $\mu$ S	24,3	0,26	9,1	24,3	65,0	23	kA/ $\mu$ S	17,3	0,10	11,8	17,3	25,2
Pico	80	kA	31,1	0,21	14,1	31,1	68,5	27	kA	41,3	0,22	17,9	41,3	94,8
"Strokes" Subsequentes							"Strokes" Subsequentes							
T-10	114	$\mu$ S	0,6	0,40	0,1	0,6	2,8	49	$\mu$ S	0,7	0,30	0,2	0,7	2,2
T-30	114	$\mu$ S	0,4	0,44	0,1	0,4	1,8	49	$\mu$ S	0,4	0,29	0,1	0,4	1,2
TAN-10	108	kA/ $\mu$ S	18,9	0,61	1,9	18,9	187,4	49	kA/ $\mu$ S	14,5	0,40	3,2	14,4	65,7
S-10	114	kA/ $\mu$ S	15,4	0,41	3,3	15,4	72,0	49	kA/ $\mu$ S	18,6	0,30	6,0	18,5	57,8
S-30	114	kA/ $\mu$ S	20,1	0,42	4,1	20,1	98,5	49	kA/ $\mu$ S	23,4	0,29	7,8	23,0	70,0
TAN-G	113	kA/ $\mu$ S	39,9	0,37	9,9	39,9	161,5	49	kA/ $\mu$ S	27,5	0,28	9,5	27,4	79,2
Pico	114	kA	12,3	0,23	5,2	12,3	29,2	50	kA	16,0	0,23	6,7	16,0	38,1

N - Número de registros

Os resultados apresentados referem-se somente às descargas negativas que são as que frequentemente, atingem o sistema elétrico.

Deve-se ressaltar, na tabela III, a existência de um relacionamento entre a intensidade da corrente e o tempo para alcançar o valor máximo. A possibilidade de ocorrência de correntes de alta intensidade com tempos T-10 muito reduzidos é muito baixa, como também o é a possibilidade de ocorrência de correntes de pequena intensidade com tempos T-10 elevados.

Com relação à intensidade de corrente, verifica-se que, nos dados da CEMIG, tabela III, o valor da mediana ajustada do primeiro "stroke" (41,3 kA) e "strokes" subsequentes (16 kA) apresenta-se, respectivamente cerca de 21% e 20% superior aos valores de referência publicados pela CIGRÉ [7] (34 kA para primeiro "stroke" e 12,3 kA para "stroke" subsequentes).

As tabelas IV e V apresentam valores de tempos médios entre "strokes" das descargas múltiplas, bem como o tempo de duração das descargas incidentes no Cachimbo, obtidas através do ajuste log-normal e, a título de comparação, valores publicados pela CIGRÉ.

**Tabela IV - Intervalo médio entre descargas subsequentes (ms)**

FONTE	PORCENTAGEM DE CASOS EM QUE O VALOR TABELADO É EXCEDIDO		
	95%	50%	5%
CIGRÉ	6	35	200
CEMIG	19	54	150

**Tabela V - Duração média das descargas múltiplas (ms)**

FONTE	PORCENTAGEM DE CASOS EM QUE O VALOR TABELADO É EXCEDIDO		
	95%	50%	5%
CIGRÉ	64	200	620
CEMIG	43	180	753

A tabela VI apresenta valores de tempos de meia cauda para o primeiro "stroke" e "strokes" subsequentes para as descargas registradas na Estação do Cachimbo. A título de comparação são apresentados valores publicados por Berger [10].

**Tabela VI - Tempos de meia-cauda ( $\mu$ s)**

FONTE		PORCENTAGEM DE CASOS EM QUE O VALOR TABELADO É EXCEDIDO		
		95%	50%	5%
BERGER	1° "STROKE"	30	75	200
	"STROKES" SUBSEQUENTES	6,5	32	140
CEMIG	1° "STROKE"	27	62	142
	"STROKES" SUBSEQUENTES	2,4	19	145

## 2.5 Geração de Campos Elétricos e Magnéticos

Em termos eletromagnéticos, as descargas atmosféricas são apenas um dos numerosos tipos de agente interferente existentes.

Entretanto, os transitórios causados pelos fenômenos atmosféricos, introduzidos nos circuitos das diversas maneiras, destacam-se em importância daqueles de outras origens pelas seguintes características:

- grande rapidez de variação no domínio do tempo, o que representa um elevado conteúdo harmônico ou uma ampla faixa de frequências interferentes, como já foi descrito;
- duração total relativamente pequena;
- não periodicidade, com recorrência muito espaçada no tempo;
- intensidade extremamente elevada.

Esta última característica confere, aos transitórios de origem atmosférica, uma capacidade, em geral muito superior àquela encontrada na maioria dos outros tipos de transitórios, de provocar a queima ou o mau funcionamento dos equipamentos.

Já a característica de baixa taxa de recorrência no tempo, que poderia ser também chamada de relativa raridade de ocorrência, faz com que muitas vezes a magnitude do risco de danos a que os equipamentos estão expostos seja menosprezada ou sub-avaliada, principalmente frente aos custos de implementação de medidas de proteção.

A consequência disso é evidente: tudo funciona bem até o exato momento em que ocorra o fenômeno atmosférico próximo, causando geralmente danos maciços e extensos nos componentes dos sistemas. Isso em geral não acontece com outros tipos de fenômenos transitórios, pois, por serem muito mais frequentes e de menor amplitude, têm o efeito de provocar apenas o mau funcionamento mais ou menos regular dos equipamentos, sendo por isso mais facilmente detectados, identificados e, em consequência, logo tratados.

Em outras palavras, pode-se dizer que o fato de nunca ter ocorrido nenhum dano a um equipamento, causado por fenômeno de descarga atmosférica em geral, por si só, não dá garantia suficiente de que a instalação tenha sido construída de modo adequado.

Pelas leis da física, pode-se concluir que o escoamento das correntes impulsivas dos raios, através de um sistema de proteção, confere aos mesmos a capacidade de atuarem como fontes de campos elétricos e magnéticos intensos, ambos variável no tempo.

Como já citado anteriormente, para as componentes de frequências mais elevadas do espectro do pulso do raio, as dimensões do sistema de proteção já serão suficientes para que os seus elementos constituintes se comportem como antenas irradiantes razoavelmente eficientes.

A exposição a seguir será limitada às situações pertinentes ao "campo próximo", ou seja, àquelas em que as distâncias, em relação ao sistema de escoamento, são pequenas, caracterizando assim o fenômeno eletromagnético como de simples indução.

## 2.6 Os Efeitos sobre os Equipamentos

Neste item, será analisado como os equipamentos podem vir a ser afetados pela incidência de raios nos sistemas de proteção.

Existem, basicamente, duas classes ou categorias de interferência eletromagnética, as quais podem ser denominadas.

- interferência induzida (abrange também a forma irradiada);
- interferência conduzida.

Como expresso no próprio nome, a interferência induzida é aquela introduzida nos equipamentos por meio de fenômenos de indução elétrica e magnética direta em fios, cabos, circuitos, etc, ou seja, sem contato direto entre as partes interferente e interferida.

Já a interferência conduzida é aquela introduzida nos equipamentos a partir de pontos geralmente afastados, sob a forma de sinais levados através de seus cabos de ligação externa, sejam cabos de alimentação, de sinal, de controle, de aterramento ou quaisquer outros.

As descargas atmosféricas geram ambos os tipos de interferência e, dada a grande quantidade de energia envolvida no processo, é comum que os sinais interferentes que venham a causar perturbação em um dado equipamento sejam o resultado final de uma série alternada dos dois tipos citados de interferência.

Assim, por exemplo, as redes de distribuição de energia de rua podem sofrer induções severas de descargas atmosféricas. A partir daí, os sinais interferentes induzidos serão conduzidos pelos cabos do sistema de distribuição e, dada sua elevada intensidade, poderão causar novas induções em outros cabos próximos, de outras finalidades, que passarão então a conduzir a interferência e assim por diante, até que seja introduzida finalmente em algum equipamento.

Conforme já foi mencionado, geralmente as interferências conduzidas são resultantes de induções em pontos afastados. Entretanto, essa não é uma regra absoluta, pois podem ser originadas também sem a ocorrência de induções, devido aos efeitos adversos das impedâncias comuns, como será descrito mais adiante.

Resta agora analisar os mecanismos de indução, iniciando pelos de origem magnética.

A figura 7 mostra uma configuração básica e genérica de circuito, de modo a ilustrar melhor os fenômenos.

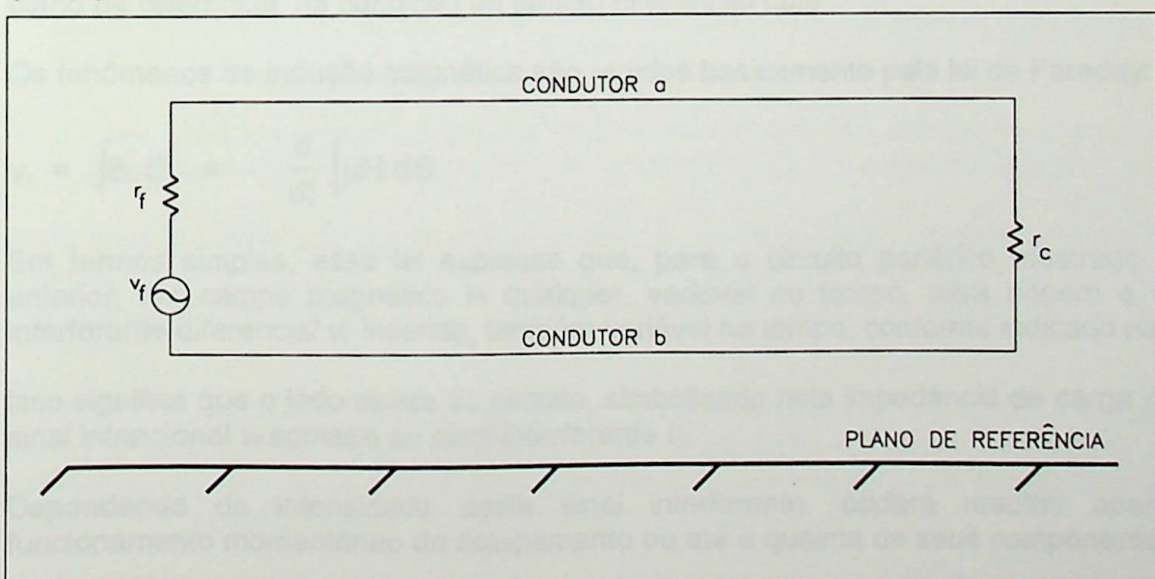


Fig.7 - Circuito Genérico

A figura representa um circuito elétrico genérico na sua forma mais simples, ou seja, como um par de condutores designados por a e b. No circuito há uma fonte de tensão  $v_f$ , com resistência ou impedância interna  $r_f$ , que envia seu sinal ao outro lado, simbolizado pela resistência ou impedância de carga  $r_c$ .

A escala do exemplo é totalmente genérica, podendo ser entendida talvez como a representação típica de um circuito de interligação entre dois equipamentos separados e afastados, sendo  $r_f$  e  $r_c$  respectivamente as impedâncias de saída e de entrada da interligação. Da mesma forma, a figura pode ser interpretada também como a representação típica de um circuito interno a um só equipamento, ou seja, a interligação entre dois estágios de um mesmo circuito.

Como as conclusões serão gerais, a escala do exemplo não é relevante.

Está representado também, na parte inferior da figura, o que se pode chamar de um "plano de referência". Tal plano pode ser entendido como qualquer parte ou superfície, geralmente de grandes proporções relativamente às dimensões dos equipamentos, composta por material com boas características de condução de eletricidade.

Dependendo do local de instalação do circuito ou do equipamento, tal "plano de referência" pode ser considerado como o próprio gabinete metálico do equipamento, a superfície do solo, os ferros de armação da laje de piso, o casco metálico de uma embarcação, a estrutura metálica da fuselagem de uma aeronave, etc.

Como a discussão se limita à instalação de equipamentos em prédios, a nível de sistema, o "plano de referência" será interpretado como sendo a superfície do solo para instalações na altura do andar térreo ou os ferros de armação da laje de piso, para instalações em andares superiores.

Esta qualificação é importante para se definir um ponto de referência comum para medição de potenciais.

Assim, será chamada de tensão interferente diferencial a diferença de potenciais causada pela interferência, medida entre os condutores a e b do circuito.

Da mesma forma, será chamada de tensão interferente de modo comum a diferença de potenciais causada pela interferência, medida entre qualquer um dos condutores a ou b e o plano de referência, na condição de tensão diferencial nula.

Os fenômenos de indução magnética são regidos basicamente pela lei de Faraday:

$$v_i = \int E \cdot dL = - \frac{d}{dt} \int \mu H \cdot dS \quad (2.1)$$

Em termos simples, essa lei expressa que, para o circuito genérico mostrado na figura 7 anterior, um campo magnético H qualquer, variável no tempo, dará origem a uma tensão interferente diferencial  $v_i$  inserida, também variável no tempo, conforme indicado na figura 8.

Isso significa que o lado direito do circuito, simbolizado pela impedância de carga  $r_c$  receberá o sinal intencional  $v_f$  somado ao sinal interferente  $v_i$ .

Dependendo da intensidade deste sinal interferente, poderá resultar apenas o mau funcionamento momentâneo do equipamento ou até a queima de seus componentes.

A lei de Faraday, indica ainda que essa intensidade  $v_i$  é dada pela taxa de variação no tempo da integral de superfície do produto escalar do vetor H, pelo vetor elemento diferencial de área  $ds$ , sendo a integração feita na área delimitada pelo circuito, indicada por hachuras na figura 8.

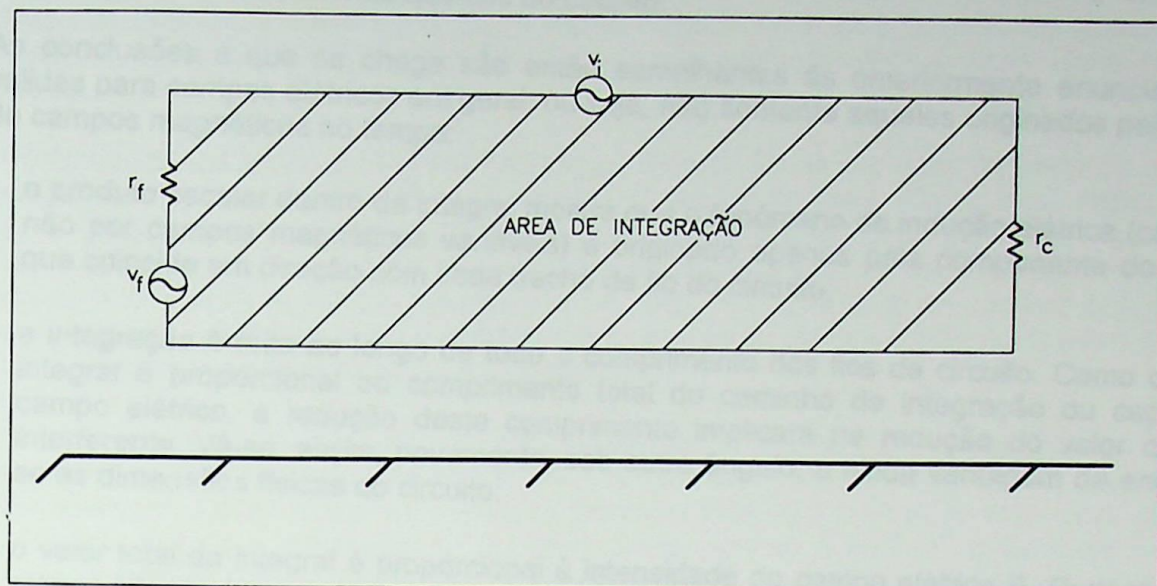


Fig.8 - Tensão Interferente Diferencial

Várias conclusões importantes podem ser obtidas então:

- como a intensidade da tensão interferente é proporcional à taxa de variação no tempo, compreende-se que, quanto mais rápido ou abrupto for o fenômeno, pior será o efeito ou a indução. Por essa razão é que as descargas atmosféricas têm tanta capacidade de gerar induções severas;
- o produto escalar dentro da integral significa que o fenômeno da indução magnética é originado apenas pela componente do campo  $H$  que seja perpendicular ao plano do circuito (ao plano do papel). Esta é a razão pela qual a indução magnética entre cabos lançados ou dispostos em posição paralela é tão intensa;
- a área de integração do campo é a delimitada pelos condutores do circuito. Como o valor da integral é proporcional à área disponível para integração ou captação do campo magnético, a redução dessa área implicará na redução do valor da tensão interferente. Na prática, isso pode ser conseguido através da aproximação dos fios  $a$  e  $b$  entre si e/ou da redução de seu comprimento;
- o valor total da integral é proporcional à intensidade do campo magnético  $H$ . Portanto, quanto menos intenso for esse campo, tanto menor será o efeito da indução.

Para uma compreensão física melhor do fenômeno de indução magnética, a análise da lei de Faraday pode também ser feita enfocando-se o campo elétrico gerado pela variação do campo magnético no tempo, ou seja, considerando-se os termos à esquerda na equação (2.1) anterior.

De acordo com as leis de Maxwell, a componente do campo magnético  $H$ , perpendicular ao plano do circuito (ao plano do papel), devido à variação no tempo, dá origem a um campo elétrico  $E$ , também variável no tempo, com linhas de fluxo elétrico em forma de anéis fechados, situadas no próprio plano do circuito mostrado na figura 8, anterior.

Tal campo elétrico impulsiona então os elétrons livres dos condutores do circuito, causando assim a circulação de uma corrente elétrica interferente no mesmo.

A diferença de potencial gerada no circuito pelo campo elétrico interferente, que impulsiona os elétrons livres como citado, é dada matematicamente pela integral de linha do produto escalar

do vetor  $E$  pelo vetor elemento diferencial de comprimento  $dL$ , sendo a integração feita ao longo de todo o comprimento dos fios do circuito.

As conclusões a que se chega são então semelhantes às anteriormente enunciadas, aliás válidas para campos elétricos em geral, ou seja, não somente aqueles originados pela variação de campos magnéticos no tempo:

- o produto escalar dentro da integral mostra que o fenômeno de indução elétrica (causado ou não por campos magnéticos variáveis) é originado apenas pela componente do campo  $E$  que coincide em direção com cada trecho de fio do circuito;
- a integração é feita ao longo de todo o comprimento dos fios de circuito. Como o valor da integral é proporcional ao comprimento total do caminho de integração ou captação do campo elétrico, a redução deste comprimento implicará na redução do valor da tensão interferente. Vê-se, assim, novamente, sob outro ângulo, a nítida vantagem de encurtarem-se as dimensões físicas do circuito;
- o valor total da integral é proporcional à intensidade do campo elétrico  $E$ . Portanto, quanto menos intenso for o campo elétrico, tanto menor será o efeito da indução.

Como, através dos resultados anteriores, foi observado que pontos situados a distâncias maiores em relação aos elementos do sistema de proteção predial apresentam intensidades menores dos campos elétrico e magnético gerados pelo escoamento das correntes impulsivas dos raios, a localização de circuitos ou equipamentos nessas posições mais afastadas traz, como benefício evidente, menores níveis de indução.

Será analisado, agora, mais especificamente, o fenômeno de indução elétrica não relacionado com variações de campo magnético, ou seja, relacionado apenas com diferenças de potencial elétrico entre partes condutoras.

De modo a aguçar o senso físico, será utilizado um modelo simplificado de capacitâncias parasitas, conforme mostrado na figura 9:

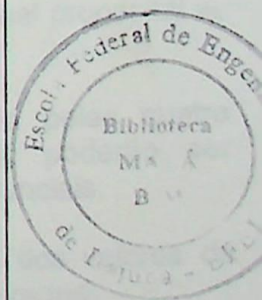
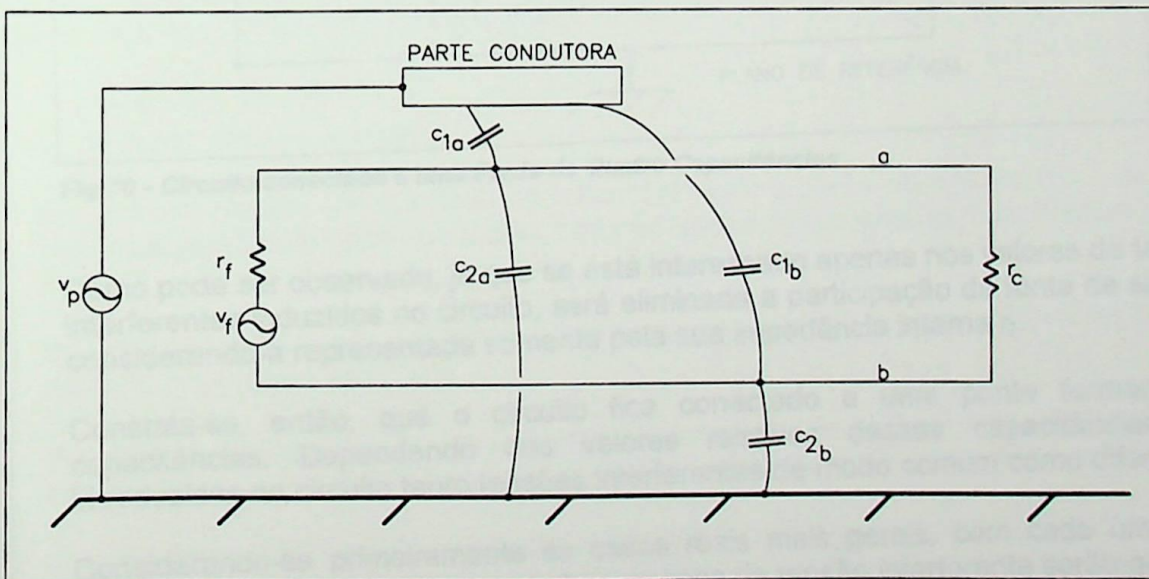


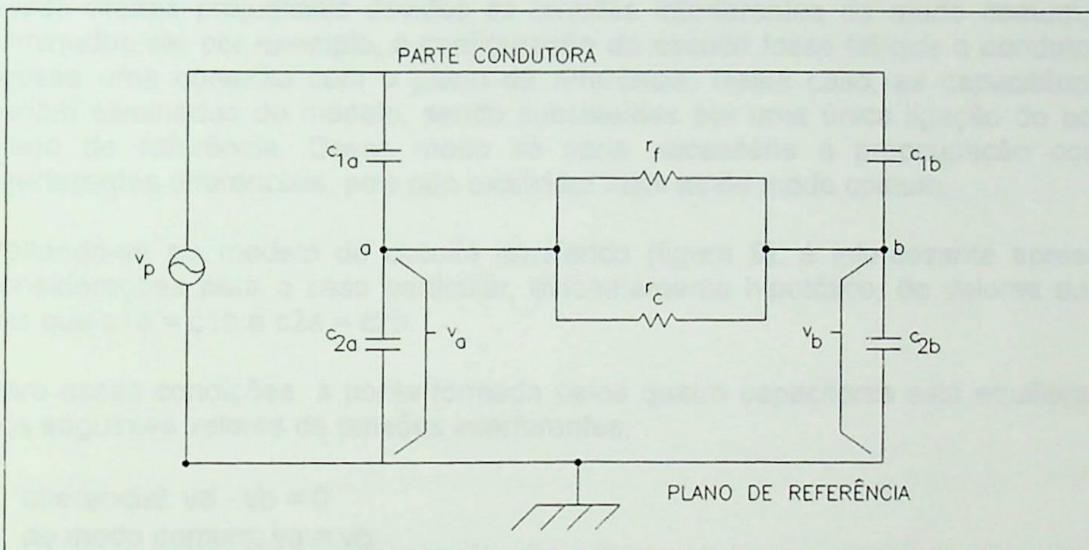
Fig.9 - Acoplamento Capacitivo

No topo da figura está representada uma parte condutora qualquer (possivelmente uma parte energizada do sistema de proteção predial), que apresenta uma diferença de potencial em relação ao plano de referência, simbolizada pela fonte de tensão  $v_p$ .

O campo elétrico existente entre a parte condutora e o plano de referência irá, então, afetar ou interferir no circuito mostrado na figura, de maneira semelhante a já descrita anteriormente. Sabe-se que, para existir uma capacitância entre duas partes condutoras quaisquer que se façam, basta que estas tenham área física o que evidentemente sempre acontece nos casos reais.

Pode-se afirmar então que, inevitavelmente, sempre existe um valor definido de capacitância entre duas partes condutoras reais quaisquer que se façam. Como essa capacitância não está contida em um capacitor discreto propositalmente fabricado para isso e sim espalhada ou distribuída acidentalmente ao longo das dimensões das partes condutoras consideradas, dá-se à mesma o nome de capacitância parasita. Portanto, é de se esperar que existam tais capacitâncias definidas entre a parte condutora superior da figura 10 e os fios a e b do circuito, bem como entre estes e o plano de referência.

Os capacitores  $c_{1a}$ ,  $c_{2a}$ ,  $c_{1b}$  e  $c_{2b}$ , indicados na figura, representam tais capacitâncias. Apesar de, na verdade, se tratar de capacitâncias distribuídas e não concentradas, a representação através de componentes discretos simplifica a análise, sem introduzir qualquer alteração em seus resultados finais. Além disso, permite a análise do fenômeno de indução elétrica através do uso de simples teoria de circuitos. Para tanto, será representado na figura 10 o circuito equivalente à configuração em estudo.



**Fig.10 - Circuito conectado a uma Ponte de Quatro Capacitâncias**

Como pode ser observado, já que se está interessado apenas nos valores de tensão dos sinais interferentes induzidos no circuito, será eliminada a participação da fonte de sinal proposital  $v_r$ , considerando-a representada somente pela sua impedância interna  $r_i$ .

Constata-se, então, que o circuito fica conectado a uma ponte formada pelas quatro capacitâncias. Dependendo dos valores relativos dessas capacitâncias, poderão ser introduzidas no circuito tanto tensões interferentes de modo comum como diferenciais.

Considerando-se primeiramente os casos reais mais gerais, com cada um dos valores de capacitância diferente do outro, ambos os tipos de tensão interferente serão gerados.

Assim, chamando-se de  $v_a$  e  $v_b$  os potenciais medidos entre os pontos ou condutores "a" e "b" respectivamente e o plano de referência, obtêm-se os seguintes valores de tensões interferentes:

- diferencial:  

$$v_a - v_b \quad (2.2)$$

- de modo comum:  

$$\frac{v_a + v_b}{2} \quad (2.3)$$

Como a impedância de carga  $r_c$  do circuito mostrado (circuito balanceado ou não conectado ao plano de referência) só é sensível às tensões diferenciais (entre fios "a" e "b"), apenas esse tipo de interferência será introduzido e processado pelo equipamento. Dependendo de sua intensidade, poderá causar mau funcionamento temporário ou até mesmo a danificação de componentes.

Já o efeito das tensões interferentes de modo comum será um pouco diferente, pondo em risco, caso atinjam valores muito elevados, a integridade dos elementos isolantes do circuito. Poderão ser assim originados arcos elétricos de altíssima temperatura, vindo provavelmente a causar danos físicos nas partes isolantes, componentes, etc.

Esses efeitos prejudiciais devidos às tensões interferentes de modo comum, poderiam ser eliminados se, por exemplo, a configuração do circuito fosse tal que o condutor "b" mostrado tivesse uma conexão com o plano de referência. Neste caso, as capacitâncias  $c_{1b}$  e  $c_{2b}$  seriam eliminadas do modelo, sendo substituídas por uma única ligação do ponto "b" com o plano de referência. Desse modo só seria necessária a preocupação com as tensões interferentes diferenciais, pois não existiriam mais as de modo comum.

Voltando-se ao modelo de circuito interferido (figura 9), é interessante apresentar algumas considerações para o caso particular, evidentemente hipotético, de valores de capacitâncias tais que  $c_{1a} = c_{1b}$  e  $c_{2a} = c_{2b}$ .

Para essas condições, a ponte formada pelos quatro capacitores está equilibrada, resultando nos seguintes valores de tensões interferentes:

- diferencial:  $v_a - v_b = 0$
- de modo comum:  $v_a = v_b$

Em outras palavras, para o caso de balanceamento perfeito do circuito (com as capacitâncias correspondentes de cada fio iguais), não são introduzidas tensões interferentes diferenciais no mesmo.

Restará apenas o efeito das tensões interferentes de modo comum, da mesma forma que já foi relatado anteriormente.

Na prática, entretanto, o balanceamento nunca é perfeito e alguma tensão interferente diferencial sempre resulta, porém normalmente com valores muito baixos.

O balanceamento perfeito só poderia ser obtido se os dois condutores a e b ocupassem exatamente a mesma posição ou o mesmo lugar no espaço, o que é logicamente impossível. Entretanto, à medida que se caminha para isso, com a aproximação crescente entre os mesmos, são obtidos valores de capacitâncias correspondentes mais próximos e, conseqüentemente, um circuito melhor balanceado.

Considerando-se ainda o caso de balanceamento perfeito, ou seja,  $c_{1a} = c_{1b}$  e  $c_{2a} = c_{2b}$ , analisa-se como as tensões interferentes de modo comum podem variar.

Pode ser observado na figura 10 anterior que os pontos ou fios a e b se localizam no centro de divisores capacitivos de potencial simétricos. Para esses divisores, na condição da  $v_a = v_b$ , as seguintes expressões são válidas:

$$v_a = v_p \cdot \frac{c_{1a}}{c_{1a} + c_{2a}} \tag{2.4}$$

$$v_b = v_p \cdot \frac{c_{1b}}{c_{1b} + c_{2b}} \tag{2.5}$$

Observa-se, portanto, que quanto menor o valor de  $c_{1a} = c_{1b}$ , ou quanto maior o valor de  $c_{2a} = c_{2b}$ , tanto menor será a tensão de modo comum induzida.

Conforme já citado anteriormente, para uma mesma configuração de partes condutoras que se façam, de modo geral quanto menor a distância de separação entre as partes, tanto maior será o valor da capacitância resultante.

Compreende-se, então, que para reduzir os valores de tensão interferente de modo comum, é preciso reduzir os valores de  $c_{1a} = c_{1b}$  e aumentar os valores de  $c_{2a} = c_{2b}$ , o que pode ser conseguido através de aproximação dos fios a e b do circuito mostrado em relação ao plano de referência e, conseqüentemente, o afastamento de tais fios em relação à parte condutora superior.

Visando uma menor captação geral de interferências originadas por campos elétricos e magnéticos, pode-se então resumir as principais conclusões obtidas até este ponto da seguinte forma:

- afastar os circuitos ou equipamentos em relação às possíveis fontes dos campos;
- reduzir dimensões dos circuitos;
- aproximar entre si os fios constituintes de um mesmo circuito;
- aproximar os fios constituintes do circuito em relação ao seu plano de referência considerado.

A partir deste ponto, será analisada a chamada "impedância comum" último elemento de grande importância relacionado à instalação de equipamentos, a ser considerado neste documento e que se caracteriza por propiciar interferências na modalidade conduzida.

A figura 11 ilustra uma configuração genérica em que está presente a impedância comum.

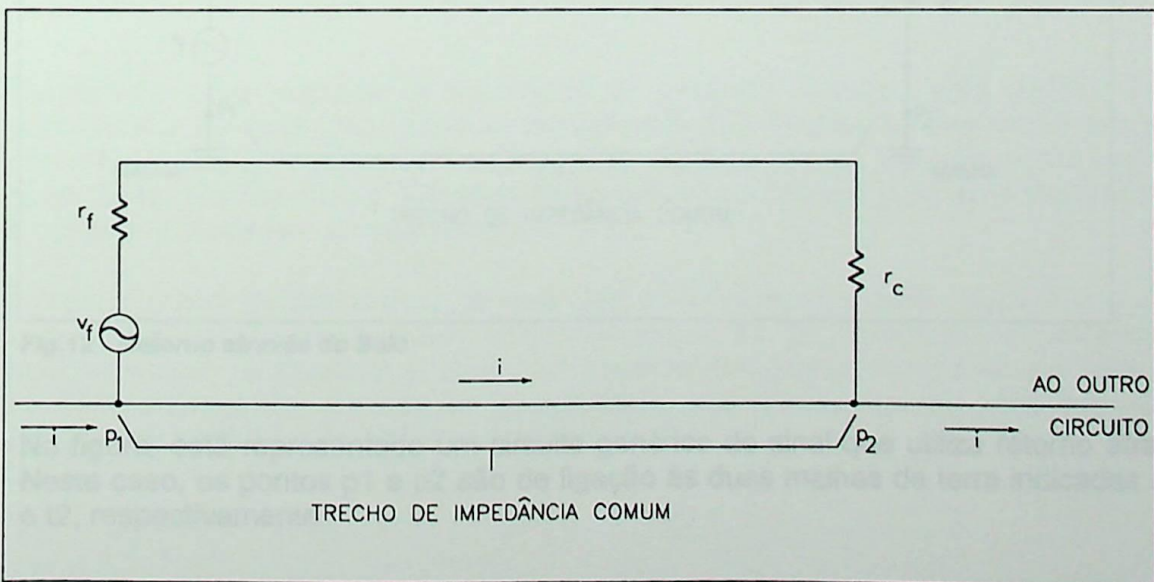


Fig.11- Impedância Comum

A equação (2.6) apresenta a diferença de potencial entre os pontos P1 e P2.

$$v_l = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.6)$$

Nesta fórmula, L representa o valor da indutância do elemento e o fator  $di/dt$  expressa a taxa de variação da corrente no tempo.

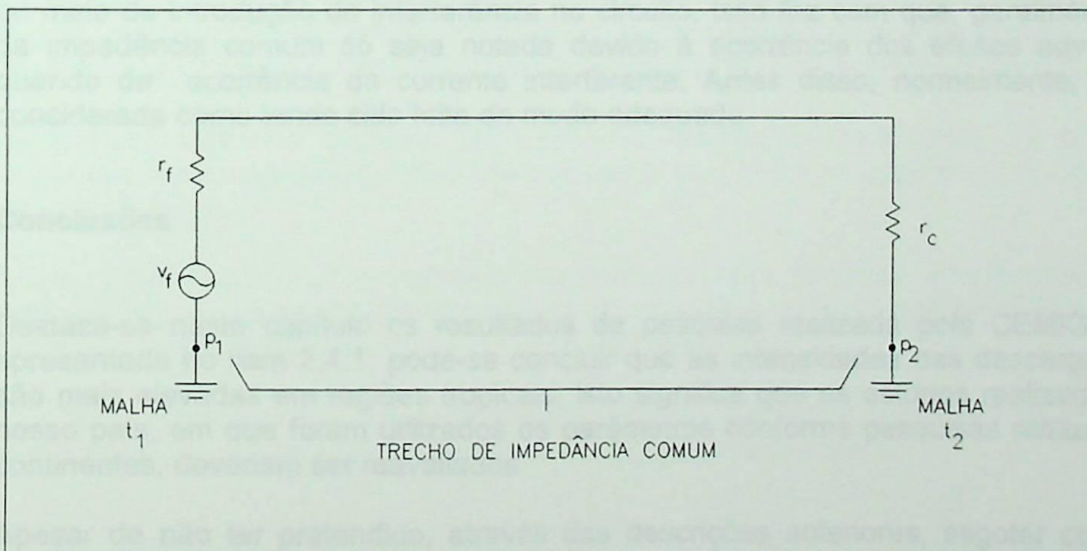
Para o caso de correntes de origem atmosférica, os valores de  $di/dt$  podem ser tão elevados que até mesmo a indutância de um trecho de fio reto (indutância intrínseca), da ordem de alguns décimos de micro-henries por metro, é suficiente para o desenvolvimento de diferenças de potencial muito elevadas, da ordem de alguns quilovolts por metro de fio.

É fácil então imaginar a extensão dos efeitos danosos de diferenças de potencial desta magnitude introduzidas em circuitos de equipamentos eletrônicos através de trechos de impedância comum.

Na prática, o papel de condutor comum aos dois circuitos, mostrado na figura 11, pode ser assumido pelos mais diversos elementos. Muitas vezes trata-se de cabos pertencentes ao próprio sistema de proteção predial, seja na função de cabo de descida, cabo de equalização de potencial, cabo da malha de terra (caso muito comum) ou qualquer outro. Conforme já foi analisado, qualquer dessas partes do sistema de proteção pode conduzir correntes impulsivas de elevada intensidade.

Outras vezes, o condutor comum aos circuitos nem tem a forma de cabo ou fio. Nesse caso se enquadram todos os circuitos com retorno através de quaisquer partes metálicas (longarinas, vergalhões, eletrodutos, etc), que, no evento de incidência de descargas atmosféricas no sistema de proteção, podem vir a conduzir correntes transitórias de valores elevados.

Outro caso muito frequente é o do condutor comum aos circuitos ser constituído pelo próprio plano de referência. Nisso se enquadram, por exemplo, os circuitos com retorno através da terra (solo) ou com duplo aterramento. A figura 12 ilustra esse importante caso.



**Fig.12 - Retorno através do Solo**

Na figura, está representado um circuito genérico de sinal que utiliza retorno através do solo. Neste caso, os pontos  $p_1$  e  $p_2$  são de ligação às duas malhas de terra indicadas separadas  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente.

Supondo-se que as malhas de terra t1 e t2 tem impedâncias de aterramento de valores  $z_1$  e  $z_2$ , respectivamente e que a impedância mútua entre as citadas malhas tenha o valor  $z_{12}$ , pode ser demonstrado que o valor da impedância comum será então dado pela expressão:

$$Z_{\text{comum}} = Z_1 + Z_2 - 2 Z_{12} \quad (2.7)$$

É importante lembrar que a impedância mútua entre malhas é definida pela relação entre o valor da elevação de potencial resultante em uma das malhas e o valor da corrente causadora da elevação de potencial, injetada na outra malha.

Para a situação ilustrada pela figura 12, no evento de incidência de descargas atmosféricas no sistema de proteção de qualquer um dos lados, ou seja, com o escoamento das correntes impulsivas de raios através de qualquer uma das malhas de terra t1 ou t2, o potencial da respectiva malha solicitada se elevará muito em relação à outra. O que equivale a dizer que os pontos p1 e p2 apresentarão uma elevada diferença de potencial, que será fatalmente introduzida no circuito de maneira já explicada, causando quase certamente danos ao mesmo.

Outra configuração muito frequentemente encontrada é aquela semelhante à representada na figura 12, porém com um elemento condutor adicional interligando diretamente os pontos p1 e p2 (geralmente um trecho de fio ou cabo). Este caso é semelhante aos demais já descritos, inclusive quanto à grande probabilidade de danos nos equipamentos.

A única diferença é que o valor da impedância comum resultante será dado pelo arranjo em paralelo da impedância comum associada às malhas de terra, como já indicado, com a impedância comum do trecho de condutor de interligação adicionado.

Na grande maioria dos casos práticos, devido aos valores de impedância em jogo, a presença do condutor adicional não será suficiente para eliminar os danos aos equipamentos. A ocorrência dessa configuração é frequente, por exemplo, nas instalações que utilizam cabos do tipo coaxial, cuja capa duplamente aterrada, ou seja, em ambos os extremos, representa o elemento condutor adicional.

É importante observar que a existência de impedância comum em um circuito, por si só não introduz qualquer sinal interferente no mesmo. Para isso é preciso que a corrente interferente esteja também presente. O papel da impedância comum é apenas o de propiciar um caminho ou meio de introdução da interferência no circuito. Isso faz com que, geralmente a existência da impedância comum só seja notada devido à ocorrência dos efeitos adversos, ou seja, quando da ocorrência da corrente interferente. Antes disso, normalmente, a instalação é considerada como tendo sido feita de modo adequado.

## 7 Conclusões

Destaca-se neste capítulo os resultados da pesquisa realizada pela CEMIG. Da tabela III, apresentada no item 2.4.1, pode-se concluir que as intensidades das descargas atmosféricas são mais elevadas em regiões tropicais. Isto significa que os estudos realizados até aqui em nosso país, em que foram utilizados os parâmetros conforme pesquisas realizadas em outros continentes, deveriam ser reavaliados.

Apesar de não ter pretendido, através das descrições anteriores, esgotar completamente o conjunto de todos os possíveis modos de influência das descargas atmosféricas sobre os equipamentos, tentativa que pode ser considerada quase impossível em face da enorme vastidão do assunto, acredita-se ter abordado pelo menos aqueles mais importantes e que servirão de base para às análises subsequentes.

## CAPÍTULO III

### FORMAS DE REDUÇÃO DOS PROBLEMAS RELACIONADOS COM TENSÕES INTERFERENTES

#### 1 Introdução

Embora este trabalho esteja voltado para os problemas relacionados com as interferências provocadas por descargas atmosféricas associadas às situações pertinentes ao “campo próximo”, pretende-se, neste capítulo, dar uma maior abrangência ao assunto e, para tanto, serão consideradas outras fontes de interferência.

Entre as fontes de interferência usuais encontradas em ambientes industriais devem-se discernir os ruídos artificiais (criados pelo homem) e os naturais.

Os ruídos naturais têm o mais amplo espectro e as fontes mais variadas possíveis tais como: irradiação das estrelas (Cygnus A gera  $4 \times 10^{35}$  W de rádio frequência), ionização provocada por elementos radioativos, descargas de cargas eletrostáticas acumuladas pelos ventos em superfícies isoladas, a já citada descarga atmosférica e tantas outras.

Os ruídos artificiais podem ser classificados quanto a sua geração como “intencionais” e “acidentais”. Fontes intencionais de ruído são as que geram, para seu próprio funcionamento, um sinal que, ao ser acoplado acidentalmente a outros equipamentos, introduz-se nestes como um ruído indesejável. Exemplo mais flagrante são os transmissores de rádio usados para comunicação ou transmissão de dados nas próprias unidades industriais. As fontes “intencionais” de ruído, normalmente não podem ser eliminadas, restando apenas o recurso de evitar que o ruído gerado por elas prejudique o funcionamento dos demais equipamentos.

Como fontes acidentais podem ser citados os circuitos de média/alta tensão, os sistemas de controle com SCR (tiristores), reatores de lâmpadas fluorescentes e tantas outras.

As fontes “acidentais” de ruído permitem uma abordagem mais ampla. Tanto se pode tentar evitar que o ruído gerado interfira nos equipamentos, como se pode atenuar ou eliminar o ruído na própria fonte.

Logo, para reduzir os problemas relacionados com tensões interferentes, verifica-se a necessidade de se estabelecerem alguns critérios de instalação que deverão ser considerados principalmente na fase de projeto de uma instalação.

Nos itens subsequentes, pretende-se descrever, rapidamente, os modos de acoplamento bem como enunciar alguns critérios gerais de instalação recomendados.

#### 1.2 Modos de Acoplamento

Conforme já descrito no item 2.6, a interferência eletromagnética, em sistemas elétricos e eletrônicos, é usualmente derivada do acoplamento, através dos efeitos induzidos e irradiados.

Por outro lado, o acoplamento sem contato elétrico pode ser subdividido em três diferentes categorias para o caso de as componentes elétricas e magnéticas do campo eletromagnético serem consideradas independentes uma da outra.

Assim, é possível distinguirem-se quatro modos de acoplamento:

- acoplamento pela impedância comum ou condutivo (no caso particular de fenômenos de baixa frequência ou quando a impedância é puramente resistiva, este modo de acoplamento é chamado de acoplamento resistivo);
- acoplamento indutivo ou magnético;
- acoplamento capacitivo ou elétrico;
- acoplamento irradiado (campo distante).

Estes modos não costumam aparecer separadamente, a predominância de um deles é determinada pela natureza do distúrbio.

A região do espaço na qual o campo indutivo ou capacitivo predomina é chamada de "campo próximo" de uma antena de transmissão.

Já a região, em que apenas o campo de irradiação é mais significativo, denomina-se de "campo distante".

A localização da região em que existe a transição entre o campo próximo e o distante depende das dimensões da fonte (por exemplo as dimensões de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas) e do comprimento da onda gerada por esta fonte.

Quando a fonte é muito menor que o comprimento de onda, o limite entre o campo próximo e o distante ocorre a uma distância da fonte de aproximadamente 1/6 do comprimento de onda, conforme equação 3.1.

$$X = \lambda/2\pi \tag{3.1}$$

Entretanto, quando a máxima dimensão D da fonte é muito maior que  $\lambda/2$ , a distância de interface torna-se:

$$X \cong D^2 / 2\lambda \tag{3.2}$$

A variação da impedância da onda (ZW) com a distância R da fonte é apresentada na figura 13

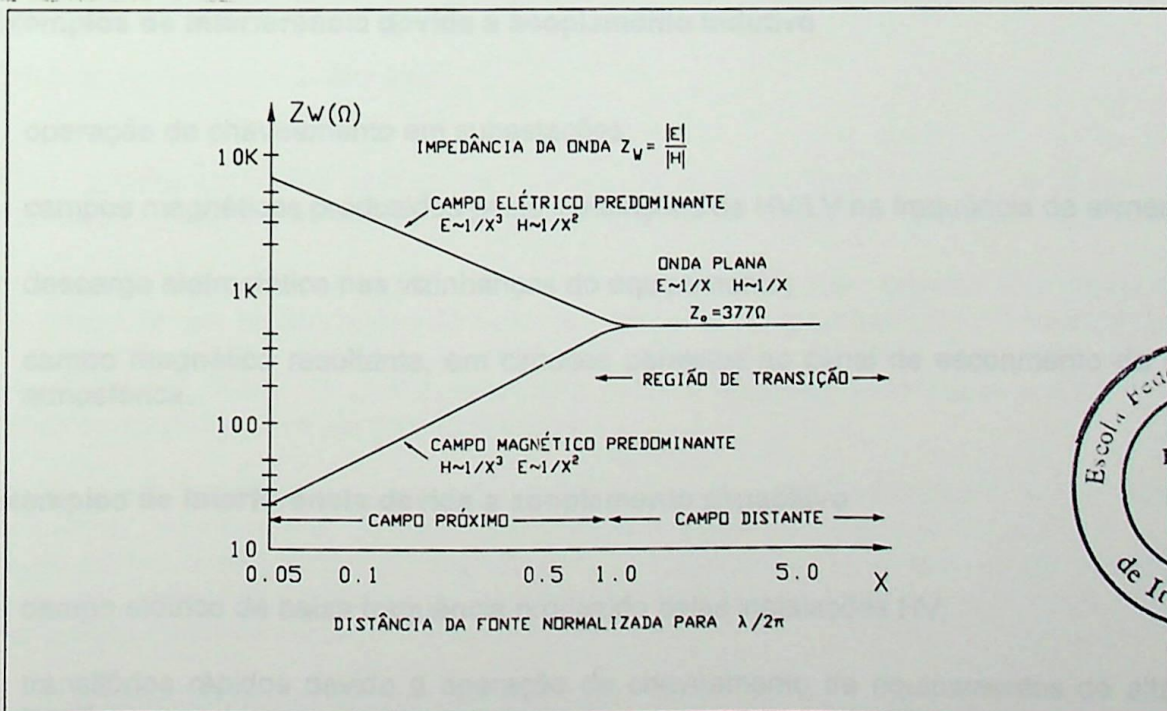
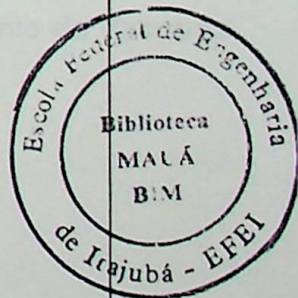


Fig.13 - Impedância da onda em função da distância e tipo de fonte, mostrando as regiões de campo próximo e campo distante.



Observa-se na fig. 13, as impedâncias dos campos elétricos e magnéticos. No campo próximo, a impedância do campo elétrico é elevada, enquanto a do campo magnético é baixa. Isto equivale a dizer que, para a maioria das fontes de interferência encontradas, suas "antenas" terão baixa impedância e seu campo próximo terá as características predominantes de um campo magnético.

A intensidade do campo eletromagnético é diretamente proporcional ao produto da corrente pelo comprimento do dipolo (antena irradiante) e inversamente proporcional à distância da fonte. Como a frequência é inversamente proporcional ao comprimento de onda conforme mostra a equação (3.3), conclui-se que a intensidade da radiação aumenta com a frequência.

$$\lambda = V/f \quad (3.3)$$

As principais fontes de radiação são as descargas atmosféricas, rádios transmissores e walkie-talkies. A primeira produz um campo impulsivo e as demais, um campo de frequência fixa.

Abaixo, são apresentados alguns exemplos típicos de interferências que consideram os acoplamentos descritos anteriormente [11].

## 2.1 Exemplos de interferência devida a acoplamento pela impedância comum

- Corrente de curto-circuito no sistema de aterramento usado como plano de referência de potencial;
- descarga eletrostática diretamente aplicada aos equipamentos;
- "cross talk" entre partes dos circuitos com um retorno comum;
- descargas atmosféricas diretas sobre os circuitos ou equipamentos;
- harmônicos, flicker, queda súbita de tensão nos sistemas de potência.

## 2.2 Exemplos de interferência devida a acoplamento indutivo

- operação de chaveamento em subestações;
- campos magnéticos produzidos pelas instalações de HV/LV na frequência de alimentação;
- descarga eletrostática nas vizinhanças do equipamento;
- campo magnético resultante, em circuitos paralelos ao canal de escoamento da descarga atmosférica.

## 2.3 Exemplos de interferência devida a acoplamento capacitivo

- campo elétrico de baixa frequência produzido pelas instalações HV;
- transitórios rápidos devido à operação de chaveamento de equipamentos de alta e baixa tensão;
- "cross-talk" em cabos de sinal;

- campo elétrico resultante em circuitos paralelos ao canal de escoamento da descarga atmosférica.

## 2.4 Exemplos de interferência irradiada

- descarga atmosférica remota (a centenas de metros do circuito afetado);
- campos de alta frequência produzidos pelos rádios transmissores.

## 3 Critérios de Instalação

No Capítulo II, foram desenvolvidos, de forma simples, os principais conceitos físicos relacionados com as descargas atmosféricas, que servem de base ou justificativa para os critérios de instalação que serão em seguida recomendados.

Neste capítulo preocupa-se em citar não só outros modo de influência das descargas atmosféricas sobre os equipamentos, por exemplo através do acoplamento irradiado, como também outras fontes de interferência e seus respectivos modos de acoplamento.

Nos itens subsequentes, serão enunciados os critérios gerais de instalação, baseados naqueles apresentados por [6] [11] [12] [13], grupados conforme os setores ou áreas de projeto a que pertencem.

### 3.1 Local de Instalação

Os primeiros critérios a serem indicados dizem respeito à colocação dos equipamentos componentes dos sistemas em locais tais que as influências de campos elétricos e magnéticos, provocados pelo escoamento das correntes de raios através do sistema de proteção predial, sejam minimizadas.

Pode-se recomendar então que:

- 3.1.1- Para prédios de vários pavimentos, instalar os equipamentos no andar mais baixo possível, pois quanto mais baixo for, em geral, menor será a sua exposição a campos interferentes.

A recomendação decorre do fato de os campos elétricos serem maiores nas partes superiores do prédio, já que as diferenças de potencial entre as partes superiores do sistema de proteção e elementos referenciados ao potencial da malha de terra (carcaças aterradas de equipamentos, ferros de armação de lajes, pilares, vigas, etc.) são maiores e as distâncias de separação entre essas partes são menores.

Outro fator que contribui para o estabelecimento desta recomendação é que nos andares inferiores, normalmente, as correntes impulsivas das descargas já se encontram dispersas pelas partes componentes do aterramento, principalmente se o sistema de proteção predial tiver sido vinculado às ferragens de armação estrutural do prédio e sua influência elétrica e magnética resultará menor.

Normalmente o melhor andar para instalação é o nível térreo já que andares subterrâneos estão mais sujeitos à influência da umidade, enchentes, etc.

Outra vantagem nítida da recomendação é a menor impedância conseguida para os cabos de aterramento de equipamentos, devido ao menor comprimento.

Para equipamentos que tenham ligação com elementos externos instalados no topo do prédio, como é o caso típico de antenas interligadas a transceptores através de cabos coaxiais ou guias de onda, a recomendação implica ainda em um nível de segurança humana muito maior. Isso se deve ao fato de o cabo coaxial, ou guia de onda, poder vir a drenar parte da corrente impulsiva do raio que seguirá através de carcaça do equipamento e cabo de aterramento desta, em direção à malha de terra. O escoamento de correntes impulsivas, através da impedância elevada de um cabo de aterramento longo, poderá resultar em um alto valor de elevação de potencial da carcaça do equipamento em relação ao potencial do malha de terra e, conseqüentemente, em relação ao potencial do piso da sala do equipamento.

O ato de tocar a carcaça do equipamento, nesse exato momento, representa um grave risco de choque elétrico pelo chamado potencial de toque.

Com instalações em andares mais baixos, a impedância do cabo de aterramento do equipamento diminui, reduzindo correspondentemente a intensidade de um possível choque elétrico.

- 3.1.2- Instalar os equipamentos em salas localizadas em posições centrais do prédio, pois, em geral, estarão assim sujeitos a níveis de campos interferentes menores.

Essa recomendação decorre do fato de o escoamento das correntes impulsivas dos raios, no sistema de proteção, ocorrer normalmente através das partes periféricas do prédio.

Outra vantagem dessa recomendação é que para as salas mais internas, possíveis campos interferentes externos terão que atravessar maiores distâncias e várias paredes de compartimentos intermediários até conseguir chegar aos equipamentos. Nesse caminho sofrerão atenuações adicionais graças ao efeito de blindagem natural proporcionado pelas paredes de alvenaria.

- 3.1.3- De modo geral, o local de instalação deverá situar-se o mais distante possível das partes constituintes do sistema de proteção predial.

Em vista de todo o exposto em itens precedentes, acredita-se não serem necessários maiores esclarecimentos quanto a esta recomendação, que é especialmente importante para os trechos do sistema de proteção, que têm a função geral de descida (cabos, ferros de armação de pilares metálicos, etc.).

## 3.2 Lay-out dos Equipamentos

Este item diz respeito à proteção relativa de equipamentos pertencentes a um mesmo sistema, visando uma menor indução de sinais interferentes.

Equipamentos que tenham fiação de interligação entre si devem ser localizados o mais próximo possível um do outro e, preferencialmente, no mesmo andar do prédio.

Esta recomendação decorre do fato de a intensidade dos efeitos de indução em circuitos serem proporcionais ao comprimento de sua fiação, conforme analisado no capítulo II. Portanto, comprimentos maiores sempre darão margens a maiores níveis de sinais interferentes e, conseqüentemente, maiores chances de mau funcionamento ou danos ao circuito. O caso é pior ainda quando estes trechos são verticais, como ocorre com equipamentos interligados, instalados em andares diferentes.

Como há uma acentuada variação do potencial elétrico ao longo da altura do sistema de proteção e, em suma, do prédio, o campo elétrico associado é preponderantemente vertical, contribuindo de modo reforçado para o processo de integração, por ser realizado ao longo dos fios, basicamente também verticais. Portanto, dado um mesmo comprimento de fiação, a instalação em andares diferentes (vertical) resultará, em geral, em maiores níveis de indução do que a instalação em um mesmo andar (horizontal).

Do ponto de vista do campo magnético, a conclusão é semelhante, pois a fiação vertical tenderá a ficar paralela aos percursos de descida das correntes impulsivas, o que redundará em induções mais intensas.

### 3.3.3 Encaminhamento da Fiação

Em seguida, serão abordadas algumas recomendações básicas referentes à fiação dos circuitos, elaboradas visando à minimização dos níveis de indução captada.

- 3.3.3.1- Manter a fiação dos circuitos, afastada, o máximo possível, em relação a qualquer parte do sistema de proteção predial e evitar paralelismo com quaisquer elementos do referido sistema que tenham a função geral de descida (cabos, ferros de armação de pilares, pilares metálicos, etc.).

Em vista de todo o exposto em itens precedentes, acredita-se não ser necessário um maior esclarecimento quanto a esta recomendação.

Se não for possível afastarem-se os condutores das instalações elétricas, deve-se introduzir alguma forma de blindagem, conforme descrito no item 3.3.3.4.

- 3.3.3.2- Os fios constituintes de um mesmo circuito deverão ser mantidos próximos um do outro o máximo possível.

O objetivo desta recomendação é, como já analisado no item 2.6, garantir uma introdução mínima de tensões interferentes diferenciais nos circuitos. Em termos práticos, pode implicar na escolha de que tipo de fio ou cabo deverá ser utilizado, se par torcido blindado, cabo de pares, cabo de veias ("flat cable"), cabo coaxial, etc.

Geralmente, não se tem muita liberdade nessa escolha, pois as próprias características do sinal proposital a ser conduzido determinam basicamente o tipo de fiação a ser utilizado. Entretanto, em algumas vezes há, pelo menos a nível de projeto, possibilidade da opção por circuito balanceado ou não, por comunicação paralela ou serial, etc, que então deverá ser analisada também à luz do critério indicado.

Neste ponto, é interessante destacar o caso real que será analisado no capítulo IV, onde os circuitos da malha diferencial, além de apresentarem um elevado comprimento, estão afastados por uma distância relativamente grande.

- 3.3.3.3- Conduzir os fios constituintes do circuito o mais próximo possível do plano de referência considerado.

Este critério, conforme analisado no item 2.6, visa à redução dos sinais interferentes introduzidos em modo comum nos circuitos. Os efeitos desse tipo de interferência são especialmente significativos para os casos de fiação aérea, devido à grande distância existente em relação ao solo.

Portanto, é vantajoso que os fios dos circuitos sejam passados ao nível do solo ou da laje de piso da sala. Nos casos em que isso for impossível, deverão ser passados junto a algum tipo de condutor (eletrocalha, bandeja, eletroduto, esteira, cabo, etc.) devidamente aterrado no plano de referência através de uma única ligação de muito baixa impedância. Desse modo, o resultado final será como se o plano de referência tivesse se aproximado da fiação do circuito.

Os efeitos desta recomendação poderão ser constatados nas análises do problema apresentado no Capítulo IV. Os resultados do Caso 06 (item 4.5.2.2) irão mostrar uma redução da tensão de modo comum, quando os valores das capacitâncias para a referência são aumentados.

3.3.3.4- Os trajetos de fiação dos circuitos deverão ser feitos através do uso de eletrodutos, eletrocalhas, bandejas blindadas, etc fabricados de material ferromagnético com alta permeabilidade (ferro galvanizado, aço carbono, etc.).

Esta recomendação visa prover um grau de blindagem aos fios dos circuitos, especialmente em trechos críticos mais sujeitos a induções.

Tais elementos de condução de fiação atuarão como blindagem da seguinte maneira:

- para campos elétricos: se corretamente aterrados no plano de referência, servirão para desacoplar as capacitâncias parasitárias que permitem a introdução desse tipo de interferência;
- para campos magnéticos: por serem confeccionados em material de alta permeabilidade magnética, concentrarão, em sua massa metálica, as linhas de campo magnético, reduzindo o fluxo magnético junto aos fios;
- para campos eletromagnéticos (ondas planas): reduzirão a incidência da energia eletromagnética sobre os fios pelos efeitos de absorção (dissipação em calor), reflexão e refração das ondas.

É importante que cada secção de elemento de condução de fiação tenha apenas uma ligação de aterramento de baixa impedância, de modo a evitar que diferenças de potencial existentes entre possíveis pontos múltiplos de aterramento provoquem a circulação de correntes pelo material condutor de blindagem, o que teria o efeito indesejável de induzir interferências nos fios internos.

No caso de instalações de grandes extensões, para que não resultem riscos de segurança humana por potenciais transferidos, os elementos de condução de fiação deverão ser segmentados a intervalos adequados e aterrados local e individualmente da forma indicada.

3.3.3.5- Nunca utilizar o retorno da corrente do circuito eletrônico através da terra (solo) ou dos cabos da malha de terra.

Conforme já foi visto anteriormente, durante o escoamento das correntes impulsivas das descargas atmosféricas, a malha de terra e o solo ao seu redor tomam-se energizados, exibindo elevadas diferenças de potencial ao longo dos mesmos (Fig.2).

Através do retorno via terra ou via cabos da malha de terra, essas diferenças de potencial são aplicadas, graças à existência de impedância comum, ao circuito eletrônico, o qual não tem a menor condição de suportar a magnitude das grandezas em jogo, vindo certamente a se danificar.

A possível economia feita com o não uso de um fio ou condutor específico para o retorno da corrente do circuito, será contrabalançada de muitas vezes pelos altos custos dos reparos necessários e pela baixa confiabilidade apresentada permanentemente pelo equipamento.

### 3.3.4 Alimentação CA

A ocorrência de descargas atmosféricas no sistema de proteção de um prédio, ou próximas a este, geralmente, introduz sinais interferentes de muito alta intensidade nos circuitos de distribuição de alimentação CA dos equipamentos.

As razões que levam a esses altos valores de indução já foram analisadas em detalhes nos itens anteriores, podendo ser resumidas aqui no seguinte:

- grandes distâncias em relação ao plano de referência, principalmente devidas ao uso intensivo de redes aéreas de distribuição;
- fios ou cabos de fases e neutro não muito próximos entre si;
- grandes comprimentos de fiação, justamente por se tratar de um sistema para distribuição de energia.

Compreende-se, assim, porque nos circuitos de alimentação CA são geralmente introduzidas tensões interferentes de valor elevado, tanto do tipo diferencial como de modo comum.

Quanto à parcela de interferência de modo comum, esta pode ser eliminada através do uso de uma configuração de alimentação que permita uma ligação ao plano de referência, isto é, à terra ou ao solo. Um exemplo disso é a configuração de alimentação trifásica em estrela com neutro aterrado junto ao ponto de consumo (prédio em consideração). Como já analisado anteriormente, esta configuração elimina as induções de modo comum.

Entretanto, um cuidado especial deve ser observado quanto ao aterramento do neutro da alimentação CA, pois este deve ser feito em apenas um ponto, desde o início de seu trajeto, a partir da bucha de neutro do secundário do transformador da rede que alimenta o prédio, onde estão instalados os equipamentos. Isso pode ser resumido nas seguintes recomendações:

#### 3.3.4.1- O neutro do sistema de alimentação CA deverá ser aterrado em um único ponto.

O não atendimento a esse critério resulta em valores de tensões interferentes diferenciais de valores muito altos, introduzidas nos circuitos de alimentação CA, veiculadas à presença da impedância comum (do solo), conforme já explicado.

Como se tratam de tensões diferenciais, poderão ser medidas entre cada cabo de fase e o de neutro. Assim, em uma tomada de CA típica, de 127 volts, poderão ocorrer, transitoriamente, tensões de vários quilovolts, causando certamente danos aos equipamentos.

Esse tipo de interferência grave, via rede de alimentação CA, originado pelo múltiplo aterramento do neutro, é sem dúvida o fator isolado que mais contribui para a danificação de equipamentos eletrônicos alimentados pela rede, devido aos altos valores de sobretensão alcançados.

A ocorrência de múltiplo aterramento do neutro é comum devido aos critérios usuais de segurança de instalações elétricas.

Invariavelmente, por razões de proteção, é norma da concessionária de energia elétrica prover o aterramento do neutro junto ao secundário do transformador de alimentação da rede. Por outro lado, é norma de instalação prover o aterramento do neutro junto a cada entrada de alimentação CA predial, como medida de segurança contra possíveis choques elétricos causados por potenciais transferidos via cabo de neutro e para permitir a atuação de dispositivos de proteção (fusíveis, disjuntores, etc.), na ocorrência de algum curto-circuito para a terra.

Ambos os procedimentos têm justificativa válida, porém, em conjunto, dão origem aos problemas relatados.

Frise-se que alguns tipos de providências, tal como o simples uso de dispositivos de supressão de sobretensões ligados entre cada fase e o neutro na entrada de alimentação CA do prédio, têm efeito apenas paliativo.

Isso se explica pelo fato de os transitórios de elevada amplitude e grande conteúdo de energia, consumirem rapidamente a vida útil dos dispositivos de supressão, provocando sua reposição frequente. Resultando, então, em altos custos operacionais e baixa confiabilidade.

A solução radical ou ideal seria a instalação do transformador de alimentação da rede junto à entrada de alimentação CA do prédio, de modo que um único aterramento do neutro abrangesse as duas finalidades indicadas anteriormente. O que é totalmente inviável.

Outra solução seria a instalação de um transformador de isolamento adicional, junto à entrada de alimentação CA do prédio, de modo que a isolação galvânica existente entre primário e secundário (um auto-transformador não serviria) interromperia ou separaria o duplo aterramento do neutro.

Isso traria uma vantagem extra para os dispositivos de supressão de sobretensões, pois a impedância adicional do transformador acrescentado (indutâncias de dispersão, resistência de enrolamentos, etc.) ajudaria a limitar as correntes drenadas pelos mesmos, prolongando sua vida útil.

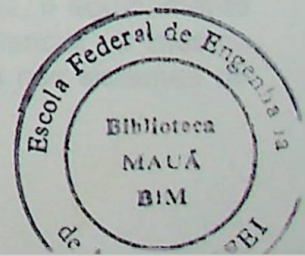
#### 3.3.4.2- A fiação dos circuitos eletrônicos deverá ser mantida o mais afastada possível em relação aos circuitos de alimentação CA da rede.

Esta recomendação deve-se ao fato de os cabos de alimentação CA poderem conduzir sinais interferentes de valor muito elevado. Esses cabos têm, então, condições de induzir tensões interferentes em outros de finalidade diversa, propiciadas pela proximidade e/ou pelo paralelismo em relação aos mesmos.

Um caso típico ocorre geralmente nas instalações que fazem uso de equipamentos de suprimento de energia ininterrupta ("no-break"). Como é de conhecimento geral, esse tipo de equipamento se caracteriza por prover em sua saída tensões de alimentação CA livres de transitórios, ruídos, instabilidade, etc. Para isso, tal equipamento drena energia a partir da rede de alimentação CA normal ou comum em sua entrada.

Entretanto, se não forem tomadas providências no sentido de não permitir a proximidade e/ou o paralelismo entre os seus cabos de entrada e de saída, parte do ruído de alta intensidade existente nos cabos de entrada, ligados à rede de alimentação CA normal, é transferida, por indução, para os seus cabos de saída, vindo a atingir e afetar os equipamentos consumidores, geralmente computadores e periféricos.

A constatação dessa ocorrência é muito frequente na prática, invalidando uma das principais finalidades de um sistema de alto custo.



### 3.3.5 Aterramento

O aterramento, se, por um lado, pode atuar como um componente essencial para minimização dos efeitos de interferência no sistema, por outro, pode servir justamente como agente de introdução de tais interferências no sistema, através do acoplamento condutivo, indutivo e capacitivo de seus eletrodos. Estes estão posicionados no solo e, portanto, expostos a vários fenômenos, que, eventualmente, ocorrem nesse meio. Assim, os eletrodos podem transmitir esses efeitos para o sistema, no qual o aterramento deveria desempenhar uma função de proteção.

Um outro aspecto a ser considerado sobre o aterramento é a ampla variedade de funções que se espera que ele desempenhe no sistema, conforme a aplicação em questão. Como exemplos podem ser citados: o aterramento para o sistema de alimentação, para os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, para minimizar os efeitos de interferência associados à irradiação na faixa de alta frequência, para descargas eletrostáticas, para o condutor de terra e, finalmente, para o terra de referência dos equipamentos sensíveis.

O principal problema relativo a tais funções é que as usuais restrições de projeto demandam que um único sistema de aterramento deva desempenhar várias dessas funções, simultaneamente. Apesar dessa união ser tecnicamente recomendável na maioria das aplicações, a complexidade e a dificuldade de análise do comportamento do sistema (quanto às possíveis ocorrências a que este pode ser submetido) são usualmente ampliadas por tal prática. Algumas vezes, não é possível ao aterramento desempenhar todas estas funções, pois algumas delas são conflitantes em determinadas situações.

Conforme análise apresentada em [12], para o desempenho destas funções, três filosofias principais foram concebidas e são usualmente implementadas na perspectiva de aplicação em engenharia.

- aterramento isolado;
- aterramento em ponto único; e
- aterramento com equipotencialização.

Os conceitos básicos associados a cada filosofia são considerados a seguir.

#### 3.3.5.1 Aterramento Isolado

Esta prática tem por finalidade evitar que distúrbios originados em equipamentos de potência interfiram no aterramento de equipamentos sensíveis. A presença de ruídos é reportada na literatura, com potenciais de magnitude entre 5V e 100V, para o aterramento de sistemas de alimentação de dimensões médias. O fluxo de correntes desbalanceadas ou parasitas (capacitivas ou indutivas) é a causa mais frequente desse ruído.

A idéia geral associada a este conceito corresponde ao isolamento entre diferentes sistemas de aterramento. No passado, tal conceito era largamente empregado, quando o aterramento de computadores e equipamentos eletrônicos era posicionado separadamente dos demais, para fins de se obter um terra de referência. Contudo, com as usuais restrições de dimensão para as áreas das instalações, é praticamente impossível evitar um significativo acoplamento condutivo entre os diferentes aterramentos e, assim, algumas ocorrências (como curtos-circuitos) podem originar valores de potencial apreciáveis nessa "referência de potencial". Nos casos em que é possível o posicionamento de tal aterramento a grandes distâncias dos demais, com uma real aproximação do terra remoto, os efeitos de eventuais descargas atmosféricas próximas ao aterramento ou ao equipamento devem ser avaliados. Nessas eventualidades, o equipamento sensível pode ser submetido a valores muito elevados de diferença de potencial. O mesmo raciocínio aplica-se ao caso de elevação de potencial devida a transitórios nos sistemas de

alta tensão próximos. Por outro lado, nas configurações constituídas por vários equipamentos sensíveis, conectados e distribuídos pela instalação, a prática de sua simples conexão direta aos terras locais pode originar loops de terra. Em caso de existência de diferenças de potencial entre as regiões onde tais aterramentos estão instalados, como aquelas referidas anteriormente, pode ocorrer o fluxo de correntes significativas nas blindagens dos cabos que conectam tais equipamentos e que não são projetadas para suportar tais correntes.

Atualmente, esta filosofia é raramente empregada. Entretanto, não é difícil encontrar aplicações em que as terminações de terra do sistema de proteção contra descargas atmosféricas são isoladas do sistema de aterramento restante. Nesses casos, uma prática possível é a conexão dos aterramentos, por meio de um conjunto de centelhadores (gaps). Para valores de tensão, entre os aterramentos, superiores a um determinado limite, ocorre a disrupção e os aterramentos tomam-se eletricamente conectados.

### 3.5.2 Aterramento por ponto único

Este conceito refere-se à ligação de todo o sistema através de uma única conexão à terra ou ao sistema de equipotencialização, sempre designado "Ponto Central de Aterramento". A filosofia deste conceito corresponde a se evitar o acoplamento de tensões causadas por interferências eletromagnéticas e que originam o fluxo de corrente através das blindagens dos cabos ou dos loops (elos) estabelecidos em relação às referências de terra.

Os condutores de ligação ao aterramento são isolados e colocados numa configuração radial. A partir do ponto central de aterramento (usualmente, o aterramento da subestação de força é a escolha preferida), deriva-se um condutor único isolado. Alguns ramos se originam desse condutor. Cada um deles dá origem a novos ramos isolados e assim por diante. Nenhum dos ramos pode ser conectado, para se assegurar a implementação de uma configuração radial sem a presença de nenhum loop.

Teoricamente, este tipo de sistema apresenta um desempenho muito satisfatório com respeito à ocorrência de descargas atmosféricas, curtos-circuitos e transitórios nos equipamentos de alta tensão. As interferências associadas aos ruídos de baixa frequência são, também, praticamente eliminadas. Devido ao aterramento em ponto único e à ligação radial do cabo de aterramento, em caso de elevação de potencial associada a tais ocorrências, todo o sistema é submetido à mesma condição (flutua no mesmo potencial) e as diferenças de potencial são desprezíveis.

Contudo, nas condições práticas de aplicação, alguns problemas podem ser detectados. Primeiramente, é extremamente difícil assegurar a integridade da filosofia, que demanda a completa isolamento das partes metálicas do sistema. Principalmente para sistema elétricos ou eletrônicos de maior extensão, é muito comum encontrarem-se conexões não propositais para a terra, como resultados de falha no isolamento, tanto com valores elevados quanto baixos de impedância. Estas podem originar distúrbios, quando se verificam as ocorrências citadas. A eliminação desses caminhos de fuga de corrente para a terra requer uma atividade periódica de busca e se constitui em tarefa técnica complicada.

Outro ponto refere-se ao fato de que a configuração radial usualmente implica uma longa extensão de condutores e, assim, torna o sistema mais susceptível à interferência eletromagnética. Diferenças de potencial significativas podem ocorrer entre o sistema e outras instalações elétricas e metálicas, principalmente o sistema de equipotencialização. Esta filosofia tenta oferecer, para cada parte do sistema, um caminho paralelo e de impedância desprezível em direção à terra, por meio de ligações metálicas (com valor muito reduzido de resistência elétrica) ao ponto central de aterramento. Essas partes são também conectadas à terra por algum tipo de acoplamento parasita (usualmente condutivo ou capacitivo). Para ocorrência cujas frequências representativas têm valor reduzido, a impedância associada a tal acoplamento é usualmente muito elevada em comparação com a impedância dos condutores de ligação ao aterramento, e a filosofia funciona com muita efetividade. Mas, para ocorrências cujas frequências representativas são elevadas (como descargas atmosféricas), a filosofia não

é efetiva. Nesses casos, deve-se considerar que a impedância associada ao acoplamento capacitivo para a terra é consideravelmente diminuída, e que a impedância dos condutores de ligação ao aterramento cresce substancialmente, pois esta se torna predominantemente indutiva.

Apesar desta prática ser amplamente empregada em substituição ao aterramento isolado, a aplicação da filosofia de aterramento com equipotencialização tem sido preferida, atualmente.

### 3.3.5.3 Aterramento com equipotencialização

A idéia básica associada a esta filosofia é que cada parte metálica e não energizada do sistema esteja ligada diretamente ao sistema de equipotencialização, através de um condutor com o menor percurso possível. Procura-se, assim, obterem-se valores muito reduzidos para a indutância e a resistência existentes nessa ligação. Assim, é possível evitar o aparecimento de diferenças de potencial significativas entre as partes elétricas do sistema, quando estas estão sujeitas a interferências eletromagnéticas. Isto determina a composição de uma configuração para o sistema de aterramento, geralmente constituída por vários aterramentos locais, sendo todos conectados. Quando equipamentos sensíveis estão presentes, a configuração dos aterramentos locais é usualmente projetada com malhas de reticulados de área reduzida. Os condutores de terra de todos esses equipamentos (bem como os seus dispositivos de proteção) são conectados ao reticulado, que atua como uma malha de terra de referência. Na aplicação dessa filosofia, cada componente metálico (e não energizado) do sistema é conectado à terminação de terra mais próxima. Mesmo as blindagens dos cabos são ligadas nas duas terminações, aos terra locais.

Através desta prática, os valores elevados das capacitâncias dos sistema, bem como os valores reduzidos das resistências e indutâncias, asseguram que os níveis de tensão induzida (por efeitos capacitivo, indutivo e condutivo) fiquem limitados a patamares aceitáveis. Adicionalmente, a prática generalizada de conectar todas as partes metálicas e instalações elétricas à terra, usualmente resulta em valores reduzidos para a impedância de aterramento [12].

As elevações de potencial originadas da injeção de correntes no solo, associadas a ocorrências internas, como curtos-circuitos, não alcançam valor elevado, devido ao valor reduzido da impedância de aterramento. O potencial se estende por todo o sistema, cujos aterramentos contribuem, dessa forma, para dissipação da corrente. O mesmo se aplica a correntes originadas no sistema devido a descargas atmosféricas, embora em outro patamar de valores. Por outro lado, os potenciais que estão presentes eventualmente no solo, devidos a ocorrências externas, como faltas em sistemas de alta tensão próximos ou descargas próximas, são transmitidos por todo o sistema de aterramento, impondo correntes elevadas aos condutores que conectam os terras locais. Nesse caso, se a filosofia foi aplicada corretamente, existirão tantas conexões elétricas entre os diferentes aterramentos locais que a densidade de corrente resultante nos muitos caminhos correspondentes não será capaz de causar danos aos condutores que promovem essas ligações.

A filosofia de aterramento por ponto único apresenta vantagens com respeito aos aspectos de segurança contra os distúrbios causados por faltas em equipamentos de alta tensão. Contudo, a usual existência de falhas no isolamento dos condutores de aterramento, nas condições de aplicação, reduzem tal vantagem. O melhor desempenho da filosofia de aterramento com equipotencialização, em termos do nível de imunidade a interferências eletromagnéticas, tem determinado a superioridade deste conceito nas atuais aplicações associadas a EMC.

### 3.3.6 Dispositivos de Blindagem

Neste item, serão apresentados os dispositivos de blindagem utilizados para reduzir o nível de interferência eletromagnética.

### 3.3.6.1 Radiação direta ao instrumento

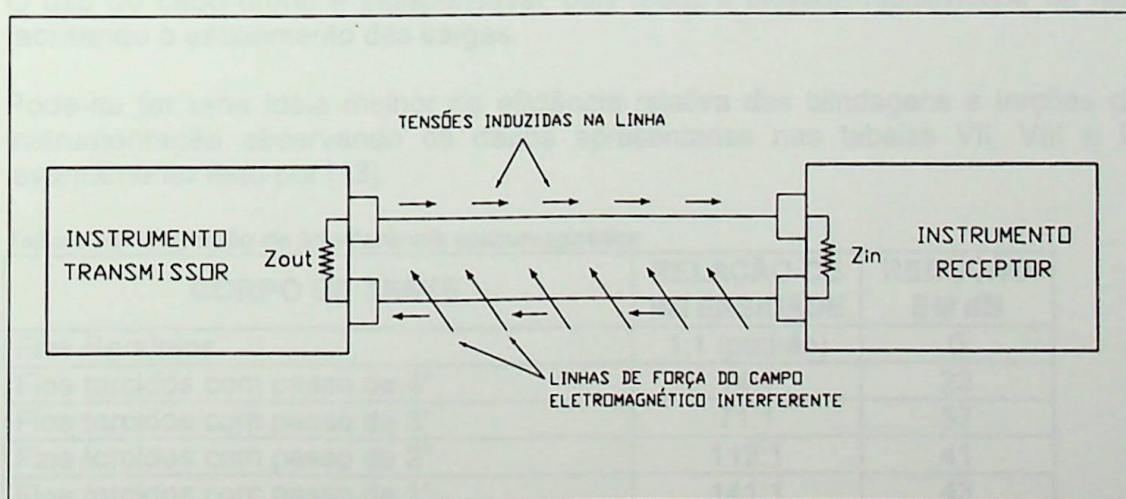
A radiação direta normalmente só é nociva quando o instrumento não é adequadamente blindado e existe uma fonte próxima de interferência, como por exemplo os transceptores portáteis ("WALKIE-TALKIES") comumente usados entre campo e sala de controle. Para eliminar esta radiação direta deve-se blindar e aterrar adequadamente o instrumento. A maneira mais prática de conseguir isto é fechar o instrumento em uma caixa metálica, aterrada e sem aberturas. A ausência de qualquer abertura é muito importante, pois um rasgo numa caixa metálica age como uma antena dipolo e, em frequência próximas a sua sintonia natural e/ou harmônicas, mesmo uma fina fenda, permite a entrada de rádio-frequência em quantidades elevadas. Um critério prático é dizer que "se a caixa metálica é a prova d'água, também é a prova de interferências".

Observe-se que este critério só é válido se se lembrar de que a "janela" de um indicador local (por exemplo) pode ser a prova d'água, mas, sendo de vidro (e não metálica), é uma grande abertura para a entrada de radiofrequência.

Há vários equipamentos projetados especialmente para trabalhar em locais sujeitos a elevados níveis de interferência, por exemplo, a maioria dos relés digitalizados.

### 3.3.6.2 Interferências nos Cabos

As tensões induzidas nos cabos de instrumentos, frequentemente localizados a distâncias comparativamente grandes das fontes de interferência, apresentam outra classe de problemas. Em se tratando de tensões induzidas, contra as quais as blindagens mais usualmente empregadas em cabos de instrumentos, que consistem de fitas de plástico metalizadas, são pouco ou nada eficientes. Para atenuar sensivelmente este tipo de interferência, há um recurso bastante simples e eficiente, que é a torção dos pares de fios que carregam um mesmo sinal. Isto faz com que as tensões induzidas nas duas pernas do par tendam a se cancelar mutuamente, conforme mostram as figuras 14 e 15. Na verdade o que se faz é reduzir o acoplamento magnético entre os condutores.



**Fig. 14 - Um cabo com condutores paralelos que age como uma espira fechada, terminada por  $Z_{out}$  e  $Z_{in}$  dos instrumentos de malha. Nesta "espira" induz-se uma tensão de interferência proporcional ao campo interferente, à área da "espira" exposta ao mesmo, e em função das impedâncias  $Z_{in}$  e  $Z_{out}$ .**

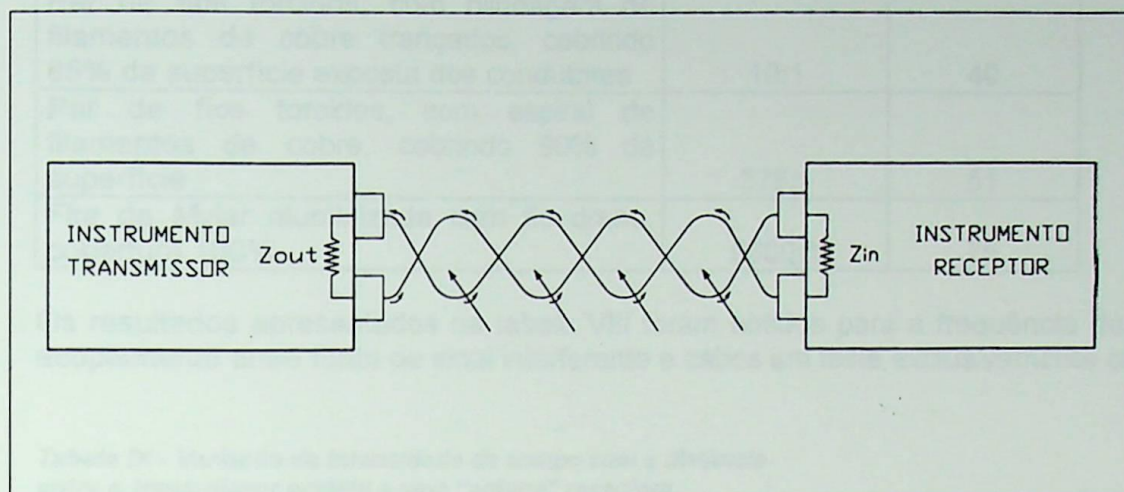


Fig. 15 - Em um cabo com condutores torcidos, a tensão induzida em cada semi-torção opõe-se à tensão induzida na semi-torção adjacente, cancelando-a.

Outra forma de reduzir os acoplamentos eletromagnéticos é usar uma blindagem eletromagnética (Cabo coaxial, eletrodutos, etc.).

A blindagem eletrostática (fita plástica metalizada, recobrimdo os pares e/ou cabo) só é eficiente contra a interferência eletrostática, pois sua relutância, relativamente alta, não consegue "curtocircuitar" eficientemente o campo magnético interferente. Por este motivo os cabos de instrumentação costumam ter seus pares trançados (contra interferência eletromagnética) e blindagem eletrostática (bastante mais barata do que blindagem eletromagnética, e bem eficiente contra interferência eletrostática).

A blindagem eletrostática usualmente tem um condutor nu (dreno) encostado em toda sua extensão, na face metalizada da fita plástica, para garantir sua continuidade e drenar para a terra as tensões eletrostáticas capacitivamente acopladas ao cabo.

O uso do cabo dreno é indispensável, pois reduz a elevada resistividade da fita metalizada, facilitando o escoamento das cargas.

Pode-se ter uma idéia melhor da eficiência relativa das blindagens e torções dos cabos de instrumentação observando os dados apresentados nas tabelas VII, VIII e IX, conforme levantamento feito por [13].

Tabela VII - Rejeição de interferência eletromagnética

CORPO DE TESTE	RELAÇÃO DE INTENSIDADE	REDUÇÃO EM dB
Fios Paralelos	1:1 (padrão)	0
Fios torcidos com passo de 4"	14:1	23
Fios torcidos com passo de 3"	71:1	37
Fios torcidos com passo de 2"	112:1	41
Fios torcidos com passo de 1"	141:1	43
Fios paralelos em eletroduto de aço de 1" Ø	22:1	27

Observe-se, na tabela VII, que a simples torção do par com passo de 3" já é sensivelmente mais eficiente do que um eletroduto de aço, como blindagem eletromagnética.

Usualmente os cabos para instrumentação têm seus pares torcidos com passos 1 a 2 1/2 polegadas.

**Tabela VIII - Rejeição de interferência eletrostática**

CORPO DE TESTE	RELAÇÃO DE INTENSIDADE	REDUÇÃO EM dB
Fios Paralelos (padrão)	1:1	0
Par de fios torcidos, com blindagem de filamentos de cobre trançados, cobrindo 85% da superfície exposta dos condutores	10:1	40
Par de fios torcidos, com espiral de filamentos de cobre, cobrindo 90% da superfície	375:1	51
Fita de Mylar aluminizada com fio dreno, cobertura 100%	6600:1	76

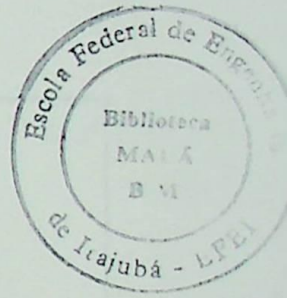
Os resultados apresentados na tabela VIII foram obtidos para a frequência de teste 1 kHz e acoplamento entre fonte de sinal interferente e cabos em teste exclusivamente capacitivo.

**Tabela IX - Variação da intensidade de campo com a distância entre o transmissor portátil e uma "antena" receptora.**

DISTÂNCIA (metros)	INTENSIDADE DE CAMPO (V/m)
2	1,23
1	4,1
0,5	6,4
0,3	7,0
0,15	10,0

Os instrumentos utilizados nos testes inerentes a tabela IX foram:

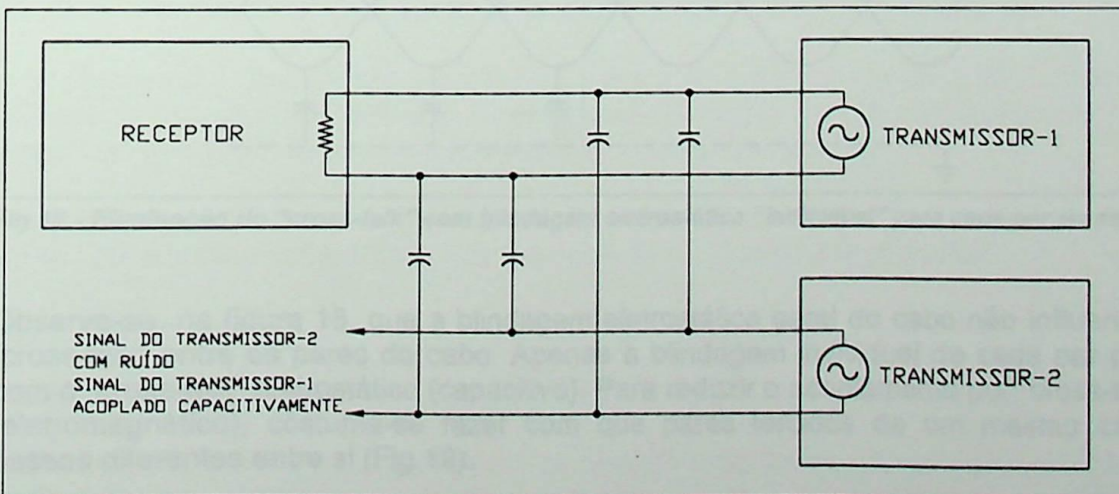
- Transmissor: Motorola HT 220 (UHF-1W-451 Mhz)
- "Antena": Dipolo sintonizada e Analisador de espectro HP 141 T



**3.3.6.3 Ruído por "cross talk"**

Quando, entre duas ou mais linhas de sinal, há um acoplamento indutivo ou capacitivo, o sinal de uma das linhas aparece atenuado na outra. (Fig.16).

A este modo de geração de ruído se chama "cross-talk".



**Fig.16 - Ruído em "cross-talk"**

Para reduzir o "cross-talk", (fundamentalmente, por campo eletrostático e acoplamento capacitivo) além da blindagem eletrostática, dão-se passos diferentes aos pares de fios do mesmo cabo (Fig. 17, 18 e 19).

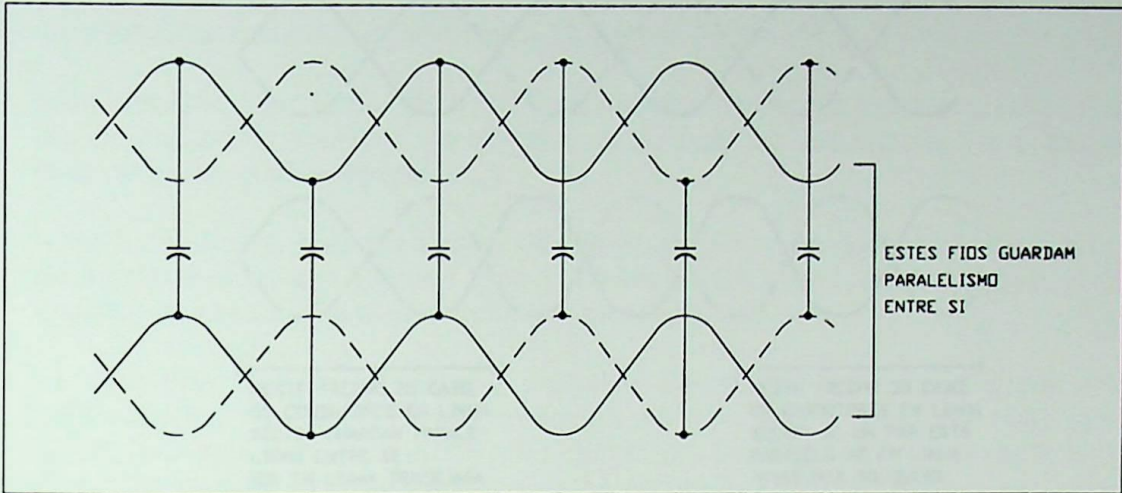


Fig.17 - "cross-talk" entre pares torcidos

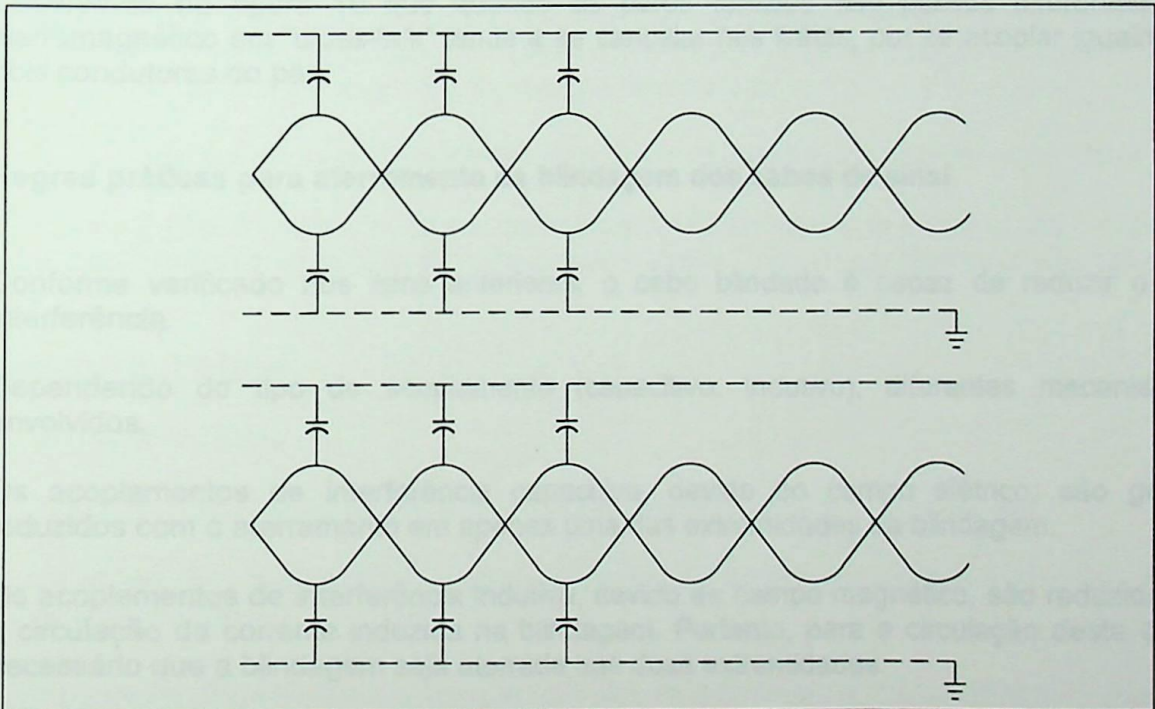
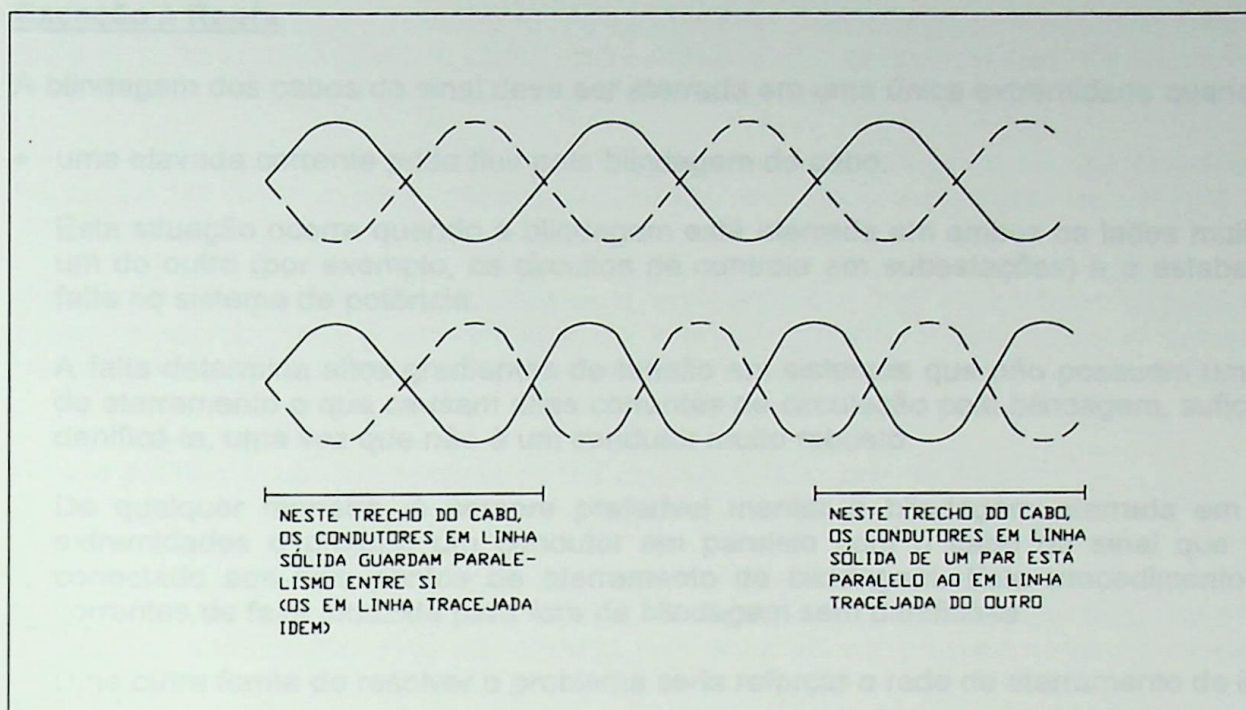


Fig.18 - Eliminação do "cross-talk" com blindagem eletrostática "individual" para cada par do cabo

Observe-se, na figura 18, que a blindagem eletrostática geral do cabo não influencia no ruído "cross-talk" entre os pares do cabo. Apenas a blindagem individual de cada par pode acabar com o "cross-talk" eletrostático (capacitivo). Para reduzir o acoplamento por "cross-talk" indutivo (eletromagnético), costuma-se fazer com que pares torcidos de um mesmo cabo tenham passos diferentes entre si (Fig.19).



**Fig.19 - Redução do acoplamento por "cross-talk" indutivo**

Observa-se na figura 19 que quando os pares torcidos têm passos diferentes, o ruído eletromagnético em "cross-talk" tende a se cancelar nas linhas, por se acoplar igualmente aos dois condutores do par.

#### 1.3.6.4 Regras práticas para aterramento da blindagem dos cabos de sinal

Conforme verificado nos itens anteriores, o cabo blindado é capaz de reduzir o nível de interferência.

Dependendo do tipo de acoplamento (capacitivo, indutivo), diferentes mecanismos são envolvidos.

Os acoplamentos de interferência capacitiva, devido ao campo elétrico, são geralmente reduzidos com o aterramento em apenas uma das extremidades da blindagem.

Os acoplamentos de interferência indutiva, devido ao campo magnético, são reduzidos graças à circulação da corrente induzida na blindagem. Portanto, para a circulação desta corrente é necessário que a blindagem seja aterrada nas duas extremidades.

Com objetivo de reduzir as tensões interferentes de baixa e alta frequência, as seguintes regras práticas para aterramento dos cabos de sinal poderão ser utilizadas:

##### **Regra Básica**

A blindagem dos cabos de sinal devem ser aterradas em ambas extremidades.

Este é o melhor caminho para reduzir os distúrbios de modo comum, particularmente os de média e alta frequência.

Para as baixas frequências, o fator de redução é significativo se a blindagem é constituída por materiais magnéticos (aço, permalói, ferrite).

### **Exceção à Regra**

A blindagem dos cabos de sinal deve ser aterrada em uma única extremidade quando:

- uma elevada corrente pode fluir pela blindagem do cabo.

Esta situação ocorre quando a blindagem está aterrada em ambos os lados muito distantes um do outro (por exemplo, os circuitos de controle em subestações) e é estabelecida uma falta no sistema de potência.

A falta determina altos gradientes de tensão em sistemas que não possuem uma boa rede de aterramento e que causam altas correntes de circulação pela blindagem, suficientes para danificá-la, uma vez que não é um condutor muito robusto.

De qualquer maneira, é sempre preferível manter a blindagem aterrada em ambas as extremidades e projetar um condutor em paralelo com o cabo de sinal que deverá ser conectado aos dois pontos de aterramento da blindagem. Este procedimento desvia as correntes de falta induzida para fora da blindagem sem danificá-la.

Uma outra forma de resolver o problema seria reforçar a rede de aterramento da instalação;

- o circuito é usado para transmissão de baixa frequência, baixo nível de sinais e apresenta grandes desequilíbrios (por exemplos: par térmico, PT100,...).

Neste caso, a blindagem deverá ser aterrada na extremidade em que a interferência for elevada ou no lado em que o circuito é aterrado. Todos os circuitos, incluindo os cabos blindados devem ser aterrados na mesma extremidade.

Se isto não for possível é necessário usar barreira galvânica (transformador, filtros).

Para um circuito longo, pode ser melhor aterrar a blindagem na extremidade onde se deseja a maior redução da tensão diferencial (por exemplo, lado do equipamento eletrônico).

### **Regras Particulares**

#### **a) Blindagem Dupla**

É, algumas vezes, possível combinarem-se as regras anteriores utilizando-se:

- ou cabos de blindagem dupla em que somente a blindagem externa é aterrada em ambas as extremidades.
- ou uma blindagem simples em que uma das extremidades é diretamente aterrada e a outra é aterrada através de um capacitor (prevenir circulação de correntes de baixas frequências) ou através de uma proteção contra sobretensão (permitir somente a circulação, pela blindagem, de correntes de descargas atmosféricas ou de falta).

#### **b) Circuitos Coaxiais**

Cabos coaxiais são cabos blindados nos quais a blindagem é usada de caminho de retorno para o sinal.

As regras acima deverão ser aplicadas também para este tipo de cabo, o que significa que a sua blindagem deverá ser aterrada em uma única extremidade.

Contudo, um lay-out coaxial multiaterrado é, geralmente, usado, para transportar sinais de alta frequência de equipamentos que têm uma razoável insensibilidade a interferências de LF e HF. Este é o caso particular de rádio microondas onde as frequências de trabalho são muito maiores que o espectro de frequência de interferência.

Este lay-out é também largamente empregado para sinais digitais de alta velocidade, quando as distâncias forem curtas (uns poucos metros) e quando a extensão da rede de aterramento for garantida.

Para conexões com grandes distâncias e, em particular, para conexões envolvendo diferentes redes de aterramento, é conveniente não aterrar a blindagem em ambas as extremidades, ou então, conforme descrito anteriormente, instalar um condutor de terra em paralelo.

#### **3.3.6.5 Regra prática para aterramento da blindagem dos cabos de força**

A blindagem dos cabos de força deve ser aterrada em cada extremidade, quando se quiser atender ao aspecto de segurança. Porém, nos casos em que a corrente induzida na blindagem é elevada, este critério deve ser evitado, sob pena de comprometimento da integridade física do cabo.

### **3.4 Conclusões**

Acredita-se ter abrangido sucintamente, neste capítulo, as principais fontes de ruídos e seus acoplamentos, bem como os critérios de instalação necessários à redução das tensões interferentes.

Em uma época em que é crescente a quantidade de implantações de sistemas cada vez mais sofisticados, considera-se de suma importância o estabelecimento e o aprimoramento de critérios básicos de instalação como os aqui relatados.

Com respeito à ocorrência a ser analisada no Capítulo IV poder-se-á concluir que o problema vivido pela siderúrgica poderia ter sido evitado caso a instalação estivesse adequada a alguns dos critérios apresentados neste capítulo.

## CAPÍTULO IV

### O PROBLEMA VIVIDO POR UMA GRANDE EMPRESA

#### 1 Introdução

Tempos atrás, houve uma ocorrência de operação do relé de proteção diferencial da barra B do switchgear nº 5, que alimenta parte das cargas do laminador de tiras a quente (LTQ) de uma grande empresa siderúrgica.

A equipe de manutenção, que foi logo acionada, executou as seguintes atividades:

- teste de isolamento na barra e nas conexões do circuito de proteção diferencial;
- loop-trip test no referido circuito;
- aferição dos relés.

Os resultados dos testes não apresentaram anormalidades que pudessem ter provocado a operação da proteção.

Com o LTQ parado por um tempo relativamente alto, o que significava um grande prejuízo, a empresa achou por bem retirar de operação a proteção diferencial e encaminhar a solução do problema de uma maneira mais segura. Desta forma, uma consultoria externa foi contratada para elaborar um diagnóstico do referido sistema de proteção.

Neste capítulo, será apresentado um resumo de todo serviço realizado pela empresa de engenharia, destacando-se a análise detalhada da hipótese que, provavelmente, tenha ocasionado o problema.

#### 2 Relato das Ocorrências

Durante a fase de coleta de dados e consultas dos relatórios de ocorrências do setor de manutenção da siderúrgica, pode-se levantar as seguintes informações:

- O relé que operou foi o da fase C que promoveu a abertura dos disjuntores de alimentação da barra B.
- Não houve registro informando qual das unidades do relé que operou, a de tensão ou a de corrente.

O turno que fazia a operação do sistema informou que houve muita pressa para restabelecer o sistema e o operador que rearmou a sinalização do relé não quis registrar no livro de ocorrência por se sentir inseguro da informação.

Posteriormente, foi feita uma entrevista informal com o referido operador e o mesmo se sentiu a vontade para dizer que tinha "quase certeza" de que a unidade que operou foi a de corrente.

- No dia do desligamento chovia muito forte e observaram-se várias ocorrências de descargas atmosféricas nas imediações.

- Executaram-se os testes já descritos no item anterior e não se constataram anormalidades.

De posse das informações acima, foi traçada a seguinte metodologia para a execução dos serviços:

- em uma primeira etapa seriam executados testes e análises de forma a determinar o comportamento do sistema diferencial em “regime permanente”;
- caso não fossem detectadas anormalidades do sistema diferencial para operação em regime permanente, deveriam ser realizados os estudos para determinação do comportamento do referido sistema em regime transitório.

Após o início dos trabalhos, houve uma ocorrência que chamou muita atenção: um técnico da siderúrgica observou a existência de faiscamento entre as blindagens dos cabos alimentadores (Fase C) do SWG-5, no lado da subestação que alimenta o sistema do LTQ (Painel B422). Nesta condição, a blindagem passou a estar aterrada em ambas as extremidades, contrariando a norma da empresa de sempre manter um único aterramento rígido no lado da carga.

As análises subsequentes mostrarão porque este fato teve a maior relevância para a condução da solução do problema.

### 4.3 Testes Executados

Com vistas a cumprir a primeira etapa dos serviços, foram executados os ensaios, medições e registros necessários para as análises do comportamento do sistema diferencial em regime permanente.

A malha diferencial da barra B é composta por transformadores de corrente inerentes a dois circuitos fontes (cubículo de entrada B544, cubículo TIE B536) e a oito circuitos alimentadores, conforme mostra o desenho da figura 20.

A seguir, apresentam-se os testes e verificações executadas no campo.

#### 4.3.1 Medição das Correntes existentes dos Circuitos da Proteção Diferencial

Com o sistema em operação normal foram medidas as correntes de cada circuito da malha da proteção diferencial.

As medidas foram executadas antes da programação de parada do barramento e teve como objetivo identificar possíveis defeitos nos TC's, nas conexões dos circuitos, ou erros de ligação no fechamento dos circuitos.

A Tabela X apresenta os valores obtidos nas medições em referência.

**Tabela X - Resultados das Medições de Corrente Secundária dos TC's**

CIRCUITOS	FASES		
	R(A)	S(A)	T(A)
B536 (INT A/B)	1,8	1,8	1,8
B537 (ALIM.)	*	*	*
B538 (ALIM.)	*	*	*
B539 (ALIM.)	0,2	0,2	0,2
B540 (ALIM.)	0,6	0,6	0,6
B541 (ALIM.)	0,8	0,8	0,8
B542 (ALIM.)	0,5	0,5	0,5
B543 (ALIM.)	0,9	0,8	0,8
B544 (ENTRADA)	1,2	1,2	1,2
B545 (INT B/C)	2,0	1,9	1,2

\* Em função do baixo valor da carga no circuito não foi possível obter leitura.

#### 4.3.2 Medição dos Sinais de Corrente e Tensão Fornecidos aos Relés

Nas mesmas condições operacionais em que foram realizados os testes mencionados no item anterior e com o mesmo objetivo, mediram-se, nos bornes de entrada do relé, os valores de tensão e corrente fornecidos ao mesmo.

A Tabela XI apresenta os valores obtidos nas medidas antes da manutenção no circuito e a Tabela XII os valores medidos após a correção do erro de ligação detectado conforme mencionado no item 4.3.8.

**Tabela XI - Níveis de Sinal no relé antes da manutenção**

FASE	R	S	T
mV	500	200	750
mA	4,2	1,0	4,3

**Tabela XII - Níveis de Sinal no relé após a manutenção**

FASE	R	S	T
mV	0,5/180 **	0,4/180 *	0,4/180 *
mA	0,7	1,5	0,9

\* Medições realizadas em dias diferentes

### 4.3.3 Testes e Verificações no Circuito de Corrente

Com o sistema desenergizado, foram executados os seguintes testes e verificações no circuito de corrente:

- continuidade;
- verificação da sequência de fases;
- conformidade do grupo de ligações existente, com o especificado no projeto;
- verificação do estado das conexões do circuito de corrente.

### 4.3.4 Medição da Resistência Ôhmica dos Circuitos

A resistência ôhmica medida envolvendo o transformador de corrente e os cabos até a régua de bornes do cubículo é de 0,8 ( $\Omega$ ).

### 4.3.5 Teste dos Transformadores de Corrente

Para avaliar as condições dos TC's, foram executados os ensaios relacionados abaixo, cujos resultados foram registrados em formulários próprios.

- levantamento da curva de excitação (saturação);
- verificação da relação;
- polaridade;
- grupo de ligações.

### 4.3.6 Levantamento dos Níveis Operacionais do Relé Diferencial

Os relés das três fases foram ensaiados com o objetivo de levantarem-se os valores de atuação, conforme mostra a tabela XIII.

**Tabela XIII - Níveis Operacionais do Relé**

DADOS DE PLACA				
FABRICANTE: WESTINGHOUSE				
TIPO: KAB				
OVER VOLTAGE UNIT.: 75-300 V				
OVER CURRENT UNIT.: 3-48 A				
I <sub>o</sub> : 0,2/2,0 A				
FREQUÊNCIA: 60 Hz				
Over Voltage Unit			Over Current Unit	
FASE	V.OPER.	I.OPER.	FASE	I.OPER.
R	75 V	29,4 mA	R	1,5 A
S	75 V	29,4 mA	S	1,5 A
T	73 V	27,5 mA	T	1,4 A

Também foi testado o dispositivo limitador de tensão ("Resistor Thyrite") instalado em série com a unidade de corrente. Verificou-se que o mesmo está operando conforme suas características.

#### 4.3.7 Medição dos Níveis de Harmônicos existentes no Circuito da Proteção Diferencial

Com o auxílio de um analisador espectral foram executadas medições com a finalidade de se verificar o conteúdo harmônico presente na malha diferencial.

Com o analisador conectado aos terminais do relé, foram feitas duas medições e os resultados estão apresentados nas tabelas XIV e XV.

**TABELA XIV - Somatório de todas as correntes secundárias menos a do TC Fonte - Cubículo B544**

ORDEM Nº	1	4	5	7	9	11	13	14	15	20	21	23	35
MÓDULO (% FUND.)	100	0,2	0,3	0,4	0,3	0,7	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2
ÂNGULO (GR.)	+1,6	+200	+144	+242	+15	+306	+290	+345	+45	+256	+308	+262	+239
FUNDAMENTAL	2,6 A												
DISTORÇÃO TOTAL	1,4%												

**TABELA XV - Corrente Secundária do TC Fonte - Cubículo B544**

ORDEM Nº	1	3	5	7	11	13	19	23	25
MÓDULO (% FUND.)	100	0,5	2,6	0,2	0,4	0,2	0,2	0,4	0,3
ÂNGULO (GR.)	+358	+308	+12	+14	+216	+163	+101	+46	+17,3
FUNDAMENTAL	1,2 A								
DISTORÇÃO TOTAL	2,8%								

#### 4.3.8 Resumo das Anormalidades Encontradas

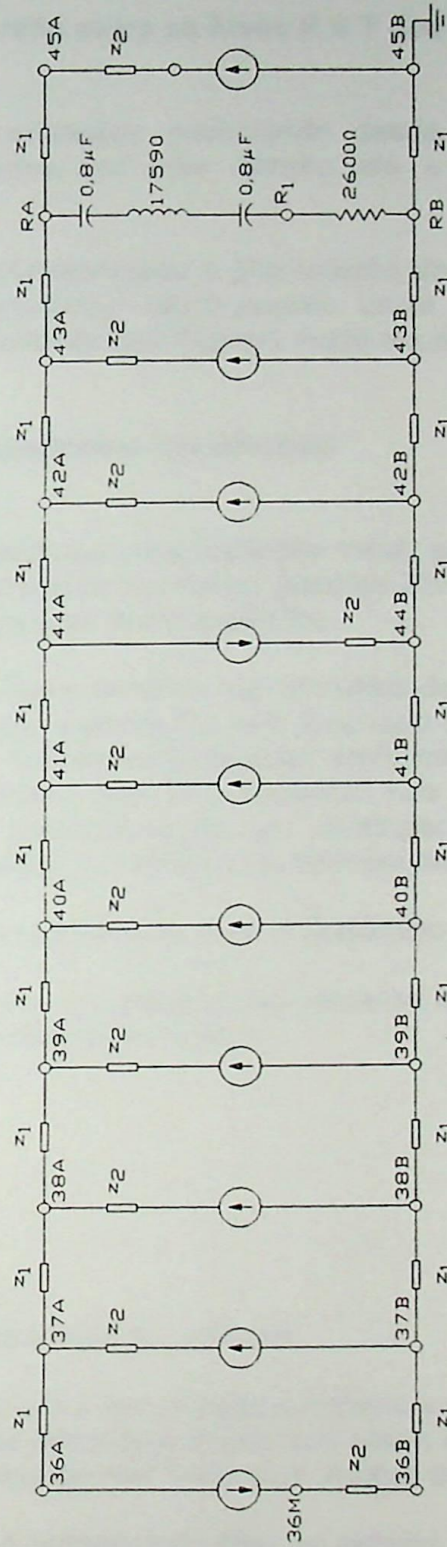
Durante a fase de testes encontraram-se as seguintes anormalidades:

- na execução do testes e verificações no circuito de corrente do cubículo B537, foi identificado inversão entre as fases R e T;
- dos resultados obtidos nos ensaios dos transformadores de corrente, verificou-se que os TC's do cubículo B545 apresentaram uma curva de saturação diferente dos demais, estes TC's saturam para valores menores de tensão;
- a malha de proteção diferencial da barra B não atende à recomendação do fabricante quanto ao aspecto do ponto de junção. Este ponto deve estar equidistante de todos os TC's, de maneira a reduzir a influência das impedâncias dos circuitos (Apêndice 1);

Conforme se pode observar na figura 20, a referida malha tem seu início no cubículo B536 e vai se formando no sentido longitudinal até o seu fechamento que é feito no cubículo B545, no qual os relés estão instalados.

#### 4.4 Análises do Comportamento do Sistema Diferencial no Estado de Regime Permanente

A partir dos resultados apresentados no item anterior foram feitas as análises do comportamento do sistema de proteção diferencial em estado de regime permanente. Para essas análises utilizou-se do programa Microtran para cálculos de transitórios eletromagnéticos. A malha diferencial foi modelada, conforme mostra a figura 20.



Observações:  
 $z_1 = 0,0001 + j377 \times 0,0027 \langle 0 \rangle$   
 $z_2 = 0,8000 + j377 \times 0,0078 \langle 0 \rangle$

Fig. 20 - Modelagem do Sistema para Análise em Regime permanente

Os transformadores de corrente foram representados por fontes de corrente ideais conectadas às resistências secundárias incluindo as dos cabos. Essas fontes têm as mesmas polaridades dos TC's. A carga do relé foi representada pela impedância da bobina de tensão conectada em série com um circuito ressonante sintonizado para a frequência fundamental.

Foram simulados alguns casos considerando as hipóteses a seguir.

#### 4.4.1 Atuação da proteção devido a inversão entre as fases R e T dos TC's do Cubículo B537.

Nesta condição, foram analisadas situações envolvendo desde a corrente de carga dos transformadores auxiliares alimentados por este circuito até a correspondente  $I_{inrush}$  dos mesmos.

A carga baixa deste circuito (250 kVA) associado à alta relação do TC (600) determinou, para todos os casos, uma corrente secundária relativamente baixa e, conseqüentemente, os módulos de tensão obtidos nos terminais do relé ficaram muito aquém do valor ajustado.

#### 4.4.2 Atuação da proteção devido a componentes harmônicos

Para análise desta hipótese, considerou-se uma condição irreal, porém conservativa, na qual os harmônicos de mesma ordem presentes na malha (tabelas XIV e XV) estariam em fase e com isso a totalização seria através de uma soma algébrica.

Com o objetivo de se obterem as maiores tensões nos terminais do relé, as harmônicas foram injetadas na malha através do TC mais distante do relé (Cubículo B536). Também neste caso agiu-se conservativamente, pois as harmônicas medidas eram na verdade uma composição fasorial de todas as correntes inerentes aos TC's inseridos nos circuitos alimentadores de fontes de harmônica. No que, se tratando-se de um switchgear pertencente a um LTQ, praticamente em todos os circuitos existe a presença de harmônicos.

Para cada ordem harmônica foi criado um arquivo para o respectivo processamento.

A partir dos resultados obtidos em cada processamento, pode-se calcular a tensão harmônica resultante na bobina do relé conforme equação abaixo.

$$V_{EF} = \sqrt{\sum_{h=2}^n (V_{EFh})^2} \quad (4.1)$$

Onde:

h - Ordem harmônica

n - Maior harmônica considerada (37)

$V_{EFh}$  - Valor eficaz da componente harmônica de ordem h

Um valor relativamente pequeno de  $V_{EF}$  foi encontrado e mesmo superpondo-o à maior tensão de frequência fundamental, obtida nos processamentos dos casos inerentes a hipótese de erro no faseamento, a tensão final na bobina do relé ficou bem aquém da tensão de operação.

Tal resultado já era esperado devido à presença do filtro no circuito da bobina de tensão.



#### 4.4.3 Atuação da Proteção devido à curva de Saturação do TC do Cubículo B545.

Em termos de saturação, o TC do cubículo B545 apresentava uma condição pior em relação aos demais TC's da malha diferencial. Em regime permanente os TC's só podem saturar por corrente alternada e, para tanto, é necessário que correntes elevadas circulem na malha diferencial. Desta forma, pode-se descartar esta hipótese, pois as correntes circulantes na malha são relativamente pequenas e nunca levariam os TC's à saturação.

#### 4.4.4 Atuação da Proteção devido a Inexistência de um ponto de Junção equidistante dos TC's

A malha diferencial não possui este ponto e conseqüentemente as impedâncias vistas dos terminais de cada um dos TC's são diferentes, o que deve influenciar na condição de saturação dos mesmos. Esta hipótese também foi descartada, pois não tem sentido falar em saturação dos TC's na condição de regime permanente.

#### 4.4.5 Conclusão

A análise dos comentários acima permite concluir que as anormalidades encontradas na malha diferencial não poderiam causar a operação do relé.

Portanto, conforme já previsto, é recomendável dar prosseguimento aos estudos para determinação do comportamento do sistema de proteção diferencial em regime transitório.

### 4.5 Análises do Comportamento do Sistema Diferencial em Regime Transitório

Neste item, pretende-se apresentar as análises das hipóteses que poderiam ter provocado a operação do relé para as condições de regime transitório. Para tal serão apresentados os estudos dos transitórios inerentes a curto-circuito e os de origem atmosférica. Como ferramenta computacional, utilizou-se o programa Microtran para cálculos de transitórios eletromagnéticos.

#### 4.5.1 Análises de Transitórios de Curto-circuito

As análises aqui presentes tiveram como objetivos verificar:

- a influência da inversão de fases dos TC's do cubículo B537;
- a sensibilidade do relé para faltas internas e externas a zona de proteção.

Para facilitar a compreensão dos estudos, apresenta-se no apêndice 1 uma descrição sucinta do relé KAB, bem como o princípio de operação do sistema diferencial de um relé de alta impedância.

4.5.1.1 Modelagem do Sistema de Proteção Diferencial

A figura 25 mostra a modelagem do sistema de proteção diferencial para análise de transitórios de curto-circuito que é a mesma apresentada na figura 20, acrescentando-se a unidade de corrente do relé (IT) e a reatância de magnetização dos TC's referida ao secundário. A reatância de magnetização é simulada pelo programa Microtran através da conexão em paralelo de duas indutâncias lineares L1 e L2, conforme mostra a figura 21.

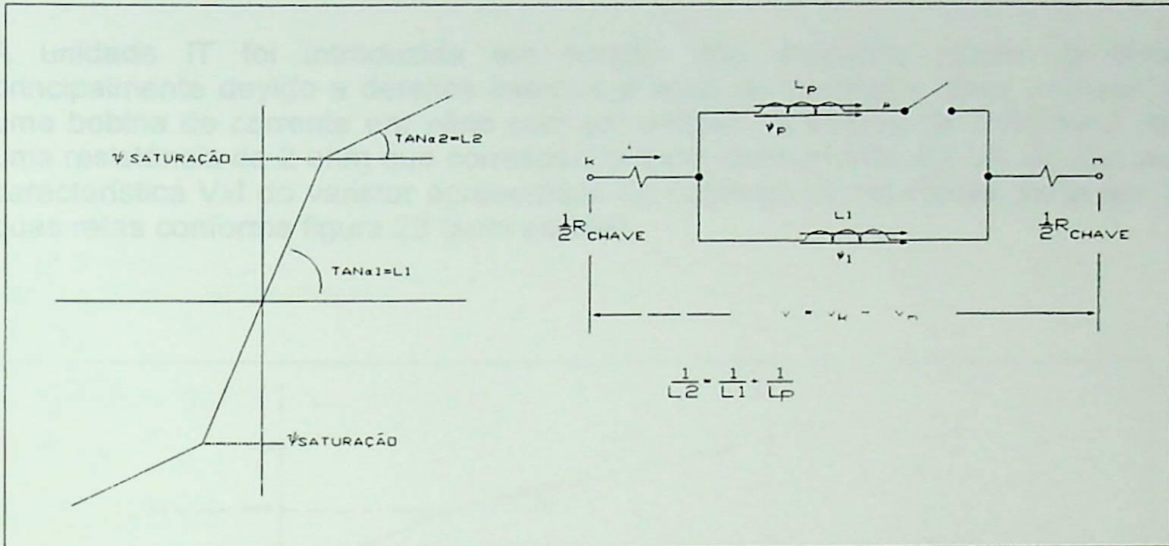


Fig. 21 - Representação da Indutância de Magnetização

A chave é aberta na condição de não saturação (L1) e fechada para a região de saturação do TC.

As indutâncias L1 e L2 e o fluxo de saturação dos TC's foram obtidos a partir dos resultados dos testes de levantamento da curva de saturação dos TC's. Para cada um dos TC's determinou-se a tensão correspondente ao fluxo de saturação e, a partir deste ponto, fez-se a linearização da curva de saturação, conforme mostra a figura 22.

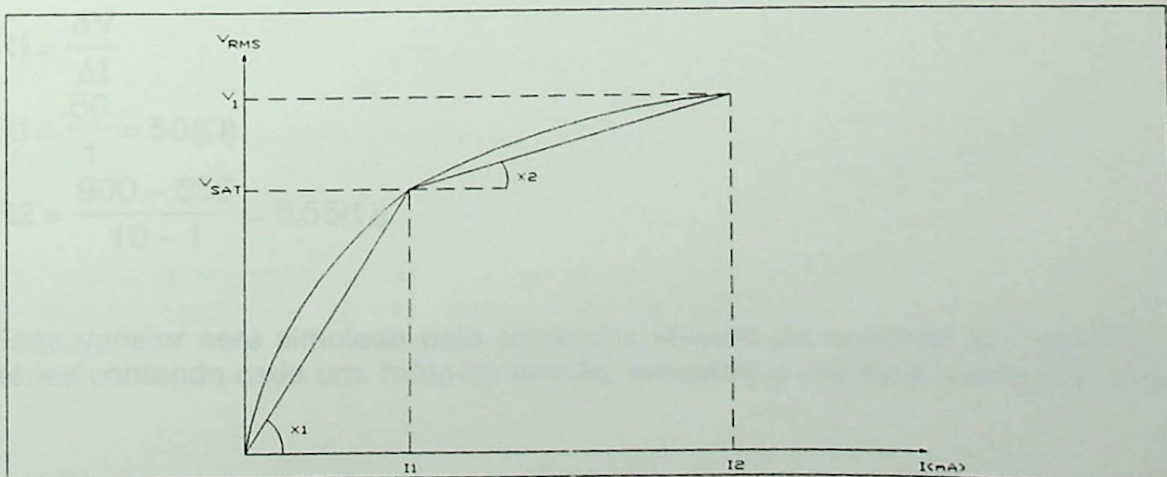


Fig. 22 - Curva de saturação do tc linearizada

O fluxo de saturação será:

$$\Psi_{sat} = \frac{V_{sat}}{\sqrt{2\pi f}} [V \times S] \tag{4.2}$$

$$X_1 = \frac{V_{sat}}{I_1} \times 10^3 (\Omega) \tag{4.3}$$

$$X_2 = \frac{V_1 - V_{sat}}{I_2 - I_1} \times 10^3 (\Omega) \tag{4.4}$$

A unidade IT foi introduzida em função dos elevados níveis de tensão esperados principalmente devido a defeitos internos à zona de proteção. Essa unidade é composta por uma bobina de corrente em série com um varistor. A bobina de corrente é representada por uma resistência de 2 ohm que corresponde a um consumo de 4,5 VA no Tap ajustado. A curva característica  $V_{xl}$  do varistor apresentada no catálogo do fabricante pode ser aproximada por duas retas conforme figura 23 (sem escala).

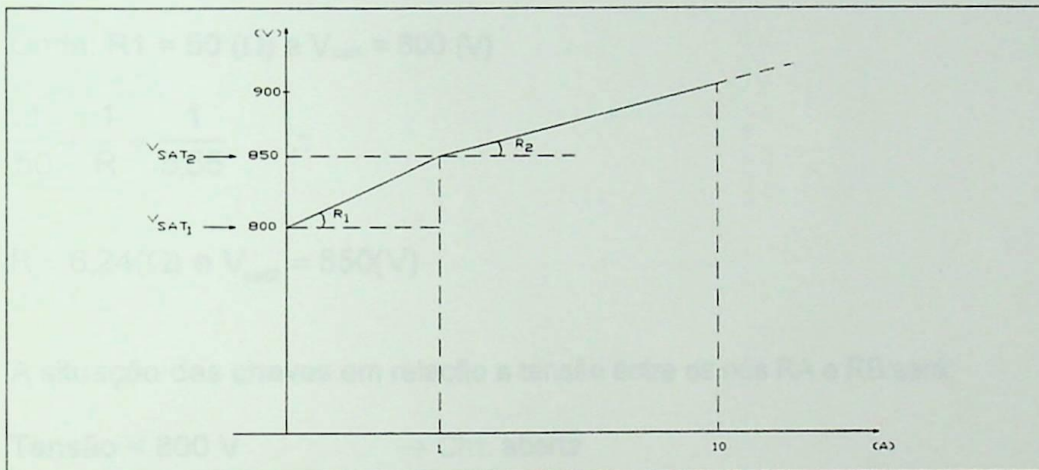


Fig. 23 - Aproximação da Curva característica do Varistor

Onde:

$$R1 = \frac{\Delta V}{\Delta I} \tag{4.5}$$

$$R1 = \frac{50}{1} = 50(\Omega)$$

$$R2 = \frac{900 - 850}{10 - 1} = 5,55(\Omega)$$

Esse varistor será simulado pelo programa através da conexão em paralelo de dois circuitos séries contendo cada um: fonte de tensão, resistência interna e chave (figura 24).

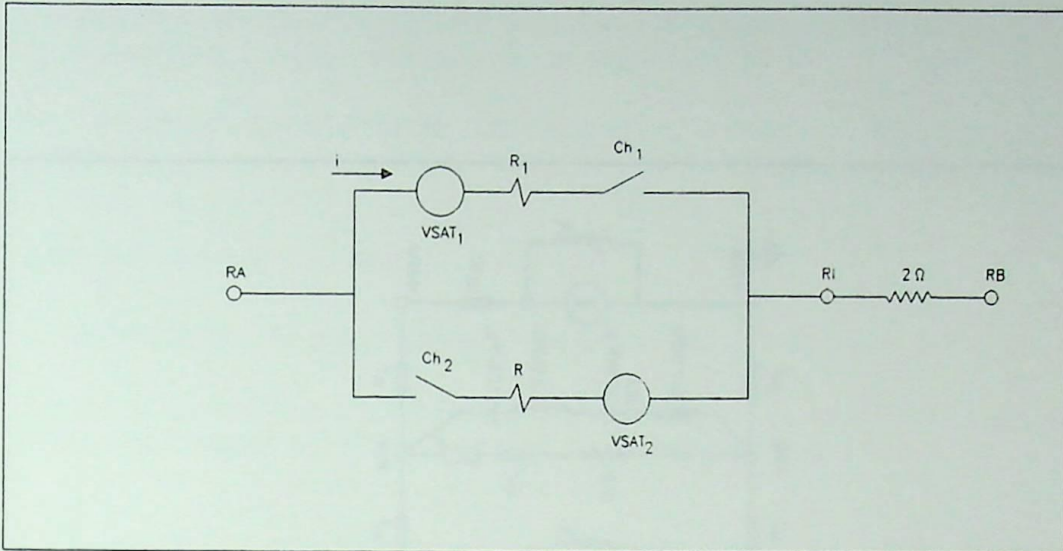


Fig. 24- Simulação do Varistor

Onde:  $R1 = 50 (\Omega)$  e  $V_{sat1} = 800 (V)$

$$\frac{1}{50} + \frac{1}{R} = \frac{1}{5,55} \quad \therefore$$

$R = 6,24(\Omega)$  e  $V_{sat2} = 850(V)$

A situação das chaves em relação a tensão entre os nós RA e RB será:

- Tensão < 800 V                    → Ch1: aberta  
    → Ch2: aberta
- 800 V < Tensão < 850 V    → Ch1: fechada  
    → Ch2: aberta
- Tensão > 850 V                    → Ch1: fechada  
    → Ch2: fechada

Finalmente, é importante observar na figura 25 os sentidos das setas representativas das fontes de correntes que estão de acordo com as marcações de polaridade dos TC's na condição normal de fluxo de carga do sistema.

Para as análises de curto-circuito os sentidos dessas setas vão depender do ponto em que se simulará a falta, pois alguns alimentadores irão dar a sua contribuição. Por exemplo, no caso de uma falta na barra B, desprezando-se as correntes de carga, o sentido das setas de todos os TC's será o mesmo.

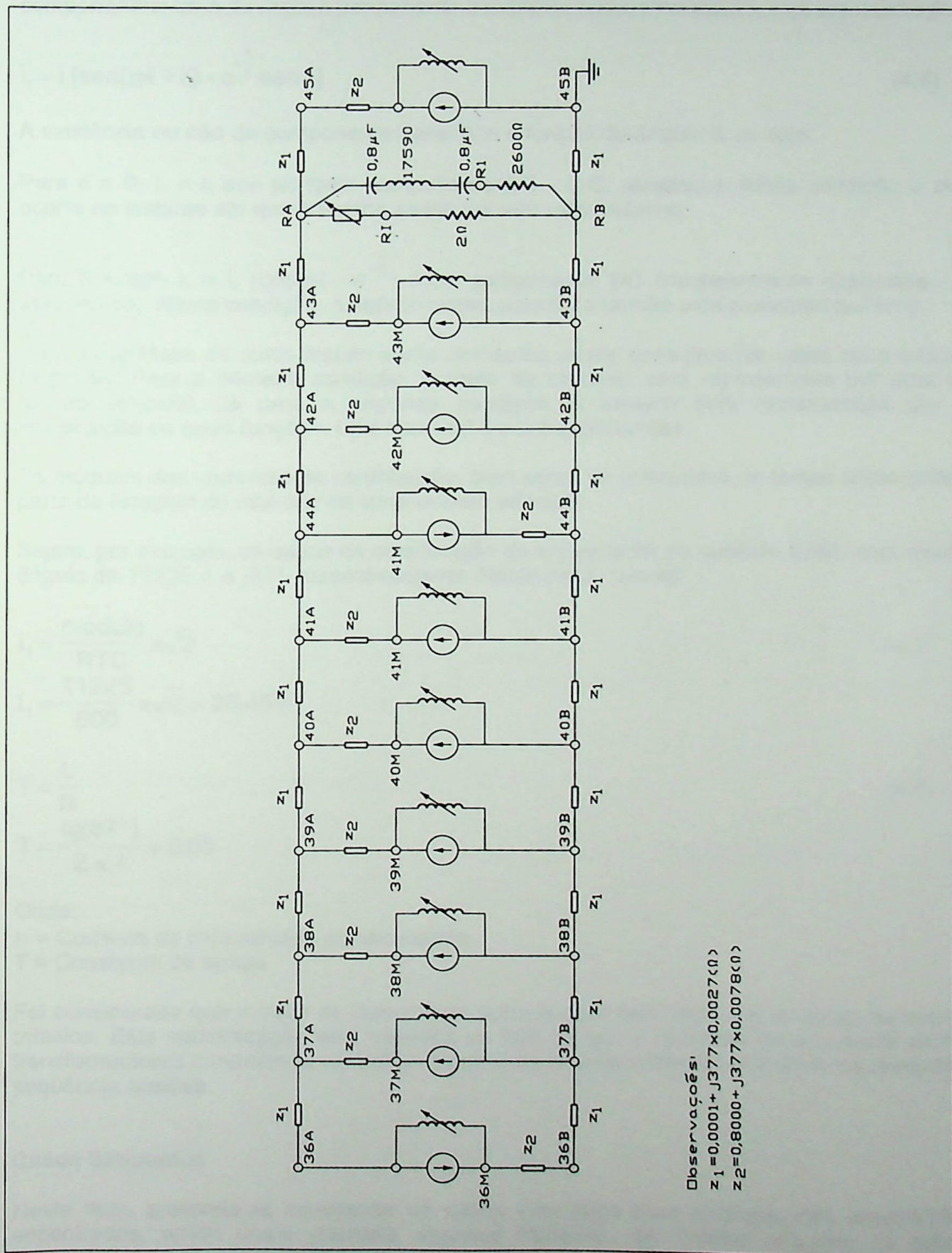


Fig. 25 - Modelagem do Sistema para Análise em Regime permanente

#### 4.5.1.2 Considerações Gerais

As análises devem ser realizadas considerando faltas fase-terra, por serem as mais comuns e apresentar em um grau de incidência da ordem de 70%.

Na condição de ocorrência de transitórios, a corrente de curto-circuito possui duas componentes; uma de regime permanente e outra de regime transitório, cuja expressão é:

$$i_1 = I_1 [\sin(\omega t + \delta) - e^{-\frac{t}{T}} \sin \delta] \quad (4.6)$$

A existência ou não da componente transitória é função do ângulo  $\delta$ , ou seja:

Para  $\delta = 0$ ,  $i_1 = I_1 \sin \omega t$  (sem componente DC - C.C. simétrico). Nesta condição o defeito ocorre no instante em que a tensão passa por seu valor máximo.

Para  $\delta = 90^\circ$ ,  $i_1 = I_1 (\cos \omega t - e^{-\frac{t}{T}})$  (com componente DC completamente deslocada - C.C. assimétrico). Nesta condição, o defeito ocorre quando a tensão está passando por zero.

Para as análises de curto-circuito serão simulados casos considerando estas duas condições extremas. Para a primeira condição, a fonte de corrente será representada por uma única função senoidal. Já para a segunda condição, a mesma será representada por uma composição de duas funções, uma senoidal e outra exponencial.

Os módulos das correntes de contribuição, bem como as constantes de tempo serão obtidas a partir da listagem do relatório de curto-circuito trifásico.

Sejam, por exemplo, os dados da contribuição do alimentador do cubículo B544, com módulo e ângulo de 11225 A e  $-87^\circ$ , respectivamente. Neste caso, tem-se:

$$I_1 = \frac{\text{módulo}}{RTC} \times \sqrt{2} \quad (4.7)$$

$$I_1 = \frac{11225}{600} \times \sqrt{2} = 26,4576$$

$$T = \frac{L}{R} \quad (4.8)$$

$$T = \frac{\text{tg}(87^\circ)}{2 \cdot \pi \cdot f} = 0,05$$

Onde:

$I_1$  = Corrente de pico referida ao secundário

$T$  = Constante de tempo

Foi considerado que o valor de corrente de curto-circuito fase-terra é igual ao do curto-circuito trifásico. Esta consideração está baseada no fato de que a reatância de sequência zero dos transformadores conectados em delta-estrela é da mesma ordem de grandeza da reatância de sequência positiva.

#### 4.5.1.3 Casos Simulados

Neste item, pretende-se apresentar os casos simulados para avaliação das anormalidades encontradas, tendo como premissa algumas hipóteses de defeitos ocorridos no sistema, quando da atuação da proteção diferencial.

Para a análise do problema de faseamento dos TC's do cubículo B537, foram processados os seguintes casos:

- curto-circuito simétrico e assimétrico no secundário do transformador auxiliar de 150 kVA, 13,8/0,22 kV.

Os valores obtidos para a tensão na bobina do relé ( $V_{R1} - R_B$ ) ficaram aquém da tensão de operação do mesmo. O maior valor encontrado foi de 50 Vpico contra os 106 Vpico da tensão de ajuste do relé. Os valores reduzidos encontrados devem-se aos baixos níveis de curto-circuito presentes em função da alta impedância do transformador;

- curto-circuito no primário do transformador auxiliar de 150 kVA, 13,8/ 0,22 kV.

Em uma análise de sensibilidade do circuito, verificou-se que uma corrente de 233 A (rms) circulando no primário dos TC's do alimentador em referência, promove a atuação do relé diferencial devido à inversão de fases. Desta forma, não foi necessário nenhum processamento para constatar que esta hipótese levará o relé a operar, pois um defeito franco no primário do transformador culminará em uma corrente em torno de 40 kA. Apesar de o defeito analisado ser capaz de atuar o relé, esta hipótese foi descartada pelo seguinte motivo: a proteção do circuito em análise é feita através de fusíveis do tipo DRVAL, 25 A da Inebrasa. Tendo este dispositivo de proteção uma característica limitadora de corrente, é de se esperar que, para o nível de curto-circuito presente, os mesmos iriam eliminar a falta antes da operação dos relés. Além disso, na época da ocorrência foi realizada uma inspeção no circuito e não foi encontrado nenhum indício que pudesse indicar a existência de um defeito.

- curto-circuito na Barra B e nas barras adjacentes.

Esta hipótese também foi descartada, pois as inspeções e testes realizados nestas barras não indicaram nenhuma anormalidade que pudesse ter provocado a operação do relé. No entanto, foram simulados casos de defeito do tipo franco e limitado, simétrico e assimétrico, de modo a avaliar a sensibilidade dos relés da barra B. Dos resultados dos processamentos pode-se concluir que os relés de proteção diferencial na graduação encontrada, estavam habilitados para distinguir defeitos externos de internos. Aliás, foi recomendada a permanência da graduação, a qual garantiria boa performance do dispositivo de proteção quando da ocorrência de curto-circuito.

#### 4.5.2 Análise dos Transitórios de Origem Atmosféricas

Até aqui todos os resultados encontrados, tanto dos testes como das análises das hipóteses levantadas, mostraram que o relé diferencial não poderia ter operado por problemas relacionados a condição de regime permanente e nem aos de transitório de curto-circuito.

Desta forma, a hipótese de que transitório de origem atmosférica foi o causador do problema tornou-se a mais plausível, por algumas razões analisadas a seguir.

No dia da ocorrência chovia muito forte e observaram-se várias descargas atmosféricas na região. Como não foi vista a captura de nenhum raio pelos sistemas de proteção instalados próximos à laminação, pode-se dizer que um local provável e susceptível à queda de raios é a linha de transmissão que alimenta a Subestação de 138 kV que supre o LTQ (SE Sul). Uma descarga poderia ter atingido o cabo guarda ou mesmo o topo de uma das torres dessa LT. Se a descarga ocorreu nas proximidades, é de esperar que um valor elevado de corrente caminhasse via cabo guarda no sentido da subestação.

Neste ponto é importante chamar a atenção para a ocorrência descrita no item 4.2, na qual fundamenta toda esta hipótese. Como algum tempo após a operação do relé, verificou-se que

a blindagem do cabo alimentador do SWG-5 estava encostando na carcaça do painel B422 e com isso estabelecendo o aterramento das suas duas extremidades, é perfeitamente aceitável acreditar que no dia do desligamento a blindagem estava nesta mesma condição. Com isso, estabeleceu-se o paralelo entre a malha de terra da SE Sul com a da laminação.

Desta forma, a corrente impulsiva ao chegar à SE Sul passou a ter dois caminhos de escoamento, e a subdivisão da mesma foi proporcional ao valor da impedância de surto de cada uma das malhas.

Agora, resta saber, de que forma o escoamento da corrente impulsiva através da malha de terra da laminação poderia ter provocado a operação do relé.

O SWG-5 possui uma barra de terra fixada na parte traseira dos cubículos. Esta barra é interligada em seis pontos, com uma outra barra de terra instalada em toda a periferia do sub-solo. Estas interligações são feitas através de cabos de cobre nus de bitola 2/0 AWG que caminham pelo teto e parede norte do sub-solo, percorrendo uma distância de aproximadamente 9,6 (m).

A barra de terra do sub-solo, por sua vez, é interligada em vários pontos, com a malha de terra da laminação, por cabos do mesmo tipo e comprimento em torno de 1,6 (m). A figura 26 apresenta o diagrama esquemático do sistema de aterramento do SWG-5, onde são mostrados apenas os cubículos de interesse para a presente análise.

No capítulo II, mostrou-se que as correntes impulsivas ao escoar pelo sistema de proteção se comportam como verdadeiras fontes de campos elétricos e magnéticos. Também foi desenvolvida toda a teoria dos mecanismos de indução de sinais interferentes, bem como os seus efeitos nos circuitos elétricos.

Com base nos conceitos do referido capítulo, pode-se dizer que a corrente impulsiva, transferida da SE Sul para SE laminação, ao escoar através da barra de terra do SGW-5, induziu tensões interferentes nos circuitos das malhas diferencial. Esses sinais interferentes podem ter alcançado níveis elevadíssimos pelos seguintes motivos:

- a intensidade da tensão interferente é proporcional à taxa de variação no tempo, o que vale dizer que fenômenos rápidos e abruptos, como o da descarga atmosférica, têm a capacidade de gerar induções severas;
- os circuitos das malhas diferencial estão a pouca distância da barra de terra e isto significa que os mesmos estão sujeitos a altas intensidades dos campos gerados e, conseqüentemente, os efeitos da indução são maiores;
- é grande o comprimento dos circuitos das malhas diferencial, o que lhes confere uma boa capacidade de captação dos campos eletromagnéticos. Esta característica proporciona o aparecimento de tensões interferentes elevadas.

Provavelmente, esses sinais interferentes de grande intensidade, induzidos no circuito da malha diferencial da barra B provocariam a operação do relé.

Um fato que pode evidenciar que houve escoamento de correntes impulsivas pela malha de terra da laminação foi constatado durante inspeções realizadas no sub-solo. Verificou-se que um dos cabos que interliga as barras de terra estava solto (cub.B527). Uma inspeção mais criteriosa no local mostrou que tal cabo não poderia ter sido solto pela mão do homem pelos seguintes motivos:

- a fixação dos cabos no teto e na parede é feita com presilhas. Algumas das presilhas do referido cabo estão deformadas como se tivessem sido forçadas contra os parafusos de fixações;

- não existem marcas no concreto que pudessem indicar a utilização de algum tipo de ferramenta para forçar as presilhas;
- o pessoal da manutenção não tem motivo algum para mexer com estes cabos e muito menos para danificá-los;
- uma parte do referido cabo, correspondente ao trecho da passagem do teto para a parede, encontrava-se deformada (torcida).

Se o cabo não foi danificado pelo homem, então, o que poderia tê-lo deixado nas condições descritas? Sabe-se que as correntes de descargas produzem esforços mecânicos que dependem da energia magnética e que são proporcionais à indutância dos condutores e ao quadrado da intensidade da corrente. Conforme [14], tem-se observado a destruição de condutores de até  $50\text{mm}^2$  de seção transversal, os quais apresentam ângulos fechados (Ao invés dos raios de curvatura mínimos recomendados) devido aos esforços mecânicos produzidos pela passagem da corrente através da forte indutância verificada nesses ângulos. Observa-se ainda, nesses pontos o recozimento do condutor devido ao efeito de "arcing" resultante da passagem da corrente de descarga, perdendo o mesmo suas características mecânicas.

Uma outra pergunta que poderia ser feita é por que somente um dos seis cabos de interligação das barras de terra foi danificado pelos efeitos mecânicos produzidos pela corrente de descarga? Essa questão pode ser esclarecida com base nos fatos apresentados acima. Talvez, na passagem do teto para a parede, o cabo inerente ao cubículo B527 estivesse com um ângulo mais fechado do que os outros e, associado a isto, as presilhas poderiam não estar tão bem fixadas quanto às dos demais cabos.

Uma última questão que tem de ser esclarecida é a operação tão somente do relé diferencial da barra B. A resposta para esta questão não é difícil de ser dada, pois a mesma tem a ver com os níveis de tensão interferente. Ao se observar mais atentamente a figura 26, pode-se verificar a posição física dos cabos de interligação das barras de terra em relação ao ponto de entrada da corrente impulsiva (Cub B544). Com certeza, pode-se afirmar que a maior parte desta corrente escoou pelos cabos inerentes aos cubículos B544, B537 e B548. Isto equivale a dizer que esta parcela grande de corrente percorreu uma seção da barra de terra do SWG-5 que compreende desde o cubículo B537 até o de número B548. Como a malha diferencial da barra B é constituída ao longo destes cubículos, pode-se afirmar que a mesma ficou sujeita aos mais intensos campos eletromagnéticos gerados e conseqüentemente às maiores tensões induzidas.

As análises feitas neste item, embora esclarecessem todos os questionamentos, tornaram-se um tanto quanto subjetivas. O que se pretende a seguir é executar alguns processamentos de maneira a verificar os mecanismos das induções.

As simulações que serão realizadas estão relacionadas apenas com o fenômeno de indução elétrica, ou seja, relacionadas com as diferenças de potencial elétrico entre partes condutoras.

No capítulo II, apresentou-se a teoria sobre a influência do campo elétrico nos circuitos. Mostrou-se que os potenciais desenvolvidos pela corrente de descarga ao longo das partes condutoras do sistema de proteção afetam os circuitos através das capacitâncias parasitárias presentes.

O objetivo maior das simulações não é obter o valor preciso da tensão que poderia ter sido induzida no relé quando da sua operação, mas sim mostrar que, se realmente ocorresse um transitório de origem atmosférica nas condições a serem analisadas, ele poderia ser capaz de levar o relé à operação indevida.



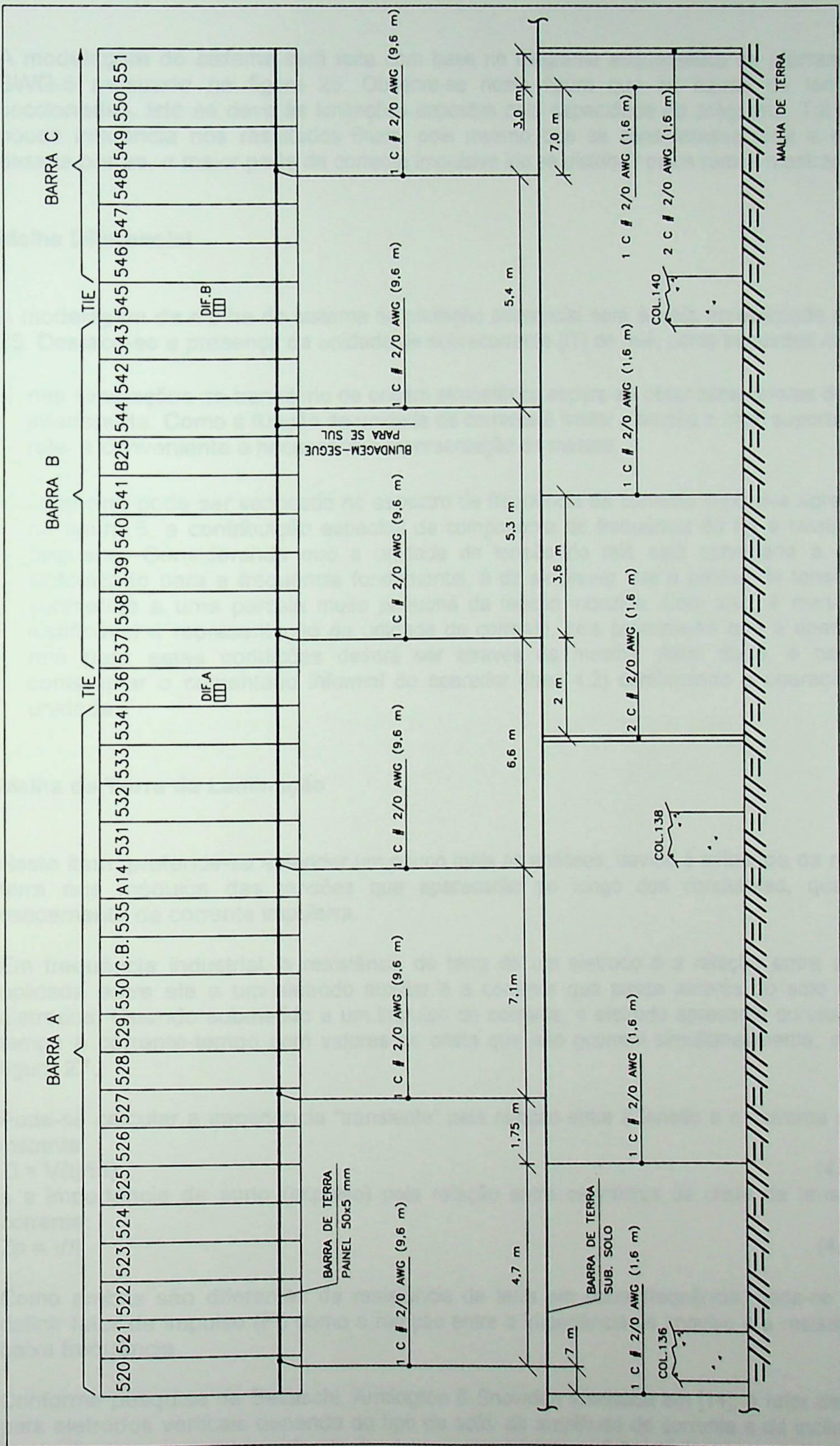


Fig. 26 - Diagrama Esquemático de Aterramento do SWG-5 (Barras A,B,C)

#### 4.5.2.1 Modelagem do Sistema

A modelagem do sistema será feita com base no diagrama esquemático de aterramento do SWG-5 mostrado na figura 26. Observa-se nesta figura que as barras de terra foram seccionadas. Isto se deve às limitações impostas pela capacidade do programa. Tal fato tem pouca influência nos resultados finais, pois mesmo que se considerasse toda a extensão dessas barras, a maior parte da corrente impulsiva iria se distribuir pelos ramos mostrados.

##### a) Malha Diferencial

A modelagem da malha do sistema de proteção diferencial será àquela apresentada na figura 25. Destaca-se a presença da unidade de sobrecorrente (IT) do relé, pelos seguintes motivos:

- nas simulações de transitório de origem atmosférica espera-se obter altos valores de tensão interferente. Como a função da unidade de corrente é limitar a tensão a nível suportável pelo relé, é conveniente e necessária a representação da mesma;
- conforme pode ser verificado no espectro de frequência da corrente impulsiva apresentado na figura 5, a contribuição espectral da componente de frequência 60 Hz é relativamente pequena. Considerando que a unidade de tensão do relé está conectada a um filtro sintonizado para a frequência fundamental, é de se prever que a bobina de tensão ficará submetida a uma parcela muito pequena da tensão induzida. Com isso, é mais do que justificável a representação da unidade de corrente, pois presume-se que a operação do relé para estas condições deverá ser através da mesma. Além disso, é necessário contemplar o comentário informal do operador (item 4.2) confirmando a operação desta unidade.

##### b) Malha de Terra da Laminação

Neste item, pretende-se estender um pouco mais as análises, devido à influência da malha de terra nos módulos das tensões que aparecerão ao longo dos condutores, quando do escoamento da corrente impulsiva.

Em frequência industrial, a resistência de terra de um eletrodo é a relação entre a tensão aplicada entre ele e um eletrodo auxiliar e a corrente que passa através do solo entre os eletrodos. Quando submetido a um impulso de corrente, o eletrodo apresenta curvas tensão-tempo e corrente-tempo com valores de crista que não ocorrem simultaneamente, conforme figura 27.

Pode-se calcular a impedância "transiente" pela relação entre a tensão e a corrente em cada instante:

$$Z_i = V(t)/I(t) \quad (4.9)$$

e a impedância de surto (impulso) pela relação entre os valores de crista da tensão e da corrente:

$$Z_o = V/I \quad (4.10)$$

Como ambas são diferentes da resistência de terra em baixa frequência, pode-se também definir fator de impulso (FI) como a relação entre a impedância de impulso e a resistência em baixa frequência.

Conforme pesquisa de Bellaschi, Armington & Snowden analisada em [14], o fator de impulso para eletrodos verticais depende do tipo de solo, da amplitude de corrente e da inclinação da frente de onda aplicada, variando desde um valor mínimo de 0,04 até 1.

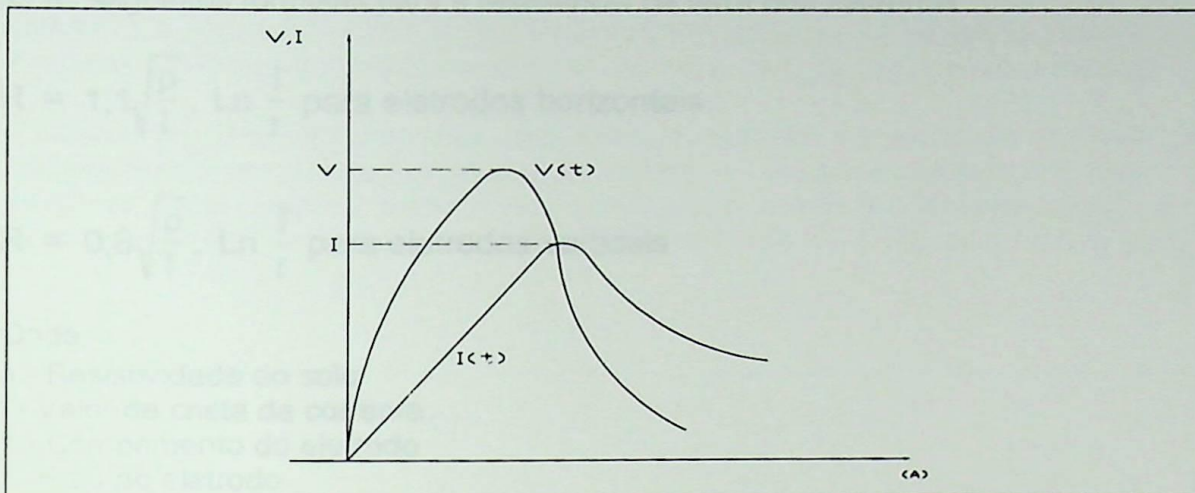


Fig. 27 - Representação da não simultaneidade entre Tensão e Corrente

A característica do solo que vai determinar a sua resistência sob correntes de frequência industrial ou a sua impedância sob correntes de raios é a sua resistividade. Esta é definida como a resistência entre faces opostas de um cubo de aresta unitária com material retirado do solo. Para uma área, o procedimento padronizado pela ABNT na determinação da resistividade do solo, é o método de Wenner.

A figura 28 [15] apresenta a impedância de impulso de um eletrodo horizontal em função da resistividade do solo. Da figura pode-se deduzir que, em solos de alta resistividade, é praticamente impossível obterem-se valores pequenos de impedância com somente um único condutor.

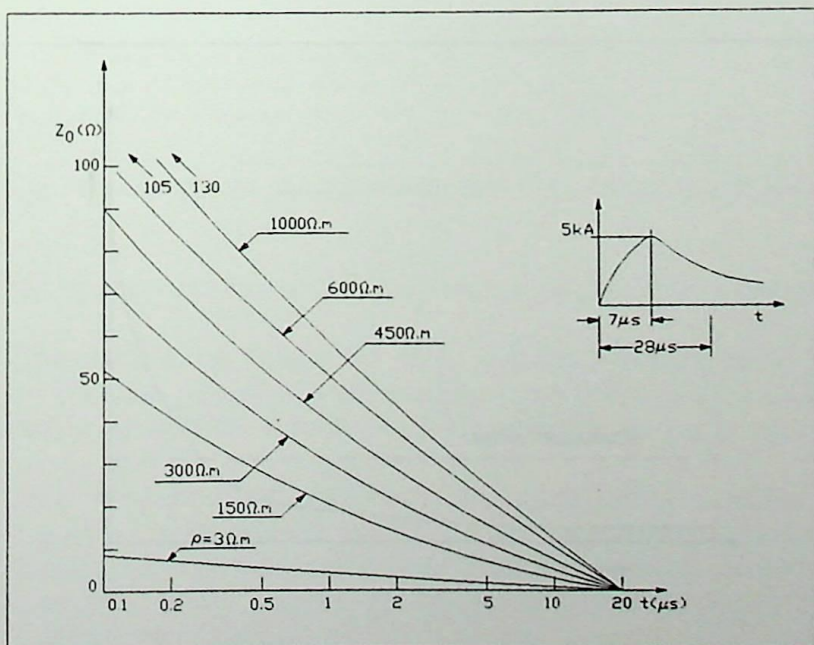


Fig. 28 - Impedância de Impulso em Função da Resistividade do Solo

Entre as várias maneiras de se modelar a impedância da terra para representar o seu comportamento sob correntes impulsivas, pode-se utilizar o modelo cilíndrico, análogo ao das linhas de transmissão, descrito por Hasse & Wiesenger.

Em [16] apresenta-se a análise deste modelo, onde, a partir de algumas simplificações, obtêm-se as seguintes fórmulas para a resistência de terra dos eletrodos:

$$R = 1,1\sqrt{\frac{\rho}{l}} \cdot \ln \frac{l}{r} \text{ para eletrodos horizontais} \quad (4.11)$$

$$R = 0,8\sqrt{\frac{\rho}{l}} \cdot \ln \frac{l}{r} \text{ para eletrodos verticais} \quad (4.12)$$

Onde:

- $\rho$  - Resistividade do solo
- $l$  - Valor de crista da corrente
- $L$  - Comprimento do eletrodo
- $r$  - Raio do eletrodo

Pelas expressões acima, verifica-se que a resistência de terra do eletrodo para correntes impulsivas é inversamente proporcional à raiz quadrada do valor de crista da corrente. Fisicamente, essa diminuição da resistência com o aumento da corrente é explicada pelos fenômenos de ionização no solo. Quando a densidade de corrente é elevada, surge na superfície do eletrodo um gradiente de tensão que supera a suportabilidade das camadas de ar que existem no solo, formando-se descargas disruptivas saindo do eletrodo. O efeito dessas descargas é curto-circuitar as primeiras camadas do solo, o que corresponde a aumentar as dimensões do eletrodo.

Já em [17] é feita uma análise da impedância de impulso de eletrodos horizontais, onde também apresenta-se uma expressão para cálculo da mesma. Este trabalho tem como conclusão que tal impedância tem o seu maior valor no início do crescimento da frente de onda e diminui até o valor da resistência de aterramento à 60 Hz, conforme mostra a figura 29.

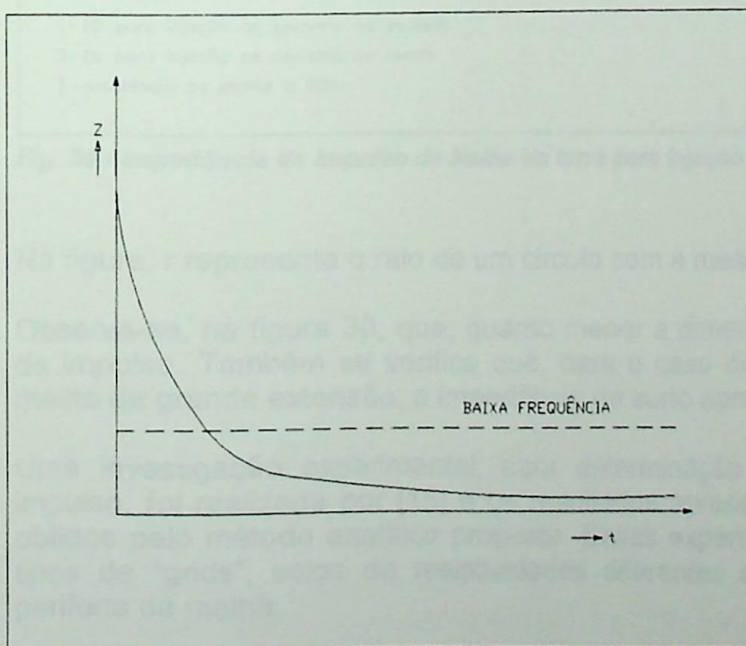
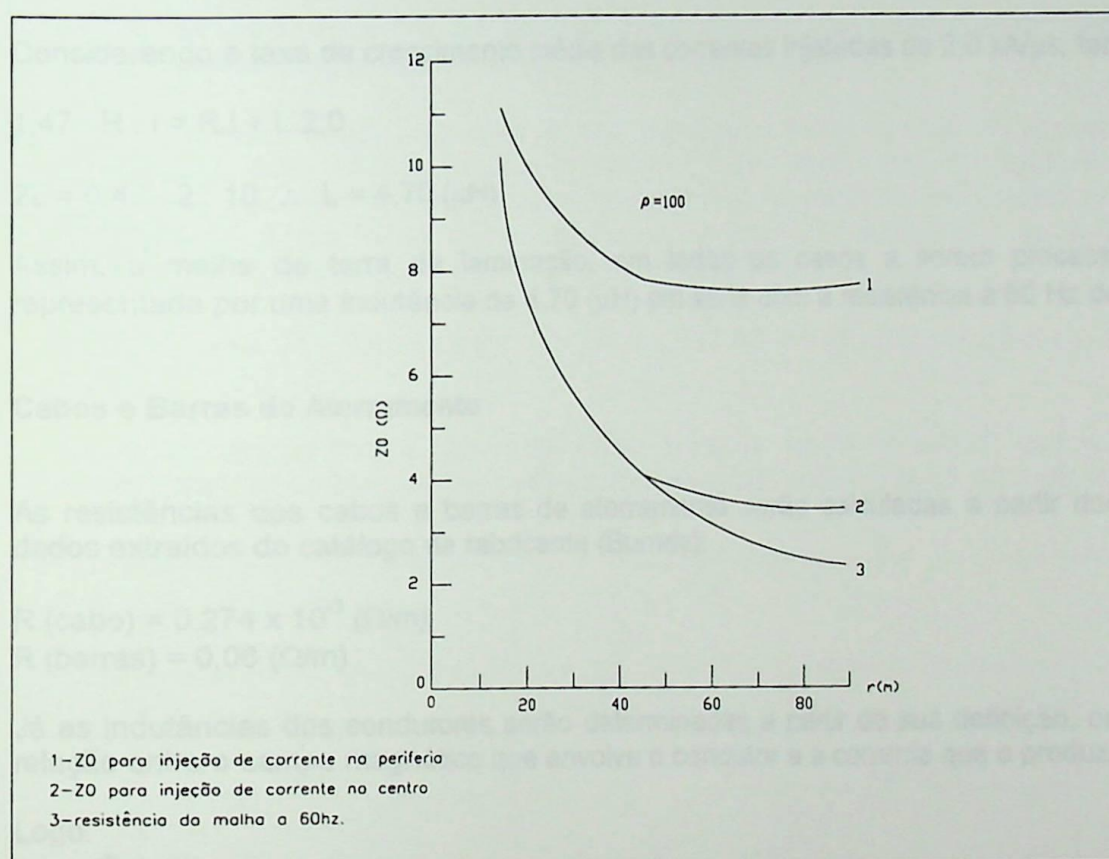


Fig. 29 - Variação da Impedância com o Tempo

Tendo apresentado isoladamente o comportamento a impulso dos eletrodos verticais e horizontais, resta agora saber como se comportam as malhas de aterramento que normalmente são constituídas de ambos os eletrodos, os quais formam vários "grids".

Em [18] são feitas as análises do comportamento de malhas de terra quanto ao aspecto de impedância de impulso. Mostra-se que a impedância de impulso de um "grid" depende do tamanho e forma do mesmo, do espaçamento entre os condutores, do ponto da injeção da corrente, da forma e magnitude da onda da corrente e da característica do solo.

Também em [18], apresenta-se uma fórmula empírica para cálculo da impedância da malha considerando duas situações quanto ao ponto de injeção de corrente, no centro da malha e na periferia. Aliás, quanto a este aspecto conclui-se que a impedância de impulso é bem menor no caso de injeção de corrente no centro da malha conforme pode-se observar na figura 30.



**Fig. 30 - Impedância de Impulso da Malha de terra para Injeção de Corrente no Centro e na Periferia**

Na figura,  $r$  representa o raio de um círculo com a mesma área ocupada pela malha de terra.

Observa-se, na figura 30, que, quanto menor a dimensão da malha, maior será a impedância de impulso. Também se verifica que, para o caso de injeção de corrente no centro de uma malha de grande extensão, a impedância de surto aproxima-se da resistência em 60 Hz.

Uma investigação experimental, para determinação da impedância, indutância e fator de impulso, foi realizada por [15] e os resultados apresentados ficaram bem próximos daqueles obtidos pelo método analítico proposto. Essas experiências envolveram malhas com diversos tipos de "grids", solos de resistividades diferentes e injeções de corrente no centro e na periferia da malha.

O fator de impulso foi sempre maior nos casos em que a injeção de corrente foi feita na periferia. Este variou deste um valor de 1,15 até 1,84, valores estes correspondentes respectivamente ao menor e maior "grid".

Para a modelagem da malha de terra da laminação, serão utilizados os resultados de [15], uma vez que ela é predominantemente constituída de eletrodos horizontais formando vários "grids".

A presença de eletrodos verticais, conforme descrito no início deste item, influenciaria no sentido de reduzir o fator de impulso. Considerando que a referida malha possui um número muito pequeno de hastes instaladas em locais estratégicos à execução de medições, tal influência será desprezada. Logo, o valor da indutância da malha a ser adotado no estudo será:

$$V_0 = Z_0 \cdot i = FI \cdot R \cdot i = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (4.13)$$

Onde:

R = Resistência da malha a 60 Hz (2  $\Omega$ )

FI - Fator de impulso a ser adotado -1,47, que corresponde ao valor médio obtido por [18]

i = Corrente impulsiva injetada (10 kApico)

Considerando a taxa de crescimento média das correntes injetadas de 2,0 kA/ $\mu$ s, tem-se:

$$1,47 \cdot R \cdot i = R \cdot i + L \cdot 2,0$$

$$2L = 0,47 \cdot 2 \cdot 10 \quad \therefore L = 4,70 \text{ } (\mu\text{H})$$

Assim, a malha de terra da laminação, em todos os casos a serem processados, será representada por uma indutância de 4,70 ( $\mu$ H) em série com a resistência à 60 Hz de 2 $\Omega$ .

### c) Cabos e Barras de Aterramento

As resistências dos cabos e barras de aterramento serão calculadas a partir dos seguintes dados extraídos do catálogo de fabricante (Bumdy):

$$R \text{ (cabo)} = 0,274 \times 10^{-3} \text{ } (\Omega/\text{m})$$

$$R \text{ (barras)} = 0,06 \text{ } (\Omega/\text{m})$$

Já as indutâncias dos condutores serão determinadas a partir de sua definição, ou seja, pela relação entre o campo magnético que envolve o condutor e a corrente que o produziu.

Logo:

$$L = \frac{\Phi}{i} \text{ } (\text{H}/\text{m}) \quad (4.14)$$

Sendo

$$\Phi = \frac{\mu \cdot i}{2\pi} \ln \frac{Rd}{r} \quad (4.15)$$

Portanto:

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{Rd}{r} \text{ } (\text{H}/\text{m}) \quad (4.16)$$

Onde:

L  $\rightarrow$  indutância em henry/metro

$\mu$   $\rightarrow$  permeabilidade do meio (no ar vale:  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m)

Rd  $\rightarrow$  Distância entre o condutor e um ponto onde a densidade do fluxo seja desprezível (adotado Rd = 1000 m).

r  $\rightarrow$  raio do condutor em metros

A indutância para o cabo de 2/0 AWG com raio de aproximadamente 5 mm será:

$$L = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ (mH/m)}$$

Para o cálculo da indutância da barra será considerada a sua equivalência a um condutor de 500 MCM com raio de aproximadamente 9,45 mm.

Logo:

$$L = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ (mH/m)}$$

Finalmente, podem-se determinar as resistências e indutâncias dos ramos a partir dos comprimentos indicados na figura 26.

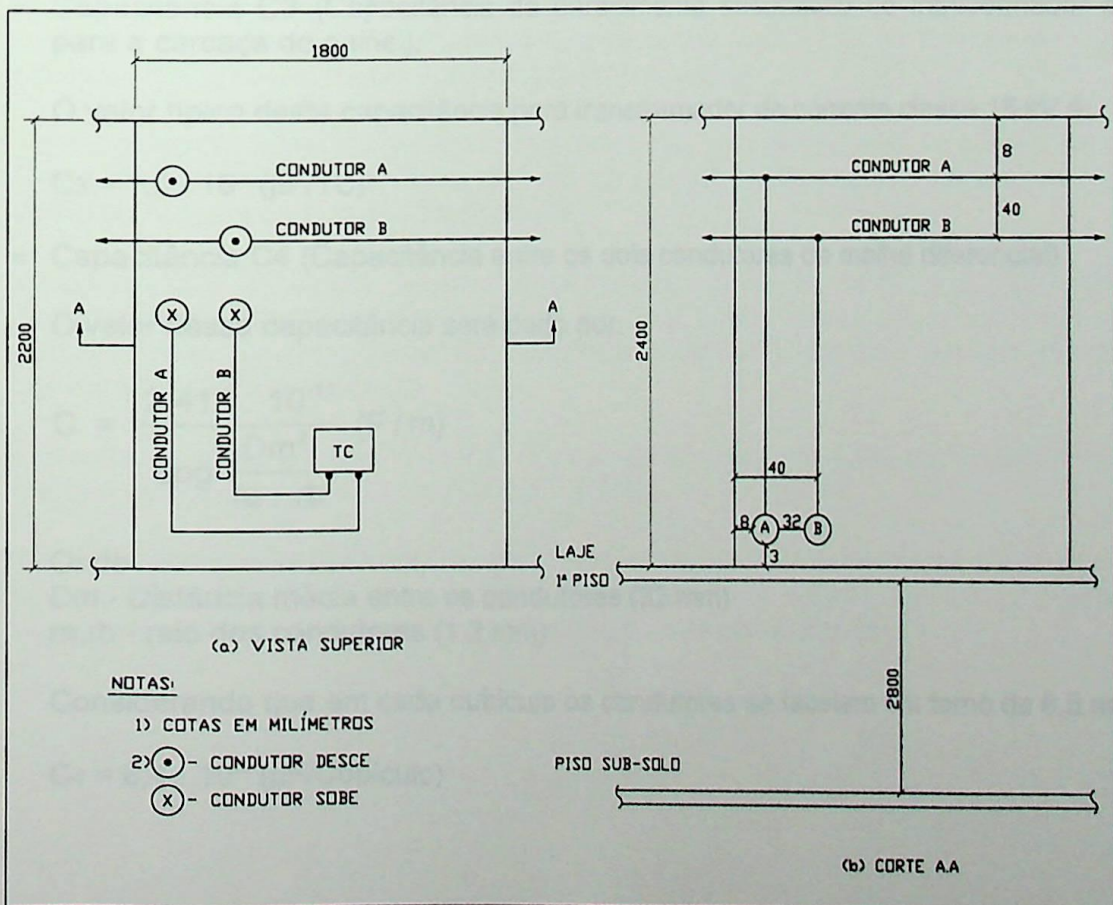
**d) Cálculo das Capacitâncias Parasitárias**

Antes de se estabelecerem as fórmulas para cálculos das capacitâncias parasitárias é necessário definir quais delas serão consideradas na modelagem. ,

Sabe-se que, para existir uma capacitância entre duas partes condutoras quaisquer que se faceiam, basta que estas tenham área física. A partir deste conceito pode-se imaginar a complexidade que seria se fossem consideradas todas as capacitâncias presentes no sistema a ser modelado. Desta forma, com o objetivo de se fazer uma análise mais qualitativa do que quantitativa, serão consideradas as seguintes capacitâncias:

- Capacitâncias C1 (Capacitância dos condutores da malha diferencial para a carcaça do painel).

Os condutores da malha diferencial estão lançados dentro de calhas, com às distâncias média para a chaparia dos cubículos conforme indicadas na figura 31 (sem escala).



**Fig. 31 - Posição dos Condutores nos Cubículos**



Para o cálculo dessas capacitâncias será utilizada a fórmula a seguir:

$$C = \frac{1281 \cdot 10^{-7}}{\text{Log} \frac{2D}{r}} (\mu\text{F} / \text{m}) \quad (4.17)$$

Onde:

D - distância entre as partes condutoras (mm)

r - raio do condutor de 12 AWG (1,2 mm)

Logo:

$$C_{1A} = 1,2 \cdot 10^{-3} (\mu\text{F}/\text{Cubículo})$$

$$C_{1B} = 5,4 \cdot 10^{-4} (\mu\text{F}/\text{Cubículo})$$

- Capacitâncias C2 (Capacitância para a carcaça dos condutores que interligam a régua de bornes do cubículo B545 com o relé diferencial).

Esses condutores têm 700 mm de comprimento e guardam as mesmas distâncias das capacitâncias C1.

Logo:

$$C_{2A} = 1,3 \cdot 10^{-4} (\mu\text{F})$$

$$C_{2B} = 5,8 \cdot 10^{-5} (\mu\text{F})$$

- Capacitância C3 (Capacitância do enrolamento secundário do transformador de corrente para a carcaça do painel).

O valor típico desta capacitância para transformador de corrente classe 15 kV é:

$$C_3 = 1,0 \cdot 10^{-4} (\mu\text{F}/\text{TC})$$

- Capacitância C4 (Capacitância entre os dois condutores da malha diferencial)

O valor dessa capacitância será dado por:

$$C = \frac{2,412 \cdot 10^{-11}}{\text{Log} \frac{Dm^2}{ra \cdot rb}} (\text{F} / \text{m}) \quad (4.18)$$

Onde

Dm - Distância média entre os condutores (32 mm)

ra,rb - raio dos condutores (1,2 mm)

Considerando que em cada cubículo os condutores se faceiam em torno de 6,5 m, tem-se:

$$C_4 = 8,4 \cdot 10^{-6} (\mu\text{F}/\text{Cubículo})$$

- Capacitância C5 (Capacitância entre os condutores da malha diferencial e a referência).

O valor dessa capacitância será:

$$C = \frac{1281 \cdot 10^{-7}}{\text{Log} \frac{2 \cdot \text{hg}}{r}} \text{ (}\mu\text{F / m)} \quad (4.19)$$

Considerando as duas situações de altura apresentadas na figura 31, tem-se:

$$C_{5A} = C_{5B} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ (}\mu\text{F/Cubículo)}$$

O motivo das capacitâncias acima terem sido calculadas para a carcaça do painel está relacionado com os potenciais a que as chaparias ficarão submetidas quando do escoamento da descarga atmosférica, pois a barra de terra do SGW-5 é conectada nas duas laterais de cada cubículo.

Como a análise do problema está voltada apenas para o fenômeno de indução conforme descrito anteriormente no capítulo II, podem-se fazer as seguintes correspondências tomando-se como base a figura 9 do Capítulo II.

<b>Figura 9</b>		<b>Sistema Analisado</b>
Parte Condutora	→	Chaparia dos Cubículos
C1A	→	C1A
C1B	→	C1B
C2A	→	C5A
C2B	→	C5B
$r_c$	→	Relé

Para uma modelagem mais precisa do sistema, seria necessário representar as capacitâncias na forma de parâmetros distribuídos e, a partir daí, determinar as tensões nas carcaças dos painéis ao longo das partes que faceiam com os cabos.

Tal modelagem, além de ser muito complexa, não vem de encontro ao objetivo deste trabalho. Desta forma, pretende-se fazer uma primeira simplificação que é considerar as capacitâncias como se fossem componentes discretos.

Para reduzir a influência da simplificação acima nos resultados finais, a capacitância total de cada ramo do circuito será subdividida em duas partes iguais, sendo que cada uma dessas parcelas será conectada aos nós delimitadores do ramo, conforme exemplo mostrado para a capacitância C1 na figura 32.

Observa-se na figura que o nó BT1-5 é aquele formado pela barra de terra do SWG-5 com as laterais conjugadas dos cubículos B537 e B538.

Também pode-se verificar que as outras extremidades das capacitâncias foram conectadas em nós do tipo ao BT1-5. Isto significa que as mesmas estarão sujeitas aos potenciais que aparecerão nestes nós durante o escoamento da corrente impulsiva.

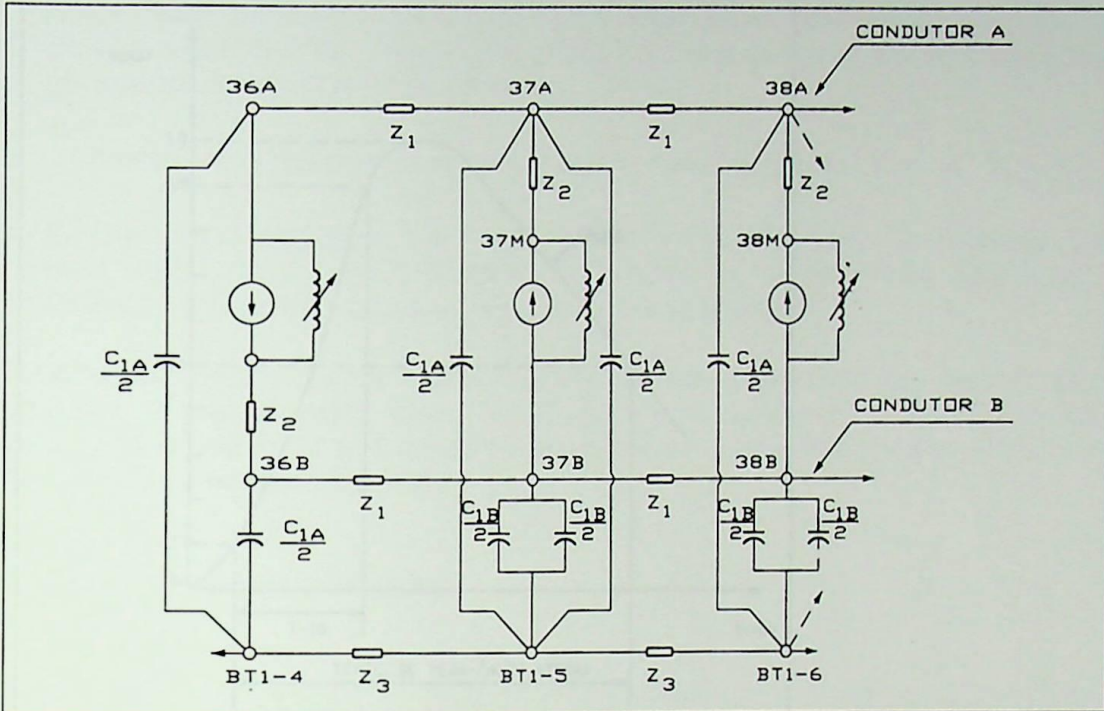


Fig. 32 - Representação das Capacitâncias do tipo c1

e) Fontes de Corrente

São duas as fontes de corrente a serem consideradas. A primeira refere-se aos transformadores de corrente que serão modelados, levando-se em conta a reatância de magnetização conforme item 4.5.1.1.

O motivo da presença dos TC's na modelagem do sistema está relacionado com o fato de que as tensões diferenciais induzidas na malha serão de módulo elevado e conseqüentemente, os mesmos irão saturar. Como as reatâncias de magnetização dos TC's são diferentes, acredita-se que a sua inclusão influenciará os resultados finais das análises.

A segunda fonte deverá retratar, com o maior realismo possível, as características das correntes de escoamento das descargas atmosféricas. Para a modelagem da fonte de corrente impulsiva será utilizada a representação abaixo [19].

$$I = I_0(e^{-\alpha_1 \cdot t} - e^{-\alpha_2 \cdot t}) \tag{4.20}$$

Uma típica corrente impulsiva é mostrada na figura 33. Esta corrente ao contrário daquela mostrada na figura 6 do capítulo II, representa uma descarga positiva e conseqüentemente o sinal de  $I_0$  na expressão acima deve seguir esta característica, ou seja, assumir também um valor positivo.

Não existe uma simples relação entre as constantes de tempo  $1/\alpha_1$  e  $1/\alpha_2$  e os tempos T-10 e T-50. Uma análise de sensibilidade da função mostrou que a constante  $1/\alpha_1$  tem grande influência no tempo T-50 e a constante tempo de  $1/\alpha_2$ , no tempo T-10. À medida que se aumenta o valor destas constantes, aumentam-se os valores dos respectivos tempos.



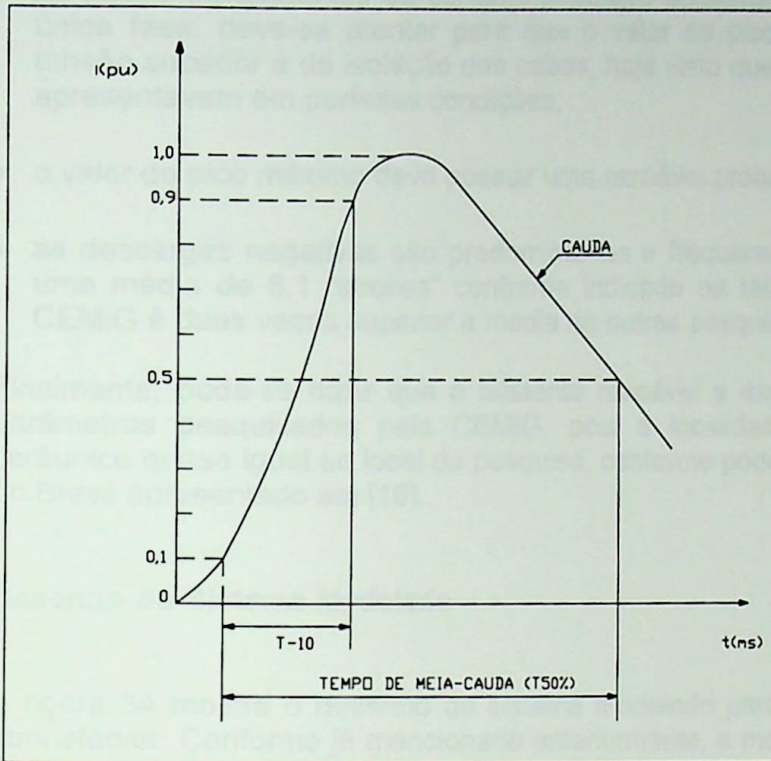


FIG.33 -Corrente Impulsiva de Polaridade Positiva

A tabela XVI apresenta os resultados da referida análise para alguns pares de constantes de tempo.

TABELA XVI - Valores obtidos de T-10 e T-50 para vários pares de constante de tempo

Número do Par	$1/\alpha_1$ ( $\times 10^{-6}$ )	$1/\alpha_2$ ( $\times 10^{-6}$ )	T-10 ( $\mu s$ )	T-50 ( $\mu s$ )
01	30	0,200	0,91	20,19
02	30	0,280	1,20	20,19
03	30	0,350	1,47	20,19
04	30	0,381	1,49	20,00
05	50	0,381	1,63	34,00
06	70	0,381	2,03	48,00
07	80	0,381	1,81	54,00
08	90	0,381	1,93	61,53
09	284	0,381	2,16	228,00
10	600	0,381	2,10	415,00
11	600	0,200	1,20	415,00
12	400	0,400	2,23	346,00
13	90	0,600	2,90	61,53
14	90	0,900	3,79	61,00
15	90	1,80	6,53	61,00
16	90	1,90	7,07	61,53
17	210	3,4	9,9	144,23
18	200	3,5	10,46	134,00
19	210	0,800	2,0	144,23
20	210	0,925	2,20	144,23

Já para o pico máximo da frente de onda devem-se levar em conta os seguintes pontos:

- se houve transferência da corrente impulsiva somente pela blindagem dos cabos de uma única fase, deve-se atentar para que o valor de pico da corrente não culmine em uma tensão superior à de isolamento dos cabos, haja visto que, após a ocorrência, esses cabos se apresentavam em perfeitas condições;
- o valor do pico máximo deve possuir uma razoável probabilidade de ocorrência;
- as descargas negativas são predominantes e frequentemente são múltiplas, apresentando uma média de 6,1 "strokes" conforme indicado na tabela II. Aliás, este valor obtido pela CEMIG é duas vezes superior a média de outras pesquisas.

Finalmente, pode-se dizer que é bastante razoável a execução das análises com base nos parâmetros pesquisados pela CEMIG, pois a localidade da siderúrgica detém um nível cerâmico quase igual ao local da pesquisa, conforme pode-se constatar no mapa isocerâmico do Brasil apresentado em [16].

#### f) **Desenho do Sistema Modelado**

A figura 34 mostra o desenho do sistema modelado para a análise de transitório de origem atmosférica. Conforme já mencionado anteriormente, a modelagem contempla apenas a parte da instalação que exercerá alguma influência nas análises.

Uma atenção especial deve ser dada para a impedância inserida entre os nós 45B e BT1-14. Ela representa a interligação, que normalmente se faz, entre a malha diferencial e a barra de aterramento do switchgear, cuja função é garantir a segurança pessoal quando de um toque acidental na parte viva dos circuitos secundários dos transformadores de corrente. Esta interligação, conforme se verificará mais adiante, tem uma grande influência sobre o módulo da tensão diferencial que aparecerá nos terminais do relé.

O apêndice 2 apresenta o banco de dados básico utilizado para todos os processamentos.

A sequência e o posicionamento dos dados pode ser facilmente compreendido após uma consulta no manual do programa microtran [20].

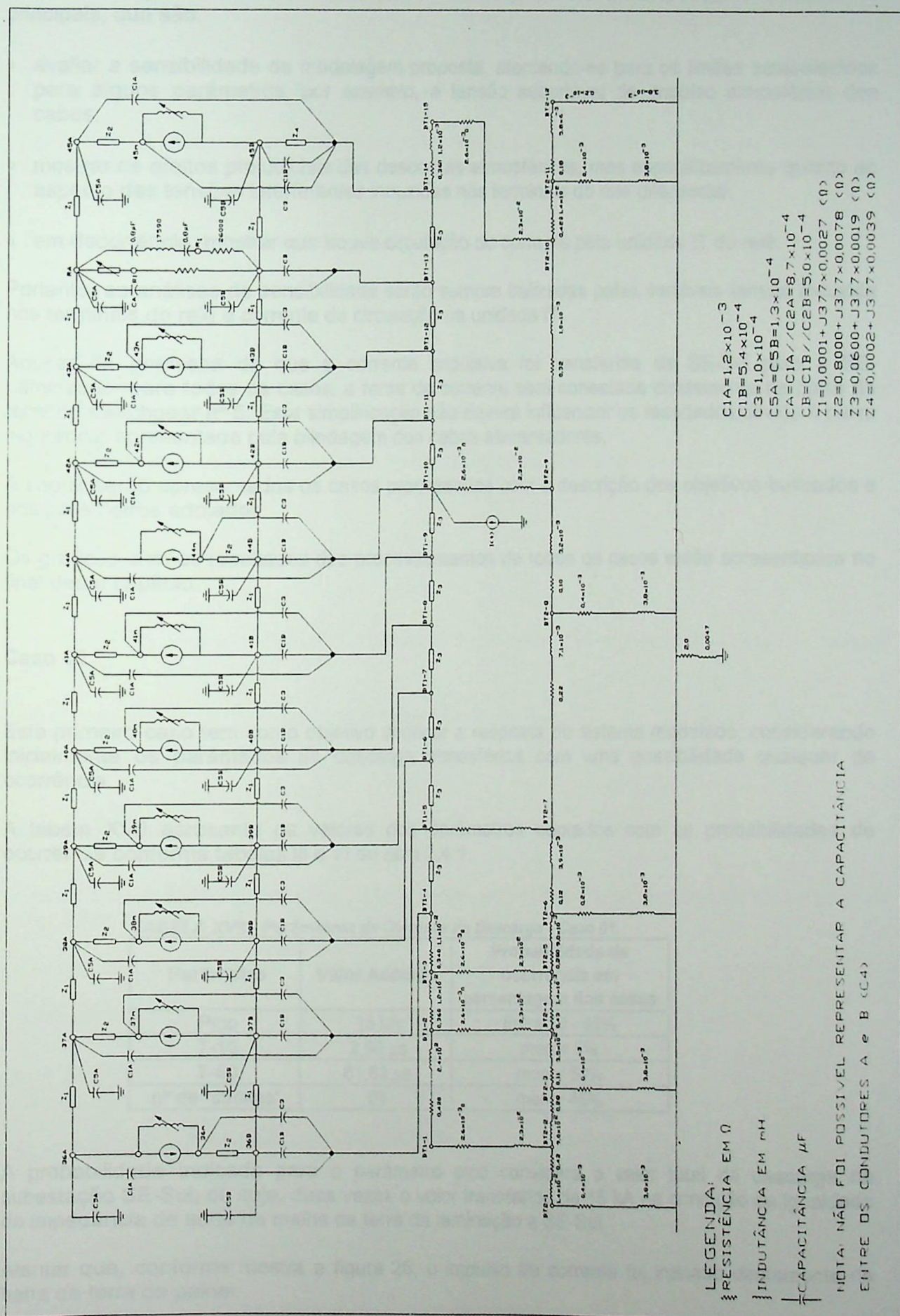


Fig. 34 - Modelagem para Análise de Transitório de origem Atmosférica

## 4.6 Casos Processados

Dentre os objetivos a serem alcançados com os processamentos, podem-se destacar os principais, que são:

- avaliar a sensibilidade da modelagem proposta, atentando-se para os limites estabelecidos para alguns parâmetros, por exemplo, a tensão suportável de impulso atmosférico dos cabos;
- mostrar os efeitos prejudiciais das descargas atmosféricas, mas especificamente quanto ao aspecto das tensões interferentes induzidas nos terminais do relé diferencial;
- em decorrência, mostrar que houve circulação de corrente pela unidade IT do relé.

Portanto, as análises de sensibilidade serão sempre balizadas pelas variáveis tensão induzida nos terminais do relé e corrente de circulação na unidade IT.

Apesar da premissa de que a corrente impulsiva foi transferida da SE-Sul para a SE-Laminação, para todos os casos, a fonte de corrente será conectada diretamente na barra de terra do switchgear nº 5. Esta simplificação não deverá influenciar os resultados devido à baixa indutância apresentada pela blindagem dos cabos alimentadores.

A seguir serão apresentados os casos processados com a descrição dos objetivos buscados e dos parâmetros adotados.

Os gráficos com os resultados dos processamentos de todos os casos estão apresentados no final deste capítulo.

### 4.6.1 Caso 01

Este primeiro caso tem como objetivo verificar a resposta do sistema modelado, considerando inicialmente os parâmetros da descarga atmosférica com uma possibilidade qualquer de ocorrência.

A tabela XVII apresenta os valores dos parâmetros adotados com as probabilidades de ocorrência conforme tabelas III e VI do item 2.4.1.

**TABELA XVII - Parâmetros da Corrente de Descarga - Caso 01.**

Parâmetro	Valor Adotado	Probabilidade de ocorrência em percentagem dos casos
Pico	15 kA	Entre 50 - 95%
T-10	2,90 $\mu$ s	menor 5%
T-50	61,53 $\mu$ s	menor 50%
nº de "strokes"	01	menor 45%

A probabilidade indicada para o parâmetro pico considera o valor total da descarga na subestação SE-Sul, ou seja, duas vezes o valor transferido de 15 kA na condição de igualdade da impedância de surto da malha de terra da laminação e SE-Sul.

Atentar que, conforme mostra a figura 26, o impulso de corrente foi injetado diretamente na barra de terra do painel.

Os gráficos de 1 a 4 apresentam os resultados do processamento onde se utilizou um passo de integração  $\Delta t = 1 \cdot e^6$ .

#### 4.6.2 Caso 02

O objetivo deste caso é verificar a influência do passo de integração.

Os dados utilizados no processamento são idênticos ao caso anterior com exceção do  $\Delta t$  que foi alterado para  $1 \cdot e^7$ . Aliás, este valor será adotado para quase todos os casos subsequentes.

Os resultados do processamento são apresentados pelos gráficos de 5 a 8.

#### 4.6.3 Caso 03

Aqui pretende-se verificar a influência do pico da corrente de descarga, mantendo os demais parâmetros com os valores indicados na tabela XVII.

Desta forma, será utilizado o valor limite calculado conforme abaixo.

$$I_p = \frac{V_p}{Z_o} \quad (4.21)$$

Onde:

$V_p$  = máximo valor de tensão suportável de impulso atmosférico para o qual o cabo é garantido.

$Z_o$  = impedância de surto típica para cabo isolado de  $30\Omega$  [21].

$I_p$  = valor de pico máximo da corrente.

$$I_p = 6 \times \frac{125}{30} = 25 \text{ kA}$$

Considerando as características por fase do circuito por onde houve a transferência da corrente impulsiva, tem-se:

Circuito: 6x1/C # 500 MCM, 12/20 kV, Pirelli, com  $V_p$  de 125 kV [22].

A tabela XVIII apresenta os parâmetros da corrente de descarga para este caso

**Tabela XVIII - Parâmetros da Corrente - Caso 03**

Parâmetro	Valor Adotado	Probabilidade de ocorrência em porcentagem dos casos
Pico	25 kA	menor 50%
T-10	2,90 $\mu\text{s}$	menor 5%
T-50	61,53 $\mu\text{s}$	menor 50%
nº de "strokes"	01	menor 45%

Os gráficos de 9 a 12 mostram os resultados do processamento.

4.6.4 **Caso 04**

Neste caso, pretende-se verificar a influência dos tempos T-10 e T-50 mantendo-se os valores do caso anterior para os demais parâmetros, modelando as possíveis atenuações e distorções impostas ao impulso de corrente, incidente na malha da SE-Sul.

Para tanto, serão adotados valores que possuem uma razoável probabilidade de ocorrência, entre 5 e 50% dos casos (Tabela XIX).

**Tabela XIX - Parâmetros da corrente - Caso 04**

Parâmetro	Valor Adotado	Probabilidade de ocorrência em percentagem dos casos
Pico	25 kA	menor 50%
T-10	9,9 $\mu$ s	-
T-50	144,23 $\mu$ s	-
nº de "strokes"	01	menor 45%

Os gráficos de 13 a 16 apresentam os resultados do processamento.

4.6.5 **Caso 05**

Aqui o objetivo é verificar a influência da interligação existente entre a malha diferencial e a barra de terra do painel, ou seja, da impedância  $Z_4$ , entre os nós 45B e BT1-14 da figura 34.

Para tanto, este caso será desdobrado em dois outros que são:

CASO 5A: A interligação será transferida para o nó onde a injeção de corrente é feita (BT1-10).

CASO 5B: A interligação será eliminada.

Em ambos os casos, serão adotados os parâmetros da corrente conforme tabela XIX.

Os gráficos de 17 a 24 apresentam os resultados destes processamentos.

4.6.6 **Caso 06**

Neste caso, busca-se verificar a influência das capacitâncias conectadas entre a malha diferencial e a referência.

No item 4.5.2.1.d essas capacitâncias foram designadas por C5A e C5B, com valores praticamente iguais devido à considerável distância entre a laje do painel e a malha de terra.

Pode-se reduzir essa distância no caso de se considerarem as capacitâncias entre a malha diferencial e a laje de sustentação do painel. Esta laje é ligada à malha de terra, através de suas ferragens.

Os cálculos das novas capacitâncias foram feitos com base na figura 31 e os valores obtidos são:

$$C'_{5A} = 5,97 \times 10^{-4} (\mu F)$$

$$C'_{5B} = 5,97 \times 10^{-4} (\mu F)$$

Os parâmetros da corrente a serem utilizados são os mesmos do caso 04, tabela XIX.

Os gráficos de 25 a 28 mostram os resultados do processamento.

#### 4.6.7 Caso 07

Este caso tem o objetivo de retratar a multiplicidade das descargas atmosféricas.

Para evitar um gasto excessivo da memória computacional, o número de "strokes" a ser adotado será 3 para um intervalo entre as descargas subsequentes de 6 (ms). Para os "strokes" subsequentes não foi considerada a hipótese de atenuação e distorção da frente do impulso.

Este intervalo determinará um elevado tempo de processamento, gerando um arquivo de plotagem acima da capacidade do programa. Portanto, neste caso será utilizado um passo de integração  $\Delta t = 5 \times e^{-7}$

A tabela XX resume os valores dos parâmetros adotados.

**Tabela XX - Parâmetros da Corrente - Caso 05**

Parâmetros	Valor Adotado	Probabilidade de ocorrência em percentagem dos casos
Primeiro "stroke"		
Pico	25 kA	menor 50%
T-10	9,9 $\mu$ s	-
T-50	144,23 $\mu$ s	-
"strokes" Subsequentes		
Pico	12,5 kA	Entre 50 - 95%
T-10	2,20 $\mu$ s	Entre 5 - 50%
T-50	144,23 $\mu$ s	Entre 5 - 50%
nº de "strokes"	02	menor 45%

Os gráficos 29 e 30 mostram os resultados do processamento.

#### 4.6.8 Caso 08

Para processamento do caso 07, foi necessário utilizar um tempo de integração maior, o que significa um comprometimento dos resultados.

Desta forma, este caso pretende reprocessar o caso anterior utilizando um passo de integração menor de  $2 \times e^{-7}$ . Devido ao limite do programa para arquivos grandes é necessário reduzir o intervalo entre as descargas subsequentes de 6 para 1 ms.

Os gráficos 31 e 32 apresentam os resultados do processamento.

#### 4.6.9 Caso 09

O objetivo aqui é o mesmo do caso anterior, porém serão alterados alguns parâmetros.

Pretende-se adotar, simultaneamente, um número elevado de "strokes" com um pequeno intervalo médio entre descargas subsequentes. A tabela II, inerente às descargas registradas pela CEMIG, sugere um número interessante de 14 "strokes".

Para o intervalo médio entre as descargas subsequentes será adotado o valor de 1 ms que possui uma probabilidade de ocorrência de 5% dos casos. Para os tempos T-10 e T-50 do primeiro "stroke" serão adotados valores que também possuem uma boa probabilidade de ocorrência, sem considerar a hipótese de atenuação e distorção da frente do impulso.

A tabela XXI apresenta os parâmetros utilizados para este caso.

**Tabela XXI - Parâmetros da Corrente - Caso 09**

Parâmetros	Valor Adotado	Probabilidade de ocorrência em percentagem dos casos
Primeiro "stroke"		
Pico	25 kA	menor 50%
T-10	2,90 μs	Entre 50 - 95%
T-50	61,53 μs	menor 50%
"strokes" Subsequentes		
Pico	12,5 kA	Entre 50 - 95%
T-10	2,20 μs	Entre 5 - 50%
T-50	144,23 μs	Entre 5 - 50%
nº de "strokes"	14	menor 5%

Os gráficos de 33 a 36 apresentam os resultados do processamento.

#### 4.6.10 Caso 10

O objetivo deste caso é verificar a influência da impedância da blindagem dos cabos que alimentam o switchgear.

A corrente impulsiva foi transferida da SE-Sul para a SE Laminação pelas blindagens dos 6 cabos de 500 MCM. As blindagens encontravam-se interligadas nas duas extremidades do circuito.

A impedância da blindagem é dada por:

$$Z_B = R_B + j\omega L_B \tag{4.22}$$

O primeiro termo da equação determina a queda de tensão resistiva da blindagem e o segundo termo, a tensão induzida entre a blindagem e o centro do condutor.

A relação entre  $Z_B$  e  $\omega$  não é simples, pois  $R_B$  e  $L_B$  são complexos e dependentes da frequência. Conforme [11] a expressão aproximada de  $R_B$  é:

$$R_B \cong \frac{R_{BO}}{1 - e^{-\delta/t}} \text{ para } \delta < t \tag{4.23}$$

Onde:

$R_{BO}$  - valor dc de  $R_B$

$t$  - espessura da blindagem

$\delta$  - "skin depth"



Com:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (4.24)$$

Sendo  $\mu$  e  $\sigma$  respectivamente a permeabilidade e a condutividade do material.

Também em [20] é apresentado um gráfico com a variação, em função da frequência, das impedâncias típicas das blindagens mais empregadas em cabos de força. Para a faixa de frequência analisada, acima de 100 MHz, a blindagem do tipo trança de fios de cobre possui uma impedância em torno de 40 m $\Omega$ /m. Portanto, os valores de  $R_B$  e  $L_B$  já podem ser determinadas conforme a seguir.

Assumindo:

$$\delta = 0,0033 \text{ mm}$$

$$t = 0,3 \text{ mm}$$

$$R_{B0} = 0,42 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

tem-se um valor de  $R_B$  igual a 38 m $\Omega$ /m.

Logo, o valor de  $L_B$  será:

$$L_B = \frac{\sqrt{40^2 - 38^2}}{377}$$

$$L_B = 0,033 \text{ mH/m}$$

Considerando o comprimento do circuito de 200 m, tem-se para os seis condutores em paralelo:

$$R_B = 1,26 \Omega$$

$$L_B = 1,1 \text{ mH}$$

Para o processamento será utilizado o banco de dados do Caso 04 acrescido do ramo acima.

Os gráficos 37 e 38 apresentam os resultados do processamento.

#### 4.7 Análise dos Resultados dos Processamentos para o Regime Transitório

A partir dos gráficos com os resultados dos processamentos apresentados no sub-item 4.6, pode-se desenvolver a seguinte análise:

- devido ao fenômeno analisado ser de alta frequência, verificou-se a necessidade de utilizar um menor passo de integração possível, cujo limite foi estabelecido pela capacidade de armazenamento de dados do programa Microtran.

Ao comparar os gráficos do caso 01 com os do Caso 02, constatou-se que a alteração do passo de integração de  $1 \cdot e^{-6}$  para  $1 \cdot e^{-7}$  provocou um aumento considerável nas variáveis analisadas. A tensão interferente diferencial cresceu de um pico máximo de 26 kV para 29,7 kV e em decorrência, a corrente na unidade IT do relé passou de um pico máximo de 306 A para 1200 A.

Um outro fato de extrema importância é que a duração da corrente na unidade IT também se alterou, cresceu de um valor de  $4\mu\text{s}$  (gráfico 2) para  $19\mu\text{s}$  (gráfico 6).

É importante lembrar que a unidade IT está conectada em série com um varistor e, por conseguinte, tanto o módulo como a duração da corrente nesta unidade são influenciados pela tensão interferente diferencial induzida nos terminais do relé.

Logo, verifica-se que o passo de integração de  $1 \cdot e^{-7}$  conduz a resultados mais precisos e, portanto, recomenda-se a sua utilização em estudos de mesma natureza.

- como já era de se esperar, o aumento do valor da corrente impulsiva de 15 para 25 kA quase que dobrou os valores de pico máximo da tensão interferente diferencial e da corrente na unidade IT, conforme mostram os gráficos 10 e 12.

Também houve um aumento da duração da corrente na unidade IT, que passou de  $19\mu\text{s}$  (gráfico 6) para  $23\mu\text{s}$  (gráfico 10).

- o aumento dos tempos T-10 e T-50, na tentativa de modelar as distorções e atenuações na frente do impulso provocou uma redução nos picos máximos da tensão interferente diferencial e da corrente na unidade IT.

Este resultado já era esperado, pois o aumento dos tempos reduz o valor da fonte de tensão interferente ( $V_i = L di/dt$ ) e, conseqüentemente, um menor valor de tensão diferencial é induzido nos terminais do relé.

Os gráficos 14 e 16 apresentam valores de pico máximo de 6 kV e 495 A, que são bem menores que aqueles mostrados pelos gráficos 10 e 12. Aliás, este valor relativamente baixo da tensão, justifica a integridade física do relé após a ocorrência.

O parâmetro duração da corrente na unidade IT foi fortemente afetado, reduzindo-se de um valor de  $23\mu\text{s}$  (gráfico 10) para  $11\mu\text{s}$  (gráfico 14).

- os resultados do Caso 05 mostraram que a proximidade elétrica, entre o terminal do relé e o ponto da injeção da corrente impulsiva na barra de terra, conduz a uma maior tensão interferente diferencial induzida.

O ponto de injeção da corrente impulsiva é caracterizado por ser o de maior tensão, portanto, a interligação deste ponto com a malha diferencial estabelece uma transferência direta de potencial.

A tabela XXII mostra um resumo do resultados obtidos para três situações.

**Tabela XXII - Influência da Interligação entre a malha diferencial e a barra de terra**

SITUAÇÃO	INTERLIGAÇÃO ENTRE OS NÓS	PICO MÁXIMO DA TENSÃO DIFERENCIAL INDUZIDA	PICO MÁXIMO E DURAÇÃO DA CORRENTE NA UNIDADE IT
1	45B/BT1-14	6,5 kV	495 A/11 $\mu$ s
2	45B/BT1-10	11 kV	731 A/13 $\mu$ s
3	-	9,3 kV	205 A/10 $\mu$ s

Apesar da situação 3 (sem interligação) ter apresentado um pico máximo de tensão maior que o da situação 1, verifica-se um menor valor para a corrente na unidade IT.

Observa-se, nos gráficos de tensão, que, na sequência dos impulsos, tem-se uma onda oscilante de frequência bastante elevada. Enquanto o valor máximo desta onda de tensão for maior que a tensão de avalanche do varistor, haverá uma corrente proporcional circulando pela unidade IT.

Uma comparação entre os gráficos 16 e 24 justifica o fato apresentado acima.

Verifica-se que o valor da tensão máxima da onda oscilante é maior para a situação 1 (gráfico 16) o que significa uma corrente também maior na unidade IT.

- o valor das capacitâncias entre a malha diferencial e a referência influencia tanto nos módulos das grandezas analisadas como no parâmetro duração da corrente IT. Tal fato pode ser constatado através dos resultados do Caso 06. Verifica-se que, com o aumento do valor dessas capacitâncias, o máximo pico de corrente cresceu de 495 A (gráfico 14) para 1360 A (gráfico 26) e a duração dessa corrente que era de 11  $\mu$ s dobrou de valor.

Conforme descrito no item 2.6, o valor desta capacitância também influencia no módulo da tensão interferente de modo comum. Este fato fica evidente ao se analisarem os gráficos 39 e 40 apresentados a seguir. Nos gráficos é plotado simultaneamente o valor da tensão no borne do relé, inerente aos casos 04 e 06. Observa-se que, em ambos os bornes, a onda de tensão associada ao caso de maior capacitância (Caso 06) apresentou picos de tensão menores o que resulta em uma menor tensão de modo comum.

Entretanto, conforme mencionado acima, a tensão diferencial foi maior para o Caso 06 (gráficos 41 e 42). A redução desta modalidade de tensão só é possível com o equilíbrio do valor de todas as capacitâncias envolvidas.

As tensões apresentadas são relativas, ao terra remoto e são elevadíssimas  $\pm 100$  kV. Isto pode suscitar algumas dúvidas com respeito ao problema. Porém, é conveniente lembrar que a tensão efetiva vista pelos bornes do relé é relativa ao terra local (barras de terra, piso, carcaça, etc.).

- o Caso 10 veio comprovar a premissa inicial de que a conexão direta da fonte de corrente impulsiva na barra de terra do painel não influenciaria os resultados.

A constatação é feita através da comparação dos resultados apresentados nos gráficos 37 e 38 (Caso 10) com aqueles dos gráficos 13 e 15 (Caso 04). Os valores encontrados para a tensão e corrente são praticamente iguais.

A justificativa para este fato é que a queda de tensão determinada pelo circuito alimentador SE-Sul/SE-Laminação é praticamente desprezível em função da baixa indutância apresentada pela blindagem dos cabos.

Uma melhor modelagem incluiria os efeitos das distorções na frente do impulso (parâmetros dependentes com frequência, etc.) o que não foi realizado. A redução da frente do impulso no Caso 04 modela este efeito e, a partir de um certo valor de tempo de frente não são esperados problemas de distorções.

- quanto ao aspecto da multiplicidade da descarga atmosférica pode-se dizer que ela determina uma sequência de pulsos de corrente na unidade IT do relé.

Esses pulsos são caracterizados por picos elevadíssimos, muitas vezes superior o valor de ajuste desta unidade que é 1,5 Arms em 60 Hz e, também, por um período de duração bem curto.

As análises até aqui contemplaram tão somente os dez casos apresentados no sub-item anterior.

Entretanto, deve-se ressaltar que outras pesquisas foram realizadas com o objetivo de dar um maior refinamento à modelagem adotada. Nesse contexto, podem ser citados alguns exemplos, como o caso de verificação da influência da indutância mútua dos condutores, ou aquele em que se introduziram as capacitâncias entre as ferragens da laje e a referência, os que verificaram a influência da representação da reatância de magnetização dos TC's, etc.

Finalmente, pode-se dizer que os casos apresentados são os mais relevantes e vêm de encontro aos objetivos listados no item 4.5.2.2.

## Conclusões

A modelagem utilizada para a análise da ocorrência na siderúrgica, baseada apenas no conceito de acoplamento de campo elétrico, prima mais pelo aspecto qualitativo do que pelo quantitativo.

Os resultados dos processamentos vieram confirmar o potencial de interferência das descargas atmosféricas e os riscos decorrentes aos equipamentos, principalmente àqueles inseridos em instalações em que o projeto de concepção não contemplou as recomendações e critérios básicos específicos.

Os resultados obtidos para as tensões interferentes induzidas, tanto a diferencial como a de modo comum, embora apresentassem os valores característicos de picos elevados não incorporaram todos os efeitos produzidos por fenômenos desta natureza.

A modelagem não considerou o acoplamento magnético presente, cujos efeitos seriam superpostos aos gerados pelo acoplamento elétrico.

A modelagem também não considerou os parâmetros como dependentes da frequência, cujos efeitos esperados são de atenuação e distorção do impulso de corrente.

A modelagem adotada, se comparada com outras existentes para cálculo do acoplamento eletromagnético, por exemplo a "Scattering Theory", tem a grande vantagem da simplicidade na determinação dos parâmetros envolvidos sem a utilização de software específico.

Deve-se ter em mente que o objetivo principal do trabalho não é o desenvolvimento de uma modelagem para cálculos de acoplamento eletromagnético, mas sim a utilização de uma que possibilite mostrar os problemas causados pela indução eletromagnética, mais especificamente aquele vivenciado pela siderúrgica.

Deve-se cercar de alguns cuidados antes de concluir que o relé diferencial operou devido às tensões interferentes induzidas.

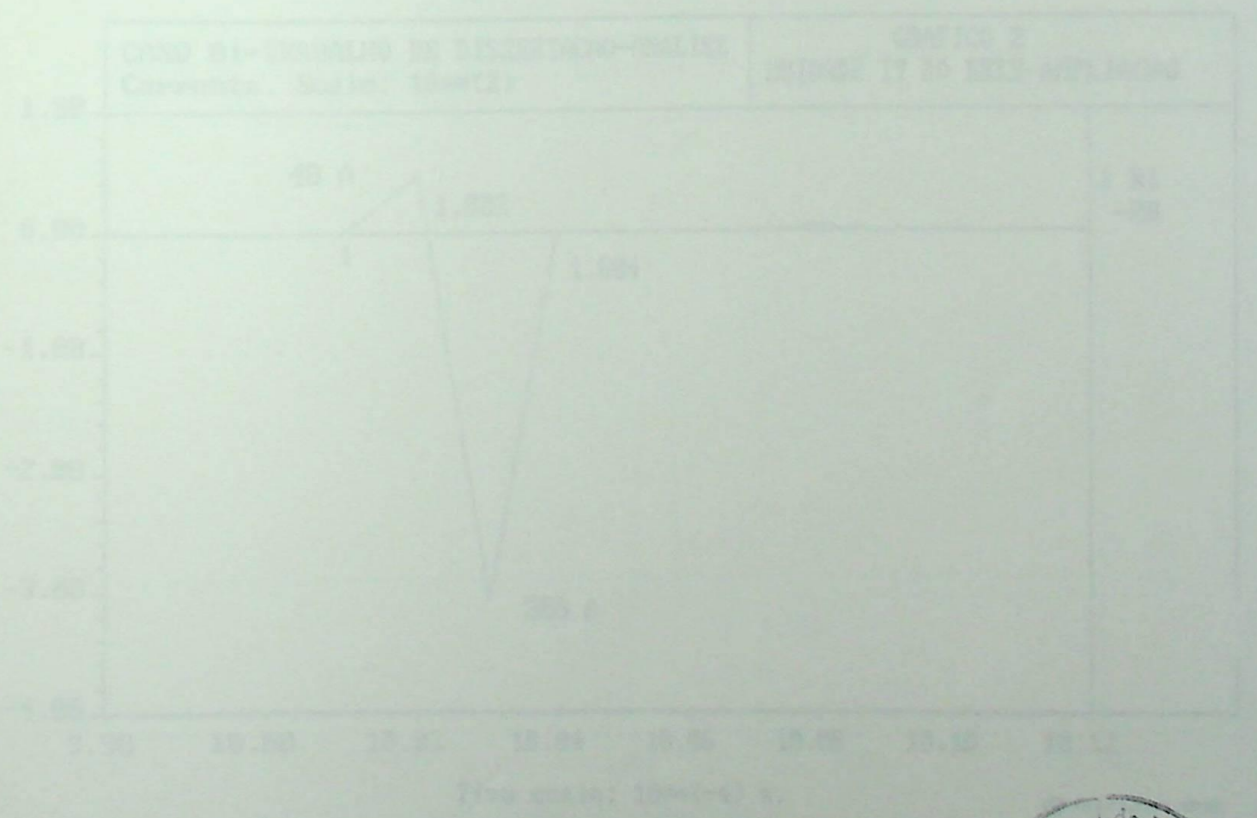
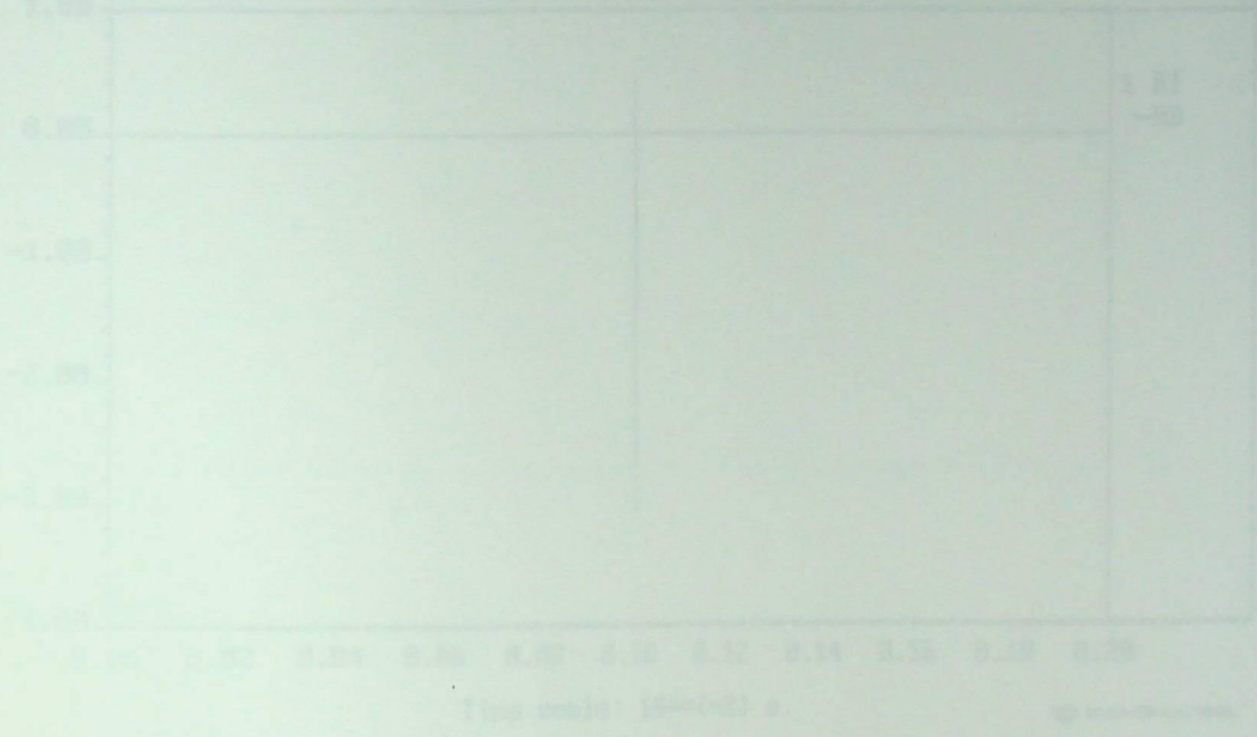
Nas análises dos resultados dos processamentos, verificaram-se valores elevadíssimos de corrente de circulação pela unidade IT do relé. Houve casos em que ela chegou a atingir picos de até 900 vezes o valor de ajuste na frequência industrial. Porém, não menos importante que o módulo da corrente, é o tempo de duração da mesma.

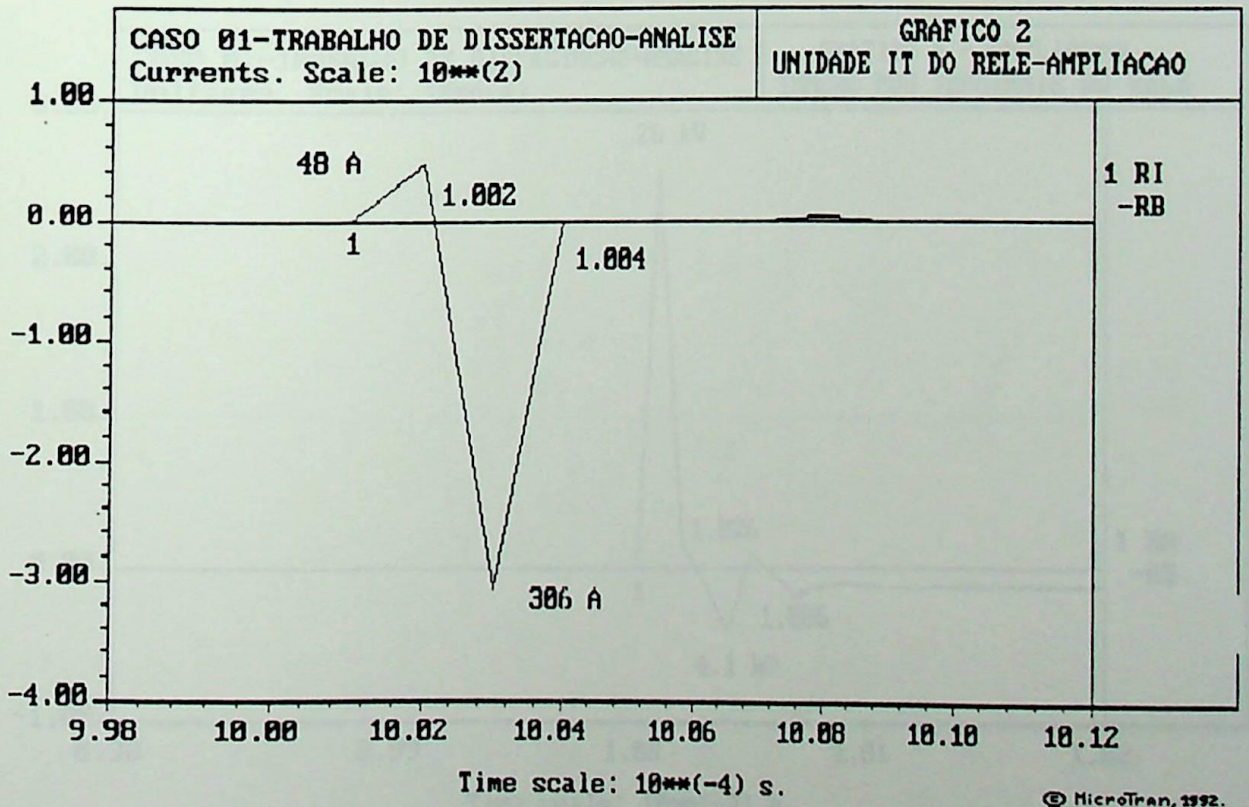
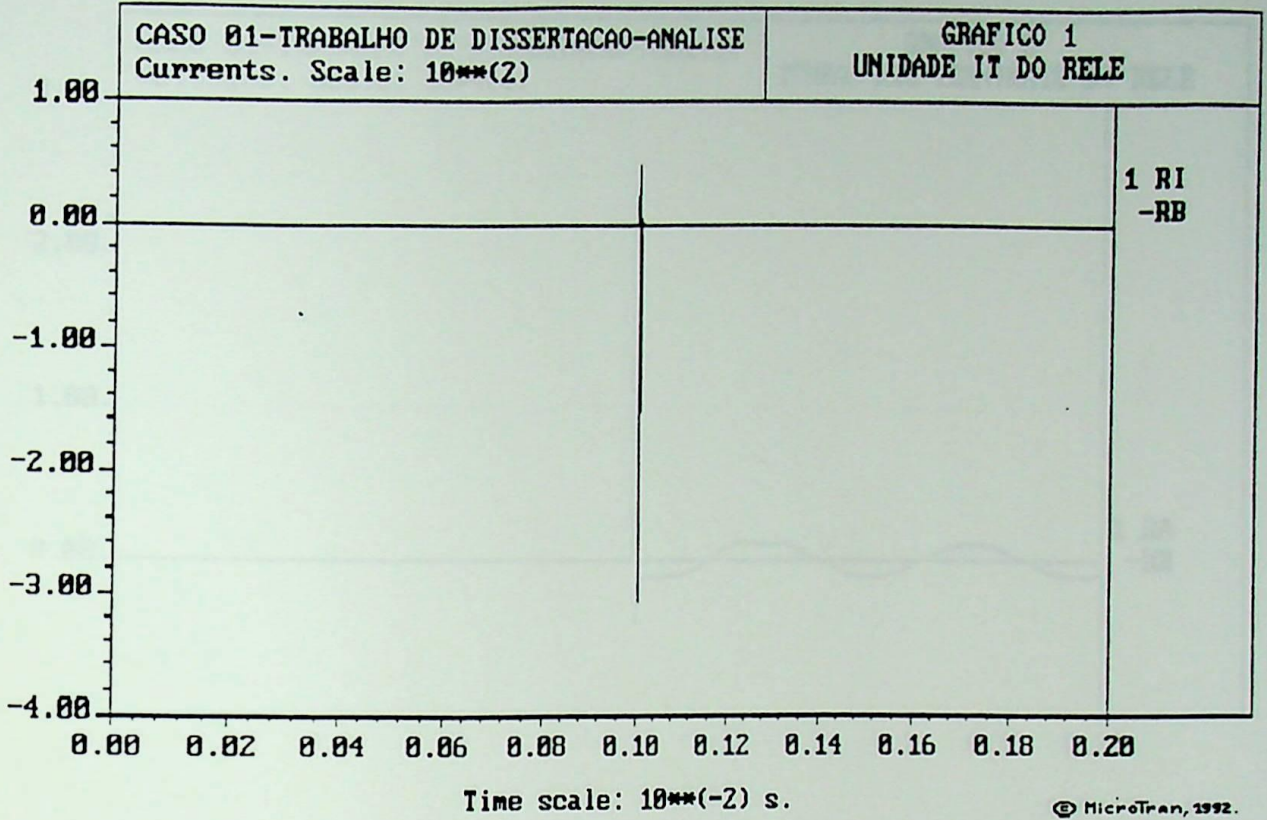
Verificou-se que a duração da corrente atingiu valores da ordem de poucas dezenas de microsegundos. Neste ponto, é importante questionar se uma corrente caracterizada por módulo elevado e baixa duração seria capaz de sensibilizar um relé instantâneo do tipo armadura em charneira. É dentro deste contexto que se vê a importância da apresentação dos resultados de todas as etapas da pesquisa realizada, desde os testes em campo até as simulações.

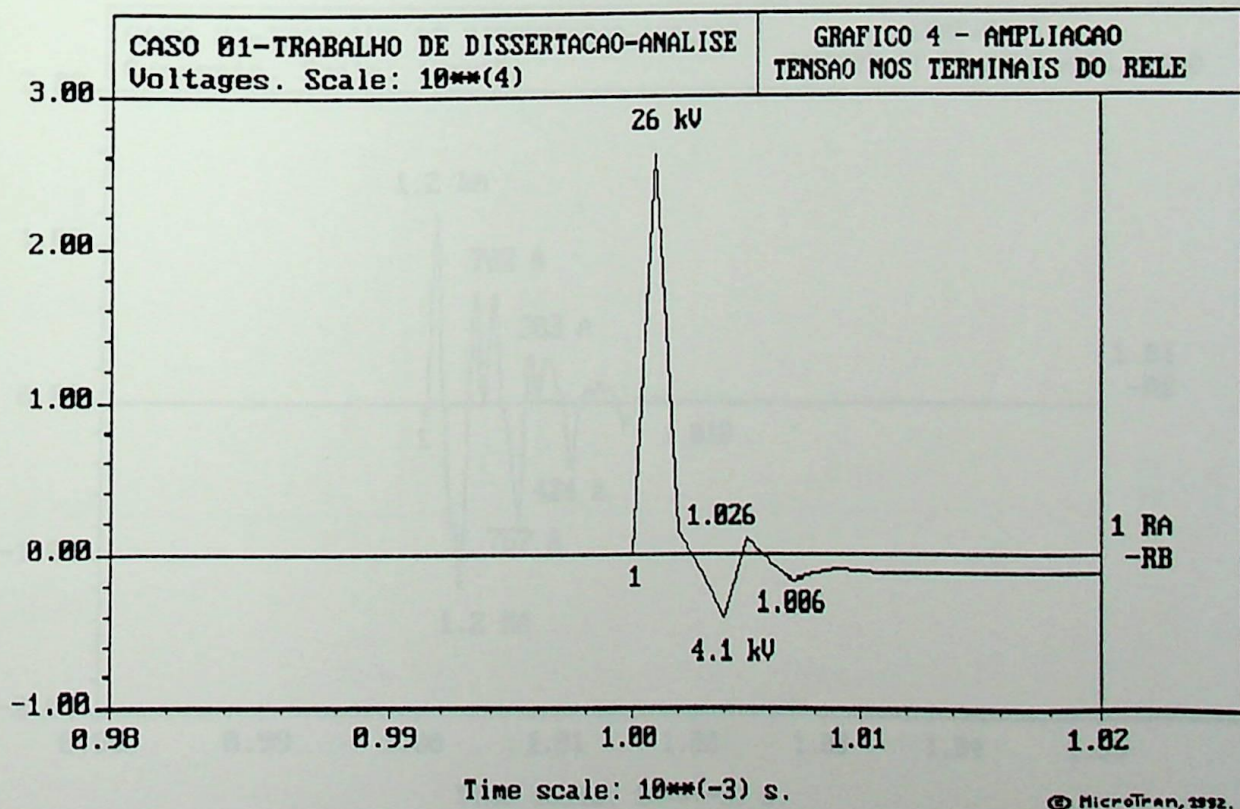
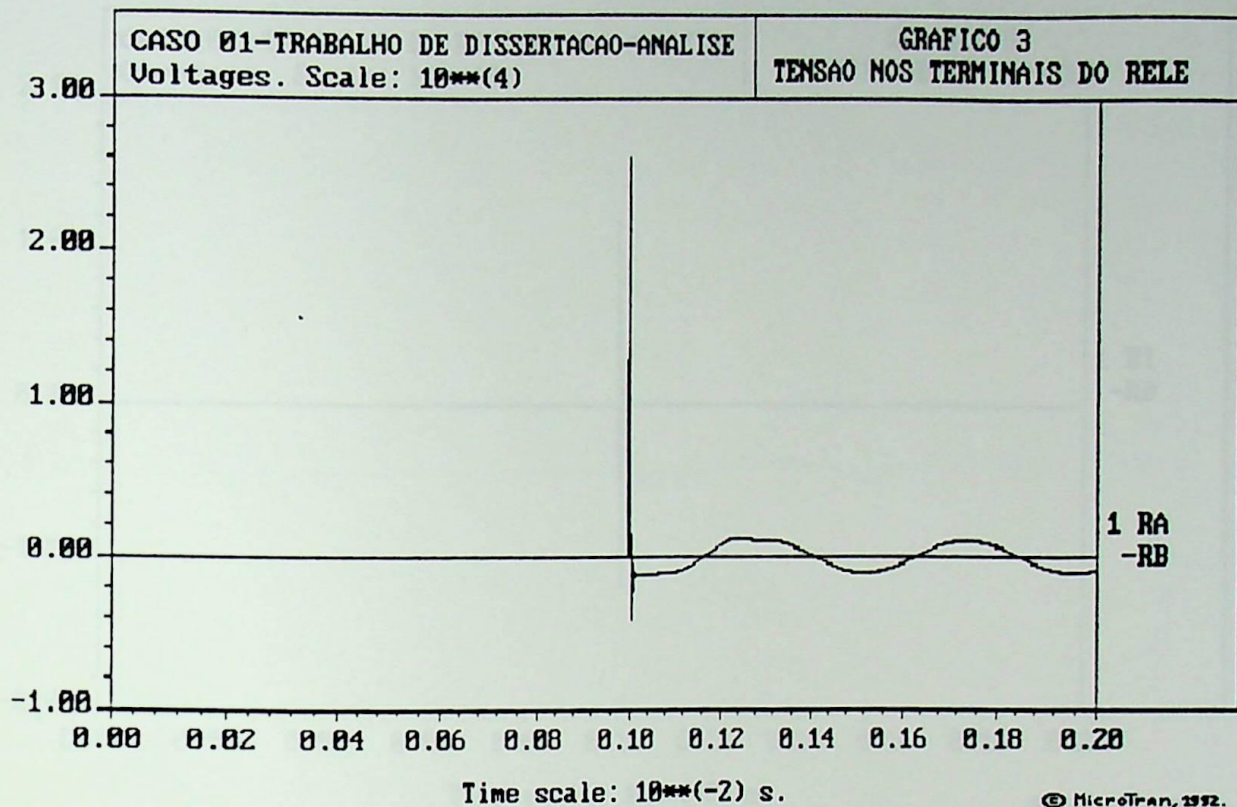
Uma vez constatado que as poucas anormalidades encontradas no sistema diferencial não seriam capazes de levar o relé a operação e que ficou evidenciada a circulação da corrente impulsiva na barra de terra do painel, pode-se concluir que a hipótese mais provável é a atuação da proteção devido ao transitório eletromagnético.

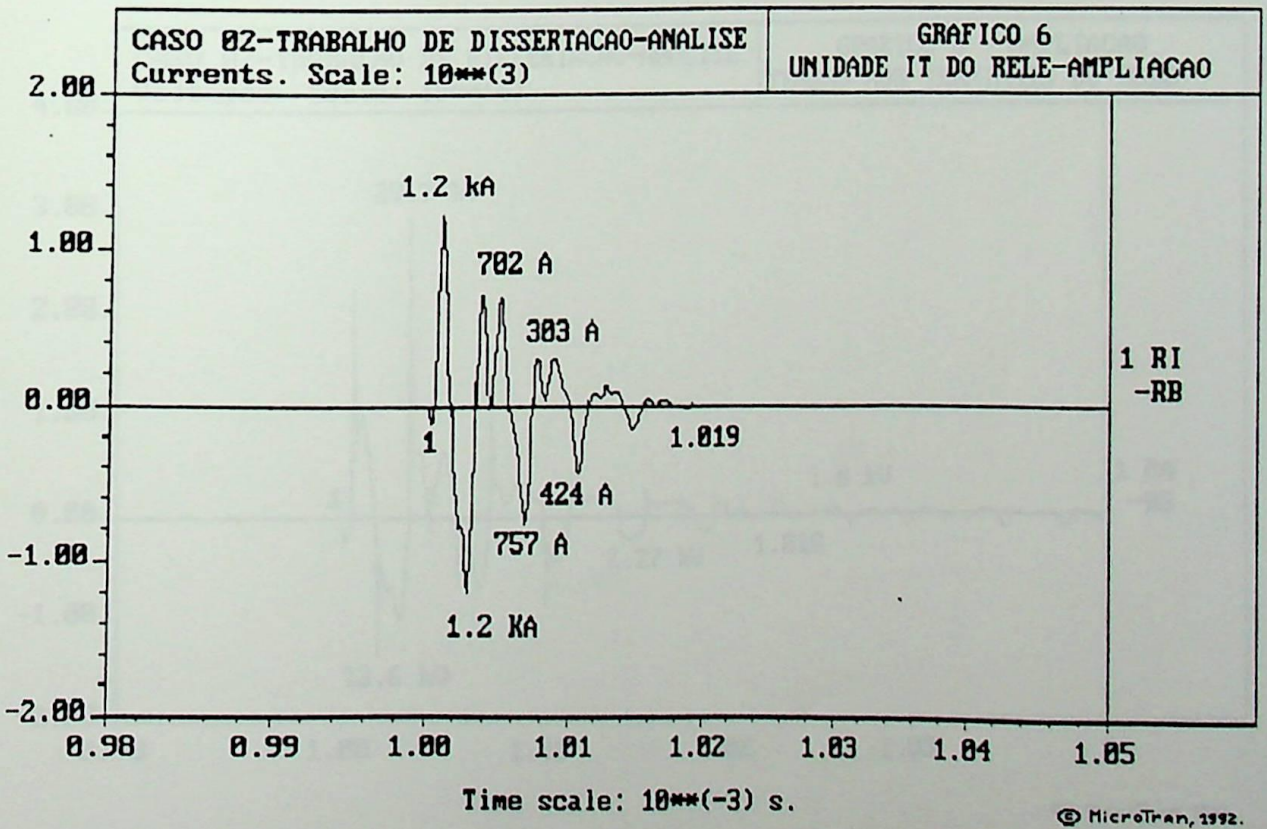
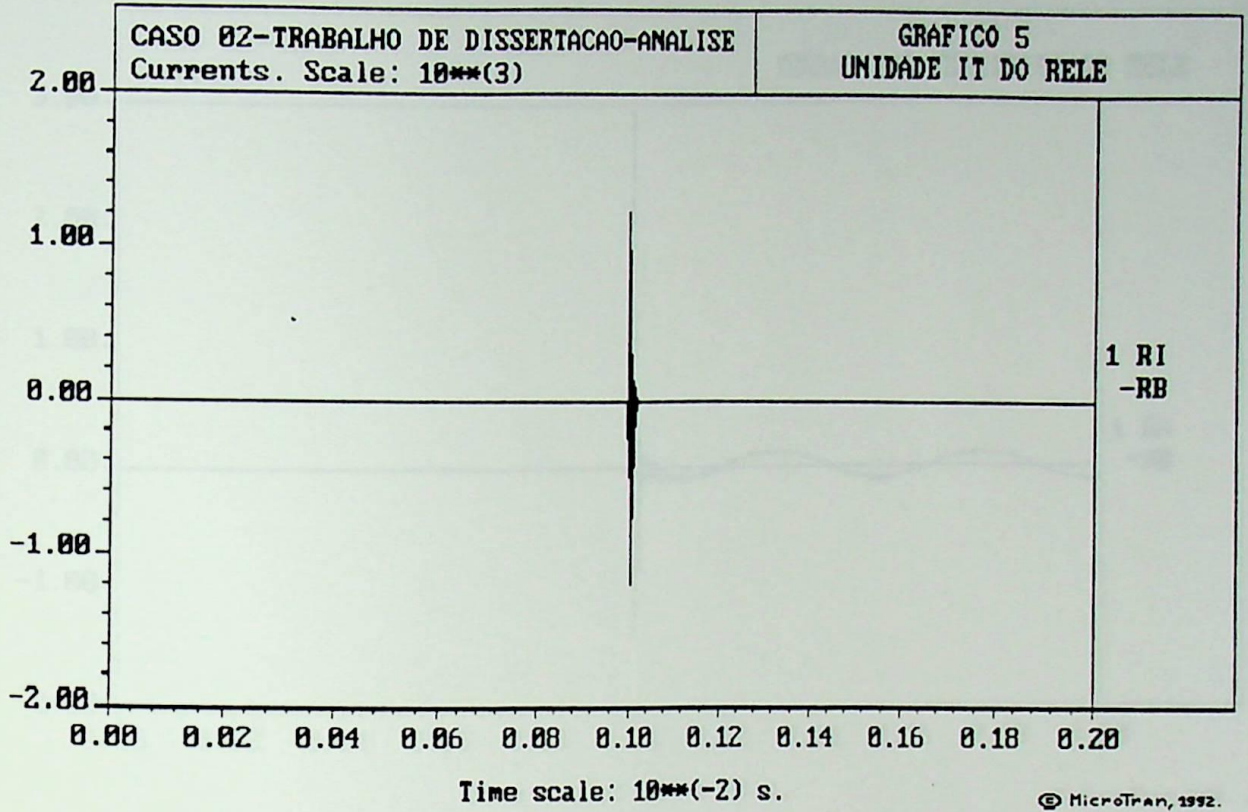
É claro que, além das hipóteses analisadas, existe aquela relacionada com o toque acidental na porta do painel. Esta hipótese é de baixa probabilidade de ocorrência devido ao tipo construtivo do relé e ao bom resultado obtido no teste de vibração realizado em caráter informal. A validação da conclusão acima só é possível por meio de ensaios em laboratório especializado.

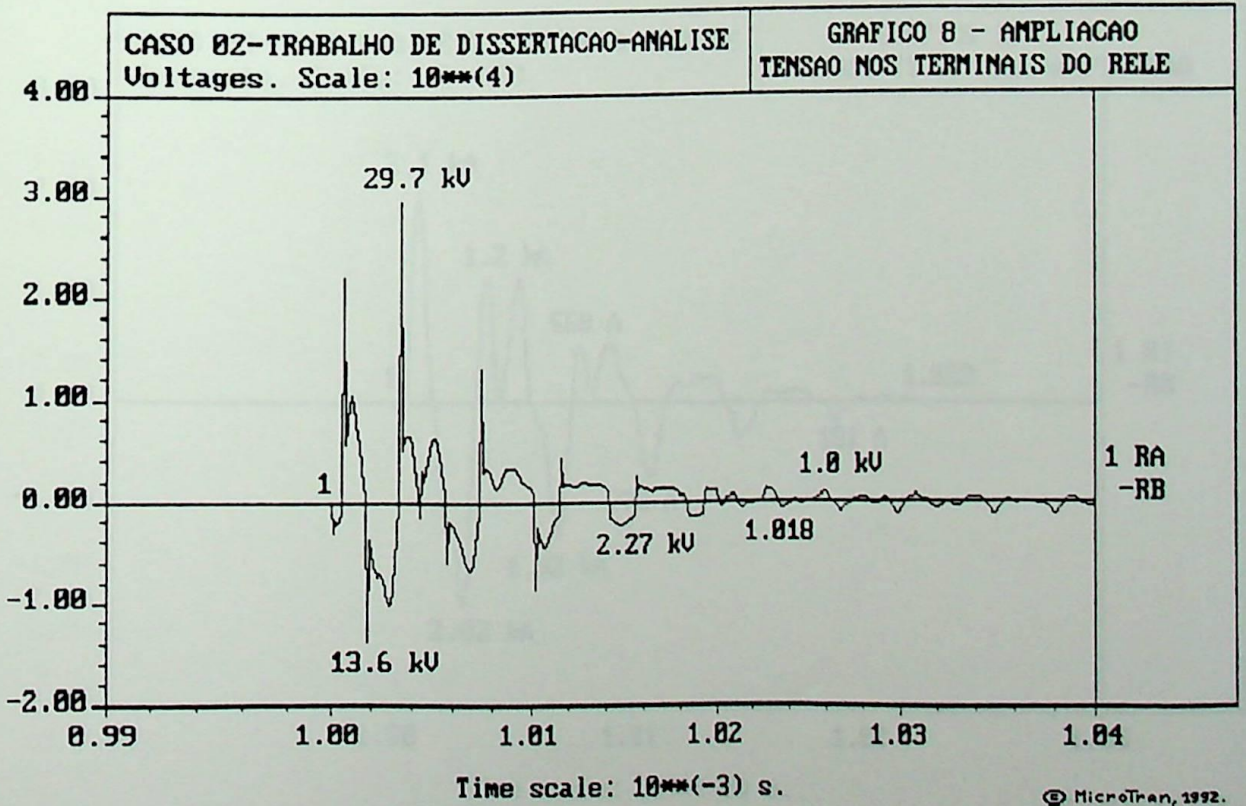
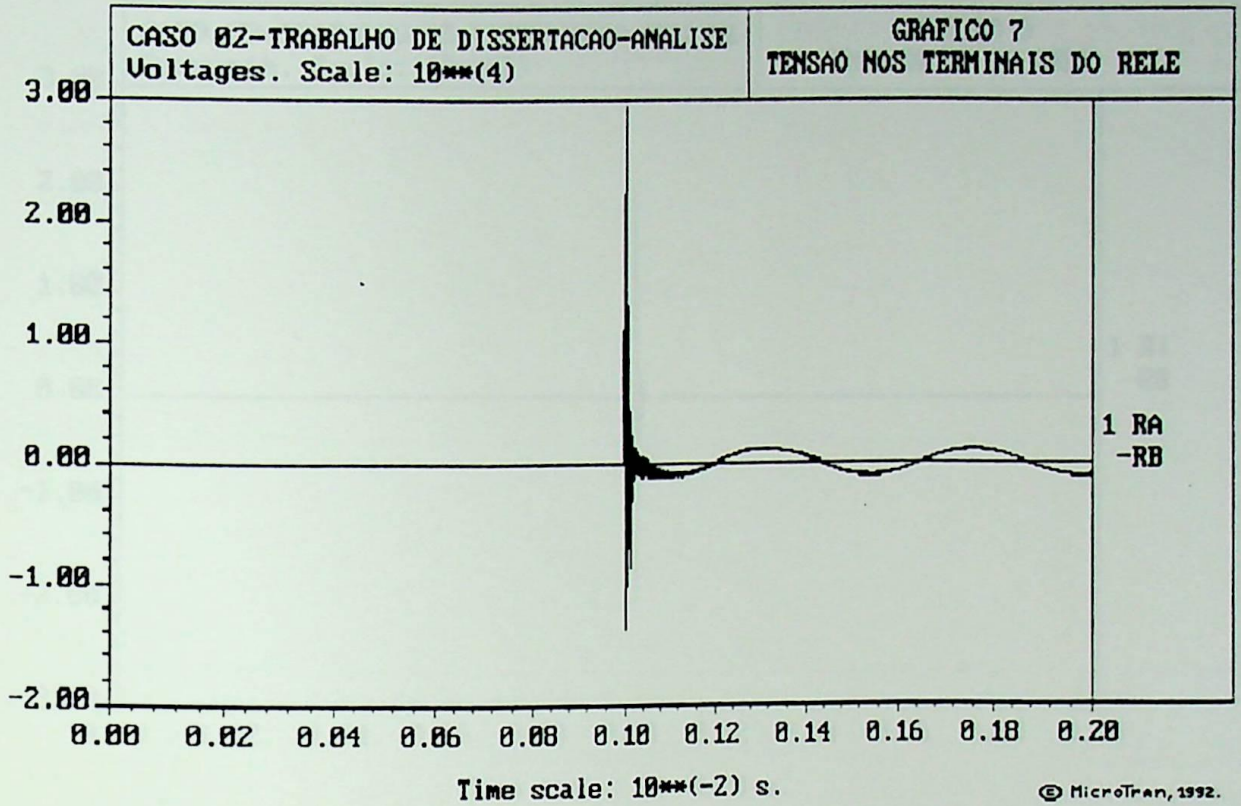
O CEPEL informou que está capacitado para avaliar a sensibilidade do relé frente a sinais impulsivos, inclusive podendo injetar uma sequência de pulsos de maneira a retratar as induções devidas a descargas atmosféricas múltiplas.

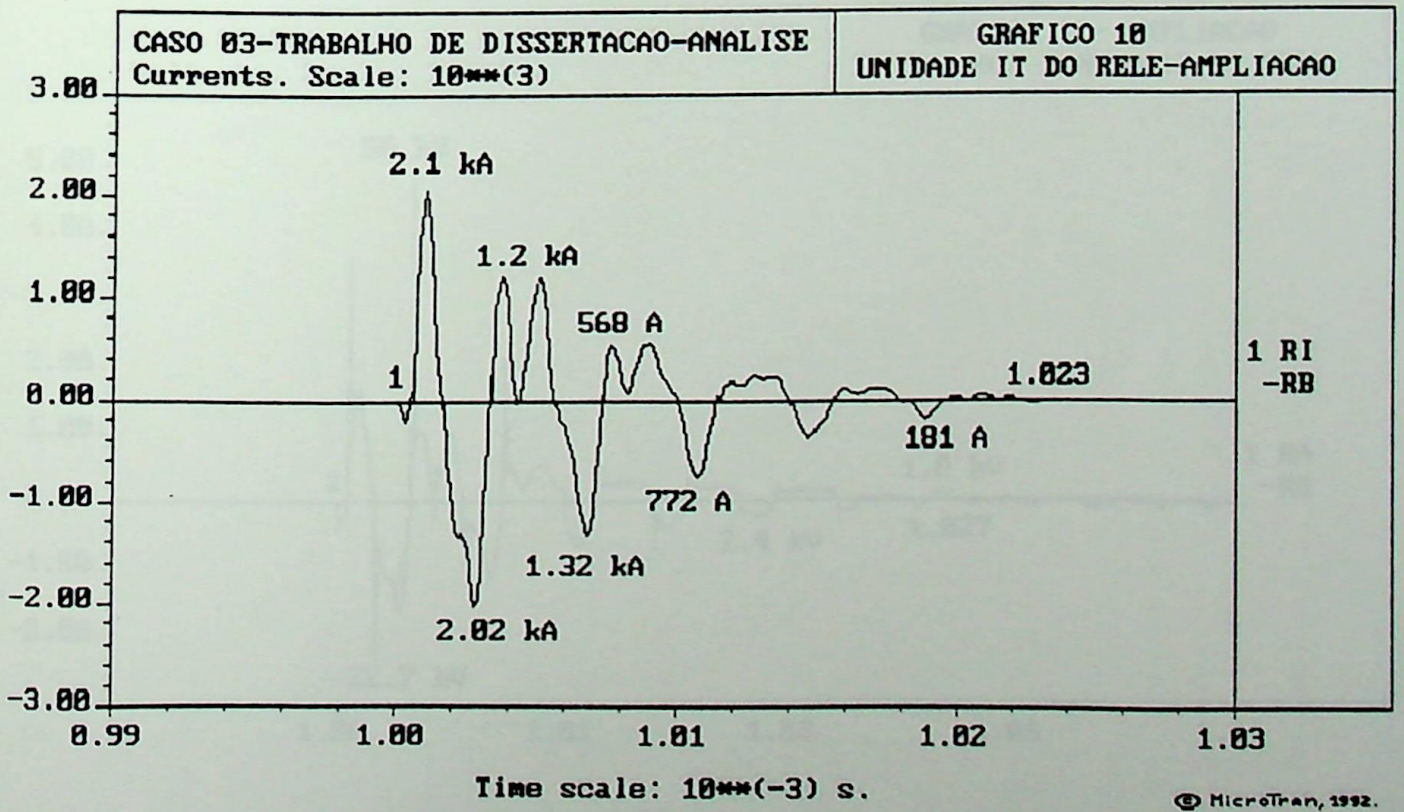
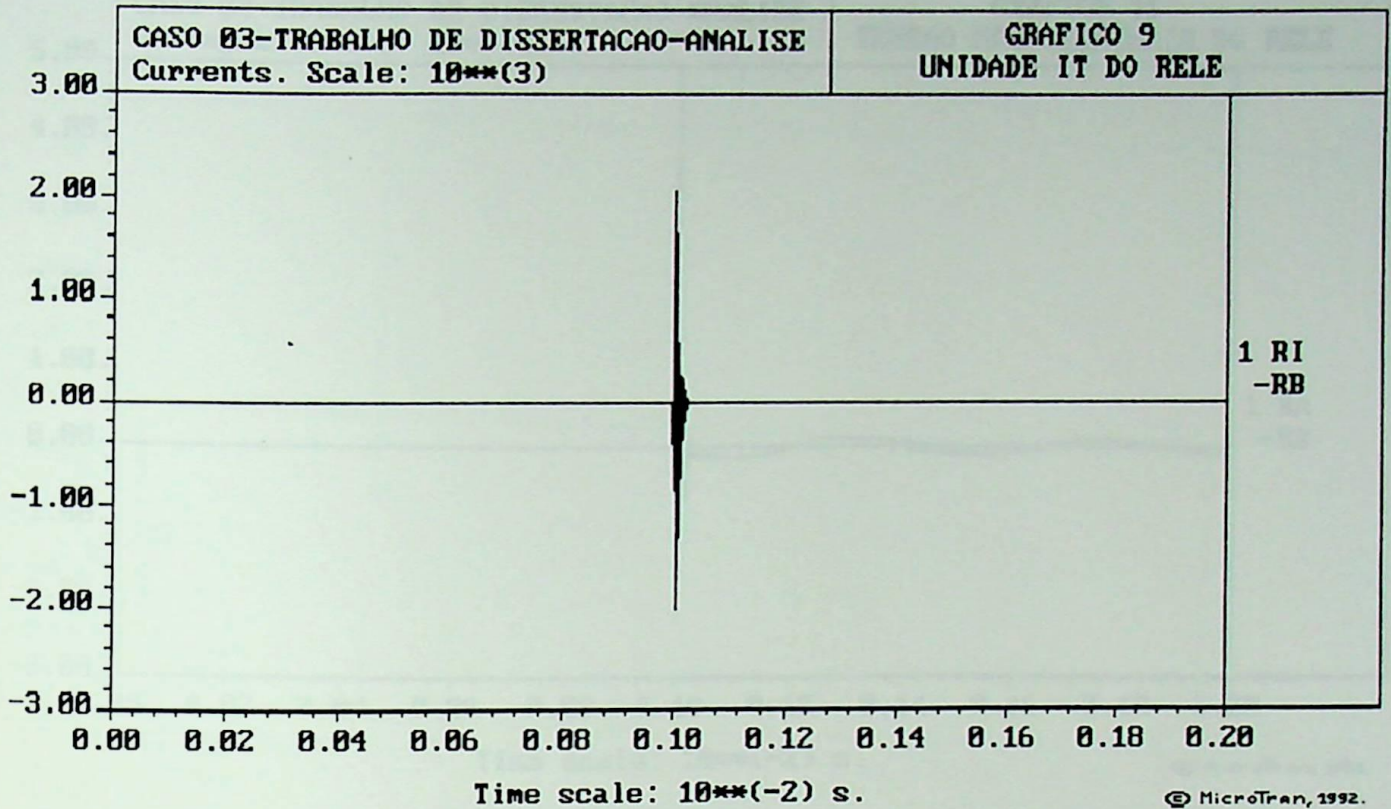


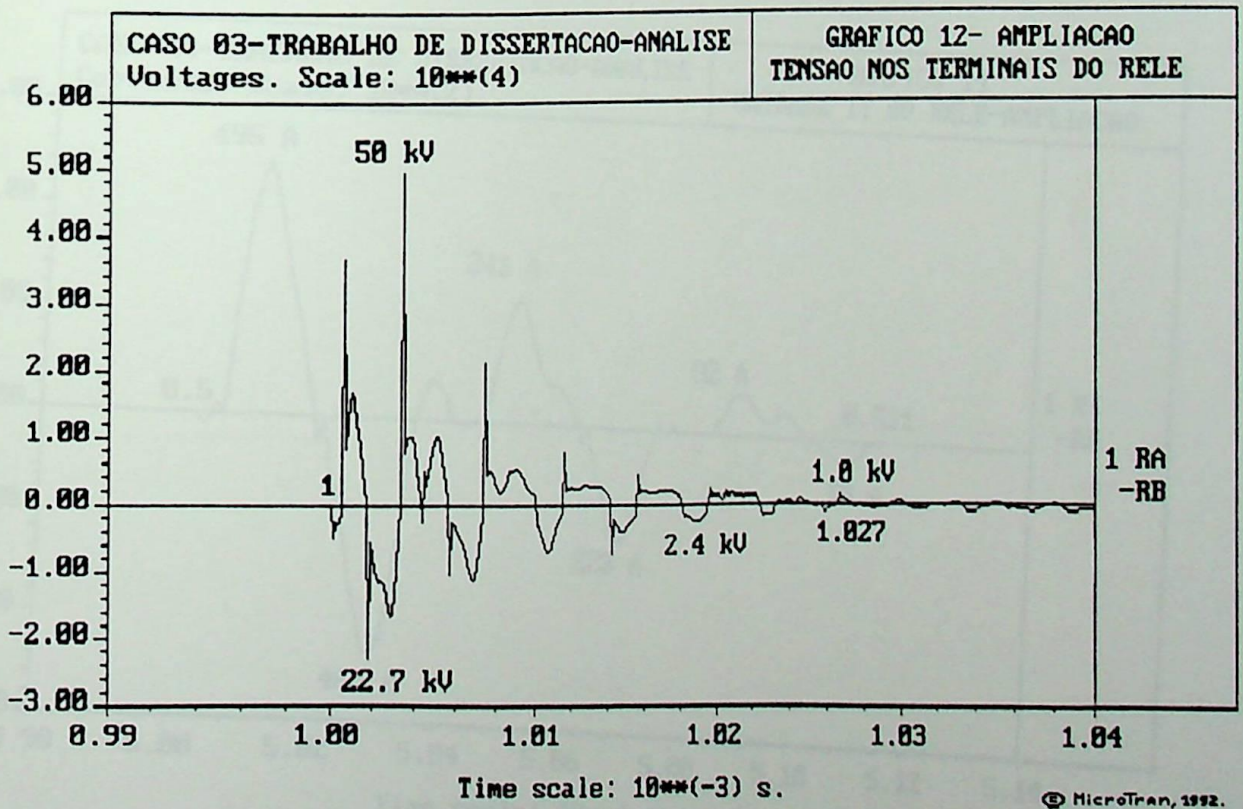
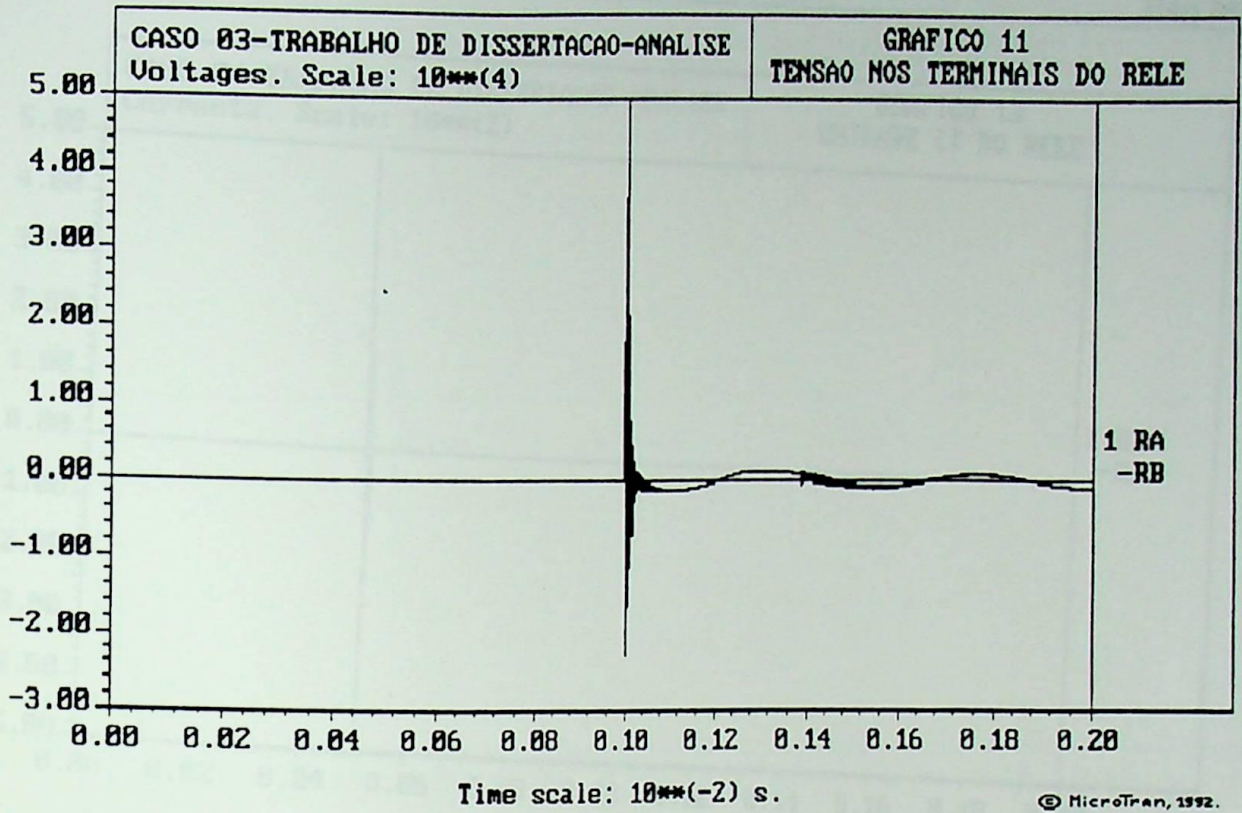


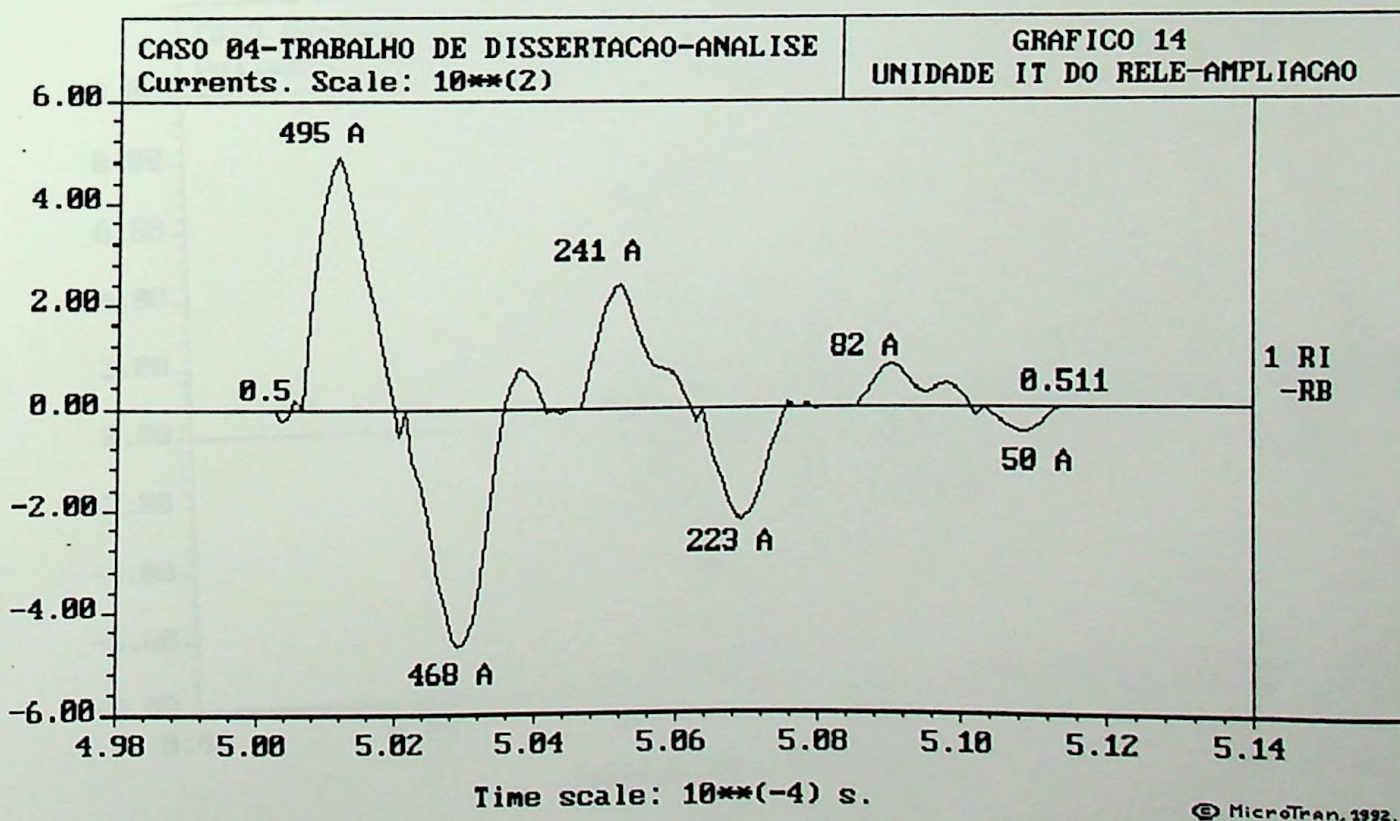
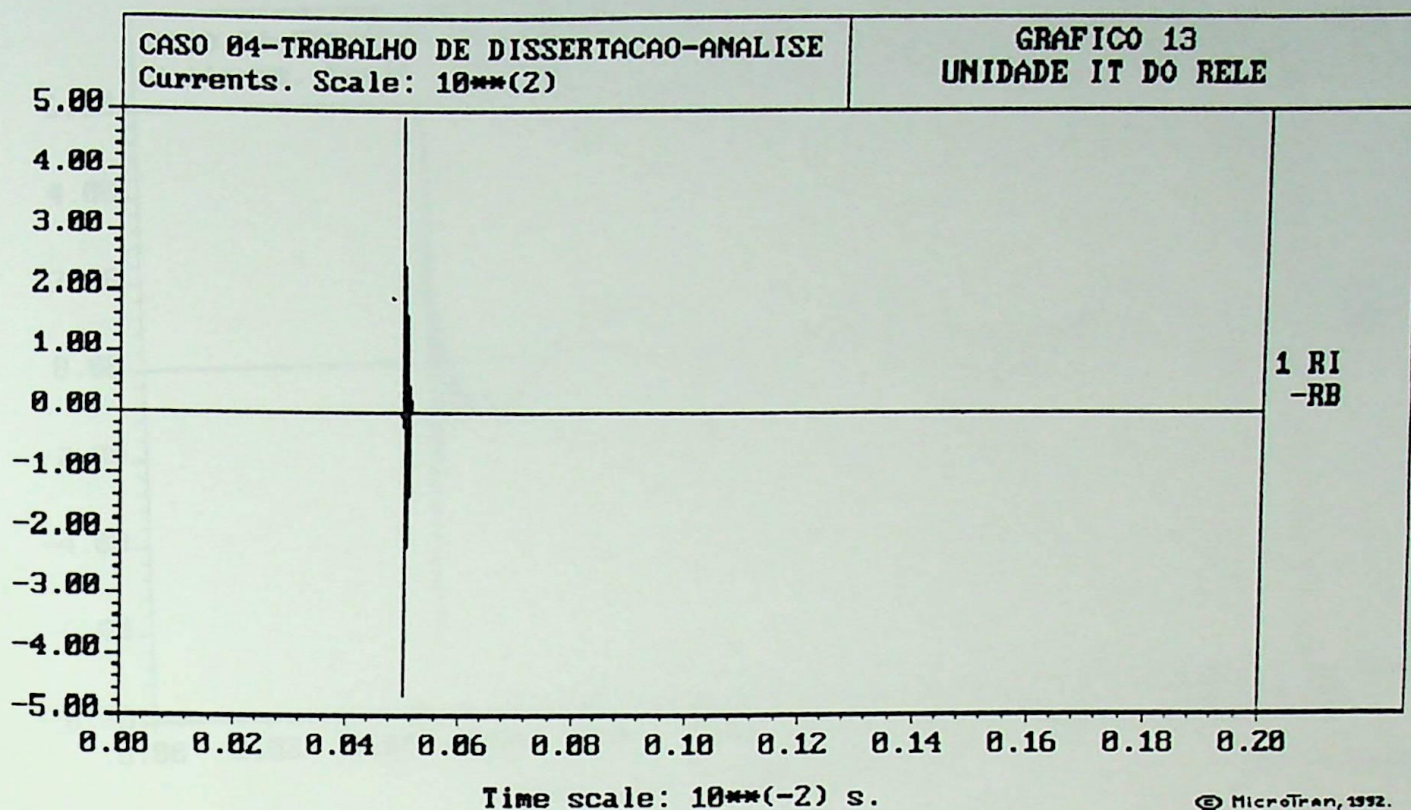


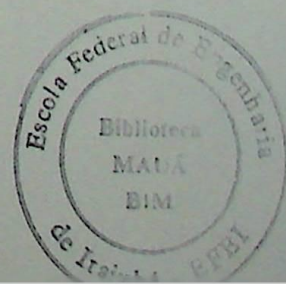
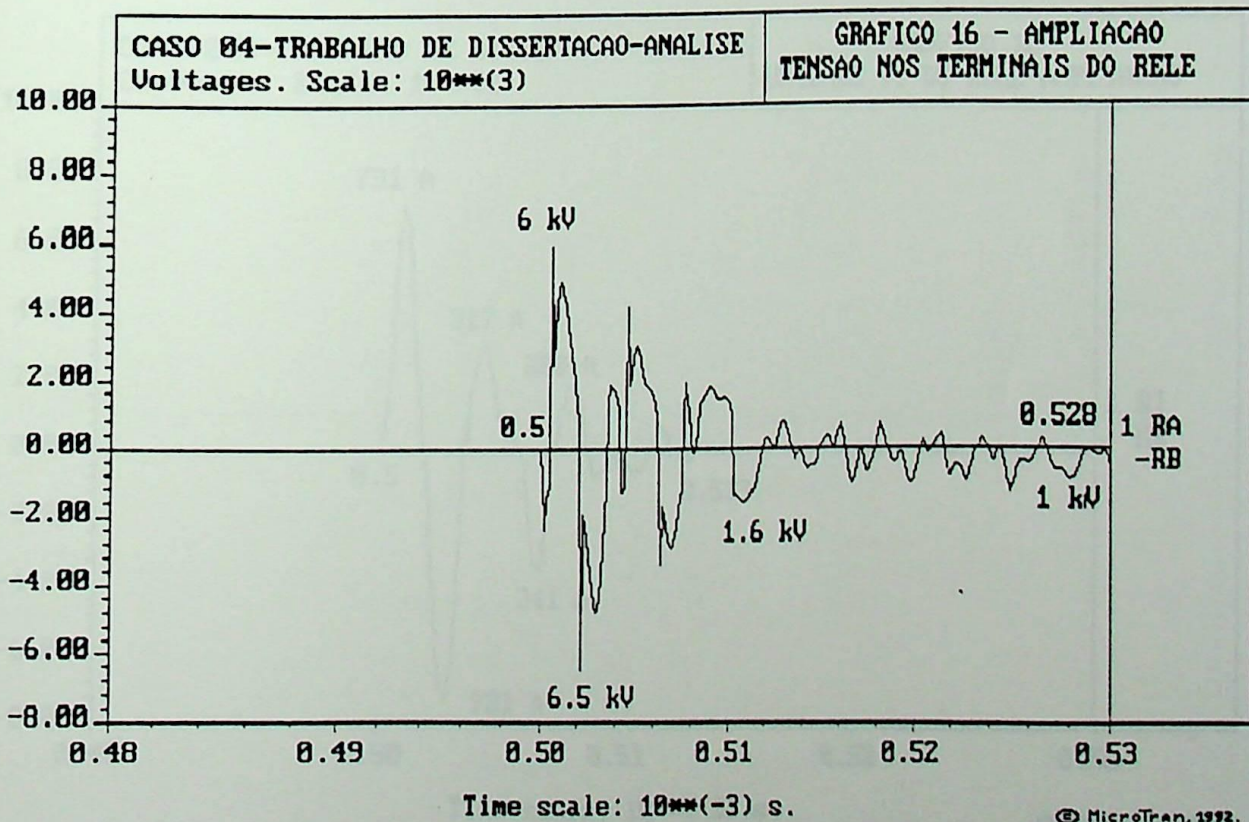
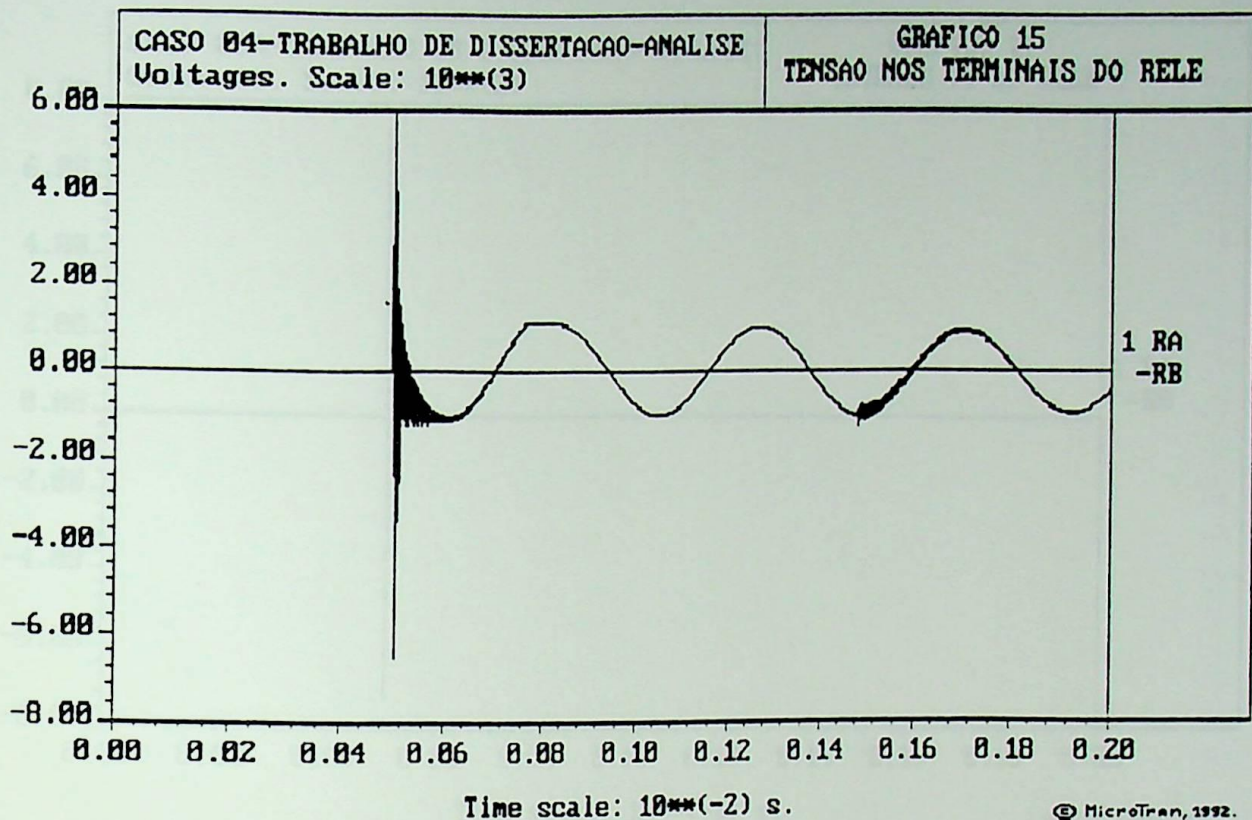


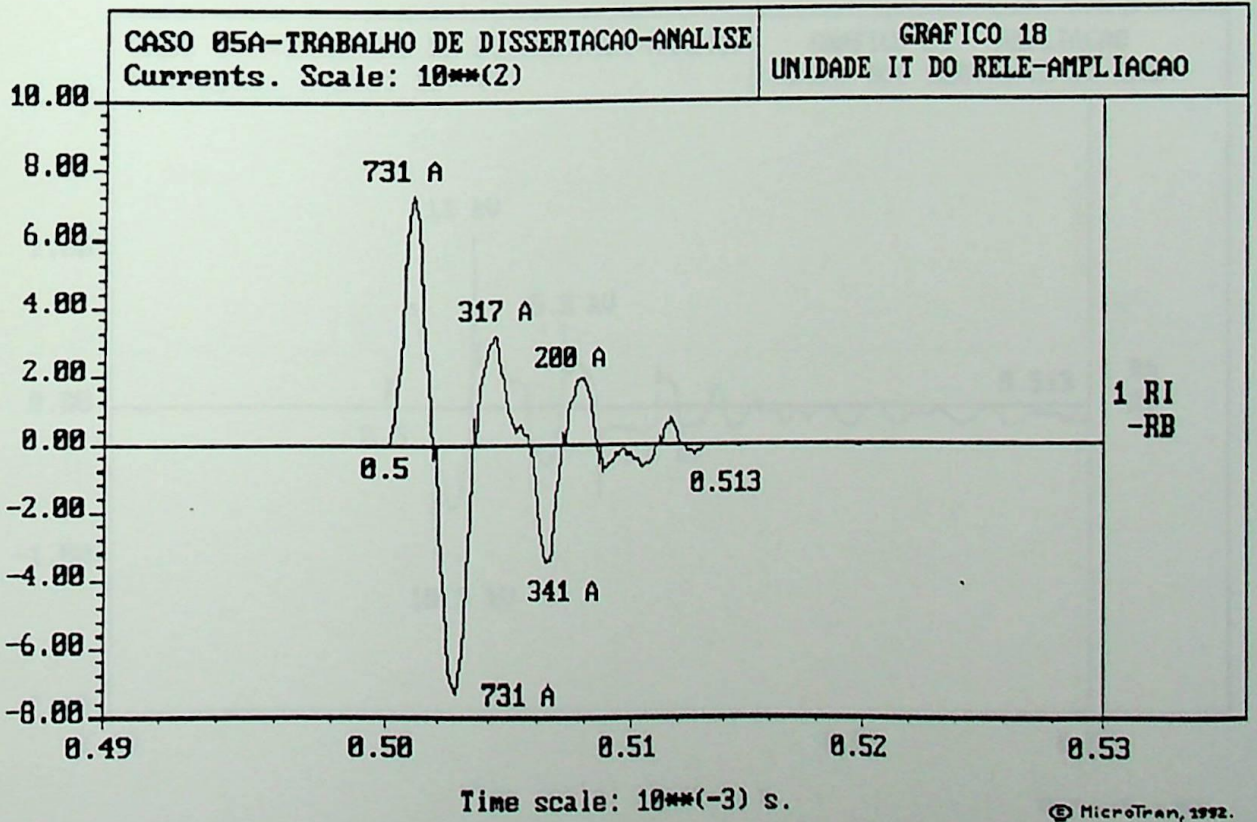
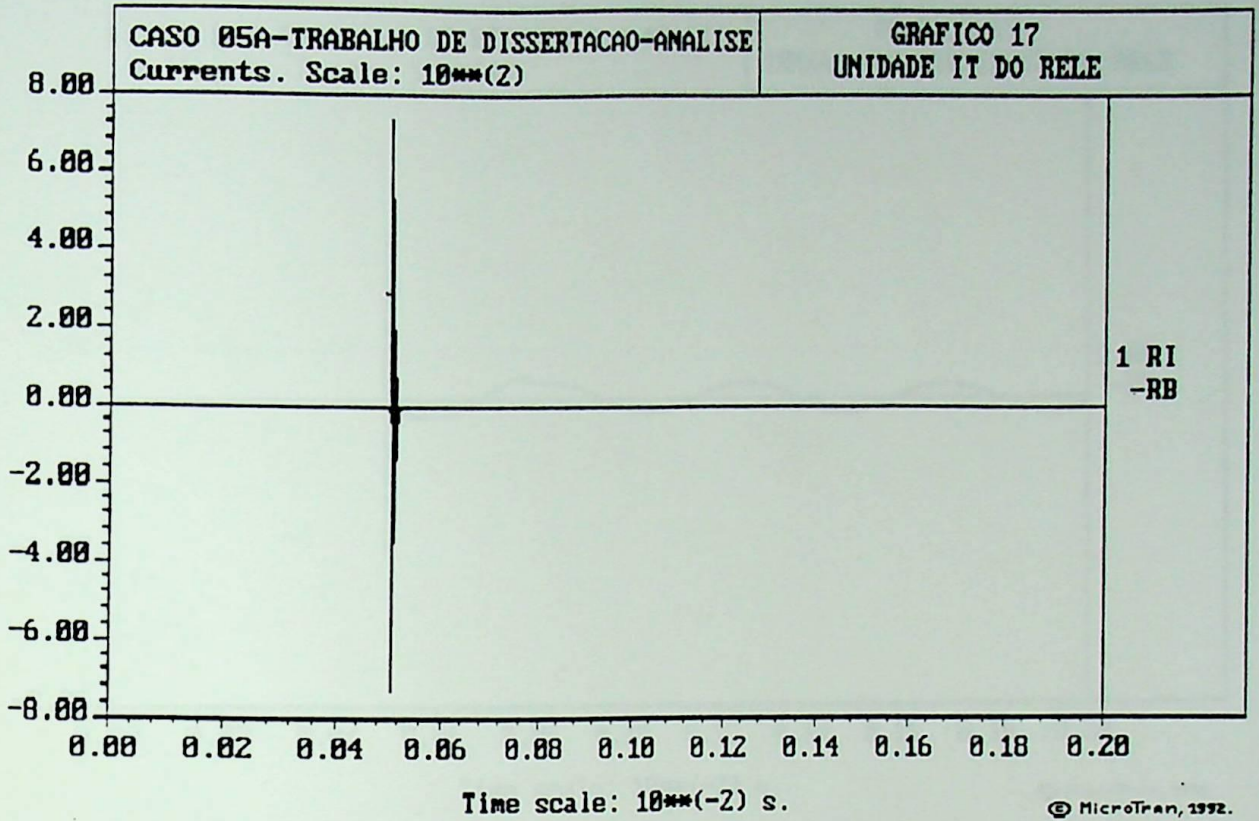


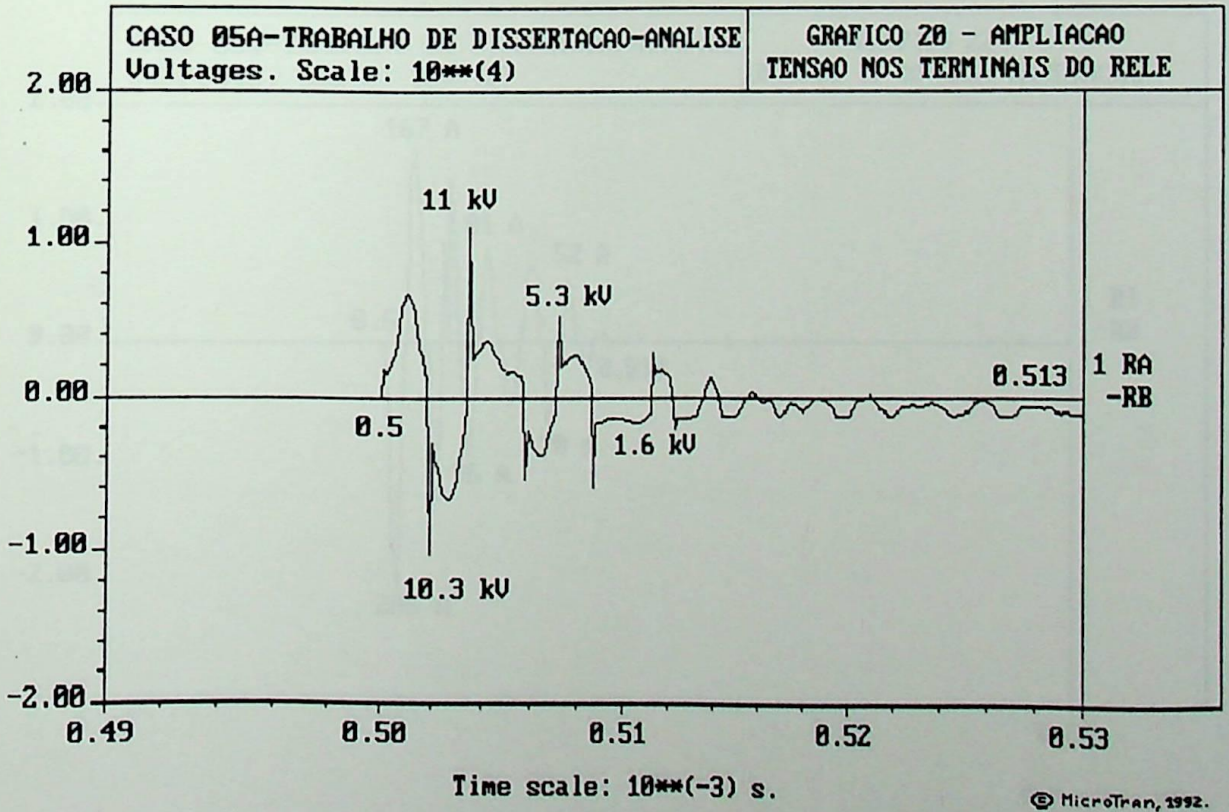
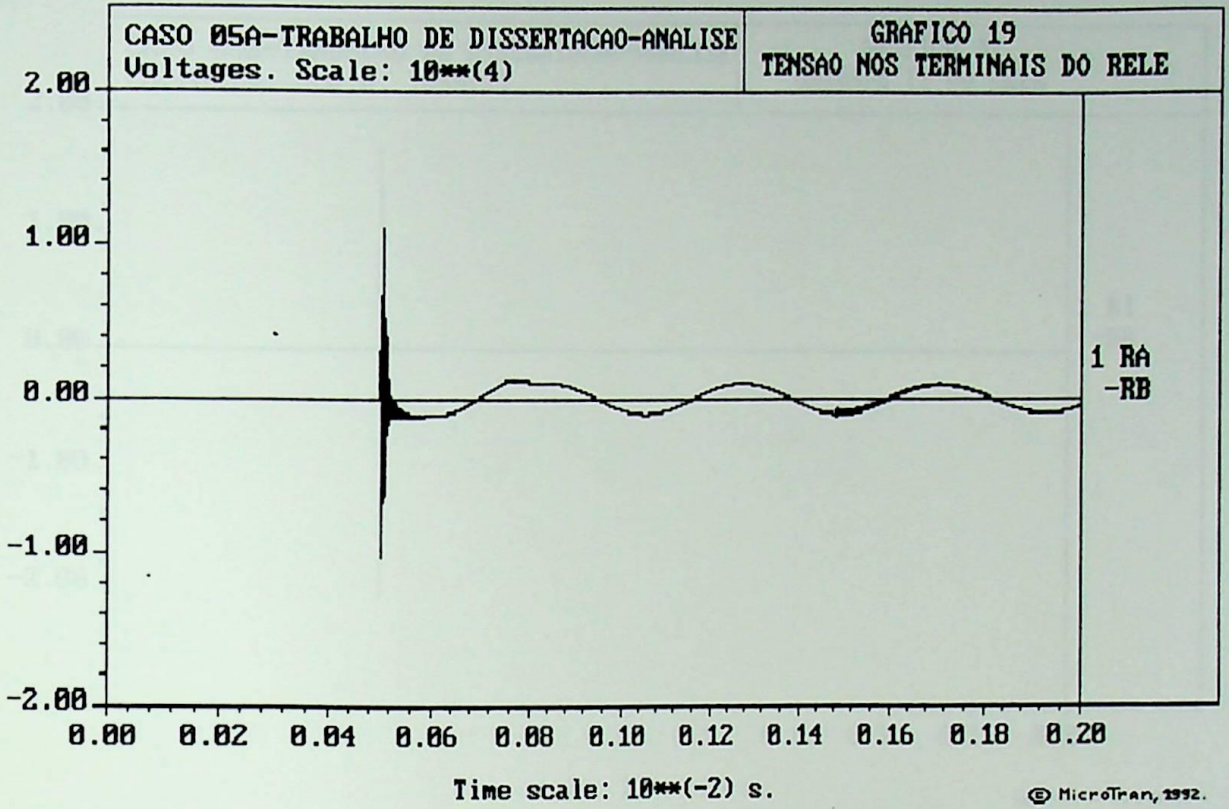


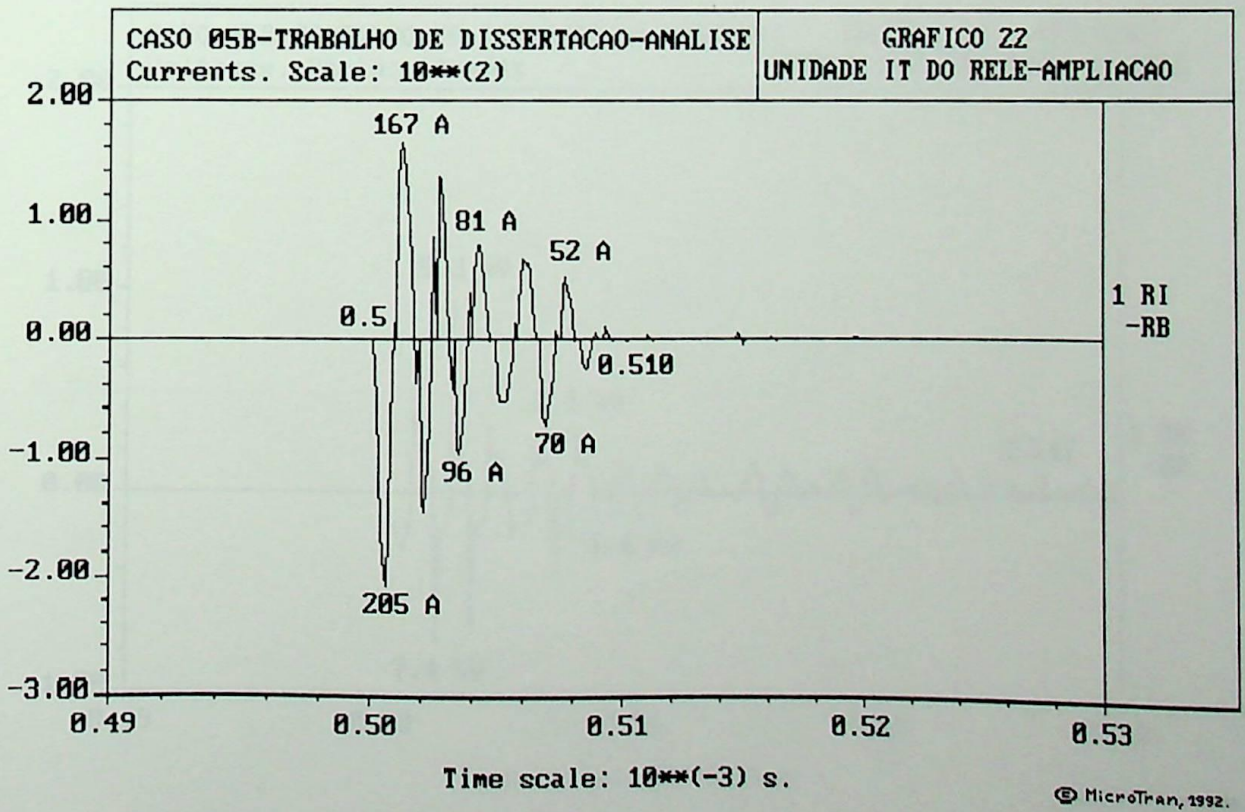
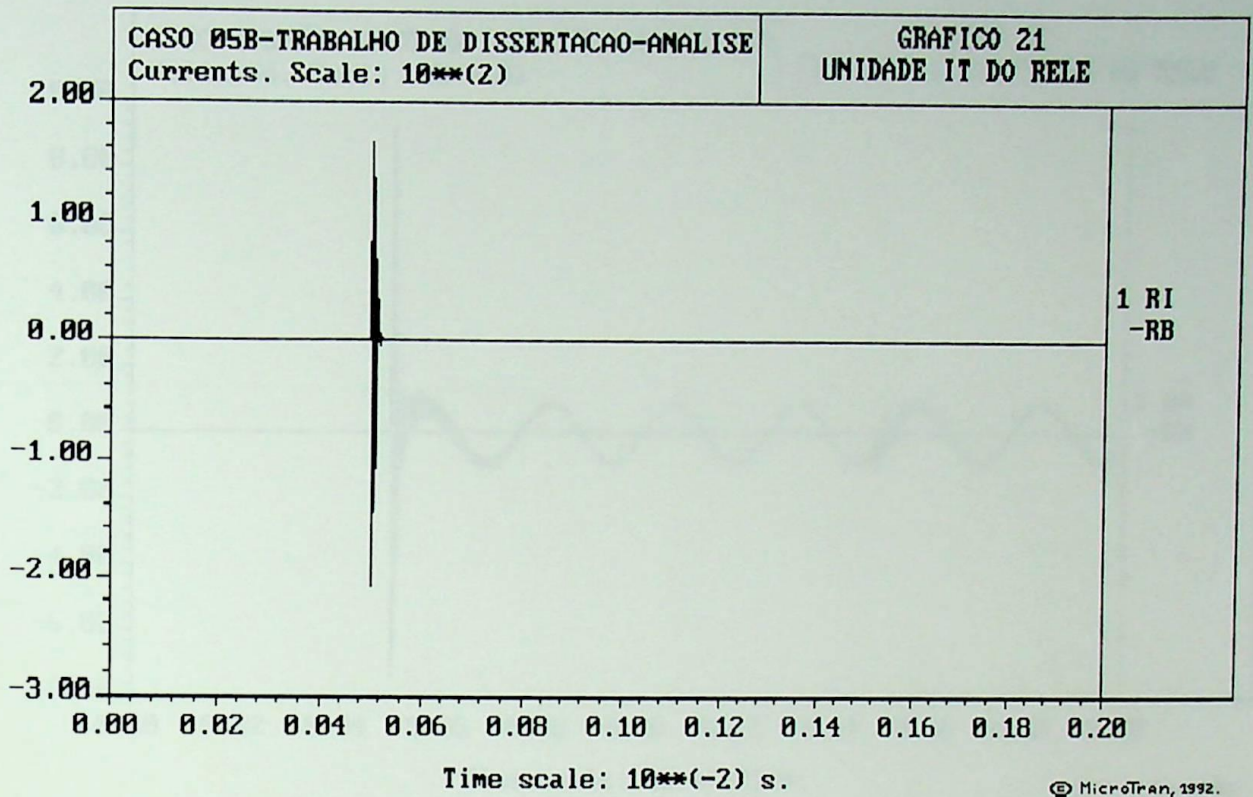


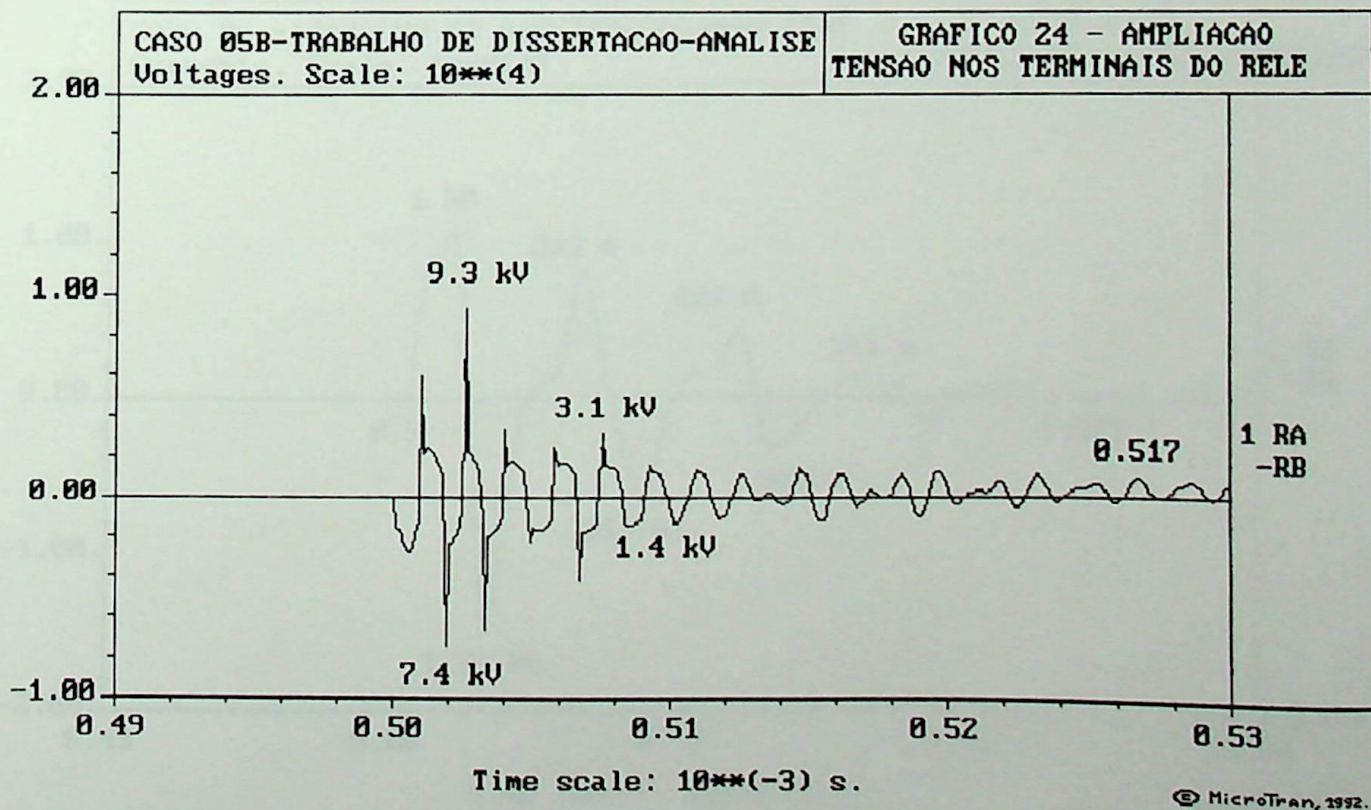
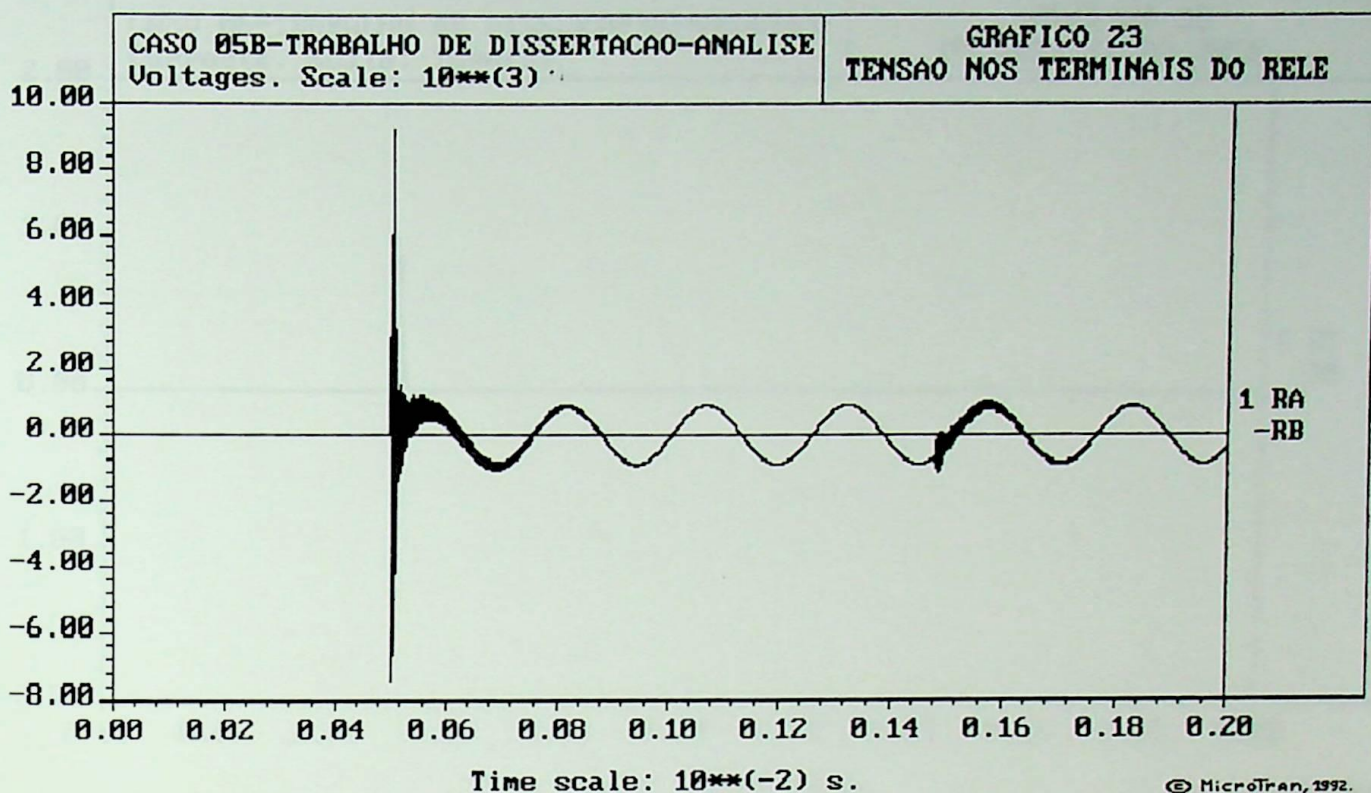


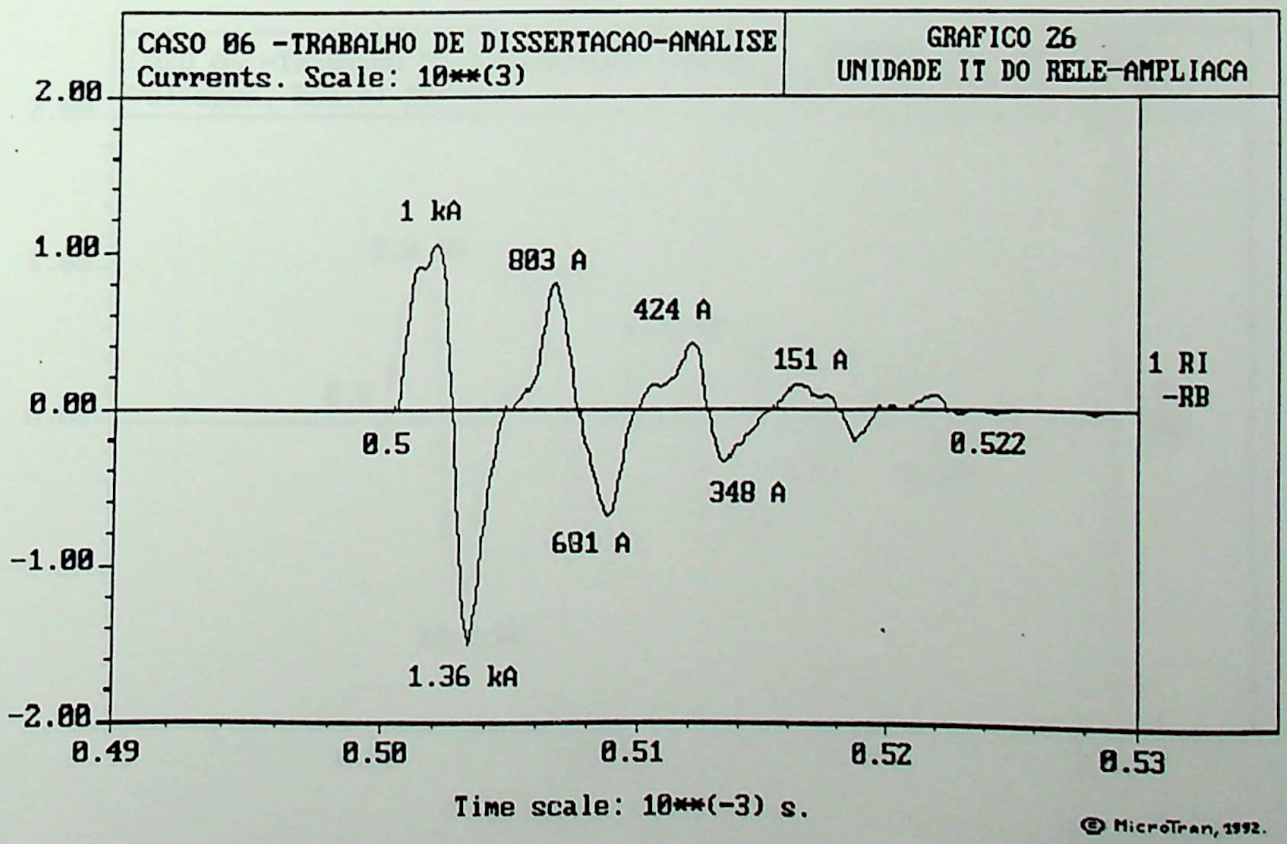
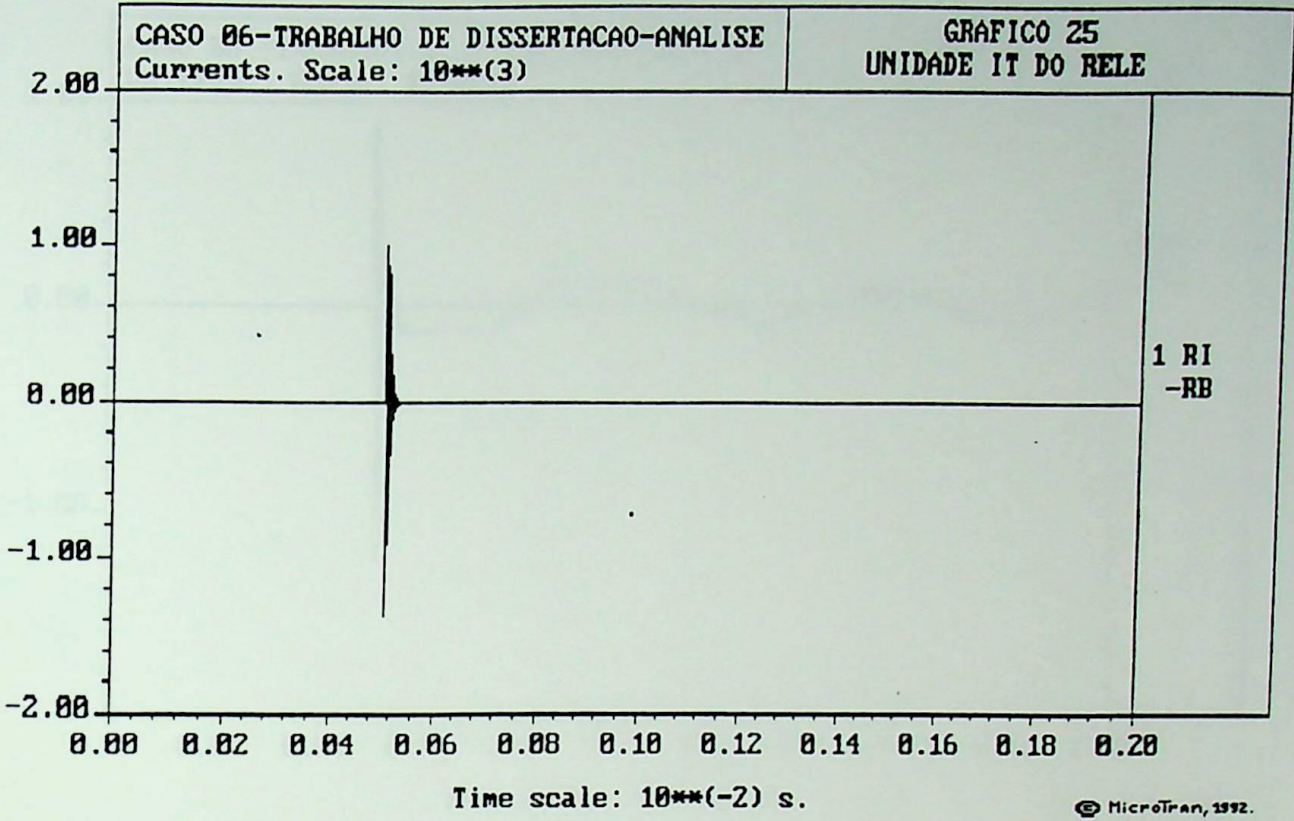


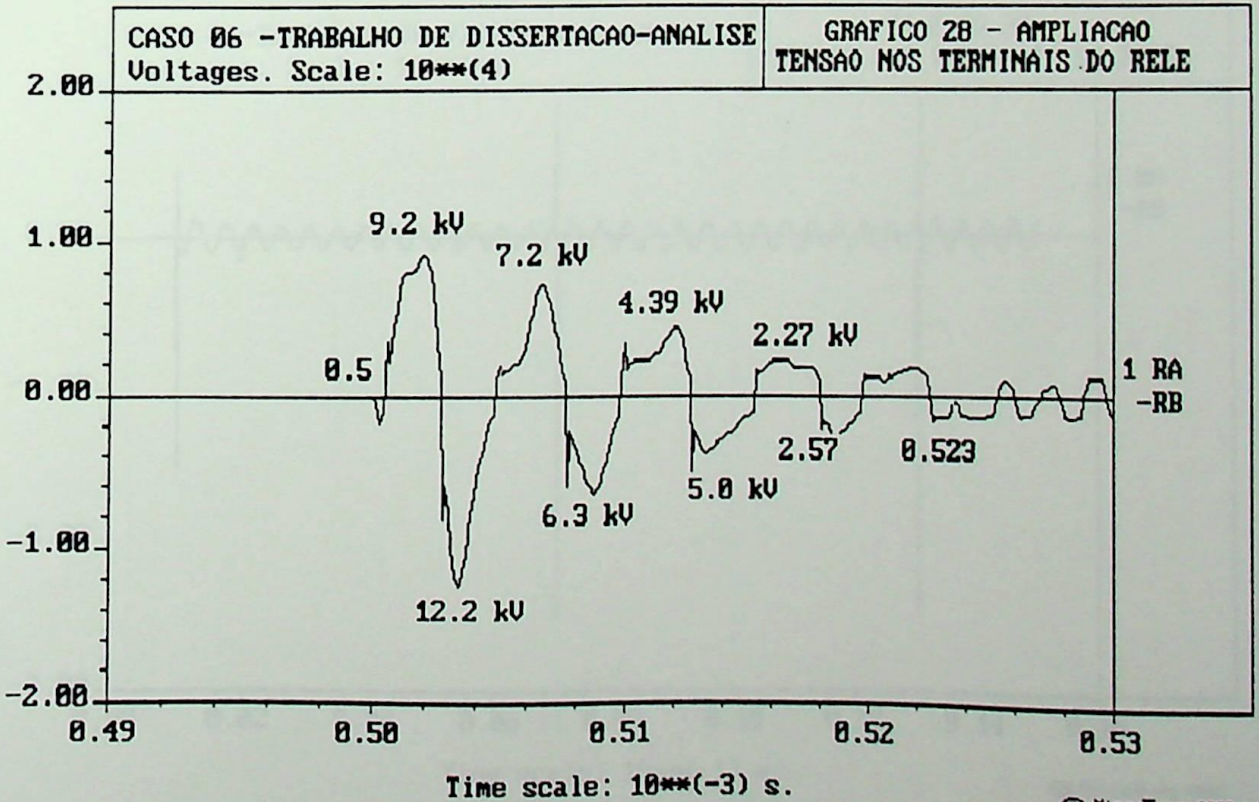
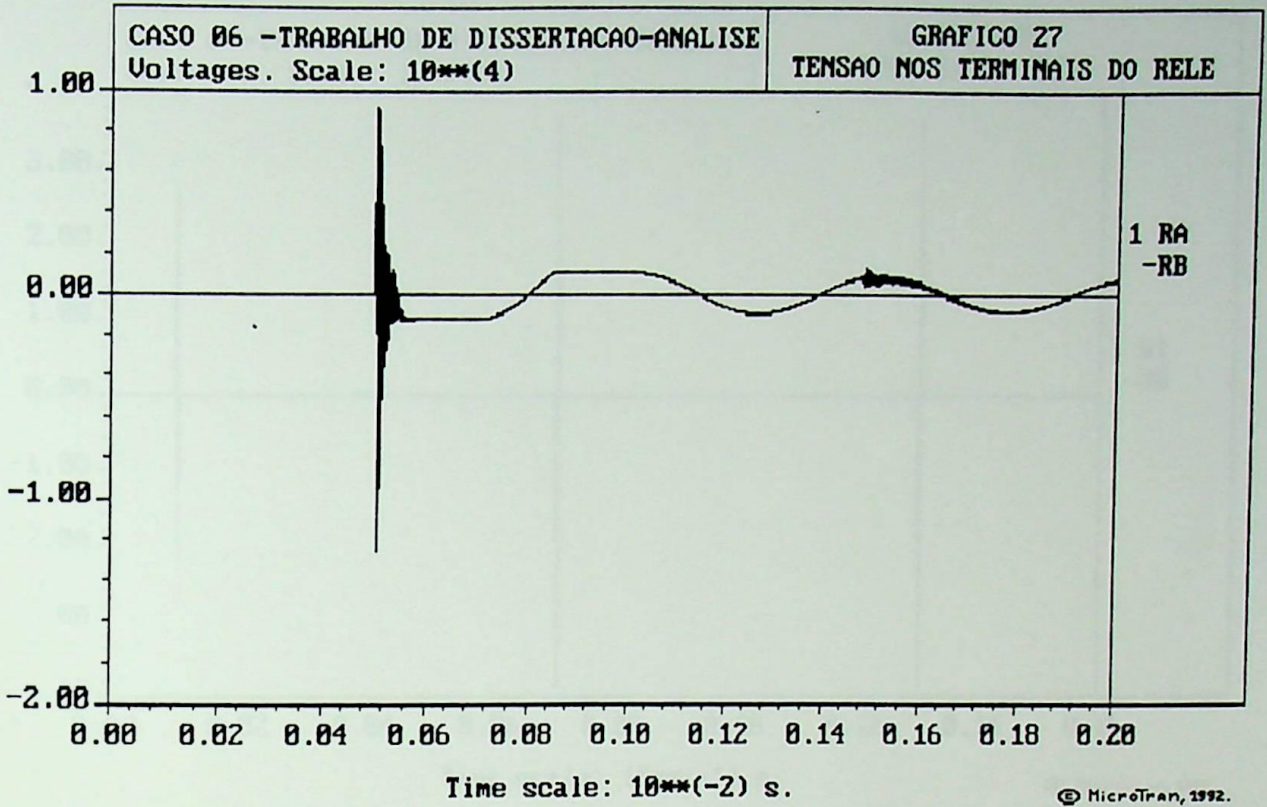


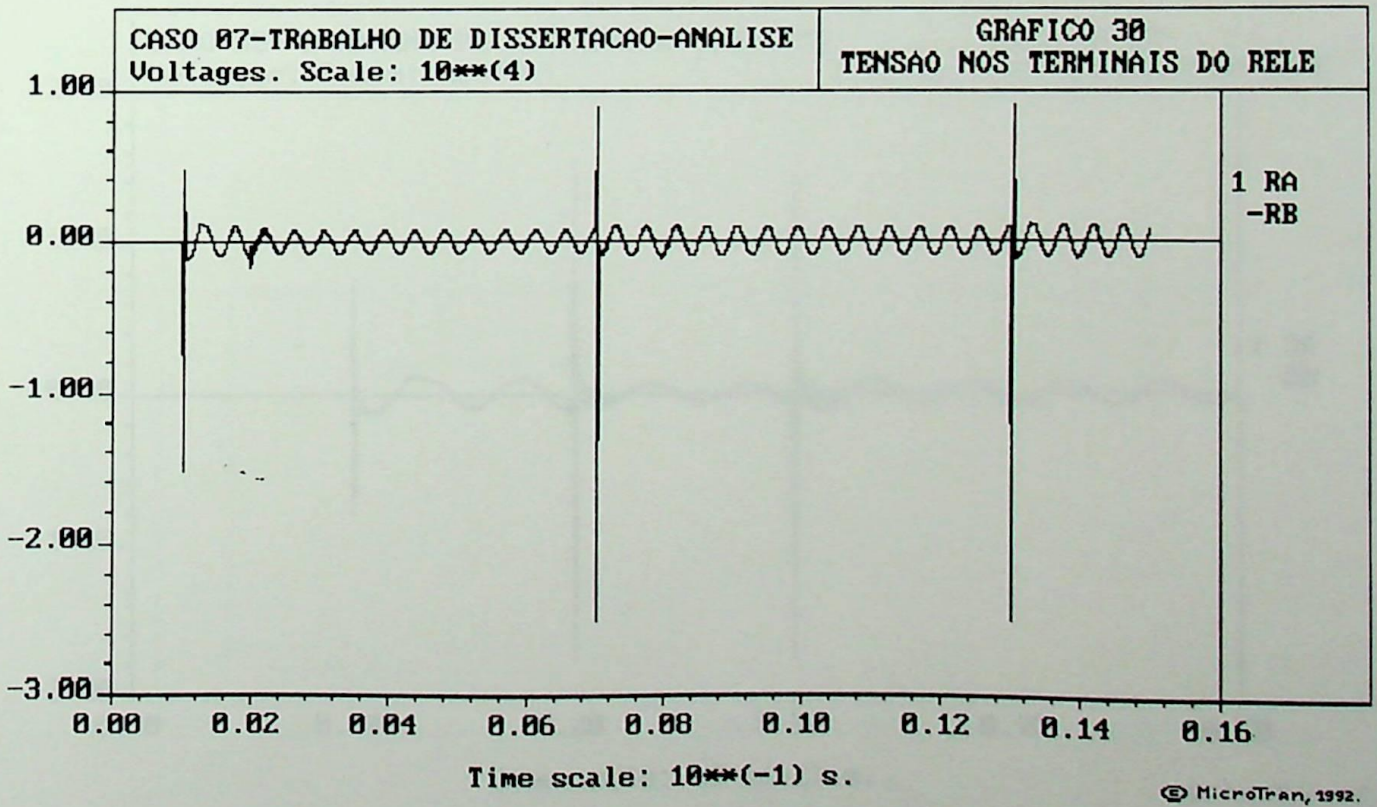
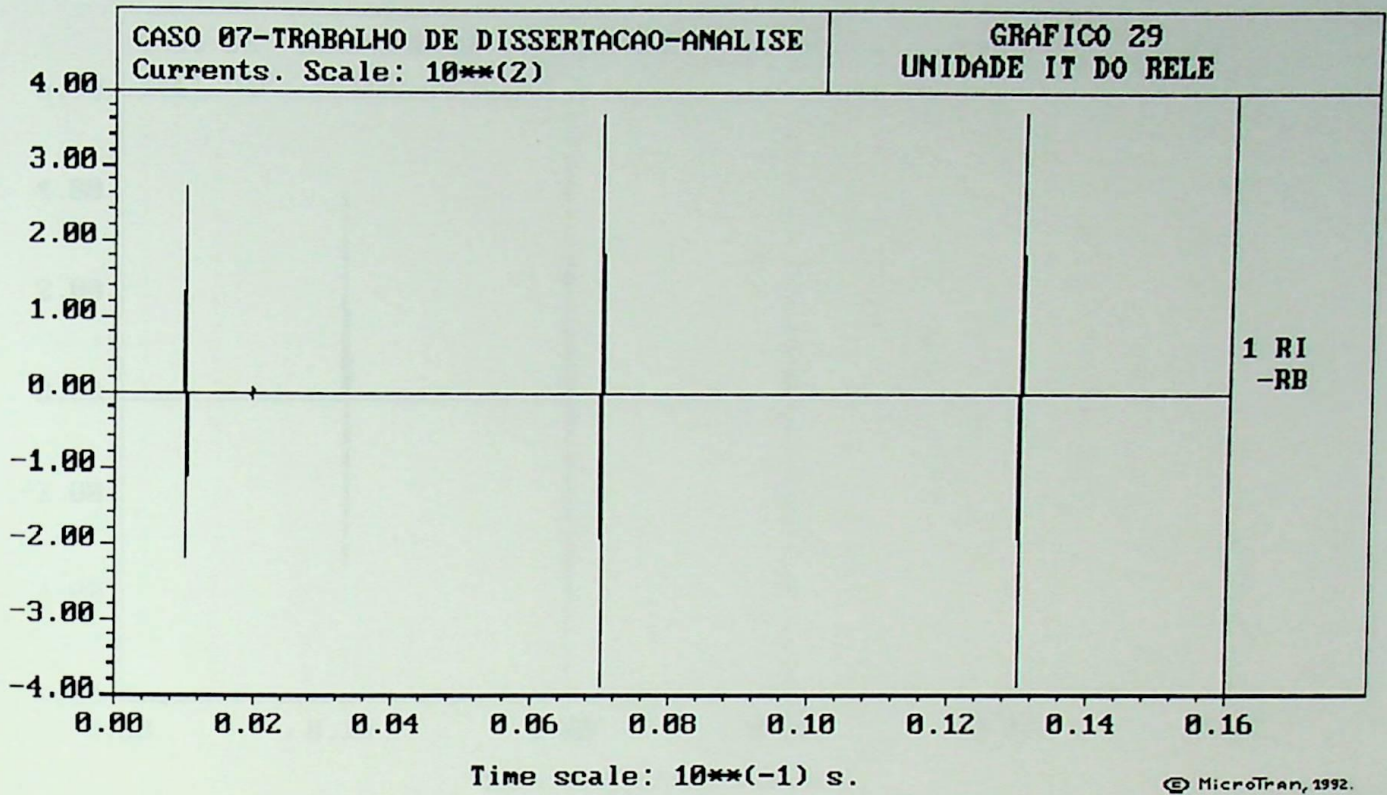


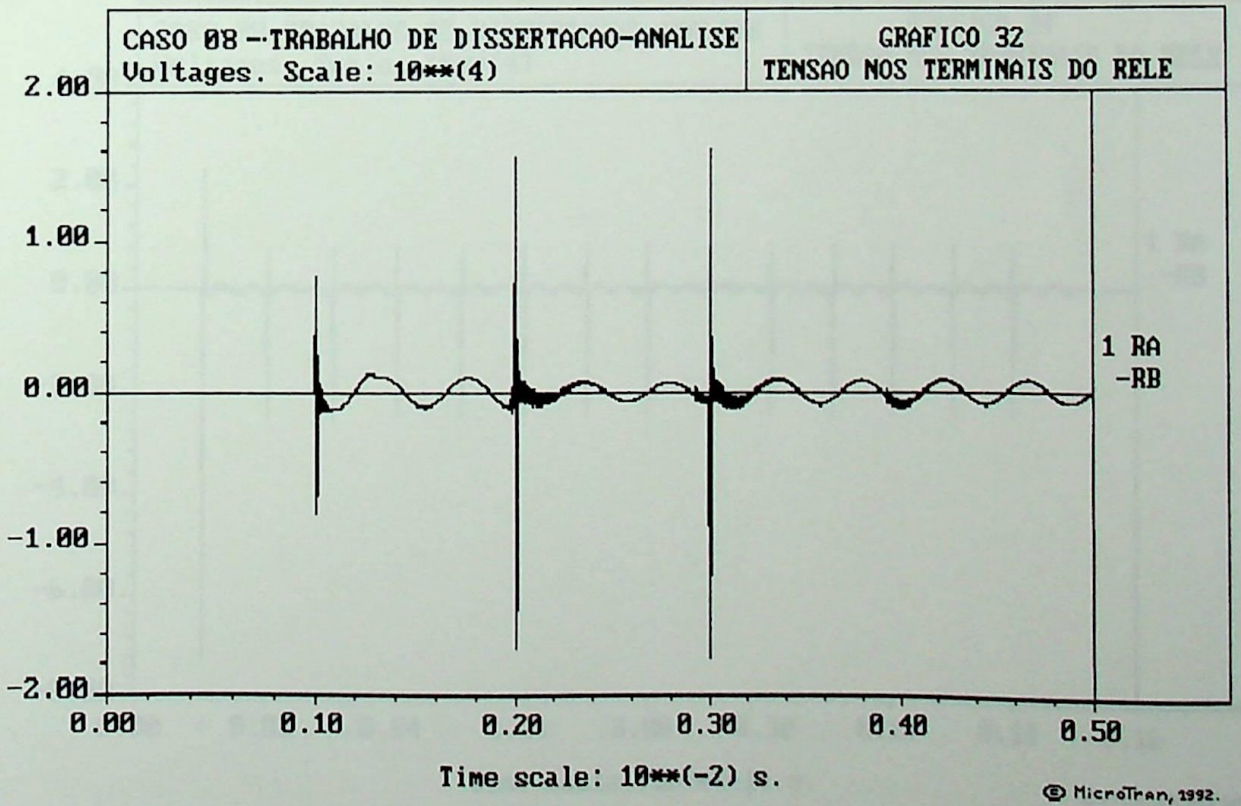
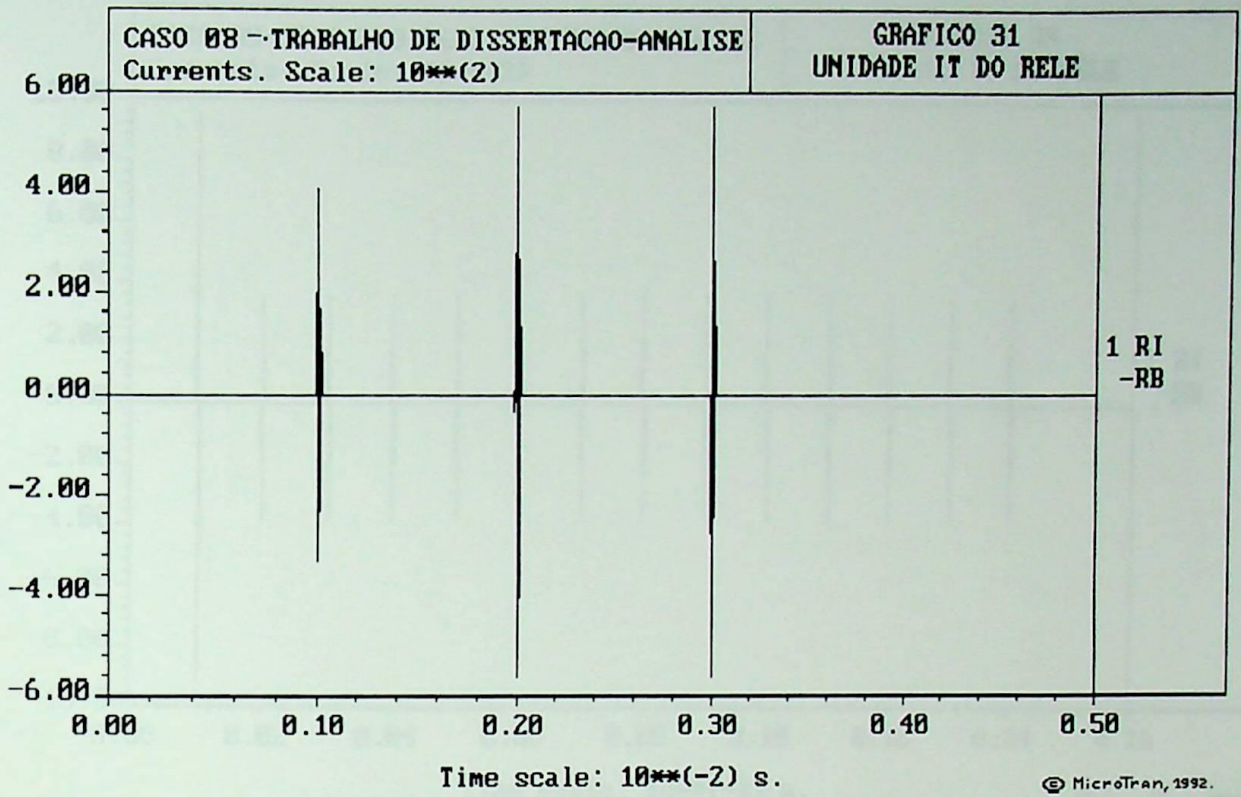


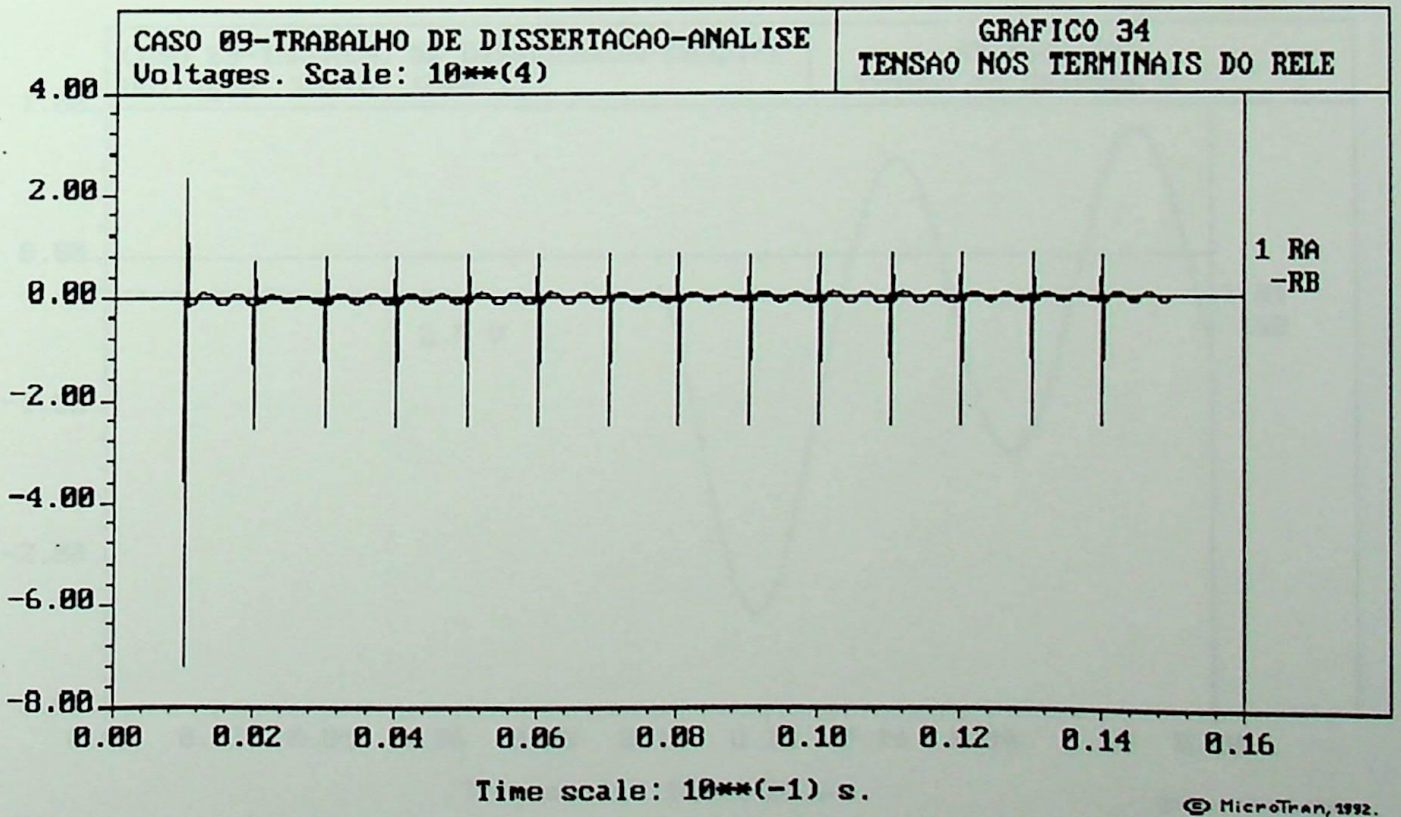
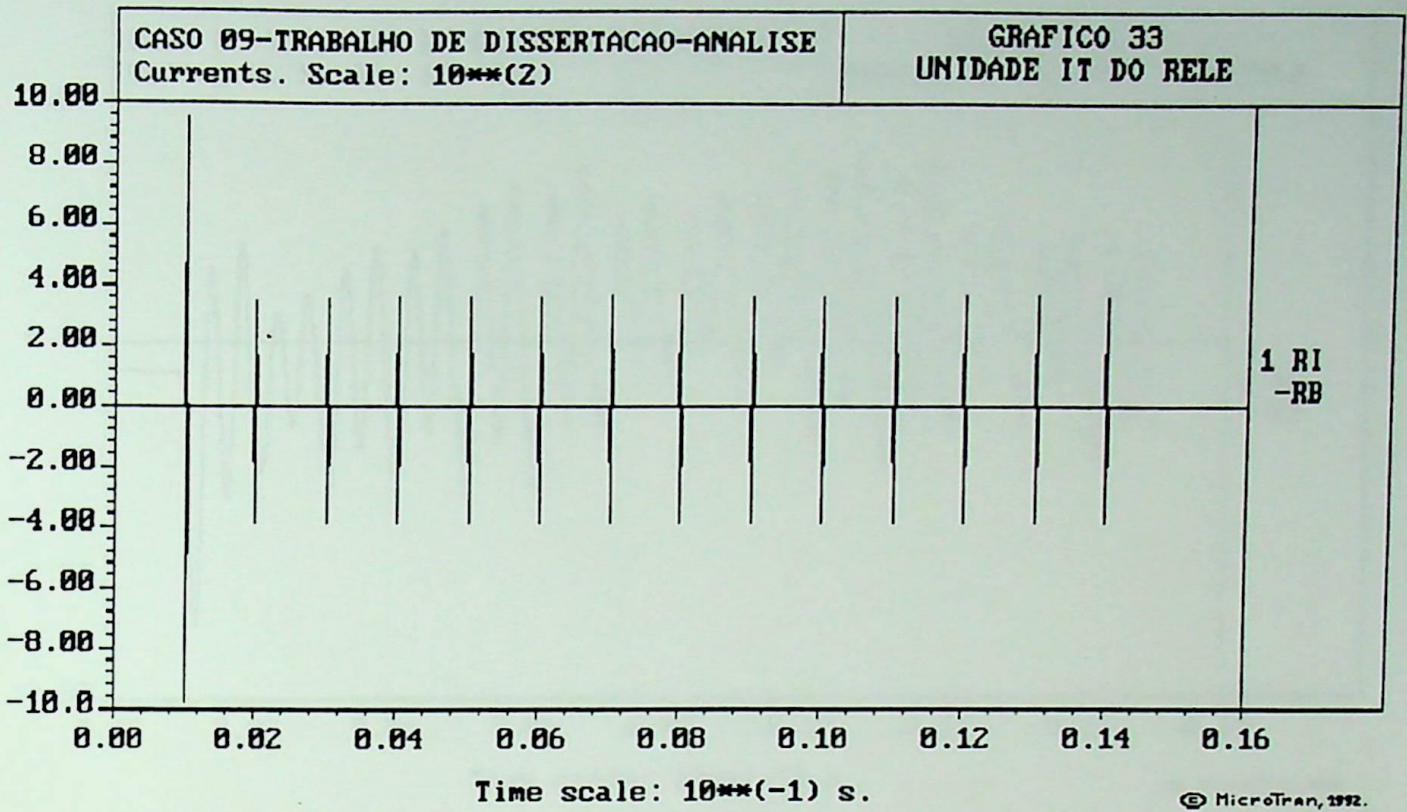


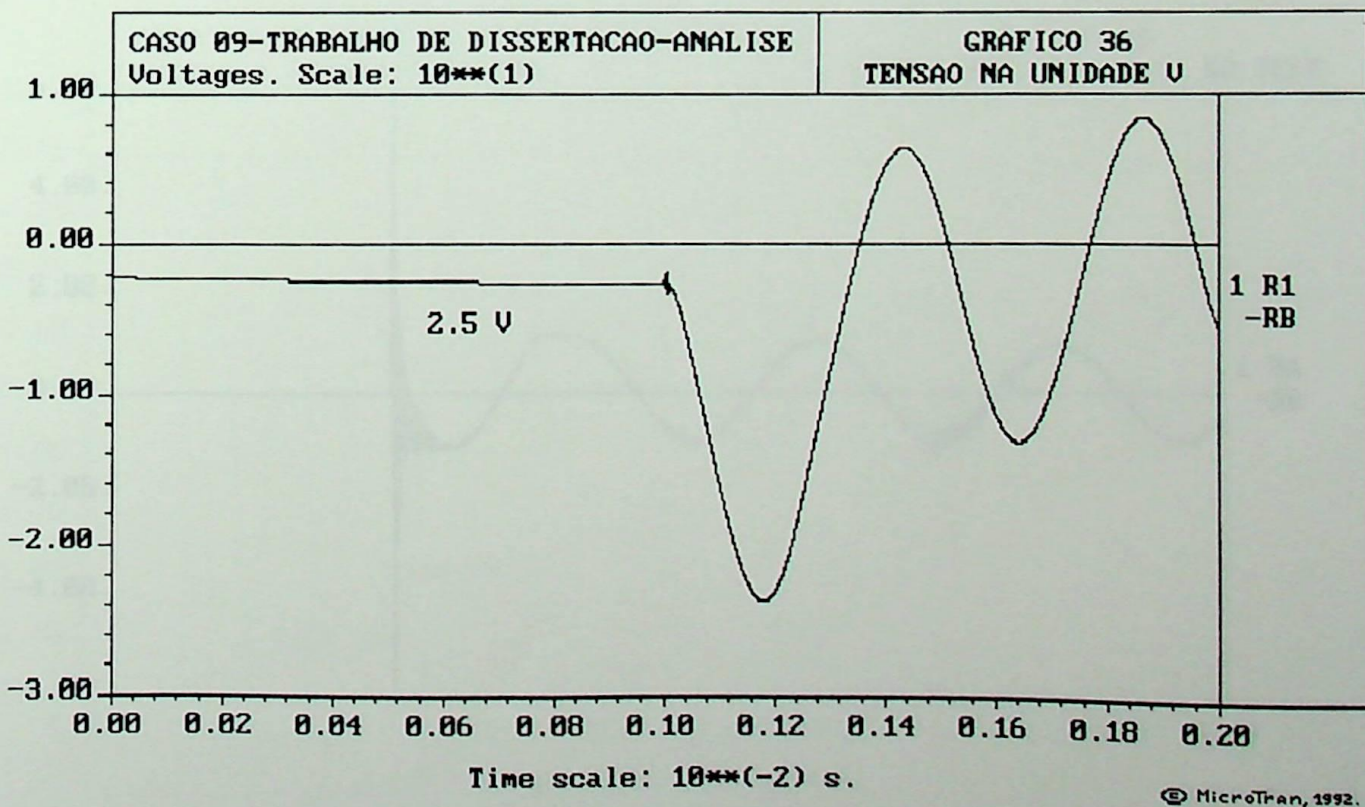
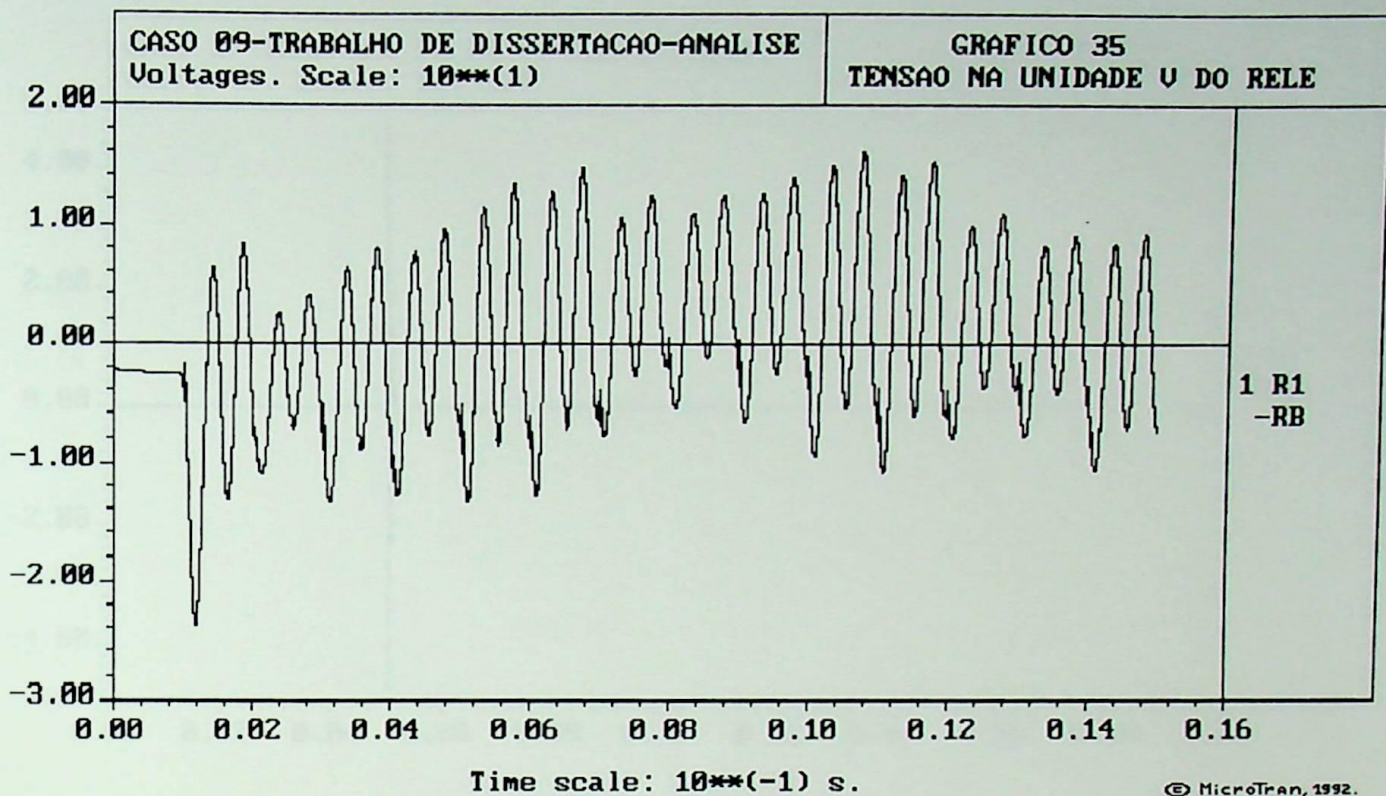


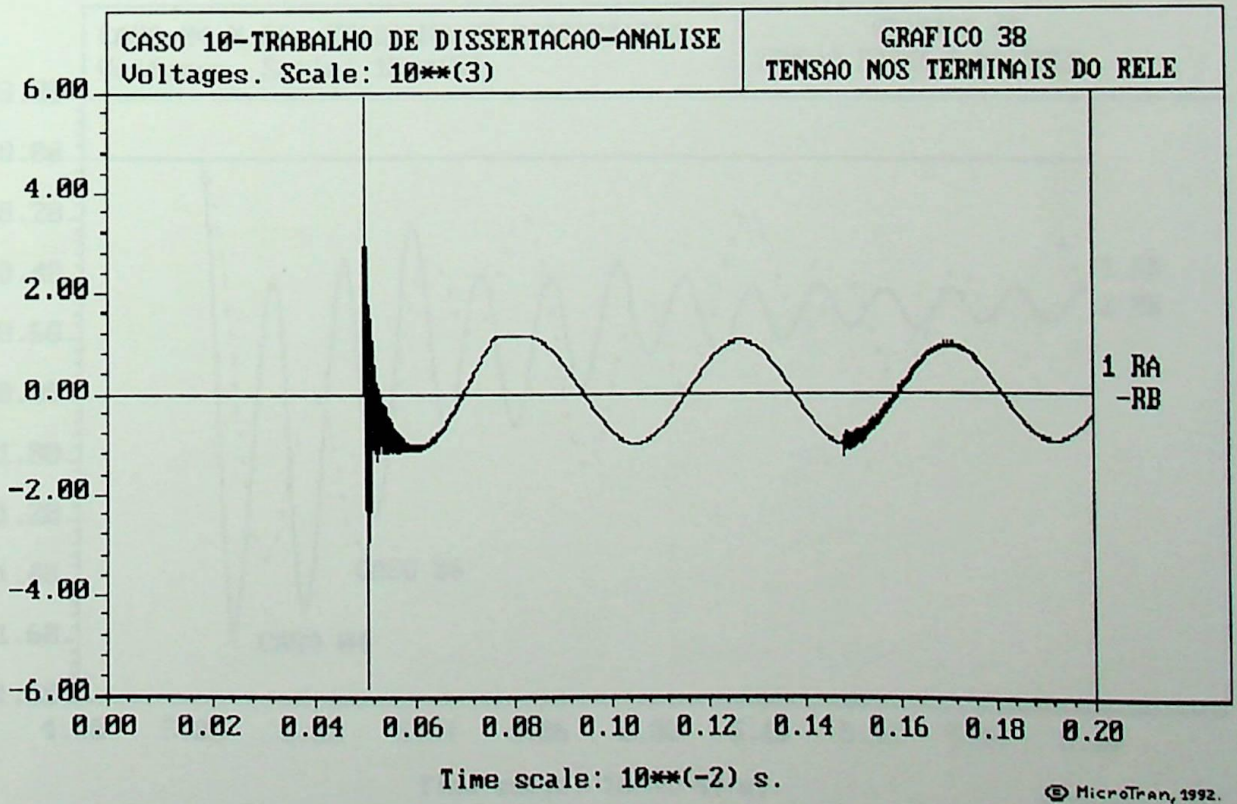
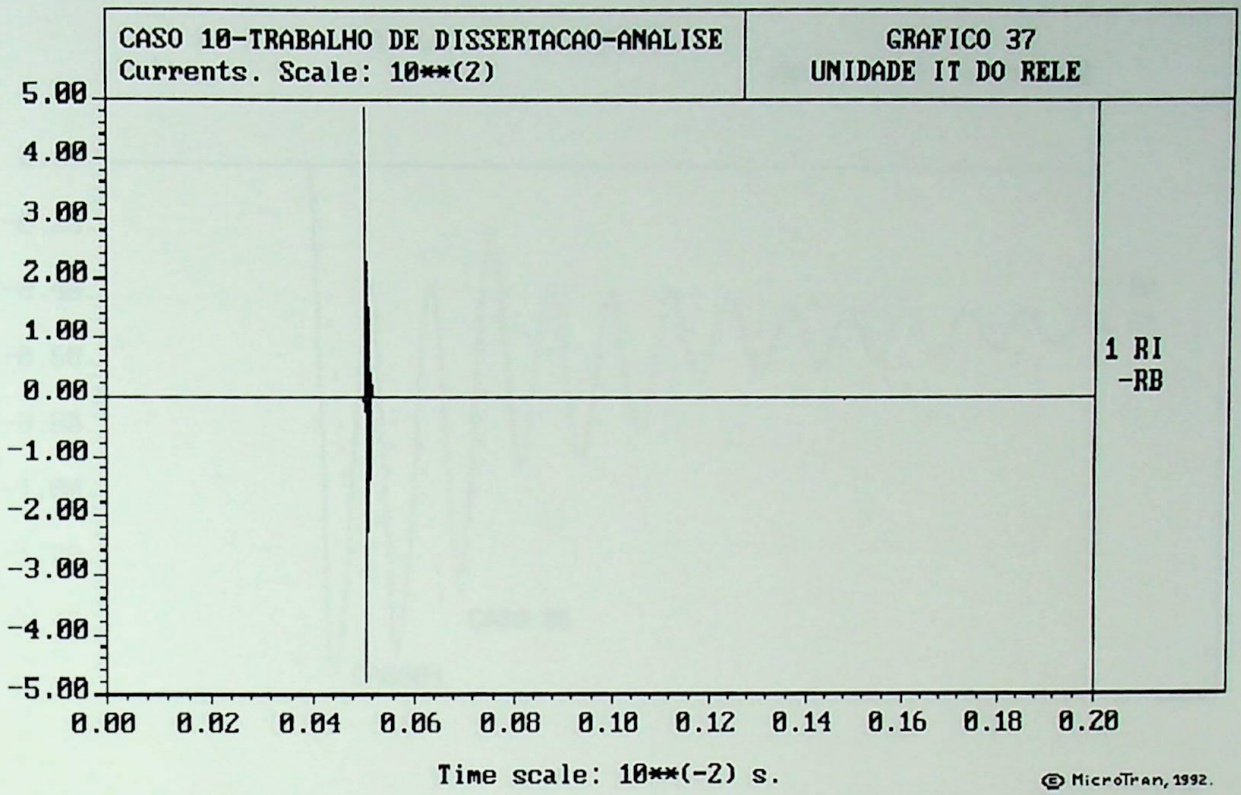


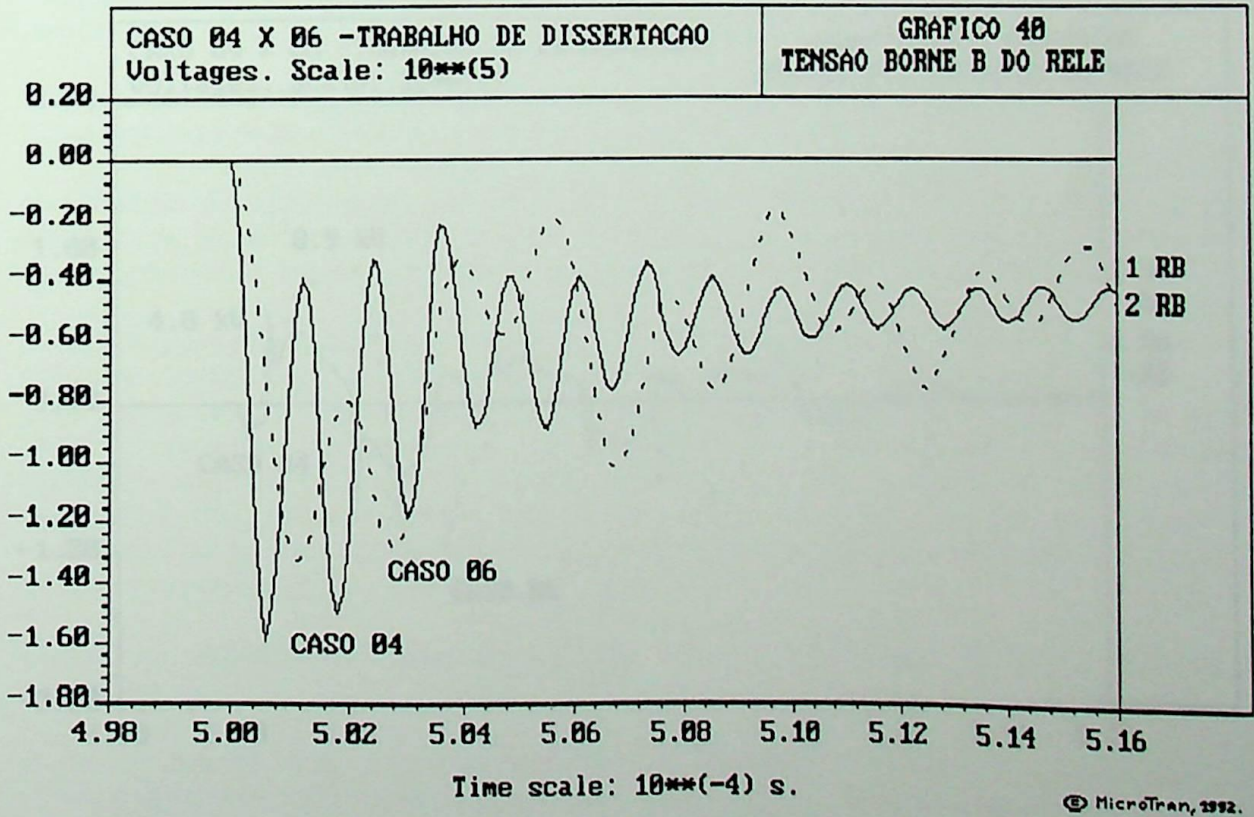
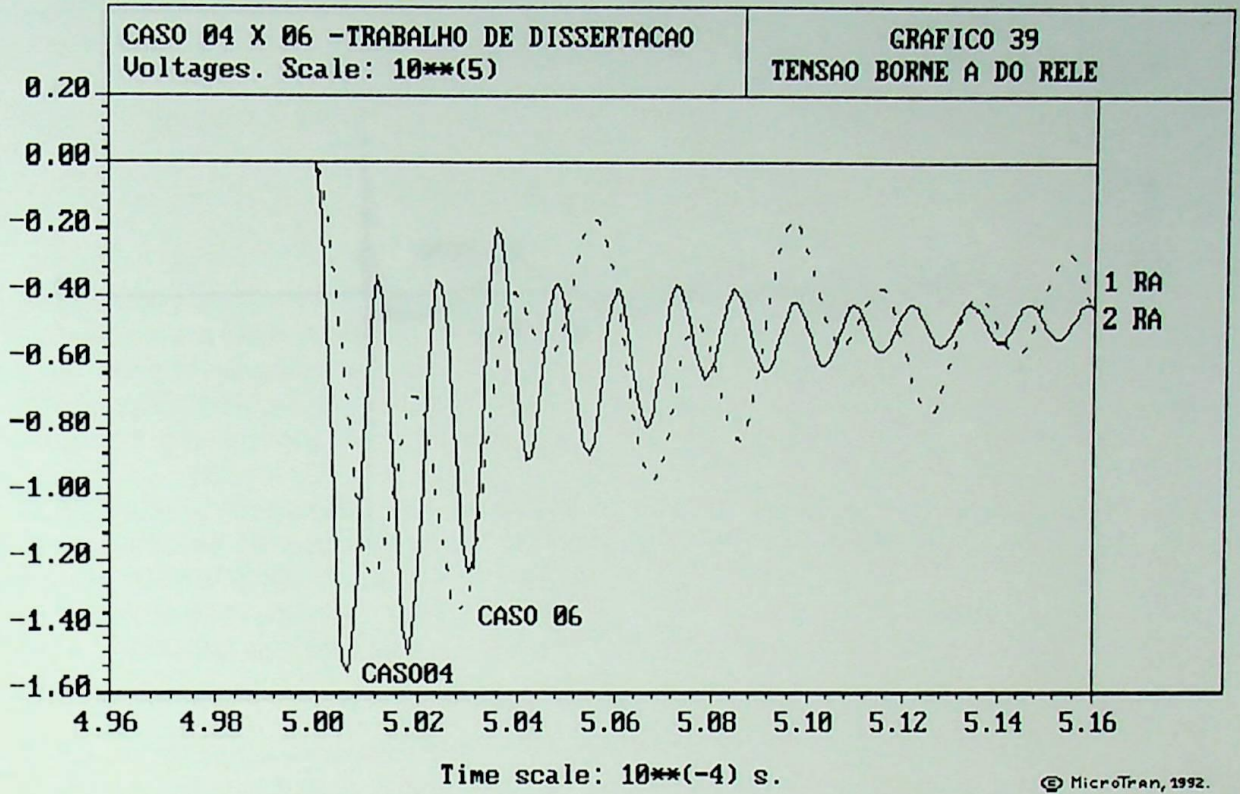


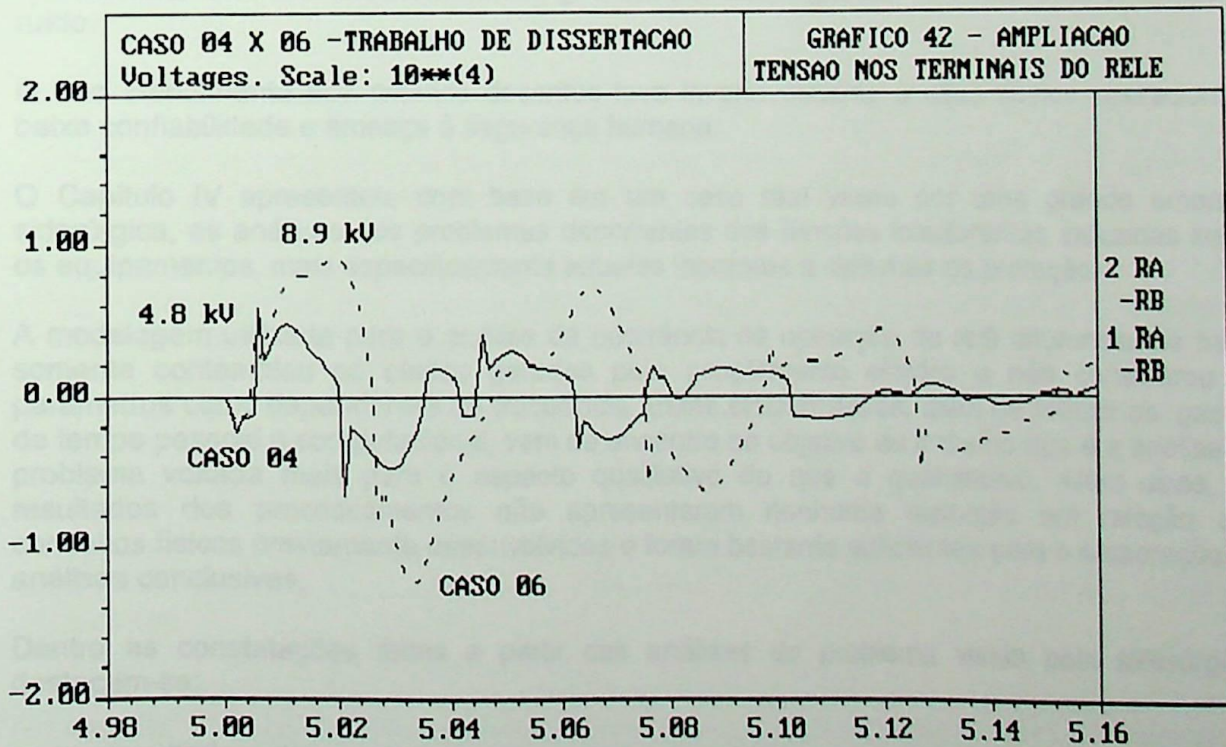
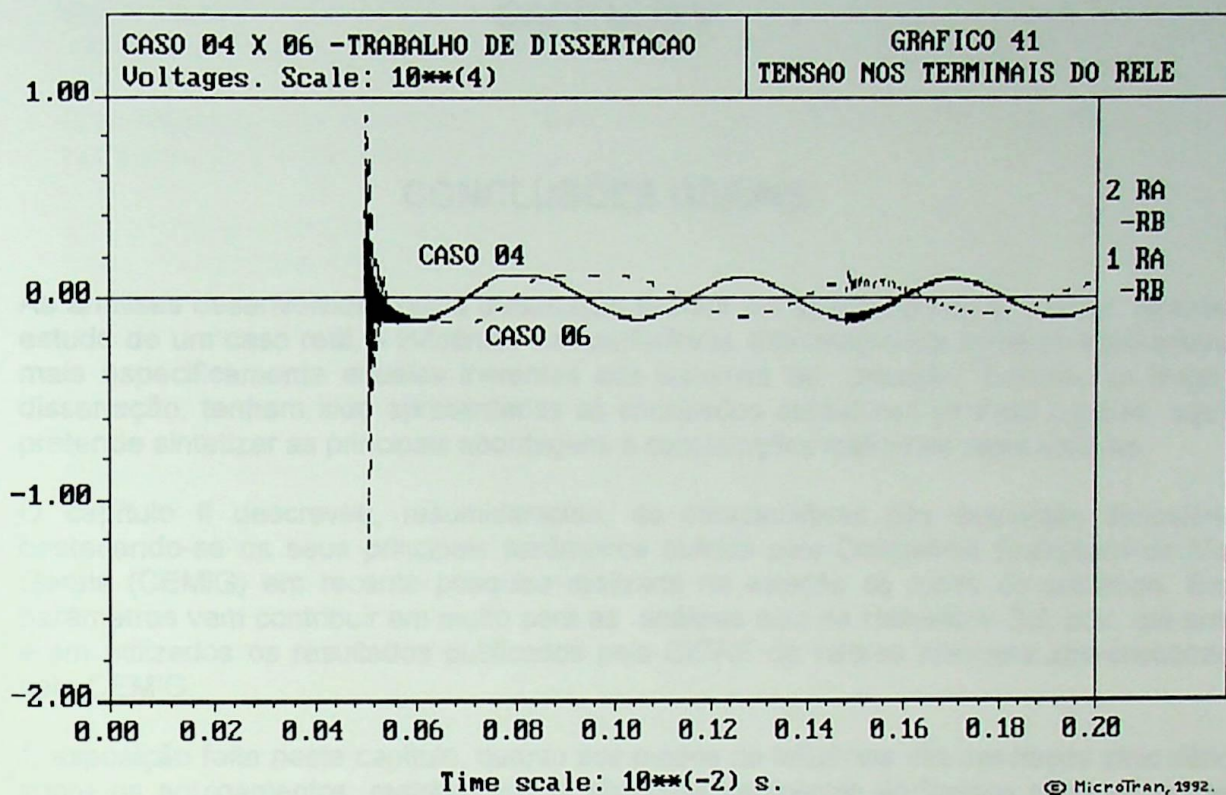












## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES GERAIS

As análises desenvolvidas nesta dissertação tiveram por objetivo principal mostrar, através do estudo de um caso real, a influência da interferência eletromagnética sobre os equipamentos, mais especificamente aqueles inerentes aos sistemas de proteção. Embora, ao longo da dissertação, tenham sido apresentadas as conclusões específicas de cada capítulo, aqui se pretende sintetizar as principais abordagens e constatações realizadas neste trabalho.

O capítulo II descreveu, resumidamente, as características das descargas atmosféricas destacando-se os seus principais parâmetros obtidos pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em recente pesquisa realizada na estação do morro do cachimbo. Esses parâmetros vem contribuir em muito para as análises aqui no Hemisfério Sul, pois, até então, eram utilizados os resultados publicados pela CIGRÉ de valores inferiores aos encontrados pela CEMIG.

A exposição feita neste capítulo, quanto aos modos de influência das descargas atmosféricas sobre os equipamentos, restringiu-se às situações pertinentes ao "campo próximo", ou seja, àquelas em que as distâncias em relação ao sistema de proteção predial são pequenas, caracterizando assim o fenômeno eletromagnético como de simples indução. Especial atenção foi dedicada aos aspectos físicos do fenômeno de indução elétrica relacionado apenas com diferenças de potencial elétrico entre partes condutoras.

O Capítulo III apresentou alguns critérios de instalação com vistas a reduzir os problemas relacionados com tensões interferentes geradas por descargas atmosféricas e outras fontes de ruído.

O não atendimento aos critérios descritos leva invariavelmente a altos custos operacionais, baixa confiabilidade e ameaça à segurança humana.

O Capítulo IV apresentou, com base em um caso real vivido por uma grande empresa siderúrgica, as análises dos problemas decorrentes das tensões interferentes induzidas sobre os equipamentos, mais especificamente aqueles inerentes a sistemas de proteção.

A modelagem utilizada para a análise da ocorrência de operação do relé diferencial de barra somente contemplou os efeitos gerados pelo acoplamento elétrico e não considerou os parâmetros como dependentes da frequência. Estas simplificações, além de reduzir os gastos de tempo pessoal e computacional, vem de encontro ao objetivo do trabalho que é a análise do problema voltada mais para o aspecto qualitativo do que o quantitativo. Além disso, os resultados dos processamentos não apresentaram nenhuma distorção em relação aos conceitos físicos previamente desenvolvidos e foram bastante suficientes para a elaboração de análises conclusivas.

Dentre as constatações feitas a partir das análises do problema vivido pela siderúrgica, destacam-se:

- os resultados dos processamentos vieram confirmar o potencial de interferência das descargas atmosféricas e os riscos decorrentes aos equipamentos, principalmente àqueles inseridos em instalações em que o projeto de concepção não contemplou as recomendações e critérios básicos específicos;

- os resultados obtidos para as tensões interferentes induzidas, tanto a diferencial como a de modo comum, embora apresentassem os valores característicos de picos elevados não incorporaram todos os efeitos produzidos por fenômenos desta natureza;
- a modelagem não considerou o acoplamento magnético presente, cujos efeitos seriam superpostos aos gerados pelo acoplamento elétrico;
- a modelagem também não considerou os parâmetros como dependentes da frequência, cujos efeitos esperados são de atenuação e distorção do impulso da corrente;
- a modelagem adotada, se comparada com outras existentes para cálculo do acoplamento eletromagnético, por exemplo a "Scattering Theory", tem a grande vantagem da simplicidade na determinação dos parâmetros envolvidos sem a utilização de software específico.

Deve-se ter em mente que o objetivo principal do trabalho não é o desenvolvimento de uma modelagem para cálculos de acoplamento eletromagnético, mas sim a utilização de uma que possibilite mostrar os problemas causados pela indução eletromagnética, mais especificamente aquele vivenciado pela siderúrgica;

- a hipótese mais provável é que o relé operou devido ao transitório eletromagnético.

Nas análises dos resultados dos processamentos, verificaram-se valores elevadíssimos de corrente de circulação pela unidade IT do relé. Houve casos em que ela chegou a atingir picos de até 900 vezes o valor de ajuste na frequência industrial. Porém, não menos importante que o módulo da corrente, é o tempo de duração da mesma.

Verificou-se que a duração da corrente atingiu valores da ordem de poucas dezenas de microsegundos. Neste ponto, é importante questionar se uma corrente caracterizada por módulo elevado e baixa duração seria capaz de sensibilizar um relé instantâneo do tipo armadura em charneira. É dentro deste contexto que se vê a importância da apresentação dos resultados de todas as etapas da pesquisa realizada, desde os testes em campo até as simulações.

Uma vez constatado que as poucas anormalidades encontradas no sistema diferencial não seriam capazes de levar o relé a operação e que ficou evidenciada a circulação da corrente impulsiva na barra de terra do painel, pode-se concluir que a hipótese mais provável é a atuação da proteção devido ao transitório eletromagnético;

- Os efeitos prejudiciais devidos à tensão interferente de modo comum, ou seja, danos físicos às partes isolantes, não foram constatados no relé diferencial de barra devido à presença do elemento de limitação de tensão (varistor);
- A conclusão de que a operação indevida da unidade IT do relé 87 tenha sido causada por transitório eletromagnético, vem reforçar os efeitos prejudiciais da tensão interferente de modo diferencial.

Finalmente, pode-se concluir que o problema vivido pela siderúrgica poderia ter sido evitado caso a instalação estivesse adequada a pelo menos dois dos critérios apresentados no capítulo III, que são:

- a blindagem dos cabos de força deve ser aterrada em cada extremidade, quando se quiser atender ao aspecto de segurança. Porém, nos casos em que a corrente induzida na blindagem é elevada, este critério deve ser evitado, sob pena de comprometimento da integridade física do cabo.

As características das instalações analisadas enquadram-se nesta situação, portanto, os cabos de força deveriam estar com sua blindagem aterrada em um único ponto. Aliás, as normas internas da proprietária da instalação recomendam tal procedimento.

A ocorrência mostrou total desleixo tanto da firma montadora como da fiscalização, pois, ao invés de cortar as cordoalhas rente aos cabos, deixaram-nas penduradas;

- sistema de aterramento com equipotencialização.

A adoção deste critério determinaria uma interligação entre as malhas de terra da SE-Sul e SE-Laminação, que garantiria uma elevação de potencial reduzida e, conseqüentemente, uma transferência da corrente impulsiva, pela blindagem dos cabos também reduzidas, o que, conforme às análises do item 4.7, determinaria valores de tensões interferentes bem menores.

Como sugestão para futuras pesquisas, destacam-se os seguintes aspectos:

- a avaliação da sensibilidade de um relé de sobrecorrente do tipo charmeira frente a transientes elétricos de curta duração e alta tensão.

Essa pesquisa deve ser realizada em laboratório especializado que possua fontes capazes de gerar sinais impulsivos, inclusive com condições de simulação de descargas múltiplas.

Os resultados desta pesquisa poderão validar a conclusão do trabalho no que diz respeito a hipótese provável de operação do relé diferencial;

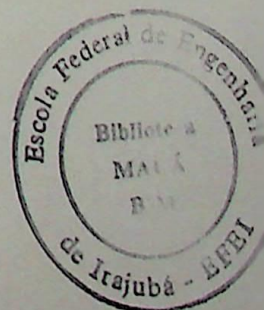
- analisar o problema considerando também os efeitos gerados pelo acoplamento magnético e os da representação dos parâmetros como dependentes da frequência. Para esta pesquisa deverão ser utilizados métodos mais sofisticados com modelagens mais completas.

A comparação dos resultados desta pesquisa, com os apresentados neste trabalho, permitirá avaliar de que forma se interagem os efeitos produzidos pelos acoplamentos elétrico e magnético e, também, as atenuações e distorções do impulso de corrente devido a representação dos parâmetros como dependentes da frequência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SIMPÓSIO FRANCO - BRASILEIRO SOBRE CÁLCULO DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS, 2, 28-30, mar/1989. São Paulo, Núcleo de Ligação Industrial - USP. **ANAIS.** mar./89. 44p.
- [2] ENCONTRO REGIONAL LATINO - AMERICANO DA CIGRÉ, 6, 28 de maio a 1º de junho de 1995. Foz do Iguaçu. Paraná, Campanha Paraense de Energia - COPEL. O Compêndio de Trabalhos/Comitê de Estudos nº 36. Compatibilidade eletromagnética em Sistema de Potência. 1995.
- [3] GALVÃO, B.S.M.C. e LOUREIRO, G. Importância do controle de EMI para a indústria Brasileira. **ELETRICIDADE MODERNA.** Vol. 23, n. 205, abr./95. p. 298 - 311.
- [4] BUCELLA, C et all. Frequency analysis of the Induced Effects. Due to the Lightning Stroke Radiated. Eletromagnetic Field. **IEEE Transactions on Eletromagnetic Compatibility.** Vol. 34, n.3, aug./93. p. 338 - 362.
- [5] BRAVER, J.R. **What Every Engineer Should Know about Finite Element Analysis.** Marcel. Dekker, New York and Basel. 1988. 219 p.
- [6] SERQUEIRA, R.M. Critérios gerais de Instalação de Equipamentos Eletrônicos em Face dos Efeitos das Descargas Atmosféricas. In: "SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, 1. **Anais...** São Paulo. 49 p.
- [7] ANDERSON, R. B. e ERIKSSON, A.J. Lightning Parameters for engineering application. **Electra** n.69, mar./80.
- [8] BERGER, K. The Earth Flash. In: "Lightning: physics of Lightning - GOLDE, R.H. London, Academic Press. 1977. V.1 Cap.5 - item 4.3.2. p. 146-157
- [9] TRIGINELLI, W.A.C. et all. Principais Parâmetros aplicáveis a estudos de Engenharia. **Eletricidade Moderna** Vol. 23, n.205, abr./95. p.118 - 130..
- [10] GOLDE, R.H. Lightning Currents and Related Parameter. In: "**Lighthning: Physics of Lightning**". London, Academic Press. 1977. p. 309 - 350.
- [11] HOEFFLMAN, J. Guide on EMC in Power Plants and HV Substations. E2-204-94a/JH/3604-4. Doc. CIGRÉ WG 36-04, mar./95. p.43-47.

- [12] VISACRO, F.S. Aspectos Fundamentais da Influência do Aterramento Elétrico. **Eletricidade Moderna**, Vol.23, n.206, mai./95. p.131-138.
- [13] FINKEL, V.S. Problemas de Instrumentação Devidos a Interferências Eletromagnéticas (EMI). Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Petróleo. p.313-328.
- [14] SISTEMAS DE ATERRAMENTO - TELECOMUNICAÇÕES, 2, São Paulo, Erico do Brasil - Comércio e Indústria Ltda. Junho/82. 129 p.
- [15] MAZZETTI, Carlo. Impulse Behavior of Ground Electro des. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. Vol. PAS- 102, n.9, sept./83. p.3148 - 3156.
- [16] LEITE, D.M e LEITE, C.M. aterramento. In: "**Proteção contra Descargas Atmosféricas**". São Paulo, MM. Editora, 1993.
- [17] VERNA, R e MUKHEDKAR, D. Impulse Impedance of Buried Ground Wire. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-99, n.6, nov./Dec./80. p.2357-2302.
- [18] GUPTA, B.R e THAPAR, B. Impulse Impedance of Grounding Grids. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAs-99, n.6, nov./Dec./80. p.2357-2362.
- [19] DOMMEL, H.W. **Electromagnetic Transients Program: Reference Manual**. Portland, Department of Electrical Engineering/Faculty of applied Science. 1986
- [20] TRANSIENTS Analysis Program for Personal Computers Canadá, Microtran Power System Analysis Corporation. 1988.
- [21] DÁJUZ, A. et all. Transitórios. **Elétricos e Coordenação de Isolamento: Aplicação em sistemas de Potência de Alta Tensão**. Rio de Janeiro, FURNAS Niterói, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE/EDUFF 1987. 435 p.
- [22] CABOS de Potência de Média Tensão - Catálogo PIRELLI



## APÊNDICE 1

### RELÉ KAB

#### 1 Descrição

O KAB é um relé de alta impedância, utilizado em proteção de barras, possui uma unidade de tensão (V) e uma unidade de corrente (IT), além de uma unidade de selo (ICS), conforme figura AP-1A.

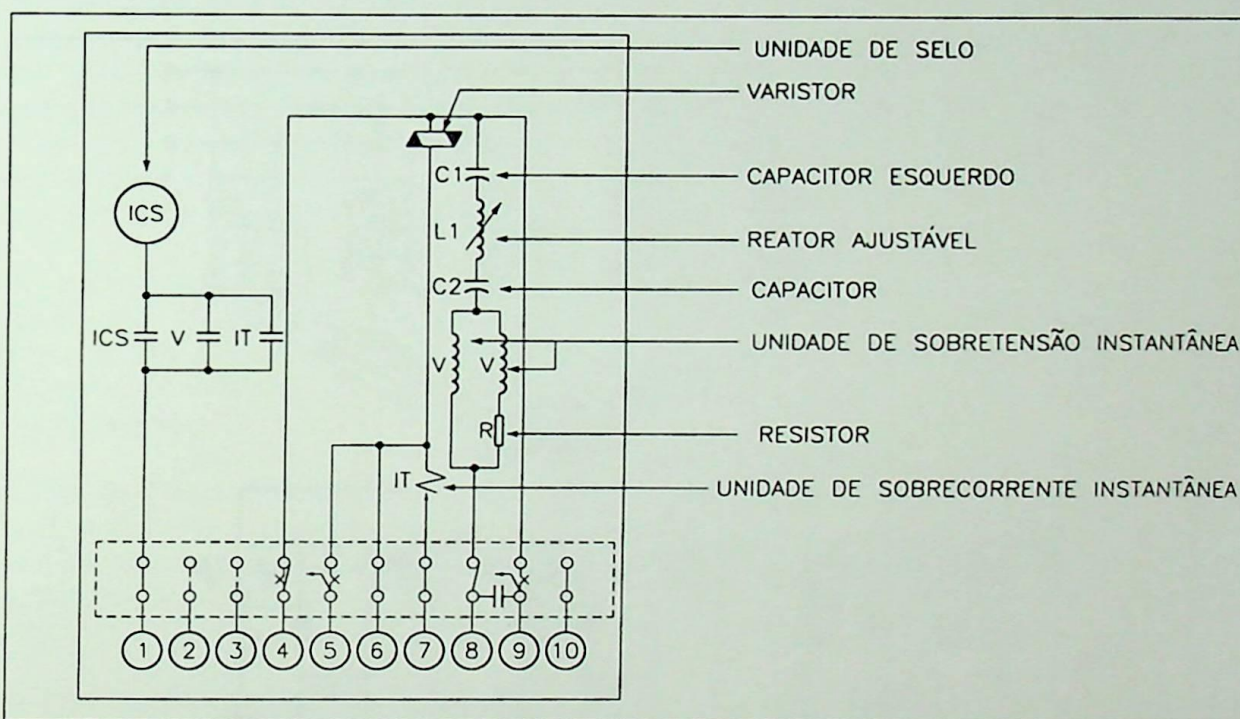


Fig. AP-1A - Esquema Interno do Relé KAB

A unidade V é a de tensão, instantânea, tipo cilindro de indução, que é ligada com uma combinação reator-capacitor sintonizada para a frequência nominal, essa unidade utiliza bobina de alta impedância.

A unidade IT é a de sobrecorrente com uma bobina de operação de baixa impedância, conectada em série com um disco do resistor "THYRITE", que nada mais é que um limitador de tensão de característica não linear.

## 2 Princípio de Operação

O relé deve ser conectado como mostra a figura AP-1B.

Para a condição normal de operação, a tensão no terminal do relé é aproximadamente igual a zero.

Considerando um defeito externo, cada TC dos circuitos das fontes produzirá uma tensão secundária, necessária para impelir sua contribuição de corrente secundária para o circuito de acordo com sua relação de transformação, enquanto que o TC do alimentador defeituoso produzirá uma tensão suficientemente necessária para forçar toda a corrente secundária de contribuição para o circuito, através de seus enrolamentos e terminais. Desprezando o efeito das correntes de carga, os TC's dos outros alimentadores não produzirão tensão secundária e, considerando um desempenho ideal de todos os TC's, não aparecerá tensão nos terminais do relé.

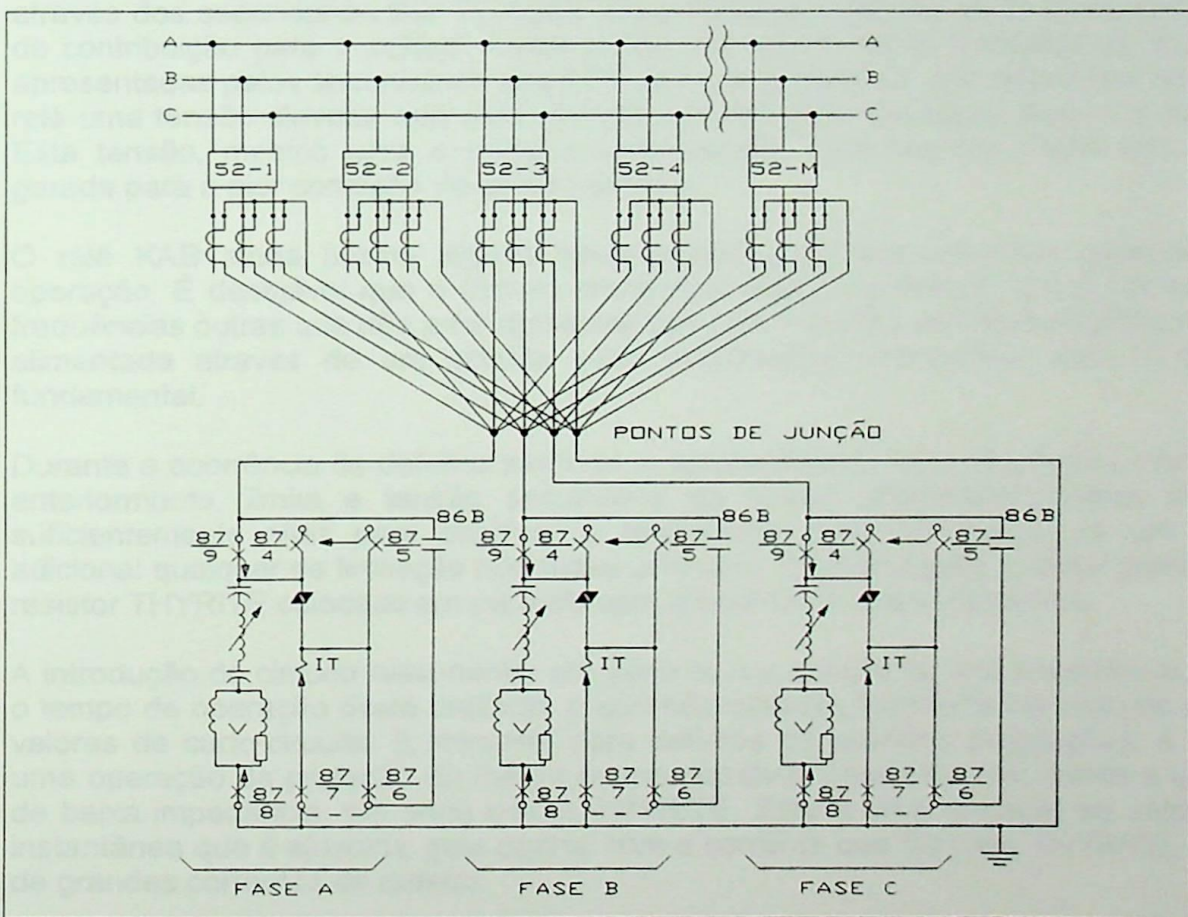


Fig. AP-1B - Conexão Externa do Relé KAB

Em verdade, em situações reais, durante curto-circuito, os TC's não respondem idealmente, devido à saturação do núcleo que normalmente é resultante de circulação de transientes de DC na corrente de defeito primária e que pode ser agravada pelo fluxo residual deixado no núcleo quando de um defeito anterior.

A pior condição acontecerá se o TC do alimentador defeituoso saturar-se completamente, perdendo toda sua capacidade de produzir uma tensão em seu secundário, neste caso, então, os TC's das fontes terão que produzir tensão suficiente para forçar suas correntes através dos seus próprios enrolamentos e através dos enrolamentos e terminais do TC saturado. Como consequência, uma tensão  $V_1$  aparecerá nos terminais do relé. Como se considerou que o TC do alimentador defeituoso estaria completamente saturado, esta

tensão  $V_1$  será igual ao produto do valor da corrente secundária total, proveniente dos TC's das fontes, pelo valor da resistência do secundário do TC defeituoso, incluindo as ligações.

Esta tensão é relativamente pequena e, como foram consideradas as piores condições (completa saturação do TC e máximo curto-circuito), é a maior tensão que pode vir a ocorrer para um defeito externo. Como é óbvio, não haverá saturação completa do TC do alimentador defeituoso e os TC's das fontes também tenderão a saturar-se um pouco, de modo que a tensão real que aparecerá nos terminais do relé será sempre menor que a tensão  $V_1$ .

A bobina de alta impedância (unidade de tensão) do relé diferencial, estará habilitada para distinguir defeitos externos de internos, se for calibrada para não operar para a máxima tensão devida a defeitos externos e operar para a mínima tensão, desenvolvida nos pontos de junção da malha, proveniente de um defeito interno.

Supondo agora a ocorrência de um defeito interno, os TC's das fontes terão que produzir tensão suficiente para impelir suas correntes secundárias de contribuição para o circuito, através dos secundários dos TC's dos alimentadores, que não terão correntes primárias de contribuição para o defeito. Deste modo, por serem muito elevadas as impedâncias apresentadas pelos secundários dos TC's dos alimentadores, aparecerá nos terminais do relé uma tensão elevada que será limitada apenas pela saturação dos TC's das fontes. Esta tensão, mesmo para o mínimo curto-circuito, será sempre maior que a tensão gerada para a pior condição de defeito externo.

O relé KAB ainda possui alguns refinamentos para melhorar sua característica de operação. É desejável que o circuito diferencial seja insensível a componentes DC e a frequências outras que não a fundamental, por isto, a bobina de alta impedância do relé é alimentada através de um circuito série ressonante, sintonizado para a frequência fundamental.

Durante a ocorrência de defeitos internos, a saturação dos TC's das fontes, como foi dito anteriormente, limita a tensão secundária da malha. Entretanto, cristas de tensão suficientemente altas para danificar o isolamento poderiam surgir, se um elemento adicional qualquer de limitação não fosse colocado. Esta limitação é desempenhada pelo resistor THYRITE colocado em paralelo com a bobina de alta impedância.

A introdução do circuito ressonante, em série com a bobina de alta impedância, aumenta o tempo de operação desta unidade, o que não constitui problema no caso de pequenos valores de curto-circuito. Entretanto, para defeitos de grandes proporções, é desejável uma operação da proteção no menor tempo possível; para este fim, existe a unidade IT de baixa impedância, em série com o THYRITE. Esta é uma unidade de sobrecorrente instantânea que é ajustada para operar com a corrente que flui pelo THYRITE, em casos de grandes correntes de defeito.

## APÊNDICE 2

### BANCO DE DADOS BÁSICO

```

*
*           . . . . . Case identification card
CASO BASE-TRABALHO DISSERTACAO-ANALISE DE INTERFERENCIA ELETROMAG.
*
*           . . . . . Time card
1.E-72000.00E-6 1           1.E-121 1
*
*           . . . . . Lumped RLC branch
RA      R1           17590.  0.4
R1      RB           2600.0
R1      RB           2.0
36B     36M           0.80.0078
36A     37A           0.00010.0027
36B     37E           0.00010.0027
37A     37M           0.80.0078
37A     38A           0.00010.0027
37B     38B           0.00010.0027
38A     38M           0.80.0078
38A     39A           0.00010.0027
38B     39B           0.00010.0027
39A     39M           0.80.0078
39A     40A           0.00010.0027
39B     40B           0.00010.0027
40A     40M           0.80.0078
40A     41A           0.00010.0027
40B     41B           0.00010.0027
41A     41M           0.80.0078
41A     44A           0.00010.0027
41E     44B           0.00010.0027
44B     44M           0.80.0078
44A     42A           0.00010.0027
44B     42B           0.00010.0027
42A     42M           0.80.0078
42A     43A           0.00010.0027
42B     43B           0.00010.0027
43A     43M           0.80.0078
43A     RA           0.00010.0027
43B     RB           0.00010.0027
RA      45A           0.00010.0027
RB      45B           0.00010.0027
45A     45M           0.50.0078
BT1-1  BT1-2         0.422.4E-2
BT1-2  BT1-3         0.361.3E-2
BT1-3  BT1-4         0.341.1E-2
BT1-4  BT1-5         0.061.9E-3
BT1-5  BT1-6         0.061.9E-3

```

BT1-6 BT1-7	0.061.9E-3	
BT1-7 BT1-8	0.061.9E-3	
BT1-8 BT1-9	0.061.9E-3	
BT1-9BT1-10	0.061.9E-3	
BT1-10BT1-11	0.061.9E-3	
BT1-11BT1-12	0.061.9E-3	
BT1-12BT1-13	0.061.9E-3	
BT1-13BT1-14	0.061.9E-3	
BT1-14BT1-15	0.361.2E-2	
BT1-1 BT2-2	2.6E-32.3E-2	
BT1-2 BT2-4	2.6E-32.3E-2	
BT1-3 BT2-5	2.6E-32.3E-2	
BT1-5 BT2-7	2.6E-32.3E-2	
BT1-10 BT2-9	2.6E-32.3E-2	
BT1-15BT2-10	2.6E-32.3E-2	
BT2-1 BT2-2	0.421.4E-2	
BT2-2 BT2-3	0.289.0E-3	
BT2-3 BT2-4	0.113.5E-2	
BT2-4 BT2-5	0.431.4E-2	
BT2-5 BT2-6	0.289.0E-3	
BT2-6 BT2-7	0.123.9E-3	
BT2-7 BT2-8	0.227.2E-3	
BT2-8 BT2-9	0.103.2E-3	
BT2-9BT2-10	0.321.0E-3	
BT2-10BT2-11	0.421.4E-2	
BT2-11BT2-12	0.185.8E-3	
BT2-1 AUX	0.4E-33.8E-3	
BT2-3 AUX	0.4E-33.8E-3	
BT2-6 AUX	0.2E-33.8E-3	
BT2-8 AUX	0.4E-33.8E-3	
BT2-11 AUX	0.4E-33.8E-3	
BT2-12 AUX	0.2E-33.8E-3	
AUX	2.04.7E-3	
45EBT1-14	0.00020.0039	
36A BT1-4		7.4E-4
37A BT1-5		7.4E-4
38A BT1-6		7.4E-4
39A BT1-7		7.4E-4
40A BT1-8		7.4E-4
41A BT1-9		7.4E-4
44ABT1-10		7.4E-4
42ABT1-11		7.4E-4
43ABT1-12		7.4E-4
RABT1-13		8.7E-4
45ABT1-14		7.4E-4
36B BT1-4		4.5E-4
37B BT1-5		4.5E-4
38B BT1-6		4.5E-4
39B BT1-7		4.5E-4
40B BT1-8		4.5E-4
41B BT1-9		4.5E-4
44BBT1-10		4.5E-4

42BBT1-11	4.5E-4
43BBT1-12	4.5E-4
RBBT1-13	5.0E-4
45BBT1-14	4.5E-4
36A  36B	8.4E-6
37A  37B	8.4E-6
38A  38B	8.4E-6
39A  39B	8.4E-6
40A  40B	8.4E-6
41A  41B	8.4E-6
44A  44B	8.4E-6
42A  42B	8.4E-6
43A  43B	8.4E-6
45A  45B	8.4E-6
RA  RB	8.4E-6
36M BT1-4	7.7E-4
37M BT1-5	7.7E-4
38M BT1-6	7.7E-4
39M BT1-7	7.7E-4
40M BT1-8	7.7E-4
41M BT1-9	7.7E-4
44MBT1-10	7.7E-4
42MBT1-11	7.7E-4
43MBT1-12	7.7E-4
45MBT1-14	7.7E-4
36A	1.3E-4
36A	7.9E-6
37A	1.3E-4
37A	7.9E-6
38A	1.3E-4
38A	7.9E-6
39A	1.3E-4
39A	7.9E-6
40A	1.3E-4
40A	7.9E-6
41A	1.3E-4
41A	7.9E-6
44A	1.3E-4
44A	7.9E-6
42A	1.3E-4
42A	7.9E-6
43A	1.3E-4
43A	7.9E-6
RA	1.3E-4
RA	7.9E-6
45A	1.3E-4
45A	7.9E-6
36B	1.3E-4
36B	7.8E-6
37B	1.3E-4
37B	7.8E-6
38B	1.3E-4

## Apêndice 2

```

38B          7.8E-6
39B          1.3E-4
39B          7.8E-6
40B          1.3E-4
40B          7.8E-6
41B          1.3E-4
41B          7.8E-6
44B          1.3E-4
44B          7.8E-6
42B          1.3E-4
42B          7.8E-6
43B          1.3E-4
43B          7.8E-6
  RB          1.3E-4
  RB          7.8E-6
45B          1.3E-4
45B          7.8E-6
  RA          RB          1.E20
$ = = End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = =
*
92  RA          RI          50.0          1131.0
92  RI          RA          6.240          1202.0
*
. . . . . Piecewise linear inductance
93  36A          36M          4124.0          80.7          0.52          1.E-6
93  37B          37M          3093.0          87.4          0.52          1.E-6
93  38B          38M          3093.0          49.5          0.52          1.E-6
93  39B          39M          4546.0          56.3          0.45          1.E-6
93  40B          40M          3377.0          92.8          0.52          1.E-6
93  41B          41M          2652.0          52.8          0.52          1.E-6
93  44A          44M          3093.0          50.7          0.52          1.E-6
93  42B          42M          3376.0          52.6          0.52          1.E-6
93  43B          43M          2857.0          92.5          0.52          1.E-6
93  45B          45M          2040.0          118.6          0.38          1.E-6
*
$ = = = End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = =
*
*
. . . . . Voltage or current sources
14  36A-1          -3.5415          60.          -90.          -1.
14  36M-1          3.5415          60.          -90.          -1.
14  39B-1          -0.280          60.          -90.          -1.
14  39M-1          0.280          60.          -90.          -1.
14  40B-1          -0.850          60.          -90.          -1.
14  40M-1          0.850          60.          -90.          -1.
14  41B-1          -1.13          60.          -90.          -1.
14  41M-1          1.13          60.          -90.          -1.
14  44A-1          -3.541500          60.          -90.          -1.
14  44M-1          3.541500          60.          -90.          -1.
14  42B-1          -0.71000          60.          -90.          -1.
14  42M-1          0.71000          60.          -90.          -1.
14  43B-1          -1.2700          60.          -90.          -1.
14  43M-1          1.2700          60.          -90.          -1.
14  45B-1          -2.830          60.          -90.          -1.

```

Apêndice 2

```
14 45M-1 2.830 60. -90. -1.  
14 37B-1 -0.01300 60. 30. -1.  
14 37M-1 0.01300 60. 30. -1.  
14 38B-1 -0.00000 60. -90. -1.  
14 38M-1 0.00000 60. -90. -1.  
15BT1-10-1-25000.000-0.00476E6-0.29411E6 500.E-61480.77E-6  
11BT1-10-1 -200.0 1480.77E-62000.00E-6  
$ = = = End of level 3: Sources = = = = =  
RA RB 45B  
$ = = = End of level 4: User-defined voltage output = = = = =  
$ = = = Level 5: End of data case = = = = =
```



