

TESE

916

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

*Impacto dos Surtos Atmosféricos nos Circuitos
Secundários de Distribuição de Energia Elétrica e nos
Equipamentos Sensíveis – Metodologia de Proteção*

HELSON DORADO DE FARIAS

ITAJUBÁ - MG

Março - 1997

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**IMPACTO DOS SURTOS ATMOSFÉRICOS NOS CIRCUITOS
SECUNDÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E NOS
EQUIPAMENTOS SENSÍVEIS - METODOLOGIA DE PROTEÇÃO.**

HELSON DORADO DE FARIAS

ORIENTADOR: PROF. MANOEL EDUARDO MIRANDA NEGRISOLI

CO-ORIENTADOR: PROF. MANUEL LUÍS BARREIRA MARTINEZ

ITAJUBÁ - M.G.

MARÇO - 1997

CLASS. 621.3.015.3:621.315

Cl. 3

F 224 i

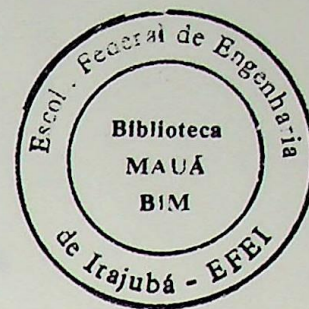
TOMBO.

936





Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

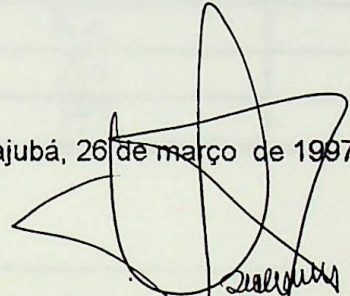


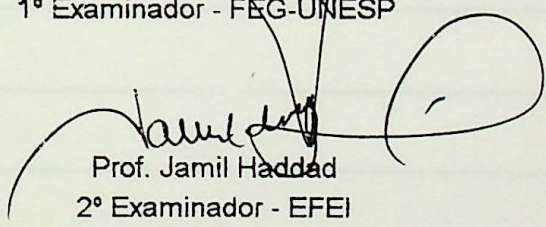
ANEXO I

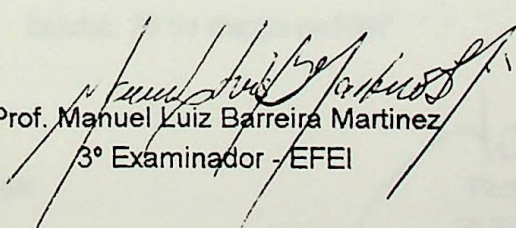
PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

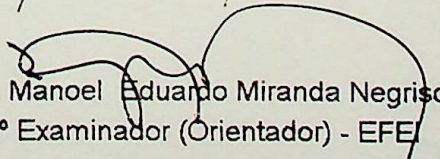
A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 072 de 10 de março de 1997, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **"Impacto dos Surtos Atmosféricos nos Circuitos Secundários de Distribuição de Energia Elétrica e nos Equipamentos Sensíveis - Metodologia de Proteção"** apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**, na **Área de Sistemas Elétricos de Potência**, satisfeitas as demais exigências regimentais, a Helson Dorado de Farias.

Itajubá, 26 de março de 1997.


Prof. Oscar Armando Maldonado Astorga
1º Examinador - FEG-UNESP


Prof. Jamil Haddad
2º Examinador - EFEI


Prof. Manuel Luiz Barreira Martinez
3º Examinador - EFEI


Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrison
4º Examinador (Orientador) - EFEI



Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Impacto dos Surtos Atmosféricos nos Circuitos Secundários de Distribuição de Energia Elétrica e nos Equipamentos Sensíveis - Metodologia de Proteção".

Autor: Helson Dorado de Farias

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A+	
2º	A+	
3º	A+	
4º	A+	

Resultado Médio: Conceito A+, ou seja, aprovado
com distinção

Observações: _____

Itajubá, 26 de março de 1997

Prof. Oscar Armando Maldonado Astorga
1º Examinador - FEG-UNESP

Prof. Jamil Haddad
2º Examinador - EFEI

Prof. Manuel Luiz Barreira Martinez
3º Examinador - EFEI

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

— A Jesus, luz da minha existência.

— Aos meus pais, Luiz (In Memoriam) e Zuleida, pela herança maior que me deixaram: o exemplo de vida.

— Aos meus irmãos, Hugo e Eliane, e aos outros irmãos que a vida me tem dado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que permitiu meios para superar todos os momentos difíceis.

Ao meu orientador Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrisoli, pela amizade e dedicação durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Manuel Luís Barreira Martinez, pela valiosa ajuda prestada durante o desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES e ao CNPq, órgãos que tornaram financeiramente possível a realização dessa dissertação.

Ao Engenheiro Douglas e ao Técnico Benedito Manoel, ambos da CEMIG, pela atenção e colaboração nas informações de suma importância para a execução deste trabalho.

À CEMIG, pela gentileza de fornecer informações do seu sistema de distribuição de energia elétrica, possibilitando, desta forma, a realização das simulações computacionais.

Aos funcionários da PPG, do DRA, da BIM, e do CPD pela boa vontade demonstrada durante todo esse tempo.

Ao companheiro de ideal Espírita Gilson Alves de Lima, pelas palavras de amizade e, principalmente, pelo exemplo, que ficará marcado nas minhas existências vindouras.

Aos outros companheiros de ideal Espírita.

Ao amigo Dr. José Claudio Antunes Júnior, pelo companheirismo e incentivo perante à vida.

Ao Centro Espírita Allan Kardec, que tem sido a nossa maior Escola.

Aos amigos Robson e Illicinea, pela valiosa ajuda na revisão e impressão do texto desta Dissertação.

A todos aqueles, que embora não tenham sido citados, merecem o nosso reconhecimento.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
GRÁFICOS DAS SIMULAÇÕES	xi
LISTA DE TABELAS DAS SIMULAÇÕES	xv
SIMBOLOGIA	xvi
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - Considerações Gerais	2
1.2 - Estrutura da Dissertação	2
 CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS VÁRIOS COMPONENTES DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO	
2.1 - Transformador	5
2.1.1 - Distribuição Inicial de Tensão em um Transformador Utilizando o Método das Ondas Viajantes	8
2.2 - Linhas de Transmissão	20
2.2.1 - Introdução	20
2.2.2 - Características Físicas dos Cabos das Linhas de Transmissão	20
2.2.3 - Teoria das Ondas Viajantes	22
2.2.4 - Indutância	32
2.2.5 - Capacitância	36
2.3 - Isoladores	41
2.4 - Pára-raios	48
2.4.1 - Pára-raios à Base de Óxido de Zinco	51
2.4.2 - Pára-raios à Base de Carboneto de Silício	53

CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DO VARISTOR

3.1 - Introdução	56
3.2 - Varistor	57
3.2.1 - Característica Elétrica do Varistor	58
3.2.2 - Efeitos da Temperatura no Tempo de Vida Útil do Varistor	61

CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DOS PARÂMETROS DOS DIVERSOS COMPONENTES DO CIRCUITO

4.1 - Considerações Gerais	66
4.2 - Modelagem dos Parâmetros do Transformador	66
4.3 - Modelagem dos Parâmetros das Linhas de Distribuição Primária e Secundária	68
4.3.1 - Circuito de Distribuição Primária	69
4.3.2 - Circuito de Distribuição secundária	71
4.3.2.1 - Cálculos para o Condutor 1/0 AWG	72
4.3.2.2 - Cálculos para o Condutor 4 AWG	74
4.4 - Modelagem dos Parâmetros dos Isoladores e do Pára-raios	75
4.4.1 - Isoladores	75
4.4.2 - Pára-raios	76
4.5 - Modelagem dos Parâmetros do Varistor	76
4.6 - Modelagem da Carga nos Consumidores	78
4.7 - Origem das Sobretensões	81
4.8 - Planta do Circuito a Ser Simulado	81
4.9 - Considerações sobre a Planta do Circuito e a Simulação em Computador	85

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OBTIDOS

5.1 - Introdução	88
5.2 - Tensões nos Diversos Pontos do Circuito	90
5.2.1 - Simulações com Troca de Pára-raios	90
5.2.2 - Simulações com Troca de Pára-raios e com Carga nos Consumidores	

.....	91
5.2.3 - Simulações com o Uso do Varistor e com Troca de Pára-raios	92
5.2.3.1 - Simulações com Pára-raios de Carboneto de Silício no Primário do Transformador - Casos XA	92
5.2.3.2 - Simulações com Pára-raios de Carboneto de Silício no Primário do Transformador e um Varistor de Óxido de Zinco no Secundário do Transformador - Casos XB	95
5.2.3.3 - Simulações com Pára-raios de Óxido de Zinco no Primário do Transformador - Casos XC	98
5.2.3.4 - Simulações com Pára-raios de Óxido de Zinco no Primário do Transformador e um Varistor de Óxido de Zinco no Secundário do Transformador - Casos XD	100
5.3 - Gráficos	103
5.3.1 - Gráficos das Simulações com Troca de Pára-raios e com Carga ...	103
5.3.2 - Gráficos das Simulações com o Uso do Varistor e com Troca de Pára-raios - Casos XA, XB, XC e XD	114
 CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO	 129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
ANEXOS - CARTÕES DE ENTRADA DO PROGRAMA MICROTRAN	141

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Seção transversal das espiras de um enrolamento	5
2.2 - Representação da rede de indutâncias e capacitâncias	6
2.3 - Rede simplificada do enrolamento de um transformador de potência	7
2.4 - Elemento de comprimento Δx do enrolamento do transformador	9
2.5 - Distribuição inicial da tensão em um enrolamento uniforme de um transformador de potência em resposta a um surto de tensão de função unitário. (a) Neutro aterrado. (b) Neutro isolado	20
2.6 - Circuito de uma linha de transmissão a dois condutores	22
2.7 - Comportamento da linha de transmissão quando aplicado a mesma um impulso de tensão U	23
2.8 - Gráfico de energização de um trecho de linha de comprimento unitário	24
2.9 - Gráficos de ondas de tensão e corrente incidentes e refletidas	31
2.10 - Circuito com dois condutores	32
2.11 - Dois condutores a uma distância D	37
2.12 - Plano XY nulo entre os condutores A e B	40
2.13 - Isolador de porcelana, tipo pino	42
2.14 - Resistência elétrica da madeira ao impulso de tensão	43
2.15 - Gráfico da probabilidade da disrupção ser seguida de arco 60 Hz	44
2.16 - Tipos de cruzetas usadas em circuito de distribuição de energia elétrica. (a) Cruzeta Tipo M. (b) Cruzeta Tipo N. (c) Cruzeta Tipo B	45
2.17 - Modelo de uma combinação madeira-porcelana	46
2.18 - Modelo simplificado da combinação madeira-porcelana	46
2.19 - Pára-raios de distribuição	49
2.20 - Características V x I de um pára-raios ideal	50
2.21 - Características V x I de um pára-raios à base de Óxido de Zinco	51
2.22 - Característica térmica dos elementos de Óxido de Zinco e Carboneto de Silício	52
2.23 - Curva característica de atuação do pára-raios de Carboneto de Silício	54
3.1 - Matriz de grãos de Óxido de Zinco	58

3.2 - Características tensão-corrente de um varistor	59
3.3 - Junções de uma resistência não-linear	61
3.4 - Característica tempo de vida útil versus temperatura ambiente variando a taxa de tensão aplicada	63
4.1 - Representação do transformador por uma rede de capacitâncias	67
4.2 - Estrutura da cruzeta e dos suportes da rede de distribuição secundária	69
4.3 - Parte de uma linha de distribuição de energia elétrica usado como exemplo.....	82
4.3.1 - Parâmetros à base de Óxido de Zinco, tipo EXLIM Q, da marca ASEA-BROWN BOVERI (ABB).....	76
4.3.2 - Varistor à base de Óxido de Zinco, tipo SIOV-S20K140, da marca SIEMENS	78
4.3.3 - Distância entre os postes na linha de distribuição primária	84
4.3.4 - Distância entre os postes na linha de distribuição secundária	85

LISTA DE TABELAS

2.1 - Características físicas dos cabos 1/0 AWG e 4 AWG, usados em linhas de distribuição	21
4.1 - Valores da rede de capacitância do transformador de distribuição	68
4.2 - Pára-raios à base de Carboneto de Silício, tipo BHF7DC, da marca SPRECHER ENERGIE	76
4.3 - Pára-raios à base de Óxido de Zinco, tipo EXLIM Q, da marca ASEA BROWN BOVERI (ABB)	76
4.4 - Varistor à base de Óxido de Zinco, tipo SIOV-S20K140, da marca SIEMENS	78
4.5 - Distâncias entre os postes na linha de distribuição primária	84
4.6 - Distância entre os postes na linha de distribuição secundária	85

GRÁFICOS DAS SIMULAÇÕES

5.1 - Tensão no primário do transformador (PP14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	103
5.2 - Tensão no poste PS4, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	104
5.3 - Tensão no poste PS5, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	104
5.4 - Tensão no poste PS6, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	105
5.5 - Tensão no poste PS7, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	105
5.6 - Tensão no poste PS8, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	106
5.7 - Tensão no poste PS9, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	106
5.8 - Tensão no poste PS10, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	107
5.9 - Tensão no poste PS11, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	107
5.10 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	108
5.11 - Tensão no poste PS18, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	108
5.12 - Tensão no Ponto de interseção PIS1, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1	109
5.13 - Tensão no primário do transformador (PP14), com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.2	109
5.14 - Tensão no poste PS10, com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.2	110

5.15 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.2	110
5.16 - Tensão no primário do transformador (PP14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador. CASO 3.1	111
5.17 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador. CASO 3.1	111
5.18 - Tensão no poste PS18, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador. CASO 3.1	112
5.19 - Tensão no primário do transformador (PP14), com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador. CASO 3.2	112
5.20 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador. CASO 3.2	113
5.21 - Tensão no primário do transformador (PP14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador, sem o uso do varistor e com carga na linha de distribuição secundária. CASO 4.1	113
5.22 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador, sem o uso do varistor e com carga na linha de distribuição secundária. CASO 4.1	114
5.23 - Tensão no Poste PS5, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS5. CASO 1A	115
5.24 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS5. CASO 1A	115
5.25 - Tensão no Poste PS9, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS8. CASO 3A	116

5.26 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS8. CASO 3A	116
5.27 - Tensão no Poste PS20, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS8. CASO 3A	117
5.28 - Tensão no Poste PS9, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS11. CASO 4A	117
5.29 - Tensão no Poste PS10, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS11. CASO 4A	118
5.30 - Tensão no Poste PS11, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS11. CASO 4A	118
5.31 - Tensão no Poste PS4, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A	119
5.32 - Tensão no Poste PS5, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A	119
5.33 - Tensão no Poste PS6, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A	120
5.34 - Tensão no Poste PS7, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A	120
5.35 - Tensão no Poste PS8, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A	121
5.36 - Tensão no Poste PS9, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A	121
5.37 - Tensão no Poste PS10, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A	122
5.38 - Tensão no Poste PS11 com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A	122
5.39 - Tensão no Ponto de interseção PIS1 com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A	123
5.40 - Tensão no Poste PS12 com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e com	

varistores ligados, ao mesmo tempo, nos postes PS5, PS6, PS8, PS11, PS15, PS18 e PS20.

CASO 11B123

5.41 - Tensão no Poste PS13 com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e com varistores ligados, ao mesmo tempo, nos postes PS5, PS6, PS8, PS11, PS15, PS18 e PS20.

CASO 11B124

5.42 - Tensão no Poste PS14 com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e com varistores ligados, ao mesmo tempo, nos postes PS5, PS6, PS8, PS11, PS15, PS18 e PS20.

CASO 11B124

5.43 - Tensão no Poste PS10 com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e com um varistor no poste PS5. CASO 1C125

5.44 - Tensão no Poste PS14 com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e com varistores ligados, ao mesmo tempo, nos postes PS5, PS6, PS8, PS11, PS15, PS18 e PS20. CASO 11C125

5.45 - Tensão no Poste PS18 com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e um varistor no poste PS5. CASO 1D126

5.46 - Tensão no Poste PS18 com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e um varistor no poste PS11. CASO 4D126

5.47 - Tensão no Poste PS4 com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e com varistores ligados, ao mesmo tempo, nos postes PS5, PS6, PS8, PS11, PS15, PS18 e PS20.

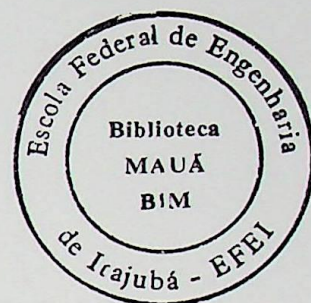
CASO 11D127

LISTA DE TABELAS DAS SIMULAÇÕES

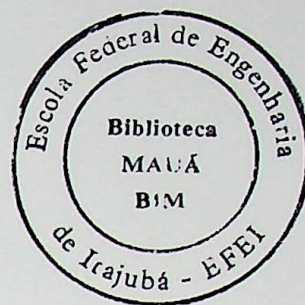
5.1 - Simulações com troca de pára-raios.....	90
5.2 - Simulações com troca de pára-raios e com carga nos consumidores.....	91
5.3 - Simulações com pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador - Casos XA. CASOS 1A, 2A, 3A, 4A, 5A e 6A.....	93
5.4 - Simulações com pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador - Casos XA. CASOS 7A, 8A, 9A, 10A, 11A e 12A.....	94
5.5 - Simulações com pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador - Casos XB. CASOS 1B, 2B, 3B, 4B, 5B e 6B.....	96
5.6 - Simulações com pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador - Casos XB. CASOS 7B, 8B, 9B, 10B, 11B e 12B.....	97
5.7 - Simulações com pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador - Casos XC. CASOS 1C, 2C, 3C, 4C, 5C e 6C.....	98
5.8 - Simulações com pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador - Casos XC. CASOS 7C, 8C, 9C, 10C, 11C e 12C.....	99
5.9 - Simulações com pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador - Casos XD. CASOS 1D, 2D, 3D, 4D, 5D e 6D.....	101
5.10 - Simulações com pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador - Casos XD. CASOS 7D, 8D, 9D, 10D, 11D e 12D.....	102

SIMBOLOGIA

- C é a capacitância da linha de transmissão [F/m].
- C_{AB} é a capacitância entre os lados de alta tensão e o de baixa tensão [F].
- C_{AT} é a capacitância do lado de alta tensão para terra [F].
- C_{BT} é a capacitância do lado de baixa tensão para terra [F].
- C_g é a capacitância para terra na entrada do enrolamento do transformador [F].
- C_s é a capacitância total de uma bobina do transformador [F].
- D é a distância entre os condutores A e B [m].
- d_{ab} é a distância entre as fases A e B do circuito secundário [m].
- d_{bc} é a distância entre as fases B e C do circuito secundário [m].
- d_{ac} é a distância entre as fases A e C do circuito secundário [m].
- d_{an} é a distância entre as fases A e o Neutro do circuito secundário [m].
- d_{bn} é a distância entre as fases B e o Neutro do circuito secundário [m].
- d_{cn} é a distância entre as fases C e o Neutro do circuito secundário [m].
- d_{ap} é a distância entre o condutor A e um ponto P [m].
- d_{bp} é a distância entre o condutor B e um ponto P [m].
- d_{AB} é a distância entre os condutores A e B [m].
- D_{ab} é a distância entre as fases A e B do circuito primário [m].
- D_{bc} é a distância entre as fase B e C do circuito primário [m].
- D_{ac} é a distância entre as fases A e C do circuito primário [m].
- D_m é a distância média geométrica entre os condutores [m].
- D_s é o raio médio geométrico do condutor [m].
- I é a corrente de surto, valor de crista [A].
- I_a é a corrente no condutor A [A].
- I_b é a corrente no condutor B [A].
- I_{cs} é a corrente na capacitância série [A].
- I_d é a onda direta de corrente [A].
- I_g é a corrente total na capacitância para terra [A].
- I_o é a corrente elétrica através de uma seção do condutor [A].
- I_r é a onda refletida de corrente [A].



- I_s é a corrente na capacitância série [A].
- k é a constante de proporcionalidade.
- ℓ é o comprimento do enrolamento do transformador [m].
- L é a indutância da linha em [H/m].
- q é a carga elétrica acumulada [C].
- q_a é a carga elétrica no condutor A [C].
- q_b é a carga elétrica no condutor B [C].
- r é a resistência do varistor [Ω].
- r_a é o raio do condutor A [m].
- r_a' é o raio geométrico do condutor A [m].
- r_b é o raio do condutor B [m].
- r_b' é o raio geométrico do condutor B [m].
- S_{CONS} é a potência aparente do consumidor [VA].
- T é o tempo necessário para uma onda atravessar toda uma linha de transmissão [s].
- U é a tensão do enrolamento do transformador para terra em algum ponto do enrolamento [V].
- U_{ab} é a tensão entre os condutores A e B [V].
- U_{cs} é a tensão na capacitância série [V].
- U_d é a onda incidente de tensão [V].
- U_o é a amplitude máxima da função surto [V].
- U_r é a onda refletida de tensão [V].
- v é a velocidade de propagação da onda na linha [m/s].
- X_{Cs} é a reatância capacitiva da capacitância série [Ω].
- W é a potência gerada.
- Z_2 é a impedância do receptor de energia [Ω].
- Z_o é a impedância de entrada da linha ou impedância de surto [Ω].
- α é o coeficiente de não-linearidade.
- ω é a frequência angular [rad/s].
- ϕ_{apa} é o fluxo magnético no ponto P produzido pela corrente que flui pelo condutor A [T].
- ϕ_{apb} é o fluxo magnético no ponto P produzido pela corrente que flui pelo condutor B [T].



- ϕ_{ap} é o fluxo magnético no ponto P [T].
- ϕ_a é o fluxo magnético no condutor A [T].
- ϕ_b é o fluxo magnético no condutor B [T].

RESUMO

As sobretensões, principalmente, as provocadas pelas descargas atmosféricas, causam vários problemas nos sistemas de distribuição de energia elétrica, entre eles, a destruição de aparelhos elétricos e eletrônicos.

Este trabalho analisa as sobretensões ao longo da linha de distribuição primária e secundária, utilizando duas tecnologias de pára-raios de distribuição, Carboneto de Silício e Óxido de Zinco, e varistores como alternativa de proteção na linha de distribuição secundária.

Com o objetivo de prover aos consumidores a proteção contra surtos de maior eficácia e a melhor disposição dos componentes, várias simulações foram executadas contemplando o funcionamento conjunto dos varistores e dos pára-raios das duas diferentes tecnologias existentes no mercado.

ABSTRACT

The overvoltages, specially those caused by atmospheric discharges, may cause many problems in power distribution networks, including damages in electric and electronic equipments.

This work analyses the overvoltages along the primary and secondary power distribution networks using one of the arrester technologies and varistors, used as an alternative to protect the secondary power distribution networks. The arrester technologies are the Silicon Carbide and Zinc Oxide.

Many simulations have been performed to find the best distribution of the components in order to provide protection to the customers against lightning. The simulations take in account the set of the varistors and the arrester of the two technologies in the market.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.2 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O estudo dos efeitos das descargas atmosféricas nas linhas de distribuição de energia elétrica ajuda na possibilidade de se obter uma maior durabilidade dos equipamentos elétricos, diminuindo a probabilidade de ruptura do isolamento, analisando as várias formas de onda, magnitude e duração, e uma maior confiabilidade, diminuindo a frequência e duração das interrupções no suprimento de energia elétrica.

É prática comum entre as concessionárias brasileiras não prever proteção contra sobretensões em linhas de distribuição, exceto o pára-raios de distribuição colocado perto do transformador. Entretanto, ocorrem casos de destruição de equipamentos elétricos e eletrônicos nas residências dos consumidores por causa dos efeitos das descargas atmosféricas.

Torna-se necessário, pois, um melhor conhecimento das sobretensões ao longo de uma linha de distribuição primária e secundária, e algum método, mais econômico, para diminuir ou até mesmo eliminar as sobretensões nas residências dos consumidores.

É dentro deste contexto que este trabalho faz um análise do comportamento das sobretensões ao longo de uma linha de distribuição de energia elétrica de um típico sistema de distribuição urbano, e também propõe um método de proteção usando varistores.

1.2 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A Dissertação constará de seis capítulos, mais o anexo julgado necessário para uma completa compreensão do estudo desenvolvido. A seguir, será mostrado, de forma sucinta, o conteúdo de cada capítulo.

No segundo capítulo, apresentou-se o comportamento dos diversos componentes que compõe uma linha de distribuição primária e secundária perante transitórios causados por sobretensões.

No terceiro capítulo, mostrou-se o varistor e suas características de funcionamento, assim como, o efeito da temperatura em seu comportamento elétrico.

No quarto capítulo, a abordagem voltou-se para a busca do modelo a ser utilizado nas simulações. O modelo apresentado não é absoluto, uma vez que inúmeras variáveis envolvidas com o fenômeno não são conhecidas completamente. Algumas aproximações foram necessárias, mas a essência do problema se manteve.

No quinto capítulo, foram apresentados os resultados obtidos e os respectivos gráficos. Buscou-se nas simulações, as situações mais críticas onde as solicitações aos equipamentos fossem mais severas, fornecendo, assim, uma maior confiabilidade nos dados apresentados.

No sexto capítulo, foram apresentadas as principais conclusões obtidas durante o decorrer do trabalho.

E, no final, colocou-se, em anexo, os cartões de entrada de alguns casos simulados, para que qualquer pessoa possa repetir a experiência.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS VÁRIOS COMPONENTES DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO

CAPÍTULO 1 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS VÁRIOS COMPONENTES DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO

1 - TRANSFORMADOR

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS VÁRIOS COMPONENTES DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO

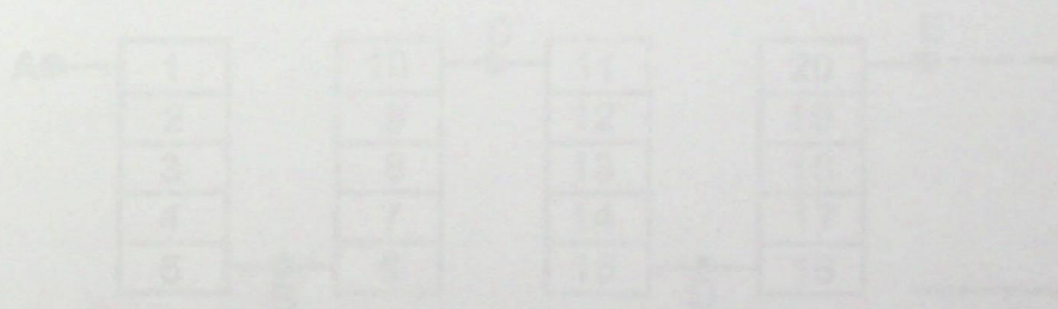


FIGURA 2 - Diagrama unifilar da rede de distribuição

CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS VÁRIOS COMPONENTES DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO

2.1 - TRANSFORMADOR

Em um transformador de potência, a distribuição de tensão devido a presença de fenômenos de transitórios é, freqüentemente, diferente da distribuição linear uniforme que ocorre quando o transformador opera em condições normais. No período transitório, os transformadores se comportam como uma rede de capacitâncias, resistências e indutâncias [5]. A precisão dos resultados é dependente do grau de refinamento contido na representação matemática do transformador, principalmente o seu enrolamento.

Um modelo melhor detalhado é aquele que inclui todas as espiras do enrolamento com suas capacitâncias e indutâncias. Mas, vários graus de simplificação são possíveis até que a rede seja reduzida para um simples circuito LC de poucos elementos.

A figura 2.1, abaixo, mostra um enrolamento composto de uma série de discos, camadas ou panquecas. Cada bloco retangular representa uma seção transversal de uma espira, onde o enrolamento terminal de linha é o ponto A e o enrolamento continua da mesma maneira além do ponto E [1]:

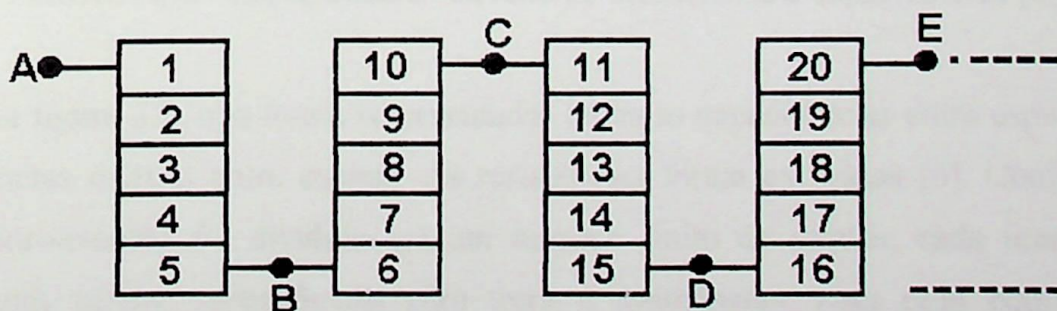


FIGURA 2.1 - Seção transversal das espiras de um enrolamento [6].

Cada seção transversal de uma espira pode ser representada por uma série de indutâncias e capacitâncias para terra e séries referidas a cada seção como apresentado na figura 2.2.

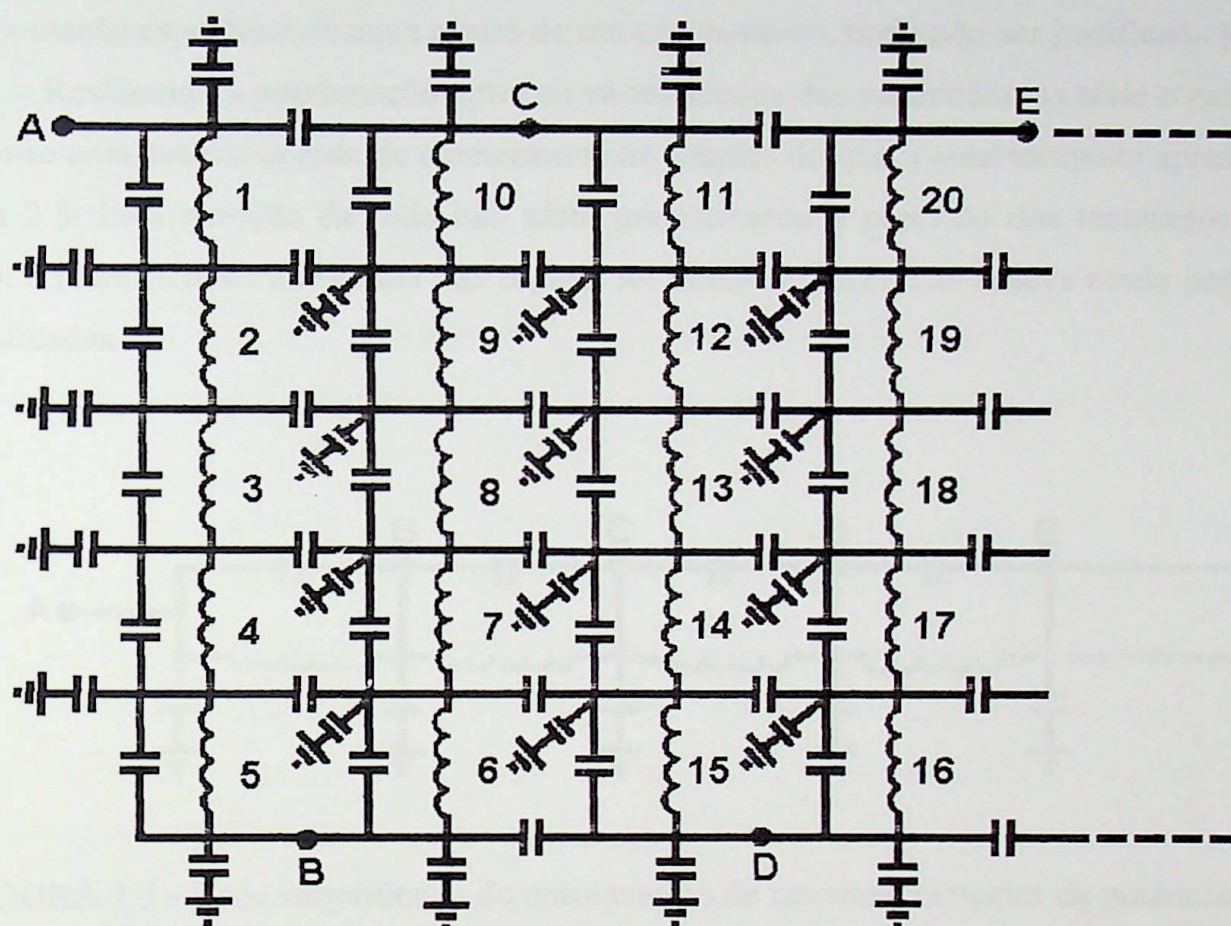


FIGURA 2.2 - Representação da rede de indutâncias e capacitâncias [6].

Na figura 2.2, não foram representadas todas as capacitâncias entre espiras, e todas as indutâncias mútuas entre espiras. As resistências foram excluídas [6]. Como pode ser visto, o enrolamento foi dividido em um número finito de seções, cada uma contendo capacitâncias séries, capacitâncias para terra e indutâncias. Esta rede equivalente foi estabelecida com base nas seguintes considerações:

1) Espiras adjacentes servem como cobertura para ambos os campos magnético e elétrico. Isto é, todos os acoplamentos magnéticos e elétricos podem ser descritos pelo acoplamento entre espiras adjacentes.

2) Todas as outras superfícies condutoras, que estão acopladas capacitivamente a cada espira na bobina, são supostas no potencial terra e o acoplamento indutivo mútuo existente entre as estruturas aterradas e cada espira são desprezados. Alguns outros modelos apresentam resistências de perdas e os elementos indutivos são todos mutuamente acoplados. Em estudos práticos, a modelagem dos enrolamentos, levando em consideração a representação específica de cada espira de um enrolamento, pode não ser justificada [1].

Realizando a combinação entre as várias seções das capacitâncias série e para terra, obtém-se uma sucessiva rede de elementos mais simples do que a anteriormente apresentada, figura 2.3. Esta redução da rede não afeta grandemente a precisão dos resultados. Neste ponto, a identificação individual das espiras foi perdida. Porém, as seções ainda podem ser identificadas.

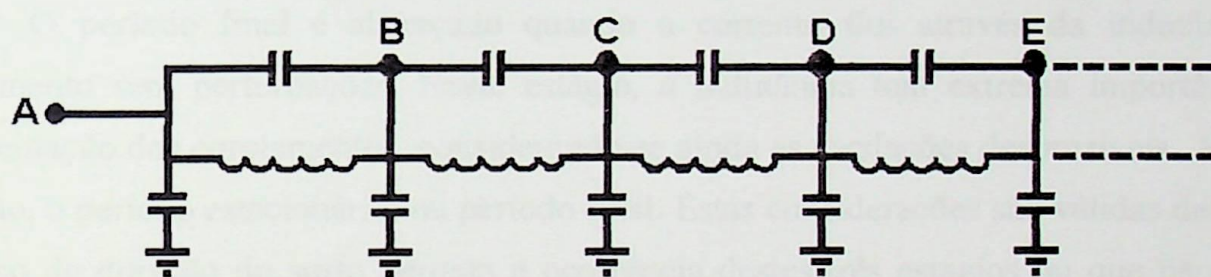


FIGURA 2.3 - Rede simplificada do enrolamento de um transformador de potência [6].

Nota-se que a análise do comportamento transitório do circuito da figura 2.3 pode ser melhor realizado se a sua similaridade com uma linha de transmissão for usada [6]. Mas, deve-se assumir que a indutância e a capacitância são uniformemente distribuídas ao longo do enrolamento para considerar válida a idéia de similaridade entre um transformador de potência e uma linha de transmissão [10]. A diferença entre uma linha de transmissão, representada por parâmetros concentrados, e um enrolamento de transformador representado da mesma forma, como na figura 2.3, são as capacitâncias séries e as indutâncias mútuas [1, 10].

Quando um surto de tensão, provocado por uma descarga atmosférica, atinge um transformador, seus enrolamentos se comportam de forma diferente com o decorrer do

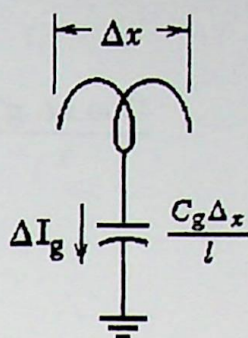
tempo. Devido a combinação de capacitâncias entre bobinas e para terra, o transformador, durante o período inicial, reage como uma capacitância concentrada. Isto se deve à presença da indutância, que não permite, no primeiro instante, uma rápida variação da corrente, mesmo porque a propagação do surto através do isolamento entre espiras ocorre muito mais rapidamente que a propagação do surto ao redor de cada espira ao longo do condutor. Assim sendo, a rede de capacitâncias é rapidamente carregada e a tensão no terminal da linha do transformador pode alcançar duas vezes a tensão de entrada, antes de uma apreciável corrente indutiva se estabelecer nos enrolamentos. Este fenômeno acontece no chamado período da solicitação do surto [1, 10].

Decorridos os instantes iniciais, a corrente através dos enrolamentos do transformador começa a se estabelecer, criando interações entre o campo elétrico e magnético. Isto causa oscilações de corrente e tensões de alta frequência; este é o período intermediário.

O período final é alcançado quando a corrente flui através da indutância do enrolamento sem perturbações. Neste estágio, a indutância tem extrema importância na representação dos enrolamentos, considerando-se ainda as oscilações desprezíveis. Alcança-se então, o período estacionário, ou período final. Estas considerações são válidas desde que o tempo de duração do surto permita a ocorrência destes três estágios ou que não ocorra nenhuma interrupção do mesmo, entre o tempo de 3 e 10 μ s após a aplicação do surto de tensão. Isto causaria uma nova equalização do surto, sob as condições já existentes no mesmo, solicitando ainda mais o enrolamento [1].

2.1.1 - DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE TENSÃO EM UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DAS ONDAS VIAJANTES

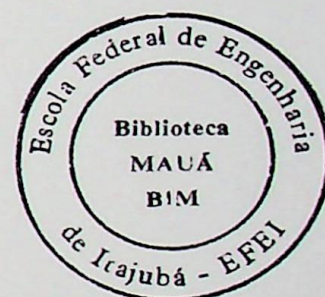
Tirando da figura 2.3 um elemento de comprimento Δx teremos a figura abaixo:

FIGURA 2.4 - Elemento de comprimento Δx do enrolamento do transformador [11].

Assumindo que as indutâncias e capacitâncias estão uniformemente distribuídas ao longo do enrolamento. Da figura 2.4, define-se que C_g é a capacitância para terra na entrada do enrolamento e C_s é a capacitância total de uma bobina do transformador [11]. Portanto, as capacitâncias por unidade de comprimento são:

$$\frac{\text{Capacitância para terra}}{\text{Unidade de comprimento}} = \frac{C_g}{\ell} \quad (\text{eq. 2.1})$$

$$\frac{\text{Capacitância série}}{\text{Unidade de comprimento}} = C_s \cdot \ell \quad (\text{eq. 2.2})$$



Onde,

ℓ é o comprimento do enrolamento do transformador.

Adotando a direção positiva de x como sendo do neutro para o terminal e U como a tensão do enrolamento para terra em algum ponto do enrolamento, I_g como a corrente total na Capacitância para terra (C_g), I_s como a corrente na Capacitância série (C_s). A corrente pelo trecho de comprimento Δx que flui para terra através da capacitância C_g/ℓ pode ser calculada da seguinte forma:

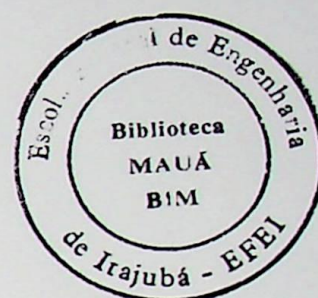
$$\Delta I_g = \frac{C_g \cdot \Delta x \cdot \omega \cdot U}{\ell} \quad (\text{eq. 2.3})$$

Onde,

ω é a frequência angular da tensão U .

Como ,

$$\Delta I_g = \frac{dI_s}{dx} \Delta x \quad (\text{eq. 2.4})$$



Combinando as duas últimas equações, fica:

$$\frac{dI_s}{dx} = \frac{C_g \cdot \omega \cdot U}{\ell} \quad (\text{eq. 2.5})$$

Mas a capacitância do trecho a ser analisado é:

$$\frac{\ell \cdot C_s}{\Delta x} \quad (\text{eq. 2.6})$$

E a tensão sobre este trecho é:

$$\frac{dU}{dx} \Delta x \quad (\text{eq. 2.7})$$

Fazendo a corrente na capacitância série igual a:

$$I_s = C_s \frac{dU}{dt} \quad (\text{eq. 2.8})$$

Sabe-se que:

$$I_s = \frac{E_{Cs}}{X_{Cs}}$$

Onde,

E_{Cs} é a tensão na capacitância C_s .

X_{Cs} é a reatância capacitiva da capacitância C_s .

Então, pode-se concluir pelas equações 2.6 e 2.7 que:

$$I_s = \frac{\frac{dU}{dx} \Delta x}{\frac{1}{\omega \frac{\ell \cdot C_s}{\Delta x}}} \Rightarrow I_s = \omega \frac{\ell \cdot C_s}{\Delta x} \frac{dU}{dx} \Delta x \Rightarrow I_s = \ell \cdot C_s \cdot \omega \frac{dU}{dx} \quad (\text{eq. 2.9})$$

Derivando a equação 2.9 tem-se:

$$\frac{dI_s}{dx} = \ell \cdot C_s \cdot \omega \frac{d^2 U}{dx^2} \quad (\text{eq. 2.10})$$

Substituindo a equação 2.5 na equação 2.10 fica:

$$\frac{C_g \cdot \omega \cdot U}{\ell} = \ell \cdot C_s \cdot \omega \frac{d^2 U}{dx^2}$$

Ou,

$$\frac{d^2 U}{dx^2} - \frac{1}{\ell^2} \frac{C_g}{C_s} U = 0 \quad (\text{eq. 2.11})$$

Fazendo $p = \frac{d^2}{dx^2}$, temos para esta equação diferencial a seguinte solução:

$$p^2 U - \frac{1}{\ell^2} \frac{C_g}{C_s} U = 0$$

$$\left[p^2 - \frac{1}{\ell^2} \frac{C_g}{C_s} \right] U = 0$$

A equação característica é:

$$p^2 - \frac{1}{\ell^2} \frac{C_g}{C_s} = 0$$

E as suas raízes características são:

$$p = \pm \frac{1}{\ell} \sqrt{\frac{C_g}{C_s}} \quad (\text{eq. 2.12})$$

Desta forma a solução para a equação 2.11 é:

$$U(x) = A_1 \cdot e^{px} + A_2 \cdot e^{-px} \quad (\text{eq. 2.13})$$

As constantes A_1 e A_2 dependem das condições iniciais do problema.

Fazendo a análise para o neutro do transformador de potência aterrado com as seguintes condições iniciais:

$$\begin{array}{lll} x = 0 & \text{e} & U = 0 \\ x = \ell & \text{e} & U = U_0 \end{array}$$

Onde,

U_0 é a amplitude máxima da Função surto.

Aplicando as condições iniciais na equação 2.13, aparece o seguinte sistemas de equações:

$$\begin{cases} 0 = A_1 + A_2 \\ U_0 = A_1 \cdot e^{p\ell} + A_2 \cdot e^{-p\ell} \end{cases}$$

Resolvendo o sistema, obtém-se:

$$A_1 = -A_2 = \frac{U_0}{e^{p\ell} - e^{-p\ell}} \quad (\text{eq. 2.14})$$

Da equação 2.12 podemos tirar uma das raízes características, assim:

$$p\ell = \alpha = \sqrt{\frac{Cg}{Cs}} \quad (\text{eq. 2.15})$$

Substituindo a equação 2.15 na equação 2.14, fica:

$$A_1 = \frac{U_0}{e^{\alpha} - e^{-\alpha}} \quad (\text{eq. 2.16})$$

Comparando a equação 2.16 com a definição da função seno hiperbólico:

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

Encontra-se:

$$2 \cdot \sinh(x) = e^x - e^{-x}$$

Ou, para melhor entendimento:

$$2 \cdot \sinh(\alpha) = e^{\alpha} - e^{-\alpha}$$

Resultando na nova equação 2.16:

$$A_1 = -A_2 = \frac{U_o}{2.\sinh(\alpha)} \quad (\text{eq. 2.17})$$

Substituindo a equação 2.17 na equação 2.13:

$$U = \frac{U_o}{2.\sinh(\alpha)} e^{px} - \frac{U_o}{2.\sinh(\alpha)} e^{-px}$$

Agrupando os valores, fica:

$$U = \frac{U_o}{2.\sinh(\alpha)} (e^{px} - e^{-px})$$

Usando a definição de função seno hiperbólico, tem-se:

$$U = \frac{U_o}{2.\sinh(\alpha)} 2.\sinh(px)$$

Ou,

$$U = U_o \frac{\sinh(px)}{\sinh(\alpha)}$$

Mas,

$$\alpha = p\ell \rightarrow p = \frac{\alpha}{\ell}$$

Logo,

$$U = U_o \frac{\sinh\left(\frac{\alpha \cdot x}{\ell}\right)}{\sinh(\alpha)} \quad (\text{eq. 2.18})$$

Fazendo a análise para o neutro do transformador de potência isolado, com as seguintes condições iniciais:

$$\begin{array}{ll} x = \ell & \text{e} \quad U = U_o \\ x = 0 & \text{e} \quad Is = 0 \text{ ou } \frac{dU}{dx} = 0 \end{array}$$

Escrevendo novamente a equação 2.9, tem-se:

$$Is = \ell \cdot Cs \cdot \omega \frac{dU}{dx}$$

Substituindo a equação 2.13 na equação 2.9:

$$\mathbf{Is} = \ell \cdot \text{Cs} \cdot \omega \frac{d}{dx} (A_1 \cdot e^{px} + A_2 \cdot e^{-px})$$

Derivando,

$$\mathbf{Is} = \ell \cdot \text{Cs} \cdot \omega \cdot (A_1 \cdot e^{px} - A_2 \cdot e^{-px}) \cdot p \quad (\text{eq. 2.19})$$

Aplicando as condições iniciais do problema $\mathbf{Is} = 0$ e $x = 0$, obtém-se:

$$0 = \ell \cdot \text{Cs} \cdot \omega \cdot (A_1 \cdot e^0 - A_2 \cdot e^0) \cdot p$$

$$0 = \ell \cdot \text{Cs} \cdot \omega \cdot (A_1 - A_2) \cdot p$$

Mas, $p=1$, logo,

$$0 = \ell \cdot \text{Cs} \cdot \omega \cdot (A_1 - A_2)$$

Então,

$$A_1 = A_2 \quad (\text{eq. 2.20})$$

Substituindo a equação 2.20 na equação 2.13, tem-se:

$$\mathbf{U} = A_1 \cdot e^{px} + A_1 \cdot e^{-px}$$

$$U = A_1 (e^{px} + e^{-px})$$

E utilizando a definição de função cosseno hiperbólico, fica:

$$U = A_1 2 \cosh(px) \quad (\text{eq. 2.21})$$

Aplicando, agora, as outras condições iniciais do problema, $U = U_0$ e $x = \ell$, na equação 2.21:

$$U_0 = A_1 2 \cosh(p\ell)$$

Isolando o termo A_1 :

$$A_1 = \frac{U_0}{2 \cosh(p\ell)}$$

Logo,

$$A_1 = A_2 = \frac{U_0}{2 \cosh(\alpha)} \quad (\text{eq. 2.22})$$

Levando os valores da equação 2.22 na equação 2.13:

$$U = \frac{U_0}{2 \cdot \cosh(\alpha)} e^{px} + \frac{U_0}{2 \cdot \cosh(\alpha)} e^{-px}$$

$$U = \frac{U_0}{2 \cdot \cosh(\alpha)} (e^{px} + e^{-px})$$

Utilizando a definição de função cosseno hiperbólico, consegue-se:

$$U = \frac{U_0}{2 \cdot \cosh(\alpha)} 2 \cdot \cosh(px)$$

Assim,

$$U = U_0 \frac{\cosh\left(\frac{\alpha \cdot x}{\ell}\right)}{\cosh(\alpha)} \quad (\text{eq. 2.23})$$

Na figura 2.5, está a distribuição inicial de tensão em um enrolamento de um transformador de potência, baseada nas equações 2.18 e 2.23, obtida a partir do final da linha. Como pode ser observado na figura a seguir, o fator α é de extrema importância na distribuição inicial de tensão. Sendo que, quanto menor for a relação entre a Capacitância para terra e a Capacitância série do enrolamento, mais uniforme será a distribuição inicial da tensão [1, 11].

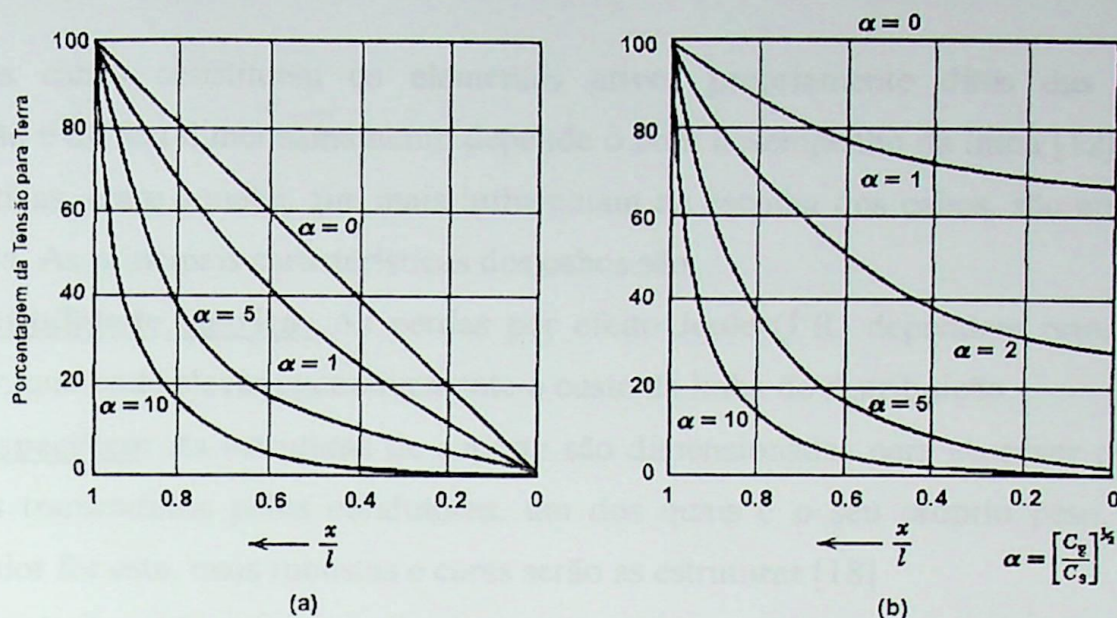


FIGURA 2.5 - Distribuição inicial da tensão em um enrolamento uniforme de um transformador de potência em resposta a um surto de tensão de função unitário. (a) Neutro aterrado. (b) Neutro isolado [11].

2.2 - LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.2.1 - INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão são os principais meios de transporte de energia elétrica em sistemas de potência e, portanto, é importante compreender a sua natureza [13]. Nas linhas de distribuição, temos as redes primárias e secundárias, onde, nestas últimas são encontradas as tensões de 220 V/ 127 V (entre fases/ entre fase e neutro) e o sistema 380 V/ 220 V, deriváveis de sistemas trifásicos com neutro, e o sistema 220 V/ 110 V, derivável de sistemas monofásicos. No sistema CEMIG, particularmente na cidade de Itajubá/ MG, são usados para a rede primária a tensão de 13,8 kV (entre fases) e a tensão de 220 V/ 127 V (entre fases/ entre fase e neutro) para a rede secundária.

2.2.2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CABOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os cabos constituem os elementos ativos propriamente ditos das linhas de transmissão e do seu dimensionamento depende o bom desempenho da linha [12]. Algumas características, entre aquelas que mais influenciam na escolha dos cabos, são apresentadas em seguida. As principais características dos cabos são:

- a) **Condutibilidade elétrica:** As perdas por efeito Joule (I^2R) dependem principalmente deste fator, que pode elevar excessivamente o custo da linha de distribuição.
- b) **Peso específico:** As estruturas de suporte são dimensionadas para absorver os esforços mecânicos transmitidos pelos condutores, um dos quais é o seu próprio peso. Portanto, quanto maior for este, mais robustas e caras serão as estruturas [18].
- c) **Resistência à oxidação e à corrosão por agentes químicos poluentes:** A fim de que não venham sofrer redução em sua seção com o decorrer do tempo, provocando redução na sua resistência mecânica, eventual ruptura e conseqüente aumento da resistência elétrica [18].

Em linhas de distribuição, são usados, geralmente, condutores CA (cabos de alumínio), que são mais leves que os de cobre. E no caso específico do sistema de potência a ser analisado, são usados condutores 1/0 AWG, para a rede de distribuição primária, e 1/0 AWG e 4 AWG, para a rede de distribuição secundária. A tabela a seguir, conforme as referências [12] e [15], fornece as características físicas destes cabos.

CÓDIGO	AWG	RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO (m)	DIAMETRO DO CONDUTOR (mm)	MASSA OU PESO DO CABO (kg/ km)	CARGA DE RUPTURA NOMINAL (kgf)
Poppy	1/0	0,003392	9,347	147,4	893,5
Lilly	4	0,002138	5,892	58,3	396,9

TABELA 2.1 - Características físicas dos cabos 1/0 AWG e 4 AWG, usados em linhas de distribuição.

2.2.3 - TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

Sejam dois condutores metálicos retilíneos e completamente isolados, suficientemente distantes do solo e de comprimento qualquer. Considere a linha de transmissão ideal, ou seja, a resistência elétrica dos condutores é considerada nula, como o dielétrico entre os condutores é considerado perfeito. Agora, imaginemos que nas duas extremidades da linha esteja ligado um transmissor e um receptor de energia. E ainda que esta linha tenha uma capacitância C e uma indutância L . Como na figura abaixo:

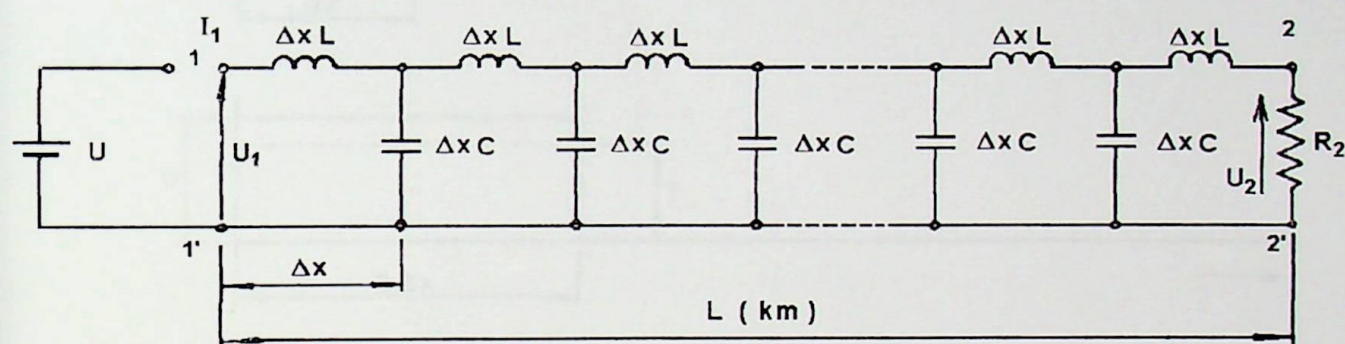


FIGURA 2.6 - Circuito de uma linha de transmissão a dois condutores [12].

Observe, na figura 2.6, que o circuito está sendo representado por parâmetros concentrados. E na figura 2.7, podemos observar o comportamento da linha quando um impulso de tensão U se propaga por esta, demorando um tempo Δt para atravessar a indutância Δx_L . E levará um outro intervalo de tempo Δt para que o capacitor do trecho Δx seguinte atinja o valor U e assim sucessivamente. Portanto, decorre um tempo finito entre o instante em que se aplica uma tensão ao transmissor de uma linha de transmissão e o instante em que esta tensão pode ser medida em seu receptor [12]. Podemos, então, definir uma velocidade de propagação para uma linha de comprimento ℓ :

$$v = \frac{\ell}{T}$$

Onde,

T é o tempo necessário para a onda atravessar toda a linha de transmissão.

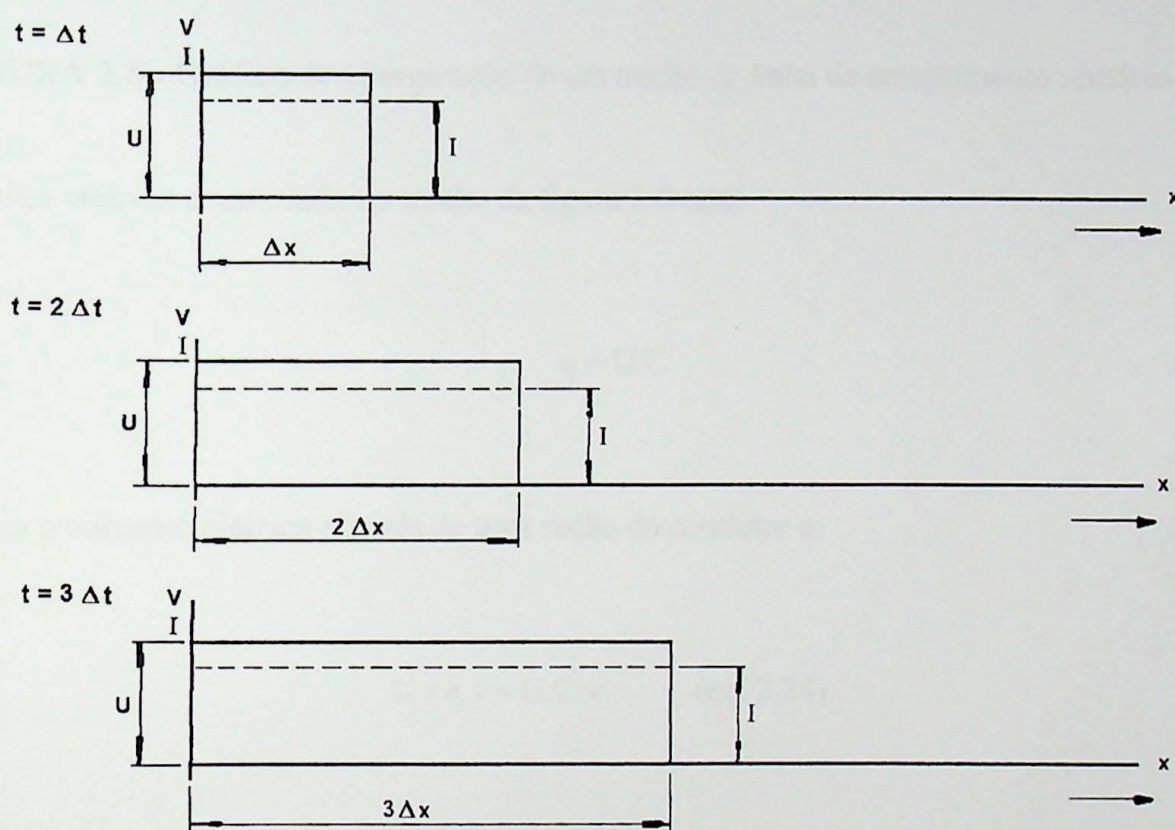


FIGURA 2.7 - Comportamento da linha de transmissão quando aplicado a mesma um impulso de tensão U [12].

Para facilitar os cálculos, seja escolhido um trecho de linha de comprimento unitário com o seguinte gráfico de energização colocado na figura 2.8.

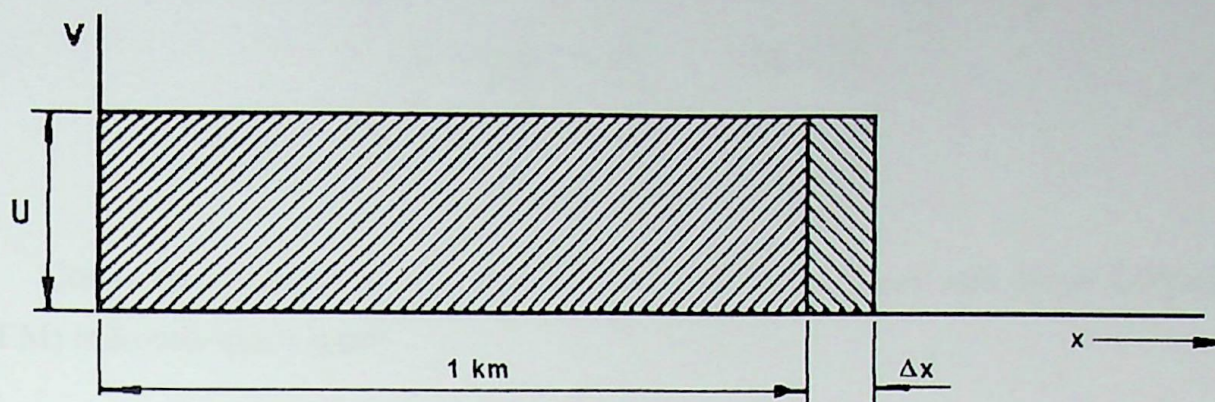


FIGURA 2.8 - Gráfico de energização de um trecho de linha de comprimento unitário [12].

A carga elétrica acumulada no trecho da figura 2.8 será:

$$q = U.C$$

Porém a corrente elétrica através de uma seção do condutor é:

$$I_o = q.v = U.C.v \quad (\text{eq. 2.24})$$

Pela equação 2.24, deduz-se que enquanto o valor da tensão da fonte se mantiver inalterado, a corrente é a mesma indefinidamente. Logo, a corrente que flui na linha independe do comprimento da linha. Então, podemos definir uma Impedância de Entrada da Linha ou Impedância de Surto:

$$Z_o = \frac{U}{I_o}$$

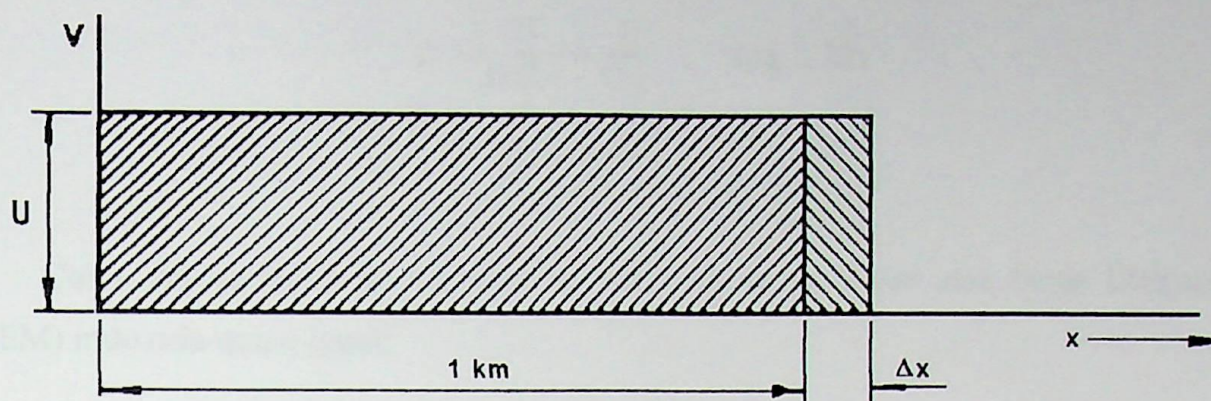


FIGURA 2.8 - Gráfico de energização de um trecho de linha de comprimento unitário [12].

A carga elétrica acumulada no trecho da figura 2.8 será:

$$q = U.C$$

Porém a corrente elétrica através de uma seção do condutor é:

$$I_0 = q.v = U.C.v \quad (\text{eq. 2.24})$$

Pela equação 2.24, deduz-se que enquanto o valor da tensão da fonte se mantiver inalterado, a corrente é a mesma indefinidamente. Logo, a corrente que flui na linha independe do comprimento da linha. Então, podemos definir uma Impedância de Entrada da Linha ou Impedância de Surto:

$$Z_0 = \frac{U}{I_0}$$

$$Z_o = \frac{U}{U.C.v} = \frac{1}{C.v} \quad (\text{eq. 2.25})$$

Como há variação de corrente no trecho de linha, existe uma Força Eletromotriz (FEM) induzida que é igual:

$$FEM = -\Delta x.L \frac{dI_o}{dt}$$

Onde $\frac{dI_o}{dt} = \frac{I_o - 0}{\Delta t}$ já que a corrente cresce de zero até I_o em Δt . Assim:

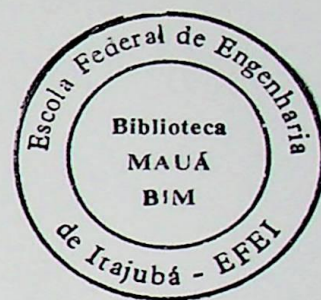
$$FEM = -\frac{I_o}{\Delta t} \cdot \Delta x.L$$

Mas lembrando que $\Delta t = \frac{\Delta x}{v}$, tem-se:

$$FEM = -\frac{I_o.v}{\Delta x} \cdot \Delta x.L = -I_o.L.v$$

Contudo, é necessário que a tensão da fonte neutralize a FEM induzida para que exista uma corrente I_o fluindo pelo circuito, então:

$$U = -FEM = I_o.L.v \quad (\text{eq. 2.26})$$



Assim, a equação 2.25 pode ser reescrita usando a definição da equação 2.26:

$$Z_o = \frac{U}{I_o}$$

$$Z_o = \frac{I_o \cdot L \cdot v}{I_o} = L \cdot v \quad (\text{eq. 2.27})$$

Agora igualando as equações 2.27 e 2.25, tem-se:

$$Z_o = Z_o \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{C \cdot v} = L \cdot v$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (\text{eq. 2.28})$$

Logo,

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{eq. 2.29})$$

Pela equação 2.28, vê-se que a velocidade de propagação da onda na linha pode ser menor que a velocidade da luz, que seria a velocidade ideal. Isto acontece porque nas linhas reais o fluxo interno dos condutores não é desprezível e também possuem perdas, representáveis por uma resistência em série com a indutância e em paralelo com a capacitância, também reduzindo a velocidade de propagação [12].

A grandeza Z_0 não depende do comprimento da linha. É uma grandeza constante para cada linha e, por isso mesmo, é considerada uma grandeza característica denominada Impedância Natural da Linha, ou Impedância de Surto da Linha.

Com estas considerações preliminares, podemos, agora, supor que partem do transmissor, simultaneamente, duas ondas, uma de tensão de amplitude U e uma de corrente de amplitude I_0 (A), que se deslocam com velocidade constante v em direção ao receptor, onde chegam com o nome de ondas diretas ou ondas incidentes. E dependendo da forma de terminação da linha, podem dar origem a ondas refletidas, que viajam de volta, do receptor para o transmissor, com a mesma velocidade das ondas incidentes. Tanto as ondas diretas como as refletidas são polarizadas, isto é, são atribuídas a elas um sinal [18]. Em qualquer instante e em cada ponto ao longo de uma linha vale as seguintes equações:

$$U = U_d \pm U_r$$

$$I = I_d \pm I_r$$

Como a Impedância de Surto é constante pode-se afirmar que:

$$Z_0 = \frac{U_d}{I_d} \quad (\text{eq. 2.30})$$

$$Z_0 = \frac{U_r}{I_r} \quad (\text{eq. 2.31})$$

Mas, a tensão inicial aplicada (U) é constante em qualquer ponto da linha, supondo o valor da fonte de tensão constante. Isto resulta em:

$$U = U_d + U_r \quad (\text{eq. 2.32})$$

E,

$$I = I_d + I_r \quad (\text{eq. 2.33})$$

E das equações 2.30 e 2.31 podemos tirar que:

$$U_d = Z_o \cdot I_d \quad (\text{eq. 2.34})$$

$$U_r = -Z_o \cdot I_r \quad (\text{eq. 2.35})$$

Onde o sinal negativo da equação 2.35 indica, como será analisado melhor adiante, que se a onda de tensão refletida (U_r) tem o sinal positivo a onda de corrente refletida (I_r) tem o sinal negativo e vice-versa. Porém, isto depende do valor da impedância de surto e do valor da impedância do receptor de energia.

Então, considerando o receptor de energia com uma impedância Z_2 e baseado nas equações 2.32 e 2.33 obtém-se a seguinte fórmula:

$$I \cdot Z_2 = U \quad (\text{eq. 2.36})$$

Pela equação 2.33, escreve-se que:

$$I = I_d + I_r$$

$$I = \frac{U_d}{Z_o} - \frac{U_r}{Z_o} \quad (\text{eq. 2.37})$$

E usando a equação 2.36, fica:

$$U = U_d + U_r = I \cdot Z_2 \quad (\text{eq. 2.38})$$

Substituindo a equação 2.37 na equação 2.38.

$$U = \frac{Z_2}{Z_o} \cdot U_d - \frac{Z_2}{Z_o} \cdot U_r \quad (\text{eq. 2.39})$$

Igualando as equações 2.38 e 2.39, tem-se:

$$U_d + U_r = \frac{Z_2}{Z_o} U_d - \frac{Z_2}{Z_o} U_r \quad (\text{eq. 2.40})$$

Então, isolando o termo U_r da equação 2.40 [20], tem-se:

$$U_r = \frac{Z_2 - Z_o}{Z_2 + Z_o} \cdot U_d$$

Da mesma maneira, teremos:

$$I_r = \frac{Z_o - Z_2}{Z_o + Z_2} \cdot I_d$$

Logo,

$$U = U_d + U_r = 2 \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_o} \cdot U_d$$

$$I = I_d + I_r = 2 \cdot \frac{Z_o}{Z_o + Z_2} \cdot I_d$$

As fórmulas anteriores podem ser interpretadas, considerando-se várias situações específicas, como as que vêm a seguir:

1) Linha com $Z_2 > Z_o$

A onda de tensão refletida possui o mesmo sinal que a onda de tensão incidente. A tensão resultante será, então, maior do que a da onda incidente, e a onda da corrente refletida possui sinal contrário ao da onda incidente, resultando em corrente menor do que a incidente [12].

2) Linha com $Z_2 = Z_o$

Tanto a onda refletida da tensão como a da corrente são nulas não havendo, portanto, alterações em seus valores [12].

3) Linha com $Z_2 < Z_o$

A onda da tensão se reflete com sinal oposto ao da incidente, resultando em diminuição da tensão e a onda da corrente se reflete com o mesmo sinal, o que leva ao seu aumento [12].

Em todos os casos as ondas refletidas de tensão e corrente possuem sempre sinais contrários. Todos estes casos estão na figura a seguir:

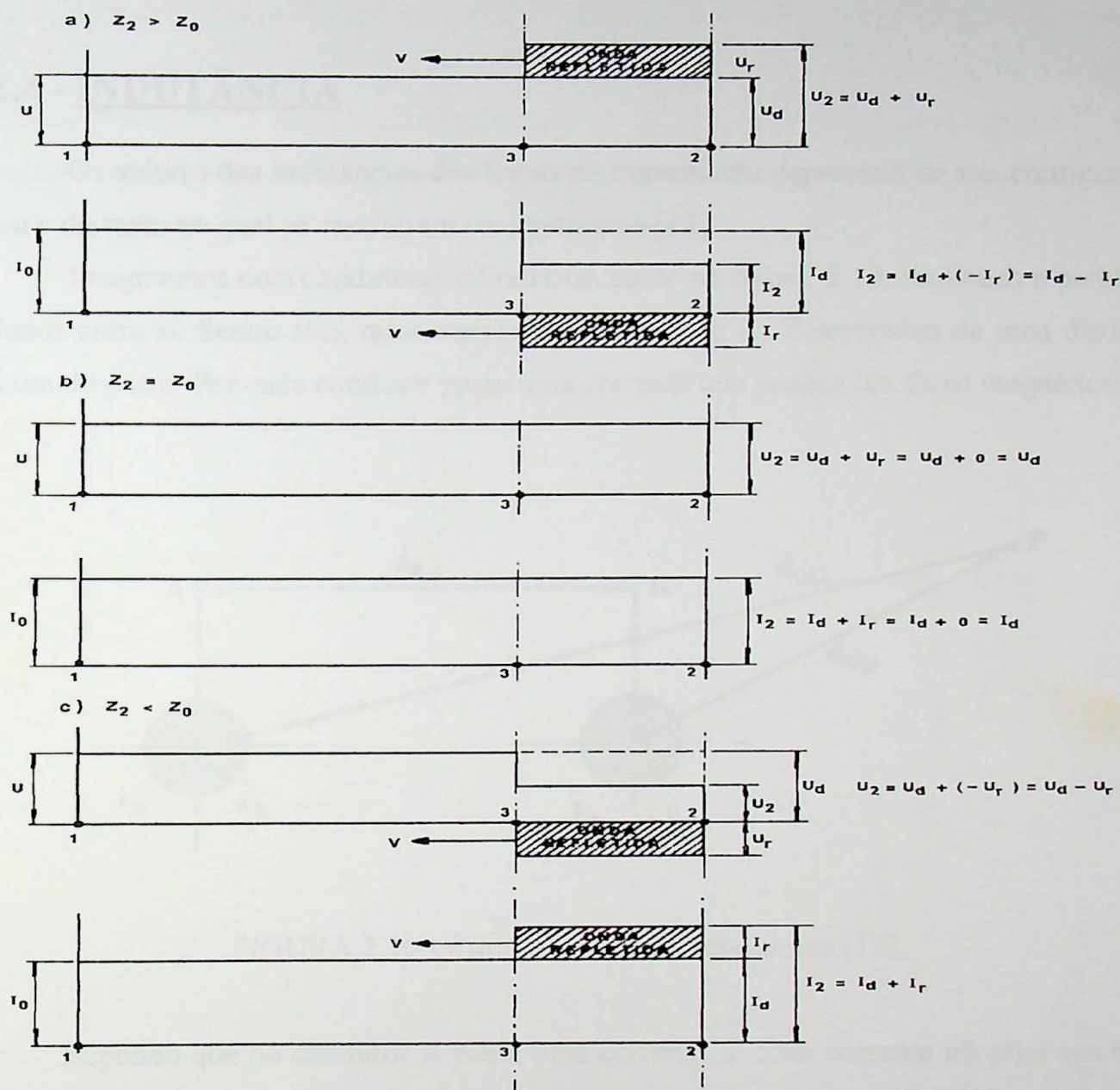


FIGURA 2.9 - Gráficos de ondas de tensão e corrente incidentes e refletidas [12].

O estudo anterior pode ser aplicado no estudo dos surtos de sobretensão em sistemas elétricos [12]. Nele, aplicamos uma fonte de tensão constante, mas, se, ao invés desta, tivéssemos aplicado uma fonte de tensão qualquer, o resultado não seria diferente.

Nas linhas reais, a energia dissipada na resistência dos condutores tem o caráter de um amortecimento, reduzindo os módulos de tensões e correntes e acelerando sua entrada

em regime permanente [12]. Nesse caso, tensão e corrente decrescem exponencialmente à medida que viajam ao longo da linha.

2.2.4 - INDUTÂNCIA

Os valores das indutâncias das linhas de transmissão dependem de sua configuração física e do meio no qual se encontram os condutores [12].

Imaginemos dois condutores cilíndricos, como na figura 2.10, retilíneos e paralelos, isolados entre si. Sendo seus raios, respectivamente, r_a e r_b . E separados de uma distância d_{AB} um do outro. Por cada condutor passa uma corrente que produz um fluxo magnético.

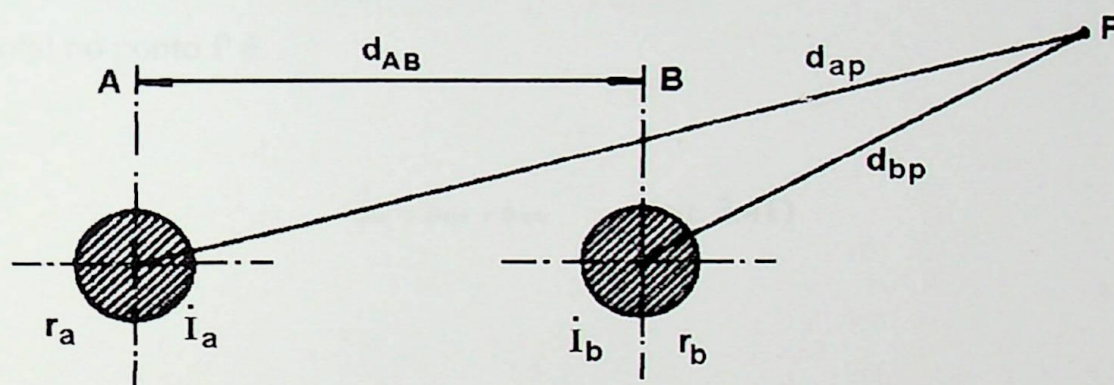


FIGURA 2.10 - Circuito com dois condutores [12].

Supondo que no condutor A passe uma corrente I_a . Esta corrente irá criar um fluxo magnético dentro e fora do condutor A, ou melhor internamente e externamente ao condutor A. O fluxo interno envolve todo o condutor e o fluxo externo se estende da superfície do condutor até ao infinito. Mas, imaginemos um ponto no espaço arbitrário P, situado a uma distância d_{ap} da superfície do condutor A. Então, a fórmula de cálculo do fluxo magnético no ponto P produzido pela corrente que flui pelo condutor A é:

$$\phi_{apa} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot I_a \cdot \ln \frac{d_{ap}}{r_a'}$$

Mas o condutor B, que é o retorno da corrente que flui pelo condutor A, terá uma corrente $-I_a$ fluindo por ele. Que produzirá, semelhante ao condutor A, um fluxo que enlaçará internamente e externamente o condutor B, que se estende igualmente a P, e que enlaçará, também, o condutor A. O valor do fluxo produzido pela corrente no condutor B no ponto P é dado por :

$$\phi_{apb} = 2.10^{-4} \cdot I_b \cdot \ln \frac{d_{bp}}{d_{AB}}$$

O fluxo total no ponto P é:

$$\phi_{ap} = \phi_{apa} + \phi_{apb} \quad (\text{eq. 2.41})$$

Então,

$$\phi_{ap} = 2.10^{-4} \cdot \left(I_a \ln \frac{d_{ap}}{r_{a'}} + I_b \ln \frac{d_{bp}}{d_{AB}} \right)$$

Desdobrando o logarítmico, tem-se:

$$\phi_{ap} = 2.10^{-4} \cdot \left(I_a \ln \frac{1}{r_{a'}} + I_b \ln \frac{1}{d_{AB}} + I_a \ln d_{ap} + I_b \ln d_{bp} \right)$$

Como $I_b = -I_a$, tem-se:

$$\phi_{ap} = 2.10^{-4} \left(I_a \ln \frac{1}{r_{a'}} + I_b \ln \frac{1}{d_{AB}} + I_a \frac{d_{ap}}{d_{bp}} \right)$$

Se o ponto P tender ao infinito, a relação $\frac{d_{ap}}{d_{bp}}$ tende para unidade, desta maneira:

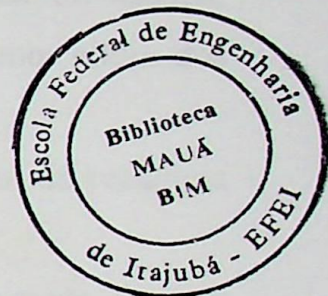
$$\phi_a = 2.10^{-4} \cdot \left(I_a \ln \frac{1}{r_{a'}} + I_b \ln \frac{1}{d_{AB}} \right)$$

Fazendo os mesmos cálculos para o condutor B teremos:

$$\phi_b = 2.10^{-4} \cdot \left(I_b \ln \frac{1}{r_{b'}} + I_a \ln \frac{1}{d_{AB}} \right)$$

E, como $L = \frac{\phi}{I}$, fica:

$$[L] = 2.10^{-4} \cdot \begin{bmatrix} \ln \frac{1}{r_{a'}} & \ln \frac{1}{d_{AB}} \\ \ln \frac{1}{d_{AB}} & \ln \frac{1}{r_{b'}} \end{bmatrix}$$



Para linhas trifásicas devemos adotar as seguintes condições que não afetarão o resultado final:

1) As linhas trifásicas de distribuição primária e secundária são consideradas equilibradas.

2) Não será levado em consideração o efeito do condutor imagem no solo, já que, em cálculos feitos na referência [12] provou-se que o erro relativo causado pela não consideração do efeito do solo é pequena, podendo ser desprezada.

3) Os raios médios geométricos dos condutores das linhas trifásicas são iguais.

4) Os condutores das linhas aéreas, ao serem suspensas, tomam a forma aproximada de catenárias, de forma que sua altura sobre o solo é também variável [20]. Como as distâncias em linhas de distribuição urbana de um poste ao outro são pequenas, este efeito será também desprezado [4].

5) A altura em relação ao solo dos três condutores das linhas trifásicas é considerada igual. Nas redes secundárias isto não é possível, devido a própria configuração do sistema, mas como a diferença de altura entre os condutores é bem menor que a menor altura dos condutores, consideraremos como igual a altura dos condutores secundários.

6) A presença de cabos pára-raios não exerce influência sobre o valor da reatância de sequência positiva das linhas de transmissão trifásicas transpostas [12].

7) Quando duas ou mais linhas de tensões diferentes ocupam a mesma faixa, ou uma mesma estrutura (paralelismo físico), mesmo que alimentadas através de um mesmo barramento primário, a intervenção dos transformadores em uma ou em ambas pode introduzir defasamentos ainda maiores. Nessas condições, o valor da indutância mútua é, em geral, muito menor e pode ser inclusive desprezado nos cálculos.

Então, pela referência [12], a fórmula para o cálculo da indutância equivalente da linha trifásica é:

$$L = 2.10^{-4} \ln \frac{D_m}{D_s} \quad (\text{eq. 2.41})$$

Onde,

L é dado em H/ km.

D_m é a distância média geométrica entre os condutores, em metros.

D_s é o raio médio geométrico do condutor a ser utilizado na linha, em metros.

Para o circuito primário:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ac}} \quad (\text{eq. 2.42})$$

Onde,

D_{ab} é a distância entre as fases A e B do circuito primário, em metros.

D_{bc} é a distância entre as fases B e C do circuito primário, em metros.

D_{ac} é a distância entre as fases A e C do circuito primário, em metros.

Para o circuito secundário:

$$D_m = \sqrt[6]{d_{ab} \cdot d_{bc} \cdot d_{ac} \cdot d_{an} \cdot d_{bn} \cdot d_{cn}} \quad (\text{eq. 2.43})$$

Onde,

d_{ab} é a distância entre as fases A e B do circuito secundário, em metros.

d_{bc} é a distância entre as fases B e C do circuito secundário, em metros.

d_{ac} é a distância entre as fases A e C do circuito secundário, em metros.

d_{an} é a distância entre a fase A e o Neutro do circuito secundário, em metros.

d_{bn} é a distância entre a fase B e o Neutro do circuito secundário, em metros.

d_{cn} é a distância entre a fase C e o Neutro do circuito secundário, em metros.

2.2.5 - CAPACITÂNCIA

Os condutores das linhas de transmissão de energia elétrica energizadas apresentam diferenças de potencial entre si e também com relação ao solo. Logo, uma linha de transmissão tem uma capacitância. Em linhas curtas, esta capacitância tem valores quase insignificantes [12].

Suponha dois condutores cilíndricos, figura 2.11, retos e paralelos, de comprimento infinito e raios r_a e r_b . A distância entre os dois condutores é de D (m). Consideremos inicialmente que apenas o condutor A possua uma carga q , enquanto que o condutor B está sem carga. O campo elétrico criado pelo condutor A é homogêneo, exceto nas proximidades do condutor B, onde será deformado pela presença deste, cuja superfície é uma superfície do campo do condutor A, de mesmo valor que a equipotencial que passa pelo centro de B, desde que r_b seja suficientemente pequeno em comparação com a distância D [12].

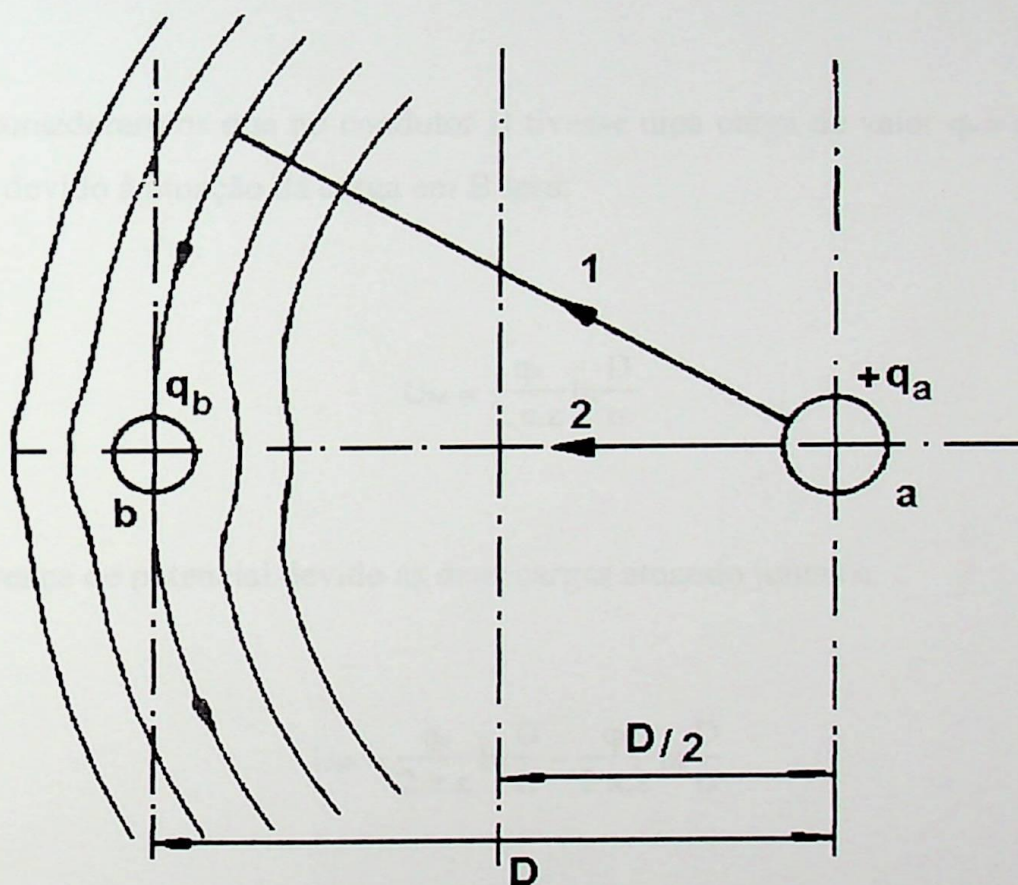


FIGURA 2.11 - Dois condutores a uma distância D [12].

A diferença de potencial entre as superfícies dos condutores A e B será numericamente igual ao trabalho despendido para deslocar uma carga $+q_a$ desde a superfície do condutor A até a superfície do condutor B, independentemente do caminho percorrido. Assim:

$$U_{ab} = \frac{q_a}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \int_{r_a}^D \frac{1}{x} dx$$

Então,

$$U_{ab} = \frac{q_a}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{D}{r_a}$$

Se considerarmos que no condutor B tivesse uma carga de valor $q_b = q_a$ a diferença de potencial devido à atuação da carga em B será:

$$U_{ba} = \frac{q_b}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{D}{r_b}$$

Logo, a diferença de potencial devido as duas cargas atuando juntas é:

$$U_{ab} = \frac{q_a}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{D}{r_a} - \frac{q_b}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{D}{r_b}$$

Para o caso em que $q_a = q$ e $q_b = -q$ e os dois condutores serem idênticos, $r_a = r_b = r$, teremos:

$$U_{ab} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \left(\ln \frac{D}{r} + \ln \frac{D}{r} \right)$$

ficando,

$$U_{ab} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{D^2}{r^2}$$

$$U_{ab} = \frac{q}{\pi \cdot \epsilon} \ln \frac{D}{r}$$

Como por definição a capacitância é:

$$C_{ab} = \frac{q}{U_{ab}}$$

Fica,

$$C_{ab} = \frac{q}{\frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{D}{r}}$$

$$C_{ab} = \frac{\pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{D}{r}}$$

É facilmente demonstrável, e a maioria dos textos de física o faz, que no caso de dois condutores paralelos, com cargas $+q$ e $-q$, possuindo os mesmos raios $r_a = r_b = r$, existirá entre os mesmos, à distância $D/2$ (m) de seus eixos, um plano XY sobre o qual todos os pontos possuem potencial nulo. Esse plano pode ser, portanto, assimilado a um condutor neutro [12]. Geralmente o solo é escolhido como potencial nulo.

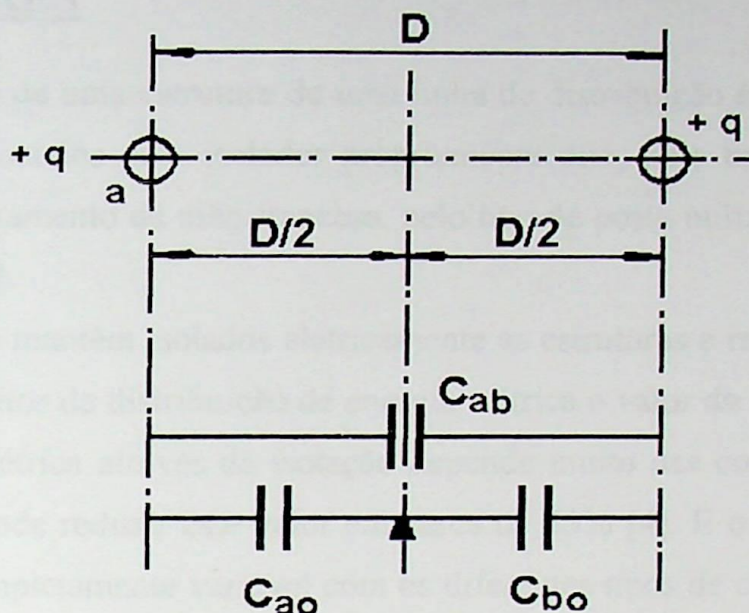


FIGURA 2.12 - Plano XY nulo entre os condutores A e B [12].

Para linhas trifásicas, as mesmas condições usadas para a indutância serão consideradas e serão acrescentadas as seguintes condições abaixo:

- 1) A distância entre condutores e entre eles e o solo é, em geral, muito grande quando comparada com o diâmetro dos condutores.
- 2) A superfície terrestre é um plano equipotencial de potencial nulo.

Então a capacitância equivalente para o circuito trifásico é:

$$C = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \ln \frac{D_m}{D_s}} \quad (\text{eq. 2.44})$$

Onde,

C é dado em F/km.

D_m é dado pelas equações 2.42 e 2.43, em metros.

D_s é o raio médio geométrico do condutor a ser utilizado na linha, em metros.

2.3 - ISOLADORES

O isolamento de uma estrutura de uma linha de distribuição é uma composição dos isolamentos proporcionados pelo isolador propriamente dito, pelo tipo e comprimento da cruzeta, pelo posicionamento da mão francesa, pelo tipo de poste utilizado e pelo projeto da estrutura completa [4].

Os isoladores mantêm isolados eletricamente as estruturas e resistem às solicitações mecânicas. Nos circuitos de distribuição de energia elétrica o valor da tensão suficiente para ocorrer a descarga elétrica através da isolação depende muito das condições atmosféricas. Sendo que a chuva pode reduzir este valor em cerca de 35% [4]. E o exato caminho que o arco faz pelo ar é completamente variável com os diferentes tipos de construção de postes e de cruzetas [7]. As principais solicitações de natureza elétrica que um isolador deve suportar são:

- 1) Tensão normal e sobretensões em frequência industrial;
- 2) Surtos de sobretensão de manobra que são de curta duração, podendo, no entanto, atingir níveis de 3 a 5 vezes a tensão normal entre fase e terra;
- 3) Sobretensões de origem atmosférica, cuja intensidade pode ser muito elevada e variada.

Nas linhas de distribuição são usados normalmente isoladores de pino que são fixados à estrutura através de um pino de aço. Para tanto, em sua parte interna possuem um furo rosqueado, com rosca filete redondo. Os pinos de aço forjado possuem, em sua parte superior, uma cabeça de chumbo filetada, sobre a qual se acopla o isolador. Os isoladores de pino apresentam uma tensão crítica de descarga sob impulso (a seco) da ordem de 100 kV [4]. São normalmente solicitados à compressão e à flexão [12].

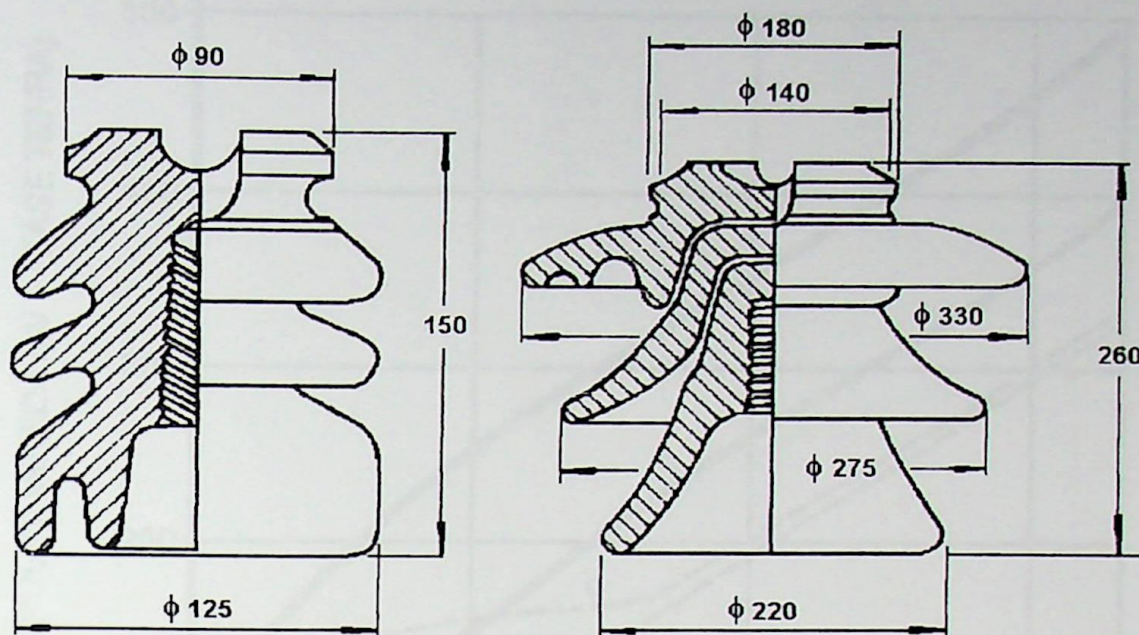


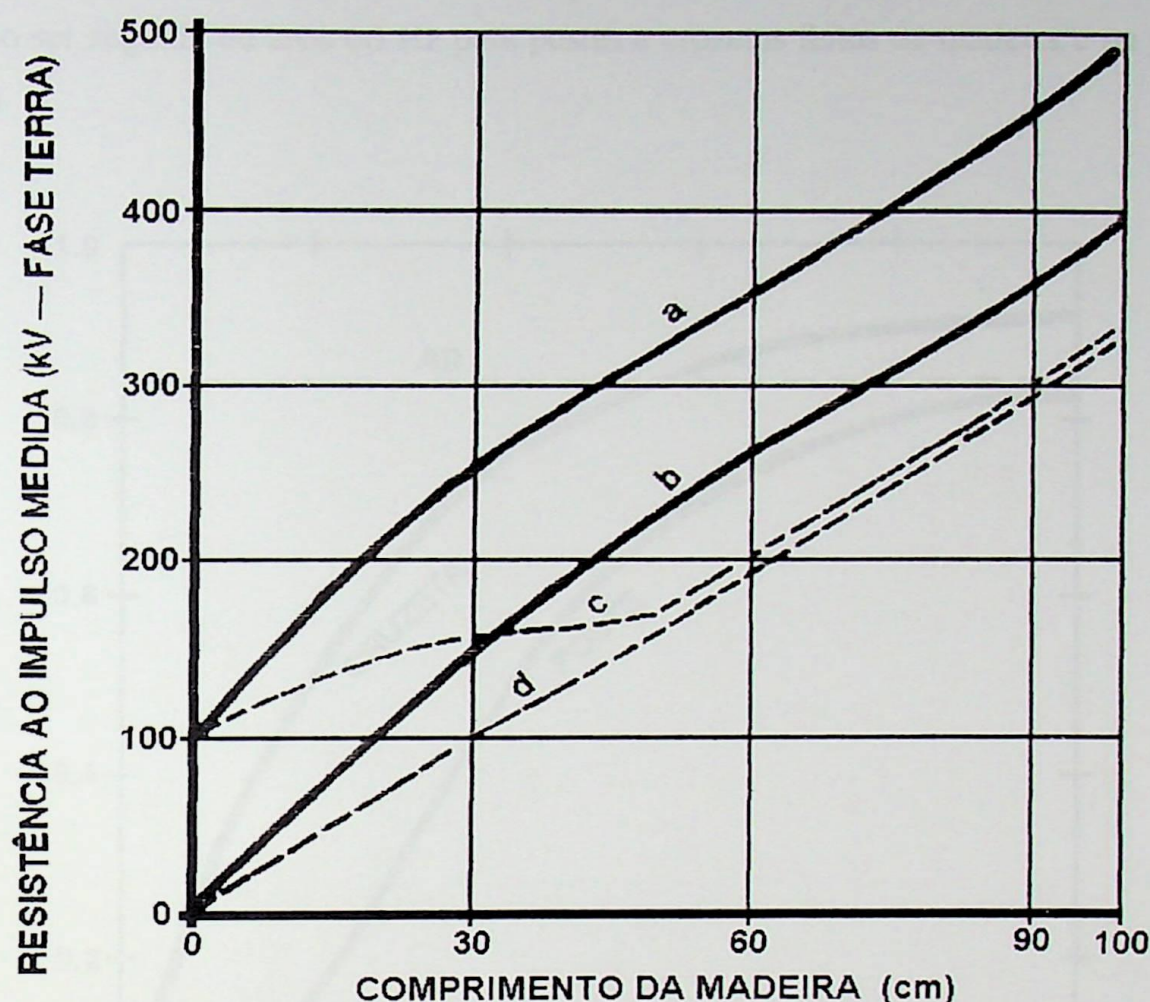
FIGURA 2.13 - Isolador de porcelana, tipo pino [12].

Além das características mecânicas das cruzetas e do poste de madeira, já bem conhecidas e utilizadas pelos engenheiros na distribuição, a madeira possui também excelentes qualidades elétricas, que quando adequadamente aproveitadas, resultam em sensível melhoria na continuidade do fornecimento e na diminuição do custo de manutenção das redes e linhas de distribuição [4].

A resistência ao impulso da madeira depende diretamente do comprimento e da umidade, sendo pouco influenciada pela seção, pelo tratamento e pelo tipo de madeira [4].

Com a madeira úmida, as células de madeira ficam cheias de água e a resistência elétrica da madeira varia bastante conforme a quantidade de água existente. Portanto, quando um impulso de tensão é aplicado na madeira, esta pode se comportar mais como um resistor do que como um isolador. À medida que se torna seca, a madeira se comporta quase como um gap de ar. Na realidade a madeira se comporta no meio termo entre um resistor e um isolador [7].

Na figura a seguir é apresentada um gráfico que relaciona a resistência ao impulso da madeira com seu comprimento:



- a. Isolador de porcelana classe 15 kV + madeira seca
- b. Madeira seca
- c. Isolador de porcelana classe 15 kV + madeira úmida
- d. Madeira úmida

FIGURA 2.14 - Resistência elétrica da madeira ao impulso de tensão [4].

Outra propriedade importante e pouco conhecida da madeira é a capacidade de extinguir a corrente do surto, evitando que muitas das disrupções que ocorrem nas redes e linhas sejam seguidas pela corrente subsequente de 60 Hz, que provoca danos e interrupções no sistema de distribuição. Esta propriedade da madeira é muito afetada pela umidade.

No entanto, para se conseguir utilizar com sucesso esta propriedade, há necessidade de efetuar um projeto adequado da estrutura, pois a probabilidade da disrupção ser seguida de arco de 60 Hz está relacionada com o gradiente de tensão eficaz por metro de madeira que a estrutura está operando. A seguir é apresentado um gráfico da probabilidade de a

disrupção ser seguida de arco 60 Hz para postes e cruzetas feitos de madeira e na condição molhada.

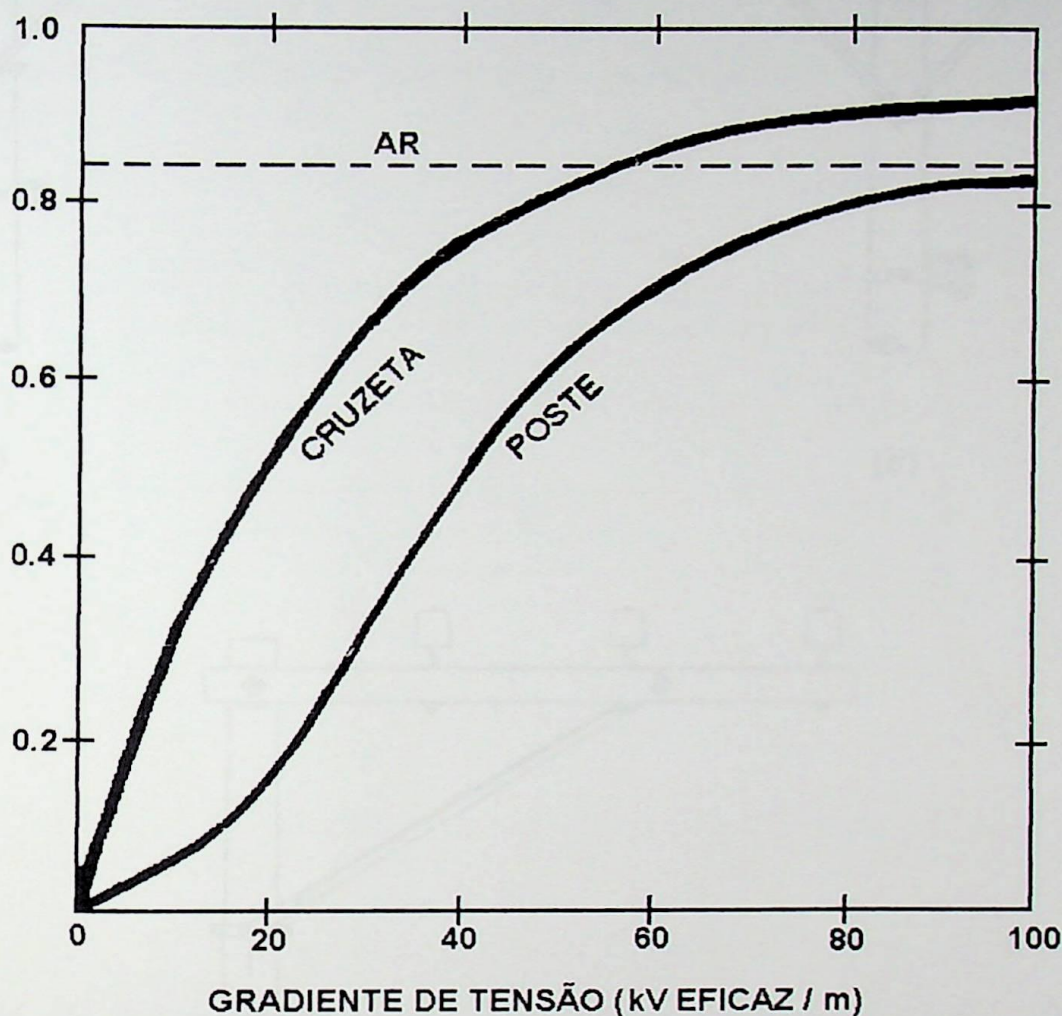


FIGURA 2.15 - Gráfico da probabilidade da disrupção ser seguida de arco 60 Hz [4].

As curvas da figura 2.5 são válidas para um único caminho de disrupção. E no caso do ar, a probabilidade é independente do gradiente. E as probabilidades são bem menores se forem usadas madeiras secas.

Com relação à mão francesa, analisando as cruzetas mais usadas, verificou-se que as N (normal) e a B (beco) são poucas usadas no circuito a ser analisado, ao contrário da cruzeta tipo M (meio beco) que é a mais utilizada no circuito. Para facilitar o cálculo todas as cruzetas serão consideradas tipo M. As cruzetas são mostradas na figura 2.16.

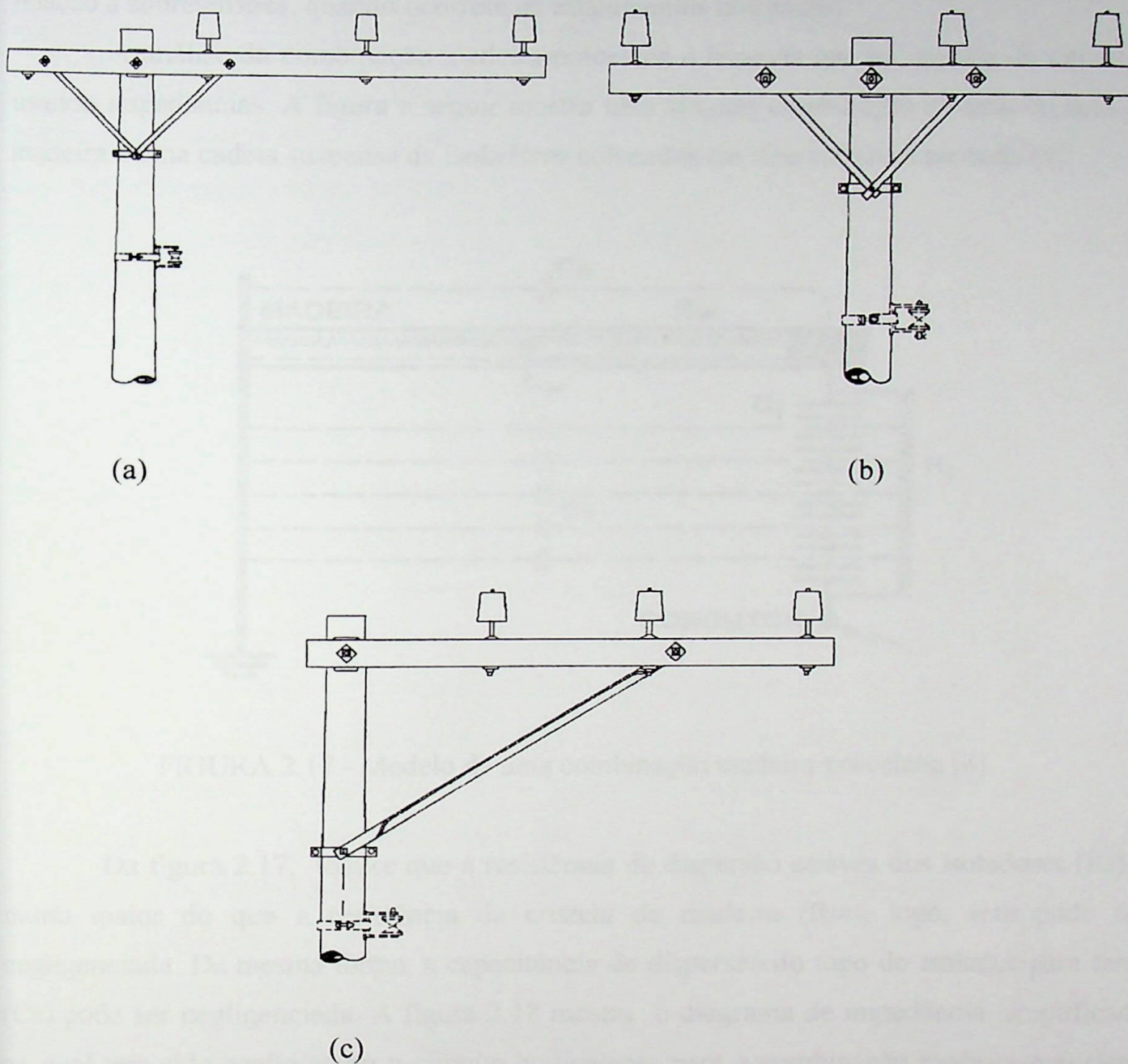


FIGURA 2.16 - Tipos de cruzetas usadas em circuito de distribuição de energia elétrica. (a) Cruzeta Tipo M. (b) Cruzeta Tipo N. (c) Cruzeta Tipo B [29].

Geralmente, a mão francesa e o poste de concreto praticamente nada contribuem para o aumento do NBI da estrutura e para a diminuição do gradiente de tensão, logo, a resistência às sobretensões praticamente se resumirá nas propriedades do isolador utilizado.

No caso dos postes de madeira, estas estruturas também apresentam problemas com relação a sobretensões, quando ocorrem os estaiamentos dos postes.

A análise da combinação madeira-porcelana é baseada em um modelo de circuitos usando impedâncias. A figura a seguir mostra uma simples combinação de uma cruzeta de madeira e uma cadeia suspensa de isoladores colocados em uma estrutura aterrada [8]:

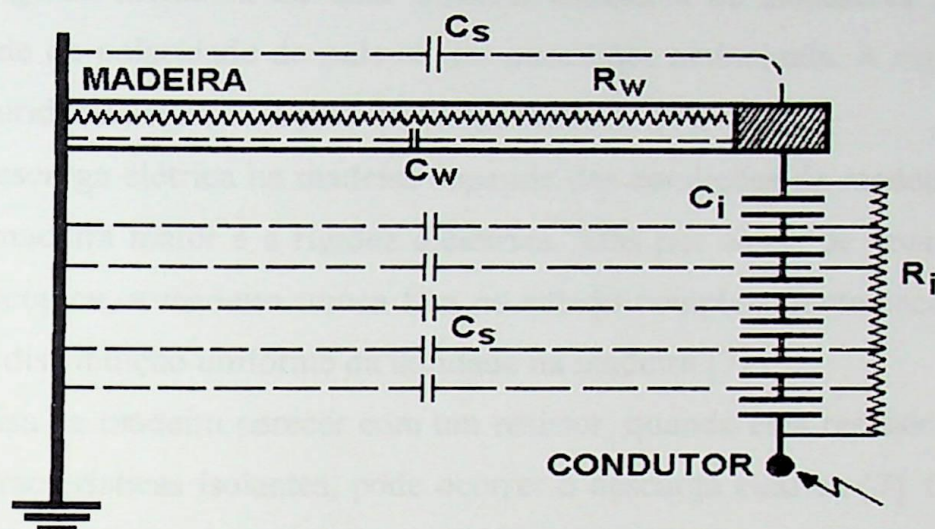


FIGURA 2.17 - Modelo de uma combinação madeira-porcelana [8].

Da figura 2.17, tem-se que a resistência de dispersão através dos isoladores (R_i) é muito maior do que a resistência da cruzeta de madeira (R_w), logo, esta pode ser negligenciada. Da mesma forma, a capacitância de dispersão do topo do isolador para terra (C_s) pode ser negligenciada. A figura 2.18 mostra o diagrama de impedância simplificado no qual tem sido aceito como o circuito equivalente para a combinação madeira-porcelana [8]:

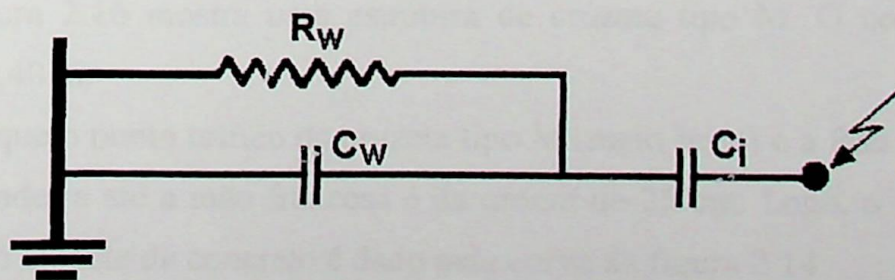


FIGURA 2.18 - Modelo simplificado da combinação madeira-porcelana [8].

Algumas considerações devem ser levadas em conta no estudo de isolamento usando madeira:

1) A variação dos valores da capacitância e resistência da madeira é provavelmente devido às diferenças entre as espécies de madeira e às diferentes distribuições internas de umidade entre espécies similares [8];

2) A rigidez dielétrica de uma isolamento composta de isoladores mais cruzeta de madeira depende da polaridade do pulso e das condições ambientais. A rigidez dielétrica é menor para polaridade negativa e para ambientes úmidos [9];

3) A descarga elétrica na madeira depende das condições da madeira. Quanto mais seca estiver a madeira maior é a rigidez dielétrica. Mas por causa de seus poros e de sua natureza higroscópica, a madeira nunca fica no estado completamente seco, logo, é muito raro haver uma distribuição uniforme da umidade na madeira [7].

Por causa da madeira parecer com um resistor, quando esta resistência for elevada, sistema com características isolantes, pode ocorrer a descarga elétrica [7]. Com o aumento da quantidade de umidade na madeira, ocorre a diminuição de sua resistência, deste modo, pode ser que em algumas partes a descarga passe através da madeira e em outras partes sobre a sua superfície. Quando de valores baixos da resistência elétrica da madeira, pode ocorrer que a descarga passe toda através dela. Neste último caso a madeira quase não pode ser considerada como tendo um valor de tensão de ruptura. Ela meramente se comporta como um resistor [7].

Limitados ensaios com isoladores sozinhos indicam que a chuva padrão (água com resistência de 114,7 Ohms por centímetro cúbico a uma taxa de 3,3 centímetros cúbicos por minuto) reduz a rigidez dielétrica dos isoladores [16].

Podemos, finalmente, analisar a estrutura M (meio beco) usada no circuito a ser simulado. A figura 2.16 mostra uma estrutura de cruzeta tipo M. O comprimento desta cruzeta será de 2,40 m.

Note-se que o ponto crítico da cruzeta tipo M (meio beco) é a fase mais a esquerda; a distância de madeira até a mão francesa é da ordem de 25 cm. Logo, o NBI estimado da estrutura supondo o poste de concreto é dado pela curva da figura 2.14:

Valor estimado sob chuva da tensão crítica da combinação madeira-porcelana:

143 kV

A probabilidade sob chuva de a descarga ser seguida de arco 60 Hz pode ser estimada pelo seguintes cálculos:

Cálculo do gradiente de tensão de operação:

Distância do isolador sob chuva ----- 4 cm

Comprimento de madeira ----- 25 cm

Total ----- 29 cm

$$\text{GRADIENTE} = \frac{13,8 \text{ kV}}{0,290 \cdot \sqrt{3}}$$

$$\text{GRADIENTE} = 27,47 \text{ kV / metro}$$

Cálculo de probabilidade:

Da curva apresentada na figura 2.15, tem-se que para o gradiente de valor 27,47 kV/metro a probabilidade é 60%.

Os cálculos efetuados indicam que as sobretensões fase-terra que ultrapassarem 143 kV provocarão descargas na cruzeta tipo M (meio beco), e ainda 60% desta descargas, provavelmente, tornar-se-ão curto fase-terra de 60 Hz [4].

2.4 - PÁRA-RAIOS

Muitos equipamentos elétricos estão sujeitos às sobretensões resultantes de descargas atmosféricas, surtos de chaveamentos ou outros distúrbios do sistema. A fim de evitar que os equipamentos sejam danificados, são aplicados dispositivos para protegê-los. Eles servem como desvios automáticos para os surtos descarregando as sobretensões nas linhas que as poderiam tirar de operação ou destruir os equipamentos [1, 17].

Os pára-raios, como o da figura 2.19, são uns destes dispositivos de proteção que limitam as sobretensões transitórias elevadas. São capazes de repetir esta operação várias vezes [3, 17]. E provêem um caminho pelo qual a descarga atmosférica flui para terra sem permitir que descargas ocorram nos equipamentos da linha e fluxo de corrente pelo sistema. Os pára-raios são geralmente conectados em paralelo com o equipamento a ser protegido [2].

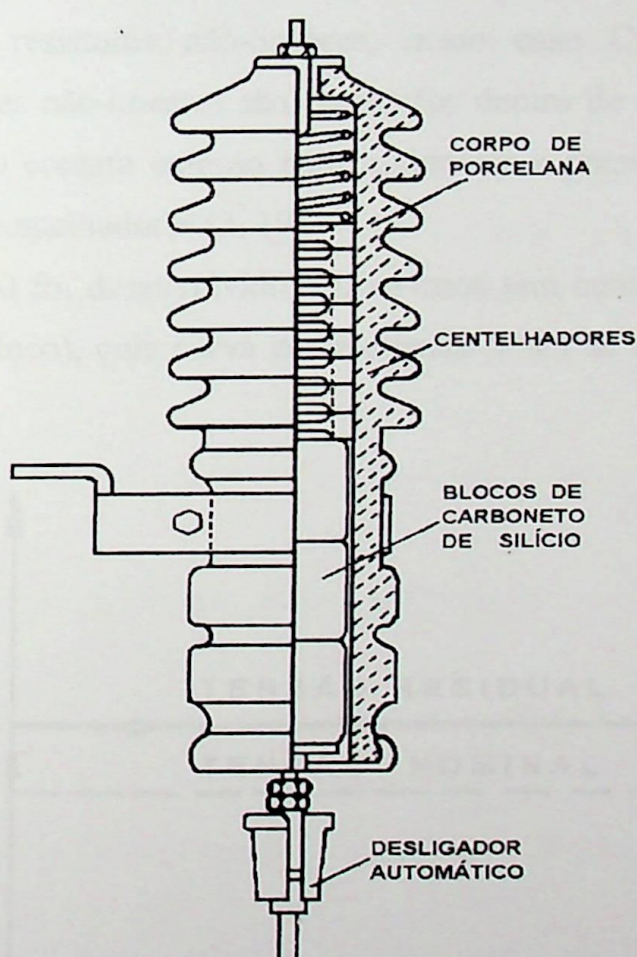


FIGURA 2.19 - Pára-raios de distribuição [3].

No início, os pára-raios eram constituídos de centelhadores que consistem basicamente de dois eletrodos, conectados entre uma fase e o terra do sistema. A distância entre os eletrodos é ajustada, a fim de provocar uma descarga para terra na presença de sobretensões, limitando, assim, o surto de tensão ao nível desejado ou estabelecido pelo isolamento dos equipamentos por ele protegido. Tais centelhadores têm a virtude de serem muito baratos, mas suas desvantagens são inúmeras [11].

A principal desvantagem apresentada pela utilização do centelhador é que após sua disrupção, é estabelecida uma corrente subsequente de frequência industrial, um curto fase-terra, que para ser interrompido implica na desenergização do circuito, interrompendo a continuidade de serviço [4]. Foram introduzidos, então, os resistores não-lineares à base de Carboneto de Silício, em série com o centelhador, que limitam a corrente subsequente.

Atualmente, os pára-raios modernos são constituídos de vários centelhadores, em série com blocos de resistores não-lineares, nesse caso Carboneto de Silício. Os centelhadores e resistores não-lineares são embutidos dentro de uma coluna de porcelana. Esta coluna é selada do contato externo para minimizar a presença de vapor d'água e a corrosão resultante nos centelhadores [3, 19].

Na década de 70 foi desenvolvido o pára-raios sem centelhador, que é construído com ZnO (Óxido de Zinco), cuja curva característica $V \times I$ se aproxima daquela de um pára-raios ideal:

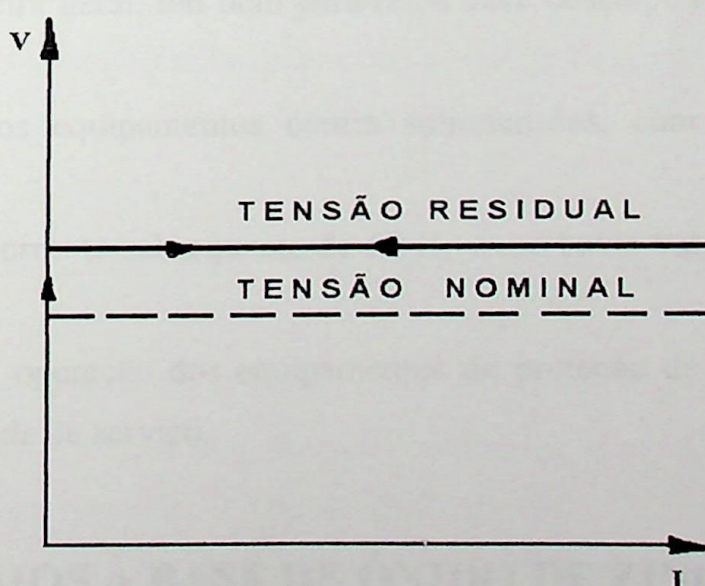


FIGURA 2.20 - Característica $V \times I$ de um pára-raios ideal [1].

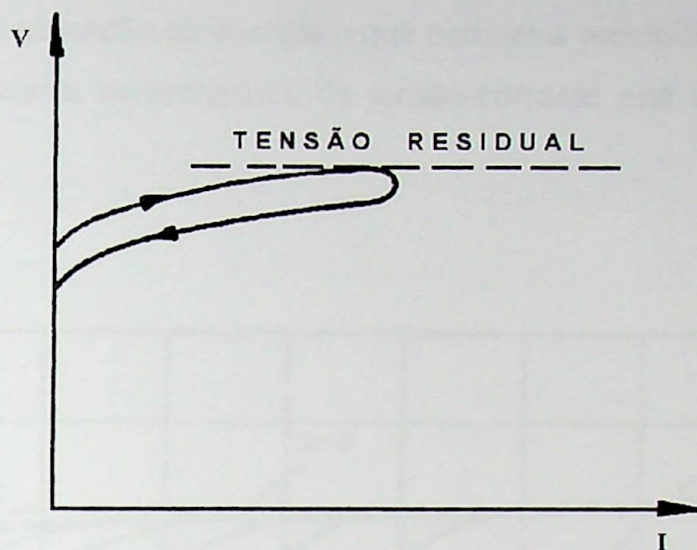


FIGURA 2.21 - Característica $V \times I$ de um para-raios à base de Óxido de Zinco [1].

O para-raios ideal seria aquele que se comportaria como um circuito aberto até um nível de sobretensão estabelecido no projeto, nível este que garantiria a sua própria integridade e também, a do sistema. Ao entrar em condução neste nível de sobretensão, ele manteria esta tensão durante todo o período de condução após o qual volta a ser um circuito aberto [1].

De uma maneira geral, um bom para-raios deve desempenhar as seguintes funções [3]:

- 1) Proteger os equipamentos contra sobretensões, com margem de segurança adequada;
- 2) Limitar a corrente subsequente de 60 Hz a um baixo valor, no caso de para-raios com centelhadores;
- 3) Eliminar a operação dos equipamentos de proteção de sobrecorrente, evitando redução da continuidade de serviço.

2.4.1 - PÁRA-RAIOS À BASE DE ÓXIDO DE ZINCO

Um pára-raios de Óxido de Zinco é composto de blocos semicondutores cerâmicos, cuja característica de tensão-corrente é extremamente não-linear, associado com uma elevada capacidade de absorção de energia o que permite a possibilidade de ausência do uso de centelhadores. A curva característica de tensão-corrente está mostrada na figura 2.22 [20]:

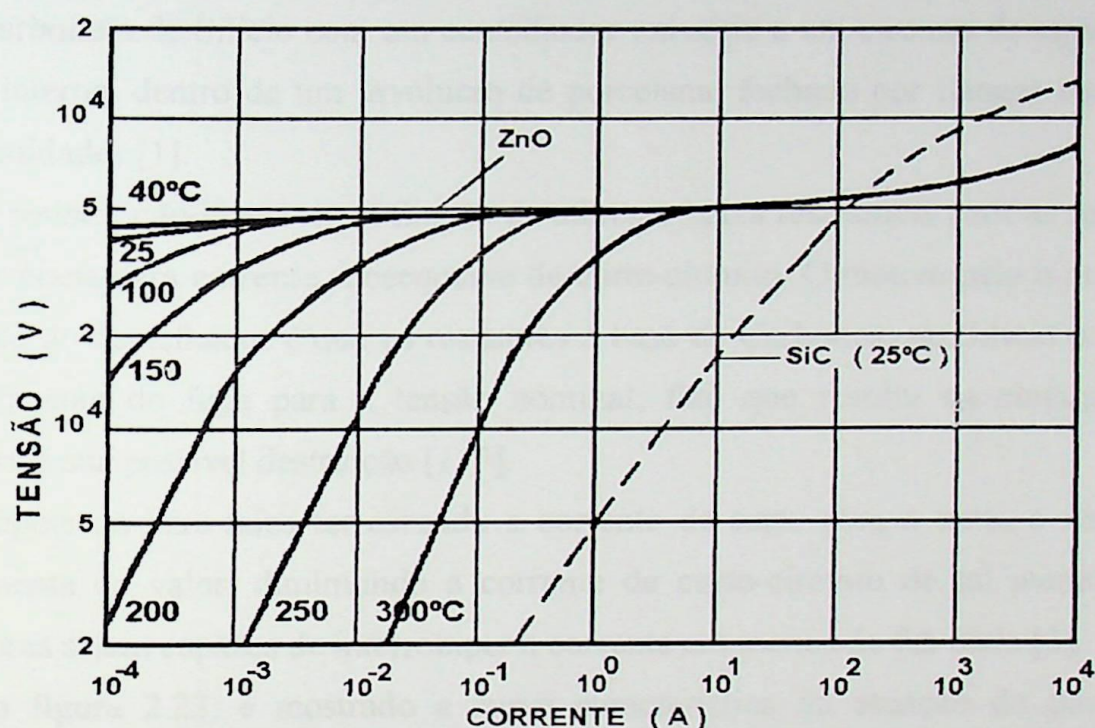


FIGURA 2.22 - Característica térmica dos elementos de Óxido de Zinco e Carboneto de Silício [1].

Pela figura 2.22, o funcionamento do pára-raios pode se resumir em três regiões [1, 21]:

1) Quando o pára-raios é solicitado por tensões normais, a corrente que flui por ele é muito pequena, mas esta região é altamente sensível à temperatura e a corrente varia linearmente com a tensão aplicada. É a região linear;

2) Nesta região a corrente aumenta abruptamente para pequenas variações na tensão aplicada. É a região não-linear;

3) É a região caracterizada pela diminuição da não linearidade, apresentando esta característica somente para altíssimos valores de corrente e a queda de tensão nesta região é atribuída apenas ou em grande parte à resistividade dos grãos de óxido de zinco.

2.4.2 - PÁRA-RAIOS À BASE DE CARBONETO DE SILÍCIO

Este pára-raios surgiu em 1926, é constituído de blocos de um elemento não-linear à base de Carboneto de Silício com um centelhador em série e um circuito de equalização na sua parte interna, dentro de um invólucro de porcelana, fechado por flanges metálicas em suas extremidades [1].

O resistor não-linear tem a função de oferecer baixa resistência para as sobretensões e alta resistência para corrente subsequente de curto-circuito. O motivo pelo o qual existe a necessidade do centelhador é que os resistores à base de Carboneto de Silício possuem uma elevada corrente de fuga para a tensão nominal; fato que resulta na elevação de sua temperatura e sua possível destruição [1, 3].

Depois do pára-raios ter escoado a corrente de surto para a terra, o resistor não-linear aumenta de valor, diminuindo a corrente de curto-circuito de tal maneira que os centelhadores sejam capazes de interromper a corrente em menos de 0,5 ciclo [3].

Na figura 2.23, é mostrado a curva característica da atuação do pára-raios de Carboneto de Silício, que tem um pico de tensão devido a atuação do centelhador.

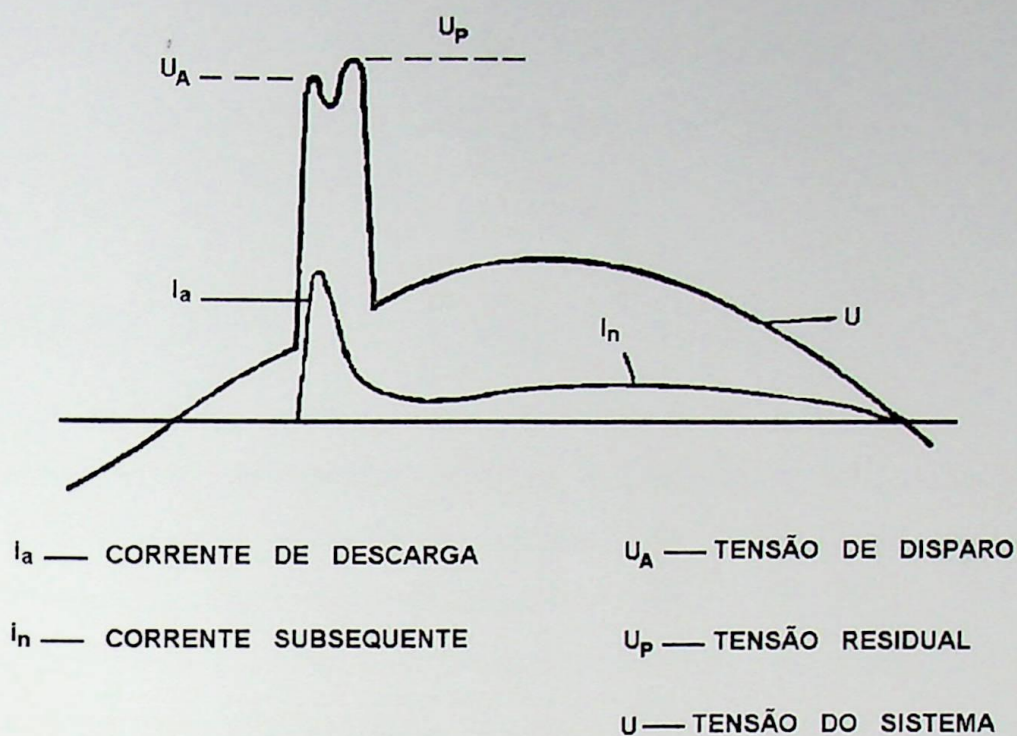


FIGURA 2.23 - Curva característica de atuação do para-raios de Carboneto de Silício [1].



CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DO VARISTOR

3.1 - INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DO VARISTOR

CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DO VARISTOR

3.1 - INTRODUÇÃO

As sobretensões são transferidas para o lado de baixa tensão da linha de distribuição através do enrolamento do transformador de distribuição pela capacitância primário-secundária. Mesmo que o primário do transformador esteja protegido por pára-raios existirão, no secundário, sobretensões de valores elevados.

Estas sobretensões podem causar perfurações nos isolamentos dos equipamentos industriais e residenciais, principalmente, aqueles dotados de componentes eletrônicos, que não suportam tensões elevadas, sendo cada vez mais utilizados.

Os primeiros componentes elétricos na proteção contra as sobretensões foram os centelhadores que tinham a grande desvantagem de não impedir o fluxo de corrente de frequência industrial depois da descarga, que no entanto são muito baratos. Um melhoramento foi obtido pelo adição de resistores em série. Com o maior desenvolvimento da tecnologia, surgiu o resistor não-linear à base de Carboneto de Silício para permitir que a corrente de frequência industrial, seja extinta, antes que a proteção atue, desligando o sistema [24].

Com o desenvolvimento do Óxido de Zinco, surgiu o varistor de Óxido de Zinco que tem excelente performance para proteção de surtos e tem ganhado popularidade em várias aplicações do sistema de potência. Ele não tem centelhadores em série com o elemento semicondutor. A eliminação do centelhador é possível devido à alta não-linearidade da resistência dos elementos de óxido metálico usados em varistores [22]. O varistor consiste basicamente de Óxido de Zinco, mas contém pequenas quantidades de outros óxidos metálicos, que permitem produzir a alta característica não-linear do material [24].

Os varistores são a proteção ideal para estas sobretensões em baixas tensões. Eles têm uma longa vida útil e absorvem grandes quantidades de energia, com a vantagem de não possuir centelhadores.

3.2 - VARISTOR

Em 1968, a MATSUSHITA ELECTRIC INDUSTRIAL Co., de Osaka, Japão, anunciou um novo material dotado de resistência não-linear baseado no Óxido de Zinco. Os dispositivos originais foram para baixas tensões, sendo usados na indústria eletrônica. Uma das grandes vantagens do Óxido de Zinco foi que este retirou os centelhadores em séries dos pára-raios à base de Carboneto de Silício por causa de sua alta não-linearidade, mas isto implica na aplicação de uma permanente tensão fase-terra sobre os seus terminais, além da necessidade de suportar as sobretensões que eventualmente ocorram.

O varistor de Óxido de Zinco tem como elemento principal Óxido de Zinco (ZnO), porém, existem outros materiais tais como Bi_2O_3 , CoO , MnO , Sb_2O_3 . Todos estes elementos são misturados e sinterizados em altas temperaturas, para que ocorra uma primeira difusão dos óxidos dentro da matriz formada pelos grãos de Óxido de Zinco. Esta pré-mistura sofre um novo processo de mistura, moagem, via úmida, secagem e adição de plastificantes. O pó, assim obtido, é prensado em formato cilíndrico no tamanho desejado. Após esta etapa, os resistores são sinterizados em um forno, com temperatura precisamente controlada, para formar as camadas intergranulares ao redor dos grãos de Óxido de Zinco. Quando os discos prensados são sinterizados em alta temperatura, resultam em um material cerâmico polycristalino. A estrutura do corpo sinterizado é uma matriz de alta condutibilidade de grãos de Óxido de Zinco envolvidos e separados por uma camada intergranular de alta resistência, homogeneamente distribuída em todo bloco, como um material isolante, consistindo primariamente dos materiais adicionados ao Óxido de Zinco. É interessante notar que a uniformidade da microestrutura, desempenha um papel extremamente importante no comportamento dos resistores não-lineares a óxido metálico, frente às solicitações em frequência industrial e de descargas de corrente [21, 22, 24, 25, 27]. A figura 3.1 ilustra o resistor não-linear:

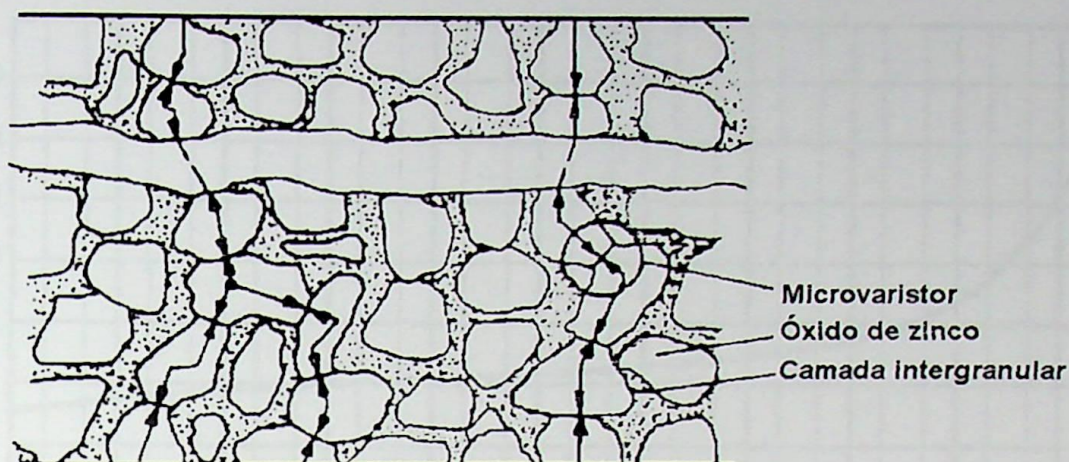


FIGURA 3.1 - Matriz de grãos de Óxido de Zinco [28].

3.2.1 - CARACTERÍSTICA ELÉTRICA DO VARISTOR

A resistência oferecida pelos varistores varia com a tensão, porém, de um modo abrupto. Ou seja, leves mudanças na tensão faz com que ocorram grandes variações de corrente. Esta variação extrema, conforme mostra a figura 3.2, permite que os varistores conduzam correntes de baixa amplitude, praticamente, correntes de fuga, quando submetidos às condições normais do sistema, sem contudo, perderem a característica de escoarem correntes de elevada amplitude quando da ocorrência de sobretensões.

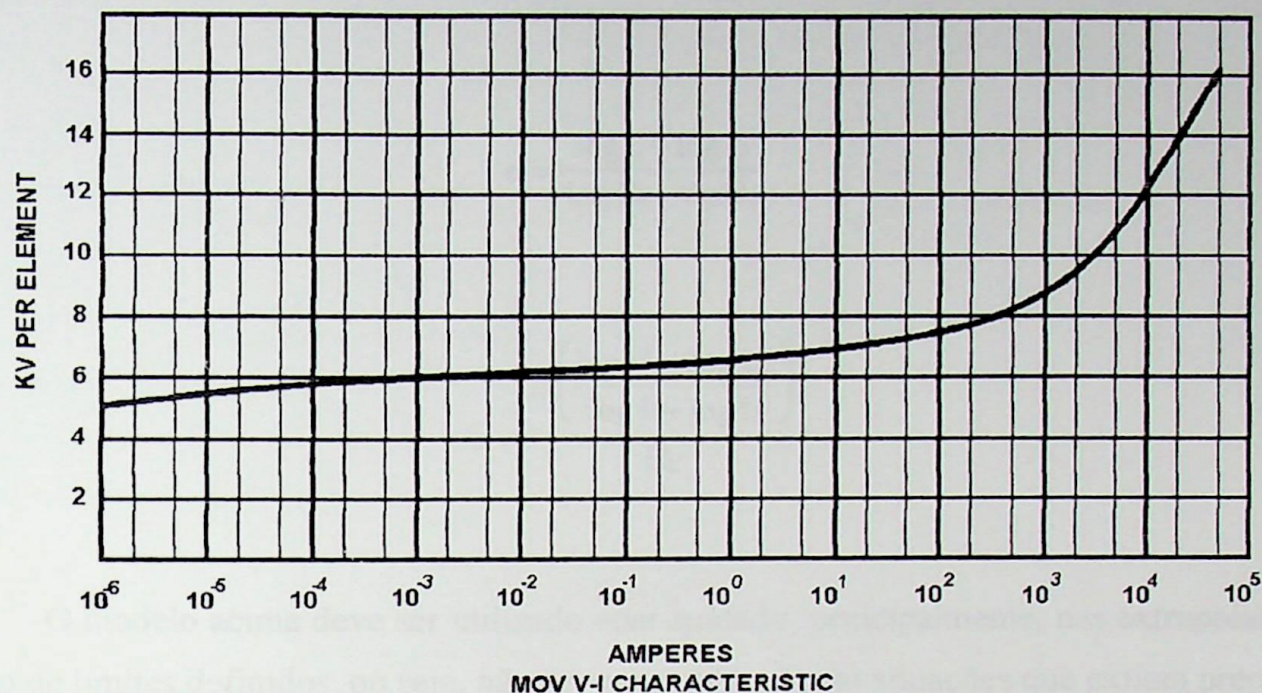


FIGURA 3.2 - Características tensão-corrente de um varistor [23].

A não-linearidade dos varistores a Óxido de Zinco é tão pronunciada que não há necessidade de centelhadores para que o componente opere em tensões normais do sistema.

Um modelo matemático que pode representar este fenômeno é fornecido pela seguinte fórmula:

$$I = k \cdot U^{\alpha}$$

Onde,

I = Corrente de surto, em valores de crista.

k = Constante de proporcionalidade.

U = Tensão desenvolvida no bloco devido a corrente de surto I .

α = Coeficiente de não-linearidade.

Este modelo necessita de dois pares tensão-corrente, tirados da figura 3.2, para ser definido, logo, considerando-se, (I_1, U_1) e (I_2, U_2) , vem:

$$\alpha = \frac{\log I_1 - \log I_2}{\log U_1 - \log U_2}$$

$$k = \frac{I_1 \left(\frac{\log U_1 - \log U_2}{\log I_1 - \log I_2} \right)}{U_1}$$

O modelo acima deve ser utilizado com cuidado, principalmente, nas extrapolações, dentro de limites definidos, ou seja, não deve ser utilizado em situações que exijam precisão. Como pode ser visto, quanto maior o α mais perto o varistor torna-se um dispositivo de tensão constante, ou seja, mais perto do modelo ideal [23, 27].

A característica tensão-corrente do varistor a Óxido metálico é, basicamente, determinada pelo comportamento em nível eletrônico das regiões de contorno, ou seja, de fronteira entre os grãos de Óxido de Zinco e a camada intergranular.

Então, o bloco pode ser representado por uma rede série-paralelo de grãos de Óxido de Zinco separados por junções intergranulares, como pode ser visto na figura 3.1. Estas junções podem também ser chamadas de regiões de depleção, fato que implica na formação, nos contornos dos grãos de Óxido de Zinco e na camada intergranular que os envolvem, de barreiras simétricas conhecidas como **Barreiras de Schottky**, em tese, responsáveis pelo comportamento não-linear desta junções e, por conseguinte, do varistor. Logo, cada conjunto “**camada intergranular - grão de Óxido de Zinco - camada intergranular**”, atua como um circuito ceifador, com tensão de corte em torno de 2,5 Volts de crista [27]. A figura 3.3 ilustra esta situação:

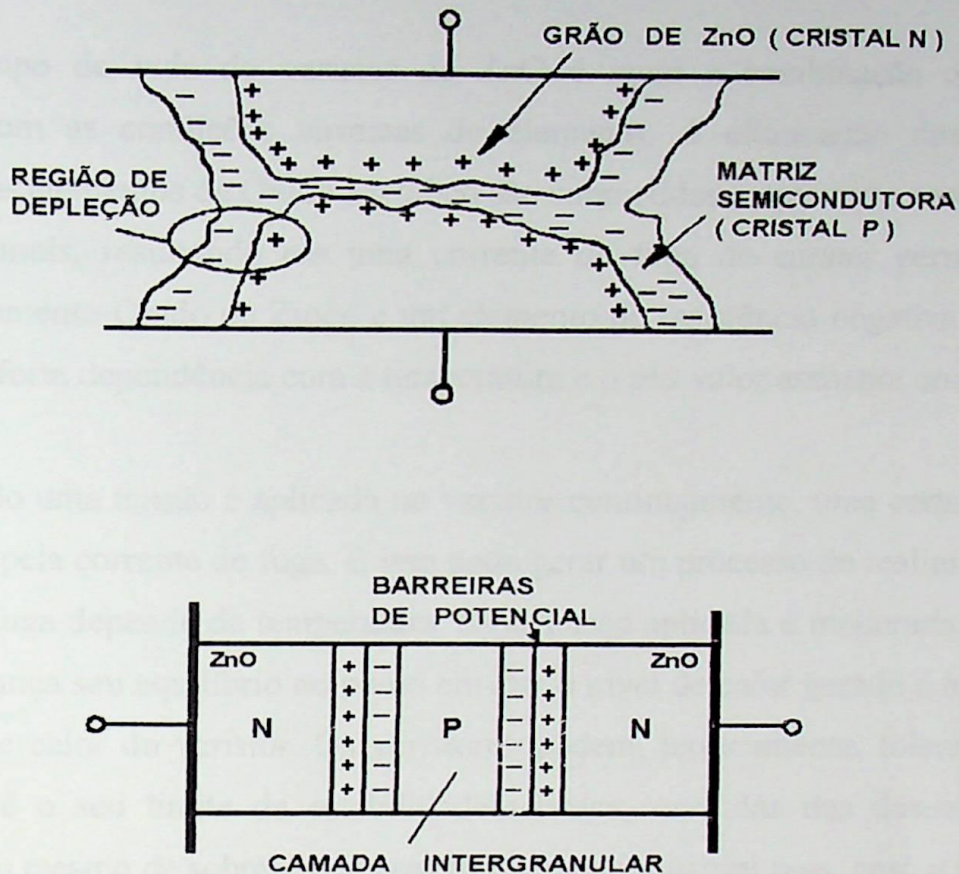


FIGURA 3.3 - Junções de uma resistência não-linear [27].

Em termos macroscópicos, as características dos resistores a óxido metálico são definidas pela superposição das características microscópicas das junções “**camada intergranular - grãos de Óxido de Zinco**”, que se encontram aos milhões, conectados em série e em paralelo, ao se considerar um tamanho médio para os grãos de Óxido de Zinco da ordem de 10 μm a 20 μm , obtém-se uma tensão nominal por milímetro de espessura destes resistores da ordem de 120 Volts a 250 Volts de crista [27].

Então, conclui-se que a corrente no interior do varistor circula pelo caminho que apresenta o menor número de junções e a perda de potência ocorre nas junções. Se a microestrutura for homogênea, a corrente se distribui uniformemente por toda a seção transversal dos resistores e a perda de potência, também, será uniforme [27].

3.2.2 - EFEITOS DA TEMPERATURA NO TEMPO DE VIDA ÚTIL DO VARISTOR

O tempo de vida do varistor de ZnO é igual a combinação do processo de degradação com as condições térmicas do elemento. A eliminação dos centelhadores significa que os elementos de Óxido Metálico são submetidos a aplicação contínua de tensão em seus terminais, resultando em uma corrente de fuga de caráter permanente. Como sabemos, o elemento Óxido de Zinco é um elemento de resistência negativa. A corrente de fuga tem uma forte dependência com a temperatura e o seu valor aumenta com a mesma [22, 25].

Quando uma tensão é aplicada no varistor continuamente, uma certa quantidade de calor é gerada pela corrente de fuga. E isso pode gerar um processo de realimentação, já que a corrente de fuga depende da temperatura. Se a tensão aplicada é moderada, a temperatura do varistor alcança seu equilíbrio no ponto em que o nível de calor gerado é balanceado com a dissipação de calor do varistor. Os varistores podem, teoricamente, tolerar variações de temperatura até o seu limite de estabilidade térmica, oriundas das descargas de surtos atmosféricos ou mesmo de sobretensões em frequência industrial pois, caso o ponto limite de estabilidade térmica não for ultrapassado, a temperatura sempre retorna para o valor de operação estável. Mas, quando a tensão aplicada excede um certo valor, a corrente de fuga e a temperatura não alcançam o equilíbrio e passam a aumentar até à destruição do componente. É a avalanche térmica [22, 26, 27]. A figura 3.4 ilustra a relação tempo de vida útil versus temperatura ambiente em graus Celsius [23]:

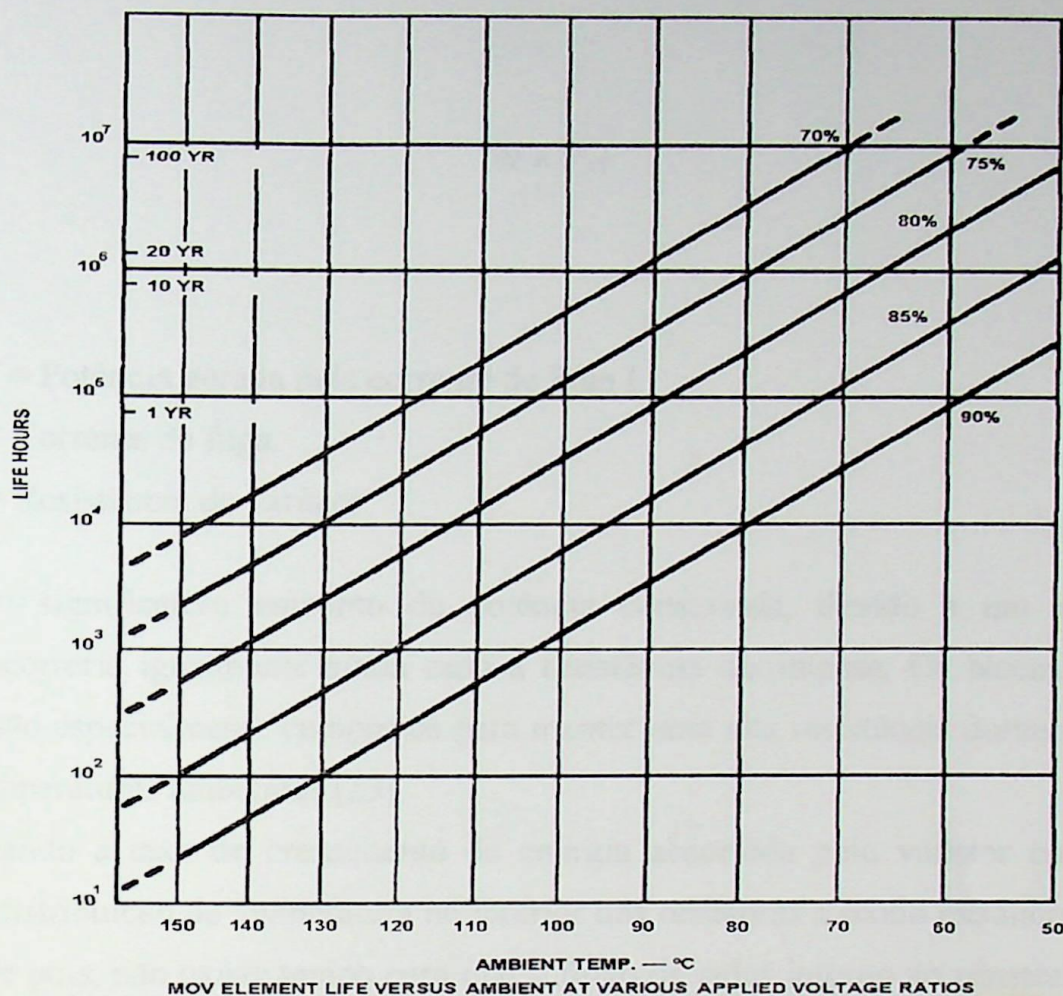


FIGURA 3.4 - Característica tempo de vida útil versus temperatura ambiente variando a taxa de tensão aplicada [23].

Logo, a primeira consideração ao se aplicar varistores de ZnO é a temperatura ambiente. Como mostra a figura 2.22, a curva tensão-corrente para um varistor de ZnO varia com a temperatura. Com o aumento da temperatura ambiente ou o aumento da energia de entrada no varistor, a temperatura do varistor aumenta. Este aumento na temperatura causa o aumento na magnitude da corrente de fuga, provocando um aumento do calor. Resultando no processo descrito anteriormente.

A habilidade do bloco em operar em ambientes de altas temperaturas, sem provocar uma avalanche térmica no varistor, é uma necessidade para operar encapsulado. Sem esta estabilidade de operar em altas temperaturas, a geração de Watts no bloco causaria a destruição no varistor [23]. Matematicamente, pode-se escrever que:

$$W = I^2 \cdot r$$

Onde,

W = Potência gerada pela corrente de fuga I .

I = Corrente de fuga.

r = Resistência do varistor.

Um significativo aumento da potência consumida, devido a um aumento da corrente, ocorreria igualmente ainda caso a resistência diminuísse. Os blocos usados em varistores são especialmente compostos para manter uma alta resistência durante uma larga faixa de temperaturas ambientes [23].

Quando a taxa de crescimento da energia absorvida pelo varistor começa a ser elevada, a distribuição de temperatura no interior dos resistores a óxido metálico passa a ser desuniforme pois, não existe tempo para que o fluxo de calor interno ao resistor promova o equilíbrio térmico. A distribuição não uniforme de temperatura é responsável pelo aparecimento de solicitações mecânicas originárias da expansão diferencial de partes do resistor, fato que pode conduzir a um fenômeno denominado **“Thermal Cracking”**. Logo, a existência de pontos quentes, tecnicamente denominados **“Hotspots”**, é responsável pela redução da capacidade de absorção de energia dos resistores a óxido metálico [27].

Com relação à temperatura, o expoente α (α) é mantido constante durante uma larga faixa de correntes, providenciando alta estabilidade de temperatura [23].

CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DOS PARÂMETROS DOS DIVERSOS COMPONENTES DO CIRCUITO

4.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DOS PARÂMETROS DOS DIVERSOS COMPONENTES DO CIRCUITO

4.2 - MODELAGEM DOS PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR

CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DOS PARÂMETROS DOS DIVERSOS COMPONENTES DO CIRCUITO

4.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A quase totalidade das sobretensões transitórias que ocorrem nos sistemas de distribuição são devidas aos raios. A pequena parcela restante pode ser devida a curto-circuito, energização e desenergização de capacitores, corte brusco de corrente e ferro-ressonância [4].

No início deste século, foram organizados vários programas para estudar os surtos atmosféricos cientificamente. Assim, instalaram-se equipamentos sofisticados para medir as características dos raios sobre os edifícios e objetos elevados, sobre linhas de transmissão e distribuição e também no cabo de descida para terra dos pára-raios [4].

Estudos de surtos atmosféricos em linhas de distribuição permitem determinar os níveis de tensão aos quais os equipamentos da distribuição primária e secundária e os equipamentos do consumidor estarão expostos quando da ocorrência de descargas atmosféricas.

O circuito elétrico a ser modelado é um trecho de uma linha de distribuição primária e secundária, alimentada por somente um transformador primário, do sistema CEMIG, pertencente à cidade de Itajubá/ MG, ver figura 4.3.

Todos os parâmetros da linha serão modelados para ser inseridos no programa de simulação MICROTRAN.

4.2 - MODELAGEM DOS PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR

Relembrando o Capítulo 2, item 2.1, desta dissertação, tem-se que no período transitório, o transformador de potência se comporta como uma rede de capacitâncias, resistências e indutâncias e seus enrolamentos se comportam de forma diferente com o decorrer do tempo.

No período inicial, o transformador se comporta como uma capacitância concentrada. É neste período que ocorre a situação mais crítica com relação a tensão. Logo, pode-se representar o transformador como um circuito PI (Π) de capacitâncias, ver figura 4.1:

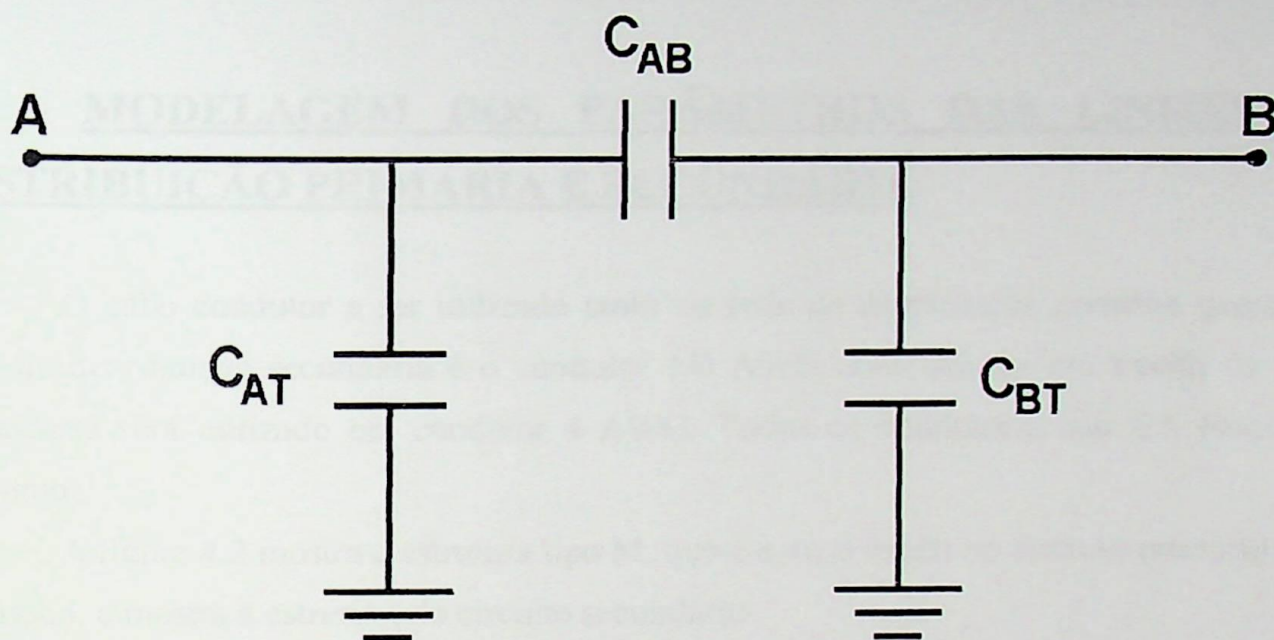


FIGURA 4.1 - Representação do transformador por uma rede de capacitâncias.

Onde,

C_{AT} = Capacitância do lado de alta tensão para terra.

C_{BT} = Capacitância do lado de baixa tensão para terra.

C_{AB} = Capacitância entre os lados de alta e baixa tensão.

Os valores das capacitâncias (tabela 4.1) foram conseguidos junto a uma concessionária de energia elétrica, Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), para um transformador de distribuição similar ao usado no sistema elétrico a ser simulado.

POTÊNCIA DO TRANSFORMADOR	C_{AT}	C_{BT}	C_{AB}
112,5 kVA	485 pF	2020 pF	1500 pF

TABELA 4.1 - Valores da rede de capacitância do transformador de distribuição.

4.3 - MODELAGEM DOS PARÂMETROS DAS LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA

O cabo condutor a ser utilizado tanto na rede de distribuição primária quanto na rede de distribuição secundária é o condutor 1/0 AWG, somente em um trecho da linha secundária será utilizado um condutor 4 AWG. Todos os condutores são CA (cabos de alumínio).

A figura 4.2 mostra a estrutura tipo M, que é a mais usada no circuito primário a ser analisado, e mostra a estrutura do circuito secundário:

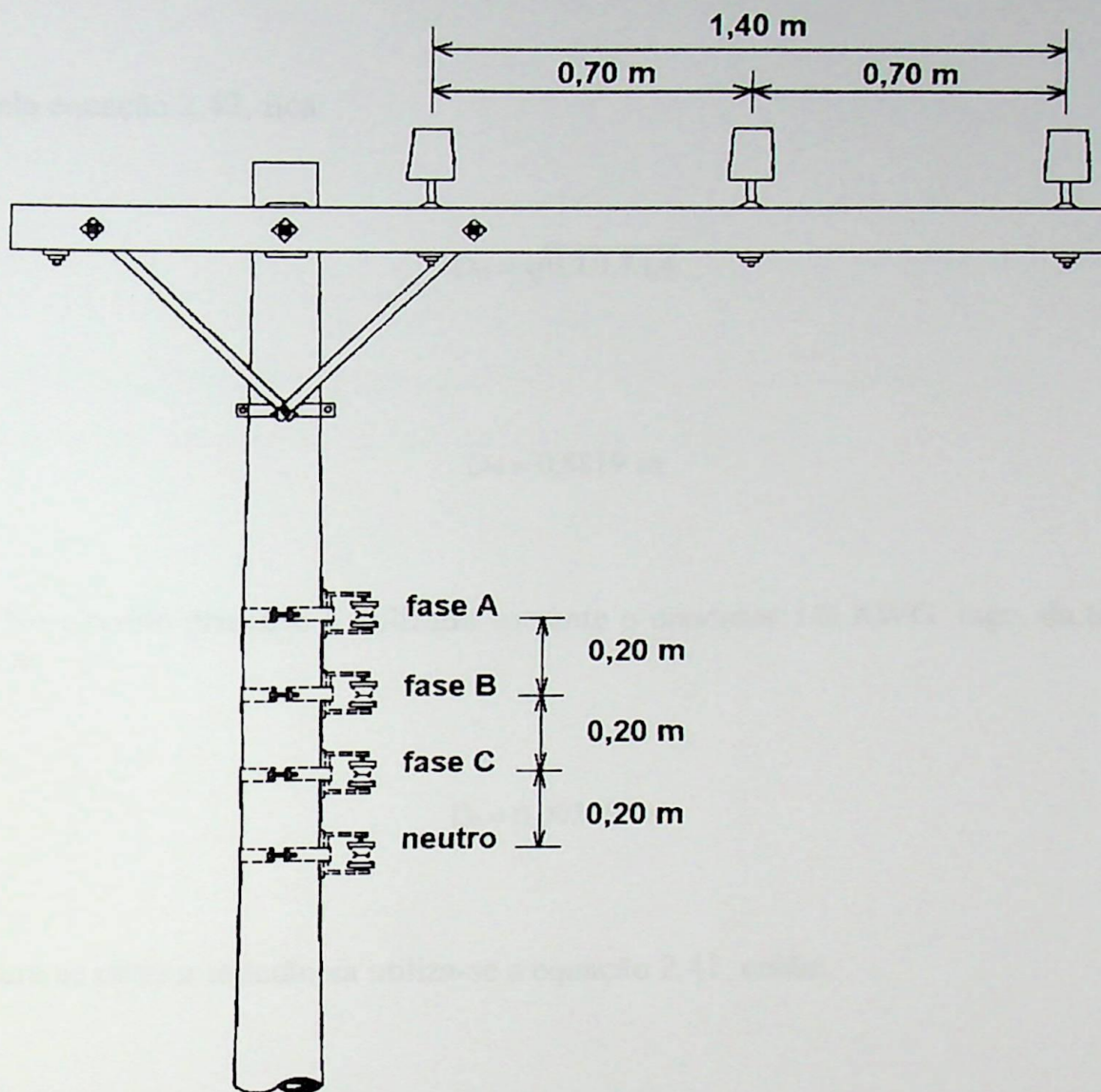


FIGURA 4.2 - Estrutura da cruzeta no primário e dos suportes da rede de distribuição secundária [29].

4.3.1 - CIRCUITO DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA

Pela figura 4.2, tem-se:

$$D_{ab} = 0,7 \text{ m}$$

$$D_{bc} = 0,7 \text{ m}$$

$$D_{ac} = 1,4 \text{ m}$$

Logo, pela equação 2.42, fica:

$$D_m = \sqrt[3]{0,7 \cdot 0,71,4}$$

$$D_m = 0,8819 \text{ m}$$

No circuito primário é utilizado somente o condutor 1/0 AWG, logo, da tabela 2.1 tira-se que:

$$D_s = 0,003392 \text{ m}$$

Assim para se obter a indutância utiliza-se a equação 2.41, então:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{0,8819}{0,003392}$$

$$L = 1,1121 \cdot 10^{-3} \frac{\text{H}}{\text{km}}$$

Porém, para se obter a capacitância utiliza-se a equação 2.44, logo:

$$C = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{0,8819}{0,003392}}$$

$$C = 9,9907.10^{-9} \frac{F}{km}$$

Agora, usando as equações 2.28 e 2.29 obter-se-ão a velocidade de propagação da onda na linha e a impedância de surto desta linha. Assim:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1,1121.10^{-3} \cdot 9,9907.10^{-9}}}$$

$$v = 3.10^5 \frac{km}{s}$$

E,

$$Z_o = \sqrt{\frac{1,1121.10^{-3}}{9,9907.10^{-9}}}$$

$$Z_o = 333,6425 \Omega$$

4.3.2 - CIRCUITO DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA

Pela figura 4.2, tem-se:

$$d_{ab} = 0,2 \text{ m}$$

$$d_{bc} = 0,2 \text{ m}$$

$$d_{ac} = 0,4 \text{ m}$$

$$d_{an} = 0,6 \text{ m}$$

$$d_{bn} = 0,4 \text{ m}$$

$$d_{cn} = 0,2 \text{ m}$$

Logo, pela equação 2.43, fica:

$$D_m = \sqrt[3]{0,2 \cdot 0,2 \cdot 0,4 \cdot 0,6 \cdot 0,4 \cdot 0,2}$$

$$D_m = 0,3026 \text{ m}$$

No circuito secundário são usados dois tipos de condutores (1/0 AWG e 4 AWG), então,

4.3.2.1 - CÁLCULOS PARA O CONDUTOR 1/0 AWG

Pela tabela 2.1, tira-se que:

$$D_s = 0,003392 \text{ m}$$

Assim, para se obter a indutância utiliza-se a equação 2.41:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{0,3026}{0,003392}$$

$$L = 8,9821.10^{-4} \frac{H}{km}$$

Para se obter a capacitância utiliza-se a equação 2.44:

$$C = \frac{1}{18.10^6 \cdot \ln \frac{0,3026}{0,003392}}$$

$$C = 1,2370.10^{-8} \frac{F}{km}$$

Agora, para se obter a velocidade de propagação da onda na linha e a impedância de surto da linha utilizam-se as equações 2.28 e 2.29. Assim:

$$v = \frac{1}{\sqrt{8,9821.10^{-4} \cdot 1,2370.10^{-8}}}$$

$$v = 3.10^5 \frac{km}{s}$$

E,

$$Z_o = \sqrt{\frac{8,9821.10^{-4}}{1,2370.10^{-8}}}$$

$$Z_o = 269,4629 \, \Omega$$

4.3.2.2 - CÁLCULOS PARA O CONDUTOR 4 AWG

Pela tabela 2.1, tira-se que:

$$D_s = 0,002138 \, \text{m}$$

Então, usando a equação 2.41 para se obter a indutância:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{0,3026}{0,002138}$$

$$L = 9,9052 \cdot 10^{-4} \, \frac{\text{H}}{\text{km}}$$

Para se obter a capacitância utiliza-se a equação 2.44:

$$C = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{0,3026}{0,002138}}$$

$$C = 1,1217 \cdot 10^{-8} \, \frac{\text{F}}{\text{km}}$$

Para se obter a velocidade de propagação da onda na linha e a impedância de surto da linha utilizam-se as equações 2.28 e 2.29. Assim:

$$v = \frac{1}{\sqrt{9,052 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1217 \cdot 10^{-8}}}$$

$$v = 3 \cdot 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

E,

$$Z_o = \sqrt{\frac{9,9052 \cdot 10^{-4}}{1,1217 \cdot 10^{-8}}}$$

$$Z_o = 297,1558 \Omega$$

4.4 - MODELAGEM DOS PARÂMETROS DOS ISOLADORES E DO PÁRA-RAIOS

4.4.1 - ISOLADORES

Como foi dito no Capítulo 2, item 2.3, desta dissertação, a estrutura constituída por um isolador e uma cruzeta de madeira tipo M, tem uma tensão crítica da ordem de 143 kV, o que é um valor suficiente numa linha de distribuição para que não ocorra uma disrupção, se

uma descarga atmosférica ocorrer nesta linha. Por isto, os isoladores da linha não serão considerados na análise.

4.4.2 - PÁRA-RAIOS

Com relação aos pára-raios, a linha de distribuição a ser simulada, originalmente, possui apenas 1 (um) pára-raios de Carboneto de Silício. Porém, como a nova tecnologia de pára-raios a base de Óxido de Zinco está ganhando popularidade entre as concessionárias de energia elétrica, haverá simulações usando este pára-raios. Abaixo estão as características de tensão residual versus a corrente de impulso dos dois tipos de pára-raios a serem usados:

TENSÃO NOMINAL	TENSÃO RESIDUAL			TENSÃO DISRUPTIVA
12 kV	5,0 kA	10,0 kA	20,0 kA	40 kV
	35 kV	39 kV	43 kV	

TABELA 4.2 - Pára-raios à base de Carboneto de Silício, tipo BHF7DC, da marca SPRECHER ENERGIE.

TENSÃO NOMINAL	TENSÃO RESIDUAL			
12 kV	1,0 kA	5,0 kA	10,0 kA	20,0 kA
	24,4 kV	27,3 kV	28,8 kV	31,7 kV

TABELA 4.3 - Pára-raios à base de Óxido de Zinco, tipo EXLIM Q, da marca ASEA BROWN BOVERI (ABB).

4.5 - MODELAGEM DOS PARÂMETROS DO VARISTOR

Os varistores tem uma aplicação bastante ampla devido a larga faixa de tensões e de correntes de impulso na qual ele pode ser utilizado. Mas, neste trabalho, os varistores serão

aplicados em pontos de interseção de linhas de distribuição secundária ou em pontos de finais de linhas de distribuição secundária. E um ponto de aplicação especial será no secundário do transformador.

Os critérios de seleção pelo catálogo da SIEMENS [28] indica que o melhor varistor para proteger o circuito é o que obedece aos seguintes parâmetros:

1) Selecionar o varistor com a máxima tensão de serviço permitida igual ou pouco maior que a tensão de serviço em cada caso. Deve-se deixar uma folga de 10% entre a tensão do varistor e da linha para compensar as flutuações da tensão de serviço, já que a dissipação de potência no varistor aumenta fortemente com a tensão de serviço (um aumento de tensão de 10 % multiplica por 15 a dissipação de potência).

$$\begin{array}{r} \text{Tensão de serviço: } 127 \text{ V} \\ + 10 \% \\ \hline 139,7 \text{ V} \end{array}$$

2) O segundo passo de seleção consiste em:

a) **Corrente através do varistor**

A máxima corrente através do varistor depende da duração do impulso de corrente e do número de cargas que deve suportar o varistor durante a sua vida útil. Mas, para se poder comparar corretamente os valores de corrente máxima permitida pelo varistor com a corrente máxima que passa por ele é necessário transformar a onda real de corrente (qualquer forma) em uma onda retangular equivalente.

b) **Absorção de Energia**

É importante que a energia dissipada no varistor seja menor que a máxima energia admissível para este varistor. E, também, é importante que a onda de corrente aplicada no varistor tenha um certo tempo para ser novamente aplicada.

Seguindo estes dois passos, chega-se ao seguinte varistor a ser aplicado no circuito:

TENSÃO NOMINAL	TENSÃO RESIDUAL				
140 V	1 A	100 A	1 kA	5 kA	10 kA
	300 V	350 V	450 V	550 V	600 V

TABELA 4.4 - Varistor à base de Óxido de Zinco, tipo SIOV-S20K140, da marca SIEMENS [28].

4.6 - MODELAGEM DA CARGA NOS CONSUMIDORES

Quando houver simulações de carga no sistema, será considerado que:

- 1) A carga é igual em todos os postes por onde passa uma linha de distribuição secundária;
- 2) Não existe carga na linha de distribuição primária;
- 3) Como o tempo de simulação é muito menor que a variação da carga no consumidor esta será considerada constante durante o tempo em que ocorrer a simulação.

Sendo a potência trifásica total do transformador igual a 112,5 kVA e o fator de potência adotado de 0,95, fica para o sistema monofásico a seguinte potência aparente:

$$\frac{112,5 \text{ kVA}}{3} = 37,5 \text{ kVA}$$

As cargas serão divididas igualmente entre todos os consumidores e não existe consumidor primário, então pela figura 4.3, tira-se que existem 17 pontos de consumo no circuito (**Obs.:** Os consumidores se ligam com a linha de distribuição secundária somente nos postes, portanto, os pontos de consumo são os postes desta linha, mas nem todos os postes tem consumidores ligados a eles, porém, neste caso será considerado que todos os postes da linha de distribuição secundária tem consumidores ligados a eles), logo:

$$S_{\text{CONS}} = \frac{37,5 \text{ kVA}}{17} = 2,205 \text{ kVA}$$

Usando o fator de potência de 0,95 pode-se obter as seguintes potências ativas e reativas:

$$S = P + jQ$$

$$S_{CONS} = 2095,59 + j688,79 \text{ VA}$$

A carga será simulada como se fosse um sistema RL série fixo, sem mudanças em seus valores. Sendo um sistema série, a corrente é o parâmetro igual nos dois elementos da carga, R e L. assim:

$$S = V.I \Rightarrow I = \frac{S}{V} = \frac{S_{CONS}}{V}$$

Substituindo os valores de S_{CONS} e V na equação acima fica:

$$I = \frac{2,205 \text{ kVA}}{127 \text{ V}} = 17,37 \text{ A}$$

Então, usando a potência ativa, P , tem-se:

$$P = R.I^2 \Rightarrow R = \frac{P}{I^2}$$

$$R = \frac{2095,56}{(17,37)^2} = 6,95 \, \Omega$$

Usando a potência reativa, Q , tem-se:

$$Q = X_L \cdot I^2 \Rightarrow X_L = \frac{Q}{I^2}$$

$$X_L = \frac{688,79}{(17,37)^2} = 2,28 \, \Omega$$

Mas,

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \Rightarrow L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$L = \frac{2,28}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 6,06 \cdot 10^{-3} \, \text{H}$$

Então a carga pode ser representada por circuito RL série com as seguintes características:

$$R = 6,95 \, \Omega$$

$$L = 6,06 \, \text{mH}$$

4.7 - ORIGEM DAS SOBRETENSÕES

As descargas atmosféricas que atingem uma linha de distribuição podem ser provenientes de uma descarga direta na linha ou de surtos induzidos na linha por raios caídos nas vizinhanças. A tensão real depende da amplitude da corrente do raio, da condutibilidade do objeto atingido e da impedância existente entre o ponto atingido e o verdadeiro terra [4].

Será considerado neste trabalho a descarga padrão de 100 kV de valor de crista e 1,2/50 μ s de tempo de crista e de metade do valor de crista, respectivamente.

4.8 - PLANTA DO CIRCUITO A SER SIMULADO

O circuito a ser simulado pertence à CEMIG da cidade de Itajubá/MG, ver figura 4.3, e se localiza perto da subestação de energia elétrica desta cidade. É composto originalmente de:

- Linhas de distribuição primária e secundária;
- cabos 1/0 AWG e 4 AWG (Cabos de Alumínio);
- Pára-raios de Carboneto de Silício (SiC);
- Transformador trifásico 13,8 kV/220 V/127 V e 112,5 kVA;
- 20 postes circulares de cimento;
- Cruzetas de madeira tipo M.

A figura a seguir ilustra o circuito:

- → Poste
 — → Linha Secundária
 - - - → Linha Primária

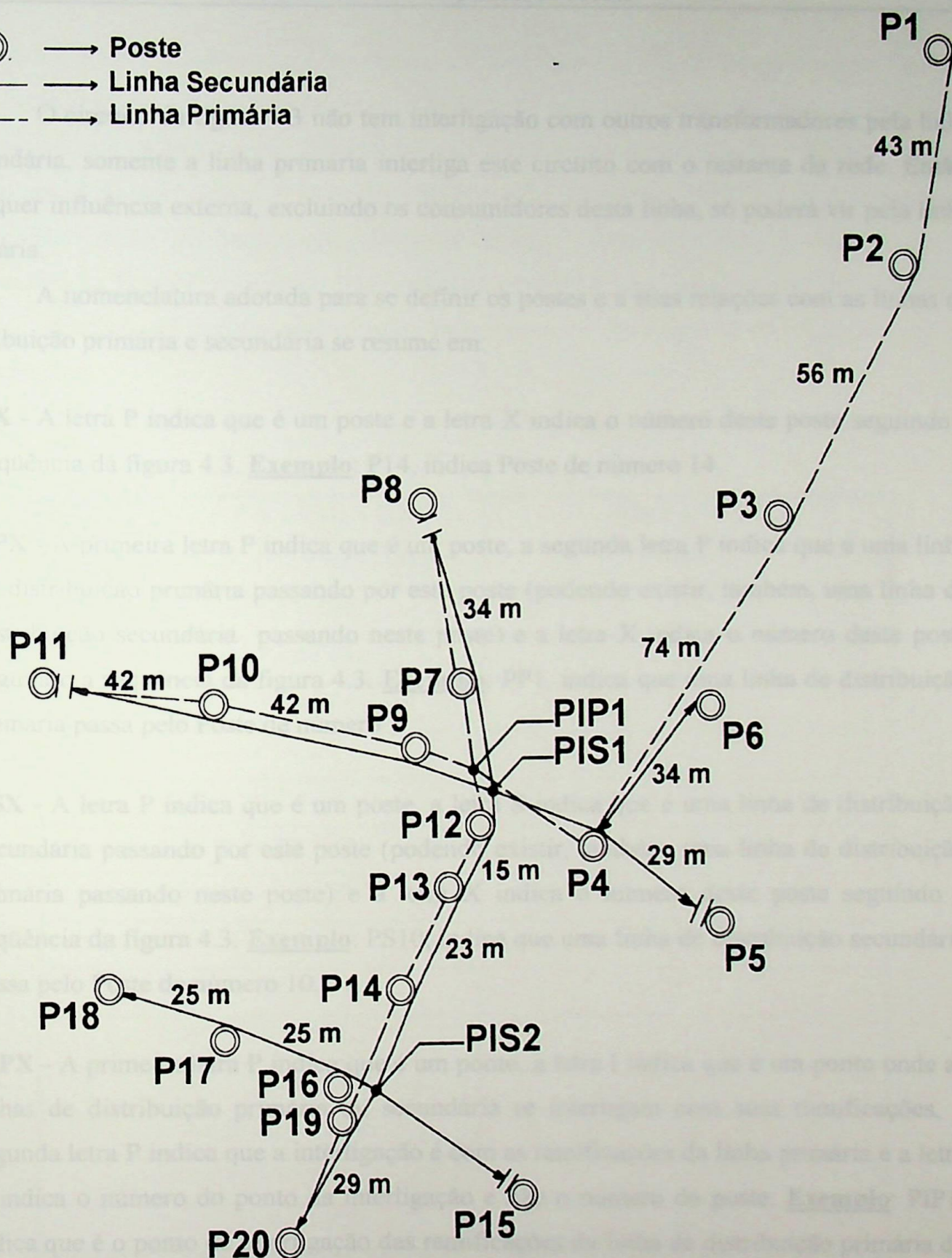


FIGURA 4.3 - Parte de uma linha de distribuição de energia elétrica usado como exemplo

O circuito da figura 4.3 não tem interligação com outros transformadores pela linha secundária, somente a linha primária interliga este circuito com o restante da rede. Então, qualquer influência externa, excluindo os consumidores desta linha, só poderá vir pela linha primária.

A nomenclatura adotada para se definir os postes e a suas relações com as linhas de distribuição primária e secundária se resume em:

- **PX** - A letra P indica que é um poste e a letra X indica o número deste poste seguindo a seqüência da figura 4.3. **Exemplo:** P14, indica Poste de número 14.
- **PPX** - A primeira letra P indica que é um poste, a segunda letra P indica que é uma linha de distribuição primária passando por este poste (podendo existir, também, uma linha de distribuição secundária passando neste poste) e a letra X indica o número deste poste seguindo a seqüência da figura 4.3. **Exemplo:** PP1, indica que uma linha de distribuição primária passa pelo Poste de número 1.
- **PSX** - A letra P indica que é um poste, a letra S indica que é uma linha de distribuição secundária passando por este poste (podendo existir, também, uma linha de distribuição primária passando neste poste) e a letra X indica o número deste poste seguindo a seqüência da figura 4.3. **Exemplo:** PS10, indica que uma linha de distribuição secundária passa pelo Poste de número 10.
- **PIPX** - A primeira letra P indica que é um ponto, a letra I indica que é um ponto onde as linhas de distribuição primária ou secundária se interligam com suas ramificações, a segunda letra P indica que a interligação é com as ramificações da linha primária e a letra X indica o número do ponto da interligação e não o número do poste. **Exemplo:** PIP1, indica que é o ponto de interligação das ramificações da linha de distribuição primária de número 1 (no circuito da figura 4.3 só existe um ponto do tipo PIPX, que é o ponto PIP1).

- **PISX** - A letra P indica que é um ponto, a letra I indica que é um ponto onde as linhas de distribuição primária ou secundária se interligam com suas ramificações, a letra S indica que a interligação é com as ramificações da linha secundária e a letra X indica o número do ponto da interligação e não o número do poste. **Exemplo:** PIS2, indica que é o ponto de interligação das ramificações da linha de distribuição secundária de número 2 (no circuito da figura 4.3 só existe dois pontos do tipo PISX, que são os pontos PIS1 e PIS2).

A tabela 4.5 contém as distâncias entre os postes nas linhas de distribuição primária e secundária:

POSTES DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA	DISTÂNCIA (metros)
Entre PP1 e PP2	43
Entre PP2 e PP3	56
Entre PP3 e PP4	74
Entre PP4 e PIP1	25
Entre PIP1 e PP7	23
Entre PP7 e PP8	34
Entre PIP1 e PP9	18
Entre PP9 e PP10	42
Entre PP10 e PP11	42
Entre PIP1 e PP12	7
Entre PP12 e PP13	15
Entre PP13 e PP14	23
Entre PP14 e PP19	25
Entre PP19 e PP20	29

TABELA 4.5 - Distância entre os postes na linha de distribuição primária.

POSTES DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA	DISTÂNCIA (metros)
Entre PS4 e PS5	29
Entre PS4 e PS6	34
Entre PS4 e PIS1	25
Entre PIS1 e PS7	23
Entre PS7 e PS8	34
Entre PIS1 e PS9	18
Entre PS9 e PS10	42
Entre PS10 e PS11	42
Entre PIS1 e PS12	7
Entre PS12 e PS13	15
Entre PS13 e PS14	23
Entre PS14 e PIS2	20
Entre PIS2 e PS15	36
Entre PIS2 e PS16	8
Entre PS16 e PS17	25
Entre PS17 e PS18	25
Entre PIS2 e PS19	5
Entre PS19 e PS20	29

TABELA 4.6 - Distância entre os postes na linha de distribuição secundária.

As distâncias são válidas tanto em um sentido quanto no sentido inverso, por exemplo, entre PS16 e PS17 a distância é 25 m e entre PS17 e PS16 a distância é a mesma, 25 m.

4.9 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A PLANTA DO CIRCUITO E A SIMULAÇÃO EM COMPUTADOR

- 1) O transformador se encontra no poste P14 e junto do transformador, neste mesmo poste, se encontra o pára-raios de Carboneto de Silício;
- 2) O pára-raios de Óxido de Zinco será colocado no mesmo local do pára-raios de Carboneto de Silício;
- 3) O local onde ocorrerá a descarga elétrica fictícia será o poste P1, porque este poste fica na saída do alimentador da subestação e no local de maior elevação do terreno onde se encontra a linha. O poste P1 tem a maior probabilidade de sofrer uma descarga atmosférica tanto diretamente quanto uma descarga transferida pela subestação;
- 4) As distâncias das linhas de distribuição primárias e secundárias foram consideradas as mesmas, quando estas coexistiam juntas em um mesmo poste e se interligavam a um mesmo poste;
- 5) Quando se supõe que existe carga nos consumidores, esta foi considerada igual em todos pontos de consumo desta linha (os consumidores se ligam com a linha de distribuição secundária somente nos postes, portanto, os pontos de consumo são os postes desta linha, mas nem todos os postes tem consumidores ligados a eles);
- 6) Não existe consumidor ligado na linha de distribuição primária; somente, na linha de distribuição secundária;
- 7) A linha de distribuição primária se expande para outros circuitos da rede de distribuição.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OBTIDOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Com a finalidade de avaliar os efeitos da troca de energia de uma rede isolada de Caboteco de Sulcio e União de Lencó e de variáveis controladas em diversos pontos do sistema, foram realizadas algumas simulações para uma melhor compreensão das condições

5.2 - OBTENDO TROCA DE ENERGIA

As simulações foram realizadas com o uso do software de simulação de sistemas de energia elétrica, considerando as condições de operação e de controle do sistema de energia elétrica.

As simulações foram realizadas com o uso do software de simulação de sistemas de energia elétrica, considerando as condições de operação e de controle do sistema de energia elétrica.

As simulações foram realizadas com o uso do software de simulação de sistemas de energia elétrica, considerando as condições de operação e de controle do sistema de energia elétrica.

As simulações foram realizadas com o uso do software de simulação de sistemas de energia elétrica, considerando as condições de operação e de controle do sistema de energia elétrica.

5.3 - SIMULAÇÕES COM TROCA DE ENERGIA E COM CARGA NOS CONSUMIDORES

- CASO 1.1 - Igual ao CASO 1, mas com carga
- CASO 1.2 - Igual ao CASO 1, mas com carga
- CASO 2.1 - Igual ao CASO 2, mas com carga
- CASO 2.2 - Igual ao CASO 2, mas com carga
- CASO 3.1 - Igual ao CASO 3, mas com carga
- CASO 3.2 - Igual ao CASO 3, mas com carga

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OBTIDOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Com a finalidade de realizar comparações com os dois tipos de pára-raios utilizados (Carboneto de Silício e Óxido de Zinco) e os varistores colocados em diversos pontos do circuito adotou-se a seguinte divisão para uma melhor visualização das simulações:

SIMULAÇÕES COM TROCA DE PÁRA-RAIOS

- **CASO 1** - Sem pára-raios no circuito.
- **CASO 2.1** - Com pára-raios de Carboneto de Silício (circuito original, o pára-raios está ligado no poste PP14).
- **CASO 2.2** - Com pára-raios de Óxido de Zinco no lugar do pára-raios de Carboneto de Silício (o pára-raios está ligado no poste PP14).
- **CASO 3.1** - Com pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador (o pára-raios está ligado no poste PP14) e varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador (o varistor está ligado no poste PS14).
- **CASO 3.2** - Com pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador (o pára-raios está ligado no poste PP14) e varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador (o varistor está ligado no poste PS14).

SIMULAÇÕES COM TROCA DE PÁRA-RAIOS E COM CARGA NOS CONSUMIDORES

- **CASO 1.1** - Igual ao CASO 1, mas com carga.
- **CASO 4.1** - Igual ao CASO 2.1, mas com carga.
- **CASO 4.2** - Igual ao CASO 2.2, mas com carga.
- **CASO 5.1** - Igual ao CASO 3.1, mas com carga.
- **CASO 5.2** - Igual ao CASO 3.2, mas com carga.

SIMULAÇÕES COM O USO DO VARISTOR E COM TROCA DE PÁRA-RAIOS

CASO XY - As letras X e Y indicam que:

LETRA X - Indica onde o varistor está ligado, sempre na linha secundária de distribuição.

- 1 - Varistor ligado no Poste 5.
- 2 - Varistor ligado no Poste 6.
- 3 - Varistor ligado no Poste 8.
- 4 - Varistor ligado no Poste 11.
- 5 - Varistor ligado no Poste 15.
- 6 - Varistor ligado no Poste 18.
- 7 - Varistor ligado no Poste 20.
- 8 - Varistor ligado no Ponto de bifurcação da linha de distribuição secundária que é o Poste 4.
- 9 - Varistor ligado no Ponto de interseção da linha de distribuição secundária com suas diversas ramificações, PIS1.
- 10 - Varistor ligado no Ponto de interseção da linha de distribuição secundária com suas diversas ramificações, PIS2.
- 11 - Varistores ligados, ao mesmo tempo, nos Poste 5, 6, 8, 11, 15, 18 e 20.
- 12 - Varistores ligados, ao mesmo tempo, no Poste 4 e nos Pontos de interseção PIS1 e PIS2.

LETRA Y - Indica o tipo de pára-raios e sua localização. Pode ser:

- **A** - Pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador.
- **B** - Pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador.
- **C** - Pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador.
- **D** - Pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador.

5.2 - TENSÕES NOS DIVERSOS PONTOS DO CIRCUITO

5.2.1 - SIMULAÇÕES COM TROCA DE PÁRA-RAIOS

NÚMERO DO POSTE	CASO 1 (EM kV)	CASO 2.1 (EM kV)	CASO 2.2 (EM kV)	CASO 3.1 (EM kV)	CASO 3.2 (EM kV)
PP1	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
PP2	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271
PP3	74,2779	74,2774	73,0099	73,9911	73,0000
PP4	50,5252	49,9633	39,4187	49,1322	39,3935
PP7	50,6960	43,0524	27,5619	42,1942	27,5348
PP8	50,6960	43,0482	27,5561	42,1905	27,5290
PP9	50,6960	43,0554	27,5629	42,1968	27,5358
PP10	50,6960	43,0518	27,5617	42,1936	27,5346
PP11	50,6959	43,0482	27,5554	42,1905	27,5282
PP12	50,8081	43,1859	24,6468	42,3175	24,6188
PP13	51,2567	43,3602	18,3779	42,4990	18,3303
PP14	52,3603	39,9007	11,1477	39,9397	11,1370
PP19	52,3602	39,8068	11,1477	39,8474	11,1370
PP20	52,3602	39,7755	11,1477	39,8166	11,1370
PIP1	50,6960	43,0554	27,5629	42,1968	27,5358
PS4	12,4318	14,1699	2,4569	0,8716	0,5575
PS5	12,6453	16,5236	2,4762	1,1493	0,5982
PS6	12,7680	15,1552	2,5140	1,1225	0,5683
PS7	11,8891	15,1331	2,3885	1,2132	0,5952
PS8	12,1193	17,4321	2,4357	1,4084	0,6120
PS9	12,2612	16,6854	2,4793	1,4597	0,6497
PS10	13,5018	17,1946	2,6714	1,5963	0,7455
PS11	14,1243	21,6991	2,7649	1,9884	0,7488
PS12	10,7025	12,9607	2,2003	1,4617	0,5759
PS13	9,3088	20,2303	2,0399	1,9079	0,5216
PS14	10,0779	17,5820	2,1382	0,4459	0,3071
PS15	11,5244	22,8618	2,4632	1,2296	0,5658
PS16	11,5371	17,8780	2,4470	1,2613	0,5759
PS17	12,2628	28,2254	2,6155	0,9733	0,7362
PS18	12,5173	37,4052	2,6492	1,7547	0,8107
PS19	11,3029	16,7368	2,3908	0,8619	0,5170
PS20	11,5123	23,4549	2,4794	1,1368	0,5586
PIS1	11,4560	11,5797	2,3046	0,9852	0,5838
PIS2	11,2298	17,6952	2,3759	0,9471	0,5145

TABELA 5.1 - Simulações com troca de pára-raios. CASOS 1, 2.1, 2.2, 3.1 e 3.2.

5.2.2 - SIMULAÇÕES COM TROCA DE PÁRA-RAIOS E COM CARGA NOS CONSUMIDORES

NÚMERO DO POSTE	CASO 1.1 (EM kV)	CASO 4.1 (EM kV)	CASO 4.2 (EM kV)	CASO 5.1 (EM kV)	CASO 5.2 (EM kV)
PP1	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
PP2	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271
PP3	74,2777	74,2773	73,0099	73,9911	73,0000
PP4	50,1714	49,9550	39,4181	49,1322	39,3935
PP7	50,3422	43,0065	27,5606	42,1941	27,5348
PP8	50,3421	43,0027	27,5548	42,1904	27,5290
PP9	50,3422	43,0092	27,5616	42,1967	27,5358
PP10	50,3422	43,0060	27,5604	42,1935	27,5346
PP11	50,3421	43,0027	27,5540	42,1904	27,5282
PP12	50,4444	43,1316	24,6449	42,3174	24,6188
PP13	50,9441	43,2962	18,3744	42,4989	18,3302
PP14	52,0476	39,9493	11,1198	39,9396	11,1256
PP19	52,0476	39,8561	11,1198	39,8472	11,1256
PP20	52,0476	39,8250	11,1198	39,8164	11,1256
PIP1	50,3422	43,0092	27,5616	42,1967	27,5358
PS4	10,8367	14,5931	2,2917	0,8712	0,5137
PS5	10,9920	17,0870	2,3121	1,1596	0,5371
PS6	11,1234	15,8591	2,3283	1,1025	0,5217
PS7	10,4673	15,0043	2,2496	1,2106	0,5470
PS8	10,8332	20,0077	2,3051	1,3431	0,5720
PS9	10,6096	16,7122	2,4030	1,4404	0,6120
PS10	11,8113	18,0424	2,5036	1,5784	0,6930
PS11	12,4037	23,6467	2,5594	1,8614	0,7075
PS12	9,3311	14,4116	2,1173	1,4083	0,5403
PS13	8,5337	21,5650	1,9954	1,9526	0,5003
PS14	9,3471	17,9078	2,0954	0,4460	0,3067
PS15	10,2171	20,8528	2,2046	1,2171	0,5350
PS16	10,2781	19,3345	2,1492	1,2418	0,5454
PS17	10,7447	26,8036	2,2118	0,9338	0,7157
PS18	10,8639	37,6136	2,2521	1,5854	0,7935
PS19	10,1065	18,2887	2,1447	0,7952	0,5009
PS20	10,2313	21,6051	2,1795	1,1615	0,5310
PIS1	9,9651	11,3440	2,2015	0,9833	0,5433
PIS2	10,0690	17,3350	2,1323	0,9490	0,4930

TABELA 5.2 - Simulações com troca de pára-raios e com carga nos consumidores. CASOS 1.1, 4.1, 4.2, 5.1 e 5.2.

5.2.3 - SIMULAÇÕES COM O USO DO VARISTOR E COM TROCA DE PÁRA-RAIOS

5.2.3.1 - SIMULAÇÕES COM PÁRA-RAIOS DE CARBONETO DE SILÍCIO NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR - CASOS XA

NÚMERO DO POSTE	CASO 1A (EM kV)	CASO 2A (EM kV)	CASO 3A (EM kV)	CASO 4A (EM kV)	CASO 5A (EM kV)	CASO 6A (EM kV)
PP1	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
PP2	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271
PP3	74,2774	74,2774	74,2774	74,2774	74,2774	74,2774
PP4	49,9629	49,9632	49,9630	49,9633	49,8544	49,9437
PP7	42,9827	42,9977	42,9632	43,0485	42,6128	42,8155
PP8	42,9798	42,9945	42,9601	43,0445	42,6121	42,8152
PP9	42,9849	43,0000	42,9655	43,0513	42,6135	42,8156
PP10	42,9823	42,9972	42,9628	43,0479	42,6130	42,8155
PP11	42,9798	42,9945	42,9601	43,0445	42,6120	42,8151
PP12	43,0926	43,1115	43,0757	43,1786	42,4169	42,6661
PP13	43,2397	43,2632	43,2234	43,3513	42,3026	42,4843
PP14	39,8864	39,9159	39,9798	39,8916	39,9623	39,9644
PP19	39,7946	39,8238	39,8878	39,7980	39,8747	39,8801
PP20	39,7640	39,7931	39,8571	39,7668	39,8454	39,8520
PIP1	42,9849	43,0000	42,9655	43,0513	42,6135	42,8156
PS4	13,2073	13,5799	14,7314	17,3932	16,2001	16,3674
PS5	0,3509	19,0753	18,1883	19,8870	22,7011	21,2379
PS6	20,3907	0,3468	19,5086	23,9006	18,4846	17,3356
PS7	22,6493	25,4899	12,3566	20,2891	18,2024	18,2561
PS8	29,9788	30,0711	0,3415	24,2472	24,0853	21,8184
PS9	14,6684	15,8225	22,4173	11,6405	21,0818	20,4791
PS10	21,9540	20,3962	21,4435	9,6387	24,0485	23,7977
PS11	29,0542	27,5377	25,9422	0,3361	29,2857	28,1744
PS12	13,1999	14,1072	12,6997	11,0062	15,2664	14,5245
PS13	22,1539	23,0252	19,5055	17,9611	21,0020	19,8089
PS14	18,1137	18,0346	18,2409	17,6678	22,1203	21,0991
PS15	19,3339	19,6768	20,0731	22,1089	0,3518	28,9311
PS16	19,5636	19,3254	19,6882	18,3031	18,0021	20,6425
PS17	26,5266	26,2800	26,7091	27,8484	24,6620	13,6505
PS18	39,8605	39,5407	39,9644	38,0418	30,2108	0,3531
PS19	15,4519	15,2634	15,5844	16,5935	18,3325	19,4924
PS20	18,6956	18,9920	19,4823	22,4936	24,5648	27,9191
PIS1	13,1419	15,6170	10,9841	12,4418	11,9331	12,8086
PIS2	16,5596	16,3644	16,6861	17,4286	14,9479	20,6894

TABELA 5.3 - Simulações com pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador - Casos XA. CASOS 1A, 2A, 3A, 4A, 5A e 6A.

NÚMERO DO POSTE	CASO 7A (EM kV)	CASO 8A (EM kV)	CASO 9A (EM kV)	CASO 10A (EM kV)	CASO 11A (EM kV)	CASO 12A (EM kV)
PP1	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
PP2	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271
PP3	74,2774	74,2774	74,2774	74,2766	74,2774	74,2766
PP4	49,8444	49,9577	49,8765	49,3908	49,7240	49,3099
PP7	42,5959	42,9108	42,7267	41,8675	42,2085	41,6835
PP8	42,5951	42,9105	42,7265	41,8660	42,2063	41,6817
PP9	42,5966	42,9113	42,7271	41,8696	42,2119	41,6866
PP10	42,5960	42,9109	42,7266	41,8680	42,2093	41,6843
PP11	42,5950	42,9105	42,7264	41,8659	42,2063	41,6816
PP12	42,3956	42,9612	42,6217	41,7249	41,8177	41,4765
PP13	42,2699	43,0796	42,7003	41,8270	41,2551	41,5792
PP14	39,9230	39,9367	39,9703	39,8918	39,8912	39,9683
PP19	39,8355	39,8464	39,8821	39,7933	39,8046	39,8684
PP20	39,8063	39,8163	39,8527	39,7605	39,7757	39,8352
PIP1	42,5966	42,9113	42,7271	41,8696	42,2119	41,6866
PS4	16,0499	0,3537	1,9990	15,7336	0,8864	0,3032
PS5	22,2137	4,3872	2,8066	18,9579	0,3289	1,1853
PS6	18,4537	3,4786	3,0857	16,6169	0,3264	0,9457
PS7	18,3605	19,8602	3,0947	18,6931	13,1013	2,1961
PS8	23,8258	29,4255	3,5535	23,8115	0,3432	2,2798
PS9	21,1806	15,6878	1,4340	18,4688	15,2059	2,8909
PS10	24,0437	19,9575	1,9490	29,1967	12,5697	7,6288
PS11	29,4666	27,7292	2,2454	35,4703	0,3442	8,5521
PS12	14,9846	14,7983	13,9833	16,2091	19,5166	15,4594
PS13	20,8226	23,7692	25,6439	24,0851	26,8854	32,9541
PS14	22,2442	18,8196	20,6283	25,5084	26,7063	26,8427
PS15	24,7323	19,3411	27,3770	3,2790	0,3378	4,3121
PS16	19,2684	21,2588	24,2355	1,6666	13,2512	1,8614
PS17	26,5482	28,3595	32,0004	1,9769	12,5992	1,9245
PS18	34,4696	42,1189	45,9125	2,5930	33,9909	2,9388
PS19	16,1250	16,8725	21,5853	2,1236	13,2092	3,0330
PS20	0,3525	19,4548	28,8086	6,0018	0,3353	8,7743
PIS1	12,0273	11,9542	0,3590	10,7599	13,5963	0,3594
PIS2	17,4098	18,0084	22,7713	0,3615	13,3343	0,3674

TABELA 5.4 - Simulações com pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador - Casos XA. CASOS 7A, 8A, 9A, 10A, 11A e 12A.

5.2.3.2 - SIMULAÇÕES COM PÁRA-RAIOS DE CARBONETO DE SILÍCIO NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR E UM VARISTOR DE ÓXIDO DE ZINCO NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR - CASOS XB

PS1	0.7604	0.7347	0.7598	1.0082	0.7604	0.7604
PS4	0.9929	0.8313	0.917	1.201	0.9929	0.9929
PS9	1.355	1.308	1.192	0.7581	1.355	1.355
PS13	1.402	1.336	1.212	0.632	1.402	1.402
PS11	1.423	1.479	1.457	1.086	1.423	1.423
PS12	1.1712	0.975	0.961	0.7581	1.1712	1.1712
PS13	1.7567	1.843	1.579	1.012	1.7567	1.7567
PS14	0.1469	0.2601	0.186	0.4359	0.1469	0.1469
PS2	1.4054	1.1692	1.151	1.1971	1.4054	1.4054
PS15	1.0761	1.095	0.954	0.7581	1.0761	1.0761
PS17	0.9726	0.9713	0.973	0.7581	0.9726	0.9726
PS18	1.279	1.307	1.469	1.5227	1.279	1.279
PS19	0.8174	0.815	0.823	0.7581	0.8174	0.8174
PS20	1.0351	0.916	1.033	0.7581	1.0351	1.0351
PS1	0.7604	0.7347	0.7598	1.0082	0.7604	0.7604
PS2	0.9929	0.8313	0.917	1.201	0.9929	0.9929

TABELA 5-5 - Simulação com para-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador - Casos XB

NÚMERO DO POSTE	CASO 1B (EM kV)	CASO 2B (EM kV)	CASO 3B (EM kV)	CASO 4B (EM kV)	CASO 5B (EM kV)	CASO 6B (EM kV)
PP1	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
PP2	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271
PP3	73,9911	73,9911	73,9911	73,9911	73,9911	73,9911
PP4	49,1322	49,1322	49,1322	49,1322	49,1320	49,1321
PP7	42,1940	42,1940	42,1940	42,1941	42,1937	42,1936
PP8	42,1903	42,1903	42,1903	42,1904	42,1900	42,1899
PP9	42,1967	42,1967	42,1967	42,1967	42,1964	42,1963
PP10	42,1935	42,1935	42,1935	42,1935	42,1932	42,1931
PP11	42,1903	42,1903	42,1903	42,1904	42,1900	42,1899
PP12	42,3173	42,3173	42,3173	42,3174	42,3170	42,3169
PP13	42,4989	42,4989	42,4988	42,4989	42,4985	42,4984
PP14	39,9395	39,9395	39,9395	39,9396	39,9392	39,9388
PP19	39,8471	39,8472	39,8471	39,8472	39,8468	39,8465
PP20	39,8163	39,8164	39,8163	39,8164	39,8160	39,8157
PIP1	42,1967	42,1967	42,1967	42,1967	42,1964	42,1963
PS4	0,6221	0,5993	0,5982	0,8798	0,8573	0,8598
PS5	0,3012	1,0754	0,8367	0,9192	1,1377	1,1438
PS6	1,1288	0,3010	0,8934	0,9798	1,0967	1,0997
PS7	0,7605	0,8357	0,7698	1,0585	1,2031	1,2029
PS8	0,9970	1,0518	0,3017	1,2791	1,3201	1,3201
PS9	1,0957	1,1088	1,1942	0,8861	1,4554	1,4548
PS10	1,3696	1,3306	1,3702	0,6582	1,5689	1,5696
PS11	1,4211	1,4859	1,4599	0,3016	1,7542	1,7564
PS12	1,1712	1,0660	0,9681	0,9255	1,4916	1,4830
PS13	1,7567	1,8043	1,3529	1,4112	2,0269	2,0126
PS14	0,4460	0,4460	0,4460	0,4460	0,4463	0,4463
PS15	1,1064	1,1062	1,1833	1,1671	0,3010	0,5863
PS16	1,0361	1,0365	1,0954	1,1948	0,6619	0,4631
PS17	0,9776	0,9773	0,9775	0,9762	0,6645	0,4557
PS18	1,3765	1,4097	1,4480	1,3232	0,9260	0,3006
PS19	0,8174	0,8150	0,8275	0,7906	0,4538	0,5250
PS20	1,0551	1,0558	1,0557	1,0567	0,7949	0,5589
PIS1	0,7499	0,7858	0,7419	0,7165	0,9821	0,9833
PIS2	0,8035	0,8002	0,8217	0,7900	0,4623	0,4621

TABELA 5.5 - Simulações com pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador - Casos XB. CASOS 1B, 2B, 3B, 4B, 5B e 6B.

NÚMERO DO POSTE	CASO 7B (EM kV)	CASO 8B (EM kV)	CASO 9B (EM kV)	CASO 10B (EM kV)	CASO 11B (EM kV)	CASO 12B (EM kV)
PP1	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
PP2	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271
PP3	73,9911	73,9911	73,9911	73,9910	73,9911	73,9910
PP4	49,1320	49,1322	49,1322	49,1318	49,1317	49,1317
PP7	42,1937	42,1940	42,1939	42,1937	42,1933	42,1934
PP8	42,1900	42,1903	42,1902	42,1900	42,1896	42,1897
PP9	42,1964	42,1967	42,1965	42,1964	42,1959	42,1960
PP10	42,1932	42,1935	42,1933	42,1932	42,1927	42,1928
PP11	42,1900	42,1903	42,1902	42,1900	42,1896	42,1897
PP12	42,3170	42,3173	42,3172	42,3171	42,3166	42,3168
PP13	42,4985	42,4988	42,4986	42,4987	42,4980	42,4982
PP14	39,9392	39,9394	39,9392	39,9394	39,9387	39,9389
PP19	39,8468	39,8471	39,8469	39,8470	39,8463	39,8465
PP20	39,8160	39,8163	39,8161	39,8162	39,8155	39,8157
PIP1	42,1964	42,1967	42,1965	42,1964	42,1959	42,1960
PS4	0,8587	0,3013	0,4012	0,8581	0,3106	0,3003
PS5	1,1396	0,7662	0,6693	1,1364	0,3000	0,4584
PS6	1,0999	0,5308	0,6557	1,0994	0,3000	0,3634
PS7	1,2038	0,8119	0,6652	1,2066	0,4108	0,6530
PS8	1,3197	1,0079	0,9840	1,3193	0,3005	0,9487
PS9	1,4559	1,1078	1,0150	1,4515	0,4055	0,8987
PS10	1,5690	1,2110	1,0076	1,5672	0,4067	0,9210
PS11	1,7648	1,4075	1,0327	1,6865	0,3004	1,0158
PS12	1,4979	1,3379	1,2697	1,5046	0,8416	1,1945
PS13	2,0367	1,7096	1,6345	2,0351	0,8880	1,5302
PS14	0,4463	0,4461	0,4461	0,4465	0,4464	0,4468
PS15	0,9430	1,1642	1,2044	0,7148	0,3002	0,7306
PS16	0,6517	1,0343	1,0445	0,5787	0,3289	0,5768
PS17	0,6519	0,9790	0,9800	0,6107	0,3220	0,4981
PS18	1,0313	1,4254	1,4270	0,7363	0,3001	0,7412
PS19	0,4837	0,8235	0,8158	0,3805	0,3270	0,3761
PS20	0,3010	1,0523	1,0467	0,6364	0,3002	0,6528
PIS1	0,9824	0,7228	0,3043	0,9820	0,4048	0,3032
PIS2	0,4759	0,8085	0,8141	0,3020	0,3274	0,3020

TABELA 5.6 - Simulações com para-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador - Casos XB.

CASOS 7B, 8B, 9B, 10B, 11B e 12B.

5.2.3.3 - SIMULAÇÕES COM PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR - CASOS XC

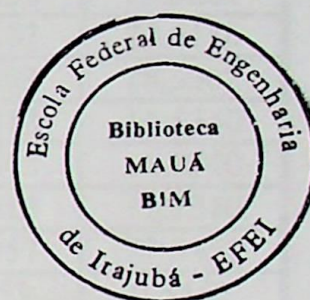
NÚMERO DO POSTE	CASO 1C (EM kV)	CASO 2C (EM kV)	CASO 3C (EM kV)	CASO 4C (EM kV)	CASO 5C (EM kV)	CASO 6C (EM kV)
PP1	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
PP2	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271
PP3	73,0099	73,0099	73,0099	73,0099	73,0099	73,0099
PP4	39,4187	39,4187	39,4187	39,4187	39,4127	39,4165
PP7	27,5608	27,5610	27,5597	27,5619	27,5456	27,5533
PP8	27,5550	27,5552	27,5540	27,5561	27,5398	27,5475
PP9	27,5618	27,5620	27,5607	27,5629	27,5466	27,5541
PP10	27,5606	27,5608	27,5595	27,5617	27,5455	27,5531
PP11	27,5542	27,5545	27,5532	27,5554	27,5391	27,5467
PP12	24,6454	24,6454	24,6440	24,6468	24,6251	24,6287
PP13	18,3751	18,3749	18,3763	18,3778	18,3444	18,3427
PP14	11,1099	11,1042	11,1050	11,0936	11,1176	11,1342
PP19	11,1099	11,1042	11,1050	11,0936	11,1176	11,1342
PP20	11,1099	11,1042	11,1050	11,0936	11,1176	11,1342
PIP1	27,5618	27,5620	27,5607	27,5629	27,5466	27,5541
PS4	0,8240	0,9487	1,3248	1,6896	1,5397	1,7093
PS5	0,3086	1,0166	1,3674	1,6992	1,5881	1,7748
PS6	0,9166	0,3082	1,3831	1,7333	1,5892	1,7766
PS7	1,3254	1,3814	0,9350	1,6908	1,5647	1,7126
PS8	1,4633	1,5600	0,3086	1,7682	1,6000	1,7594
PS9	1,3563	1,4252	1,3966	1,3459	1,6088	1,7625
PS10	1,5395	1,6052	1,6066	0,9780	1,8383	2,0349
PS11	1,6154	1,7034	1,7005	0,3069	1,9974	2,1737
PS12	1,2591	1,3375	1,3037	1,5333	1,3630	1,4847
PS13	1,3440	1,4074	1,4007	1,6067	1,1340	1,2321
PS14	1,5175	1,5309	1,5054	1,5883	1,0752	1,1919
PS15	1,7551	1,7367	1,7569	1,5123	0,3059	1,3625
PS16	1,7934	1,7604	1,7866	1,5068	0,9242	1,0695
PS17	1,9426	1,8989	1,9422	1,6472	1,0930	0,9228
PS18	1,9972	1,9254	1,9831	1,6712	1,2209	0,3055
PS19	1,7161	1,7143	1,7240	1,4834	0,8298	1,1770
PS20	1,7500	1,7504	1,7650	1,5262	1,0410	1,3402
PIS1	1,2221	1,2946	1,2383	1,5136	1,4572	1,5929
PIS2	1,7058	1,7044	1,7157	1,4680	0,8361	1,1362

TABELA 5.7 - Simulações com pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador - Casos XC. CASOS 1C, 2C, 3C, 4C, 5C e 6C.

NÚMERO DO POSTE	CASO 7C (EM kV)	CASO 8C (EM kV)	CASO 9C (EM kV)	CASO 10C (EM kV)	CASO 11C (EM kV)	CASO 12C (EM kV)
PP1	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
PP2	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271
PP3	73,0099	73,0099	73,0099	73,0098	73,0099	73,0098
PP4	39,4125	39,4182	39,4176	39,3943	39,4056	39,3931
PP7	27,5452	27,5603	27,5534	27,5204	27,5262	27,5136
PP8	27,5394	27,5545	27,5476	27,5145	27,5203	27,5078
PP9	27,5461	27,5613	27,5544	27,5212	27,5269	27,5144
PP10	27,5450	27,5601	27,5532	27,5202	27,5260	27,5135
PP11	27,5386	27,5537	27,5468	27,5137	27,5195	27,5070
PP12	24,6243	24,6437	24,6366	24,5961	24,5981	24,5888
PP13	18,3438	18,3690	18,3638	18,3186	18,3125	18,3121
PP14	11,1185	11,1602	11,2051	11,1289	11,1490	11,1595
PP19	11,1185	11,1602	11,2051	11,1289	11,1490	11,1595
PP20	11,1185	11,1602	11,2051	11,1289	11,1490	11,1595
PIP1	27,5461	27,5613	27,5544	27,5212	27,5269	27,5144
PS4	1,5209	0,3097	1,0679	0,9767	0,4088	0,3007
PS5	1,5648	0,5206	1,3143	1,0231	0,3006	0,3915
PS6	1,5653	0,7479	1,3766	1,0289	0,3005	0,4007
PS7	1,5458	0,8806	0,8589	0,9295	0,4344	0,4199
PS8	1,5752	0,9372	1,2121	0,9343	0,3009	0,5409
PS9	1,5903	0,9763	0,6179	1,0558	0,5241	0,4263
PS10	1,8244	1,1493	1,1082	1,2995	0,4746	0,5861
PS11	1,9792	1,2063	1,1964	1,3766	0,3009	0,6025
PS12	1,3467	0,9525	0,4817	0,7998	0,5427	0,3794
PS13	1,1232	1,1290	0,8177	0,6676	0,6278	0,5303
PS14	1,0464	1,4573	1,2429	0,6709	0,7436	0,6636
PS15	1,0050	1,5945	1,6171	0,5483	0,3019	0,5352
PS16	0,9083	1,6062	1,5701	0,4663	0,5690	0,3810
PS17	1,0825	1,7183	1,6984	0,7854	0,5098	0,5499
PS18	1,2145	1,7776	1,8049	0,9414	0,3012	0,6023
PS19	0,8406	1,5867	1,5413	0,3405	0,5291	0,3401
PS20	0,3060	1,6007	1,5845	0,5088	0,3020	0,5074
PIS1	1,4405	0,8452	0,3094	0,8626	0,5177	0,3024
PIS2	0,8517	1,5752	1,5190	0,3067	0,5657	0,3061

TABELA 5.8 - Simulações com para-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador
- Casos XC. CASOS 7C, 8C, 9C, 10C, 11C e 12C.

5.2.3.4 - SIMULAÇÕES COM PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR E UM VARISTOR DE ÓXIDO DE ZINCO NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR - CASOS XD



NÚMERO DO POSTE	CASO 1D (EM kV)	CASO 2D (EM kV)	CASO 3D (EM kV)	CASO 4D (EM kV)	CASO 5D (EM kV)	CASO 6D (EM kV)
PP1	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
PP2	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271
PP3	73,0000	73,0000	73,0000	73,0000	73,0000	73,0000
PP4	39,3935	39,3935	39,3935	39,3935	39,3934	39,3934
PP7	27,5348	27,5348	27,5347	27,5348	27,5347	27,5347
PP8	27,5290	27,5290	27,5290	27,5290	27,5289	27,5289
PP9	27,5358	27,5358	27,5358	27,5358	27,5357	27,5357
PP10	27,5345	27,5345	27,5345	27,5346	27,5345	27,5345
PP11	27,5282	27,5282	27,5282	27,5282	27,5282	27,5281
PP12	24,6188	24,6188	24,6188	24,6188	24,6187	24,6186
PP13	18,3302	18,3302	18,3303	18,3303	18,3303	18,3302
PP14	11,1286	11,1280	11,1275	11,1316	11,1313	11,1340
PP19	11,1286	11,1280	11,1275	11,1316	11,1313	11,1340
PP20	11,1286	11,1280	11,1275	11,1316	11,1313	11,1340
PIP1	27,5358	27,5358	27,5358	27,5358	27,5357	27,5357
PS4	0,3935	0,3916	0,4422	0,4837	0,5553	0,5552
PS5	0,3008	0,4271	0,4661	0,4894	0,5958	0,5956
PS6	0,4239	0,3008	0,4528	0,5290	0,5658	0,5656
PS7	0,4472	0,4587	0,4249	0,4969	0,5933	0,5931
PS8	0,4766	0,4764	0,3008	0,5029	0,6105	0,6103
PS9	0,5043	0,5129	0,5003	0,4638	0,6483	0,6485
PS10	0,5762	0,5757	0,6061	0,4139	0,7441	0,7443
PS11	0,6226	0,6217	0,6499	0,3006	0,7480	0,7484
PS12	0,4388	0,4485	0,4259	0,4397	0,5743	0,5744
PS13	0,4347	0,4441	0,4172	0,4283	0,5203	0,5205
PS14	0,3066	0,3067	0,3066	0,3068	0,3053	0,3049
PS15	0,5266	0,5266	0,5266	0,5266	0,3007	0,5128
PS16	0,5623	0,5623	0,5623	0,5623	0,4556	0,4402
PS17	0,7361	0,7361	0,7361	0,7361	0,5883	0,4348
PS18	0,8107	0,8107	0,8107	0,8107	0,6683	0,3005
PS19	0,5094	0,5094	0,5094	0,5094	0,4318	0,4459
PS20	0,5405	0,5405	0,5405	0,5405	0,4695	0,4889
PIS1	0,4310	0,4376	0,4226	0,4569	0,5820	0,5820
PIS2	0,5003	0,5003	0,5003	0,5003	0,4225	0,4411

TABELA 5.9 - Simulações com pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador - Casos XD. CASOS 1D, 2D, 3D, 4D, 5D e 6D.

NÚMERO DO POSTE	CASO 7D (EM kV)	CASO 8D (EM kV)	CASO 9D (EM kV)	CASO 10D (EM kV)	CASO 11D (EM kV)	CASO 12D (EM kV)
PP1	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
PP2	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271	93,0271
PP3	73,0000	73,0000	73,0000	73,0000	73,0000	73,0000
PP4	39,3934	39,3935	39,3935	39,3934	39,3934	39,3933
PP7	27,5347	27,5348	27,5348	27,5346	27,5346	27,5346
PP8	27,5289	27,5290	27,5290	27,5289	27,5288	27,5289
PP9	27,5357	27,5358	27,5358	27,5357	27,5356	27,5357
PP10	27,5345	27,5345	27,5345	27,5344	27,5344	27,5344
PP11	27,5282	27,5282	27,5282	27,5281	27,5281	27,5281
PP12	24,6187	24,6188	24,6188	24,6187	24,6187	24,6187
PP13	18,3303	18,3302	18,3302	18,3303	18,3303	18,3302
PP14	11,1310	11,1337	11,1351	11,1351	11,1402	11,1373
PP19	11,1310	11,1337	11,1351	11,1351	11,1402	11,1373
PP20	11,1310	11,1337	11,1351	11,1351	11,1402	11,1373
PIP1	27,5357	27,5358	27,5358	27,5357	27,5356	27,5357
PS4	0,5553	0,3012	0,3819	0,5537	0,2715	0,3002
PS5	0,5958	0,3495	0,3982	0,5943	0,2720	0,3163
PS6	0,5658	0,3605	0,4253	0,5642	0,2716	0,3433
PS7	0,5933	0,3959	0,3533	0,5918	0,2757	0,3498
PS8	0,6104	0,4168	0,3763	0,6089	0,2762	0,3660
PS9	0,6483	0,4559	0,4082	0,6471	0,2760	0,3918
PS10	0,7441	0,5376	0,4863	0,7426	0,2773	0,4586
PS11	0,7480	0,5963	0,5963	0,7470	0,2780	0,5070
PS12	0,5743	0,41933	0,3214	0,5732	0,2782	0,3212
PS13	0,5203	0,4227	0,3429	0,5196	0,2893	0,3499
PS14	0,3053	0,3065	0,3061	0,3045	0,3034	0,3033
PS15	0,5068	0,5266	0,5265	0,4152	0,3000	0,4152
PS16	0,4612	0,5623	0,5622	0,3606	0,3052	0,3606
PS17	0,5900	0,7361	0,7360	0,4908	0,3058	0,4908
PS18	0,6680	0,8107	0,8107	0,5999	0,3000	0,5999
PS19	0,4281	0,5093	0,5093	0,3283	0,3046	0,3282
PS20	0,3007	0,5405	0,5404	0,3912	0,3000	0,3912
PIS1	0,5819	0,4027	0,3015	0,5807	0,2749	0,3009
PIS2	0,4284	0,5003	0,5002	0,3019	0,3049	0,3014

TABELA 5.10 - Simulações com pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador - Casos XD. CASOS 7D, 8D, 9D, 10D, 11D e 12D.

5.3 - GRÁFICOS

Os gráficos apresentados em seguida foram divididos da mesma maneira que as tabelas de tensão, sendo que os principais gráficos são aqueles do primário e do secundário do transformador, e em alguns pontos específicos da linha de distribuição secundária.

5.3.1 - GRÁFICOS DAS SIMULAÇÕES COM TROCA DE PÁRA-RAIOS E COM CARGA

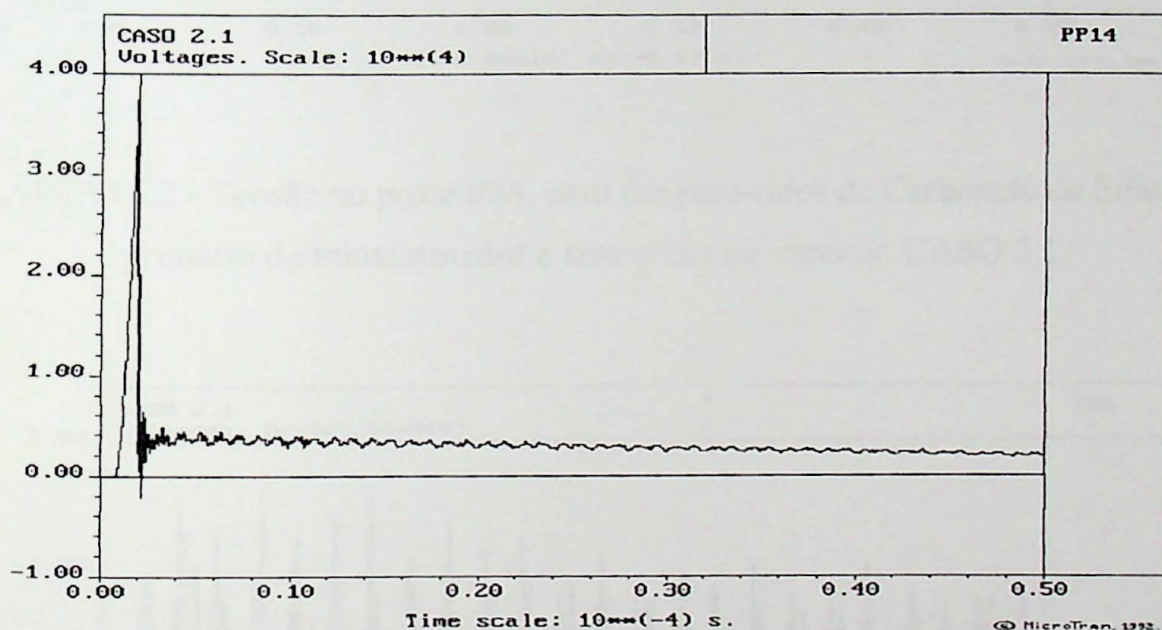


GRÁFICO 5.1 - Tensão no primário do transformador (PP14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

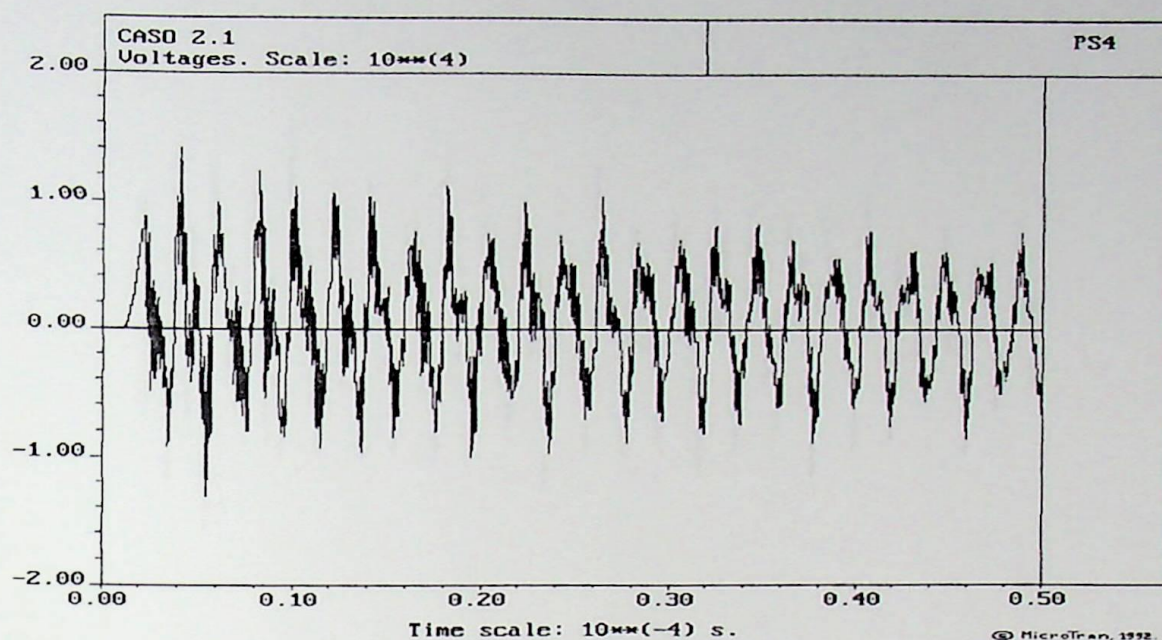


GRÁFICO 5.2 - Tensão no poste PS4, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

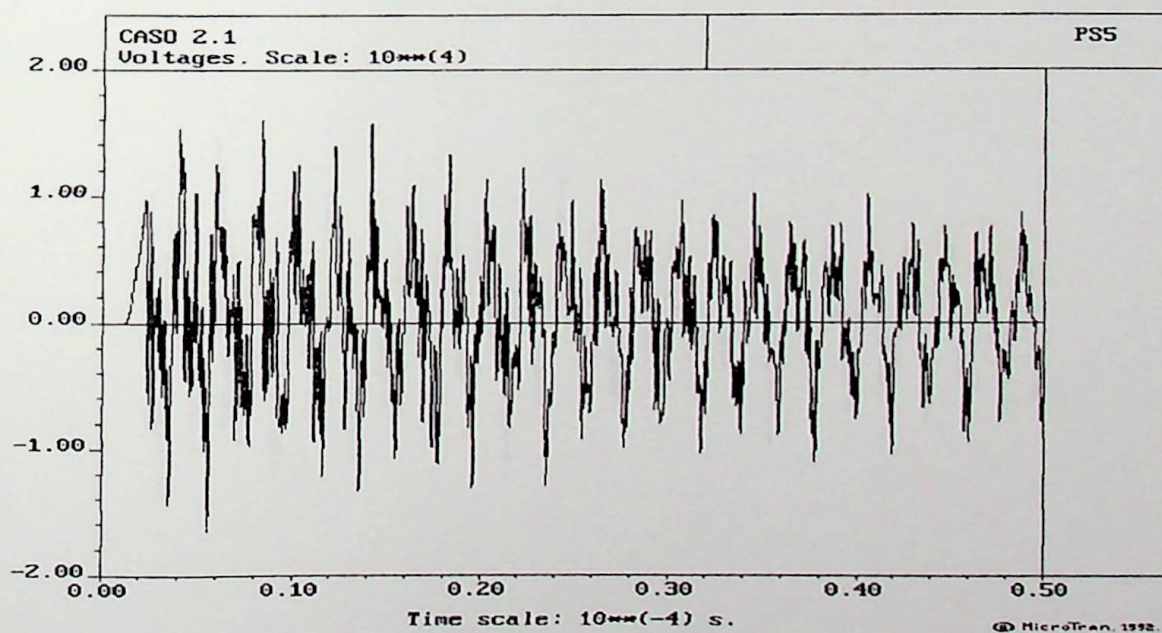


GRÁFICO 5.3 - Tensão no poste PS5, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

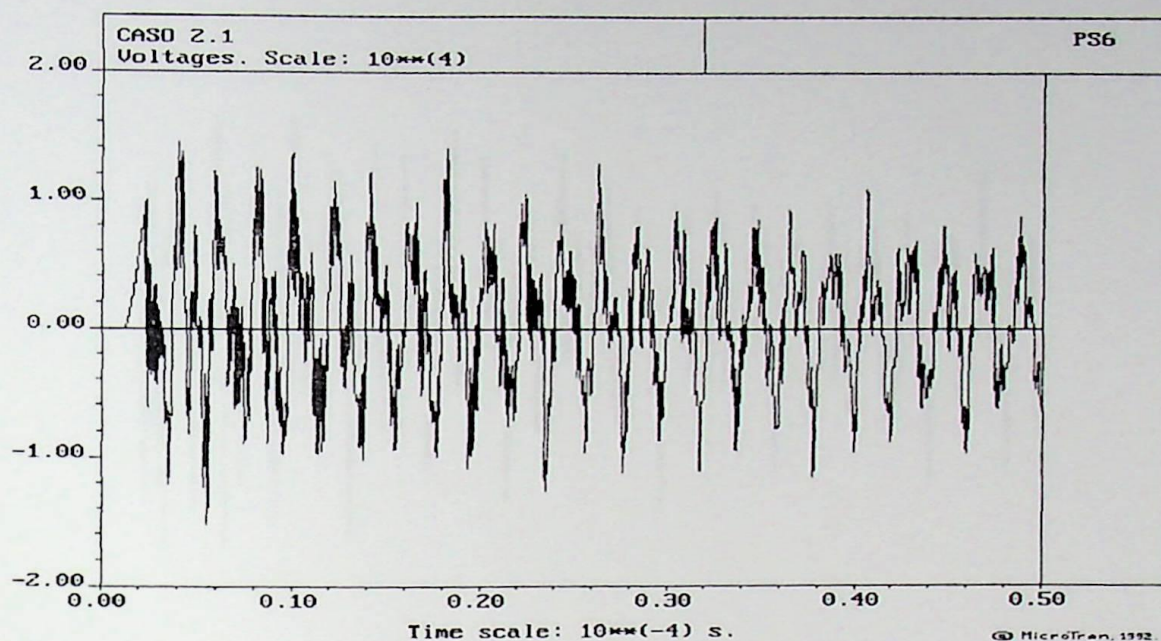


GRÁFICO 5.4 - Tensão no poste PS6, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

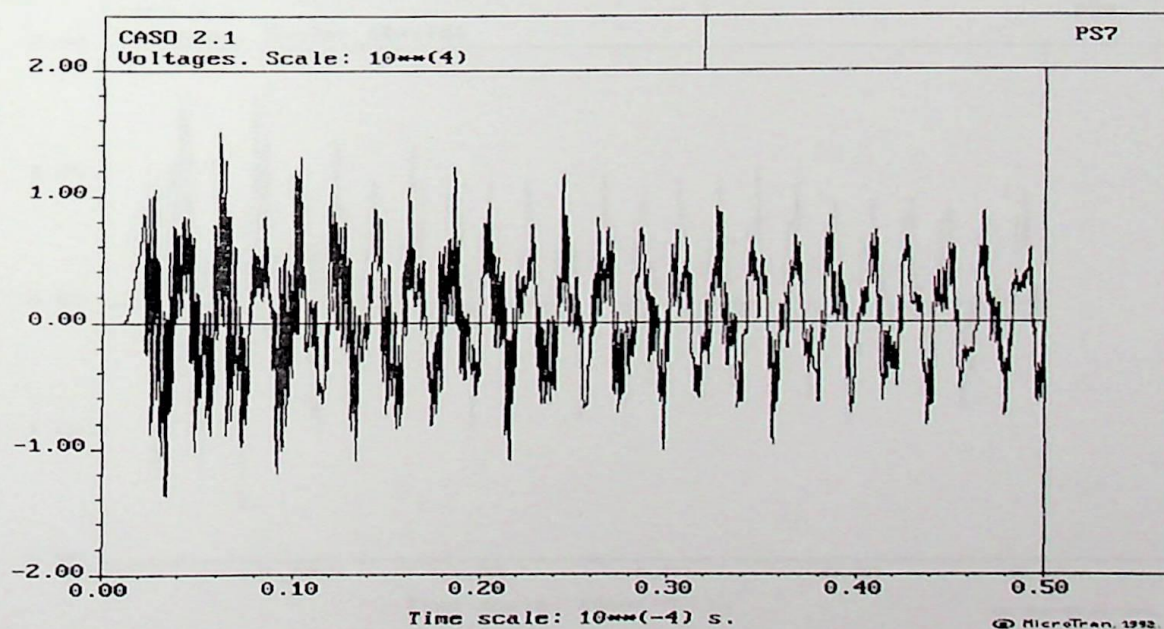


GRÁFICO 5.5 - Tensão no poste PS7, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

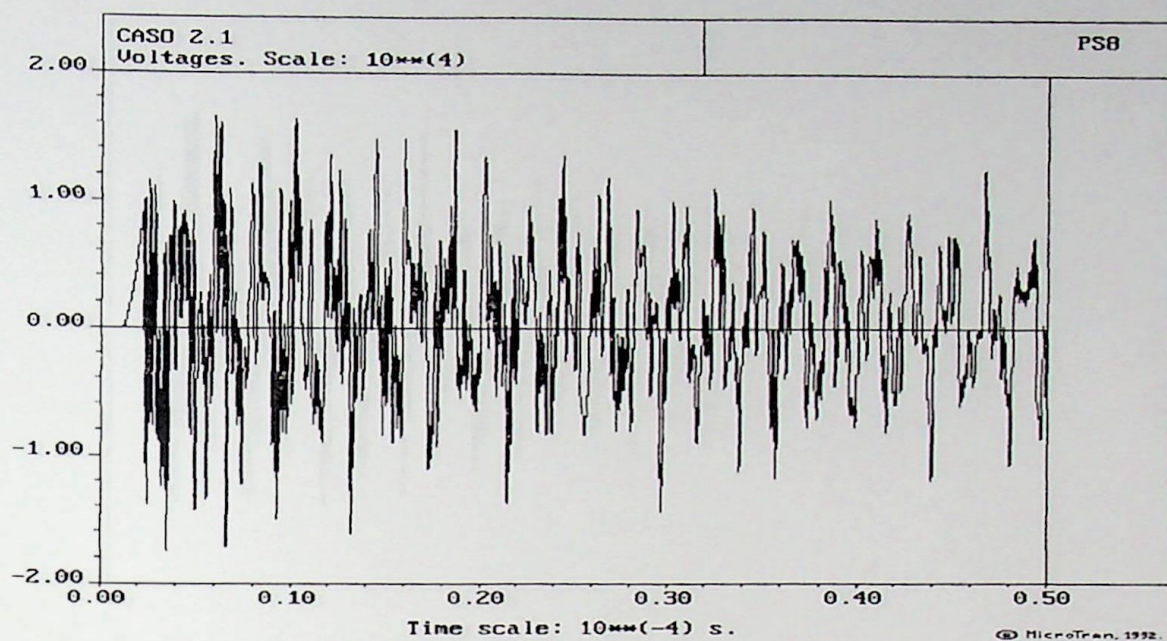


GRÁFICO 5.6 - Tensão no poste PS8, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

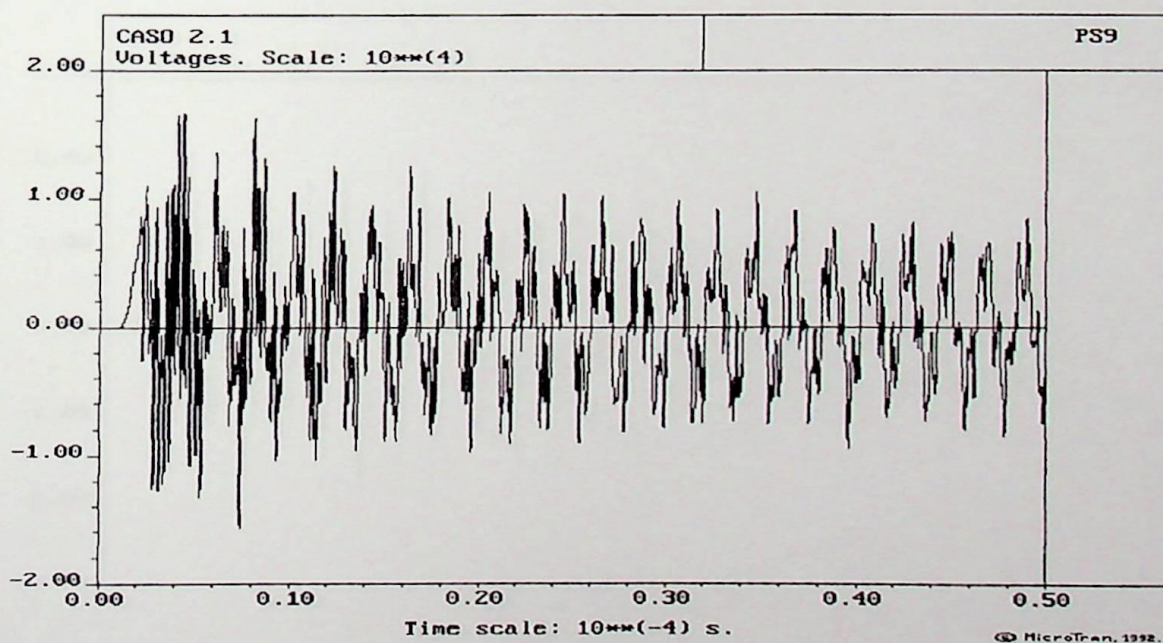


GRÁFICO 5.7 - Tensão no poste PS9, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

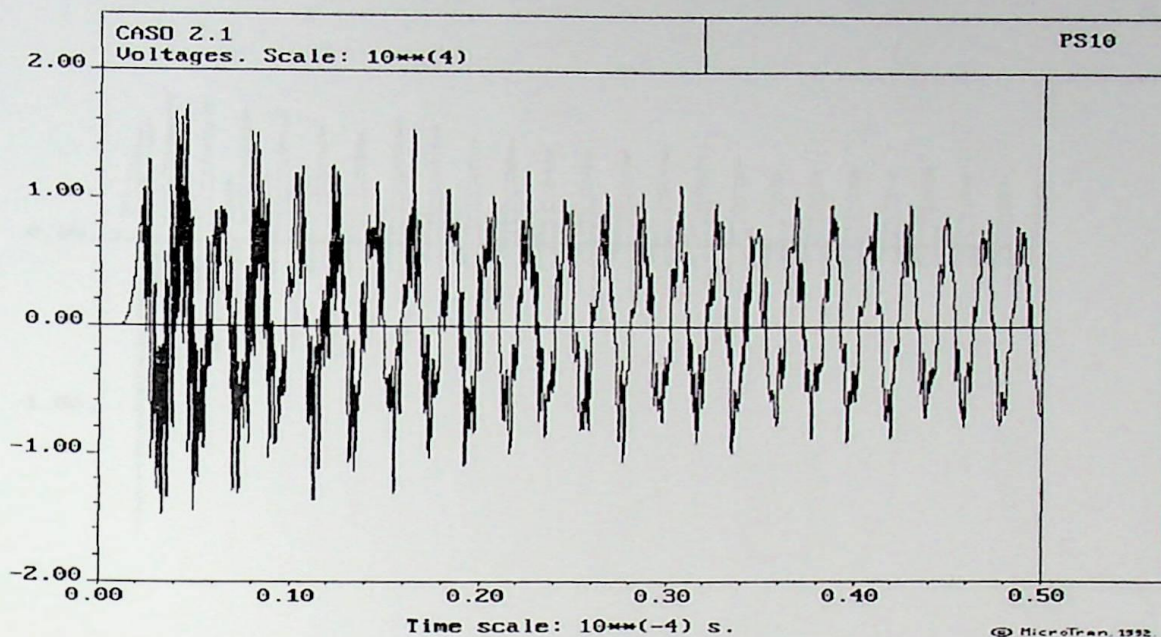


GRÁFICO 5.8 - Tensão no poste PS10, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

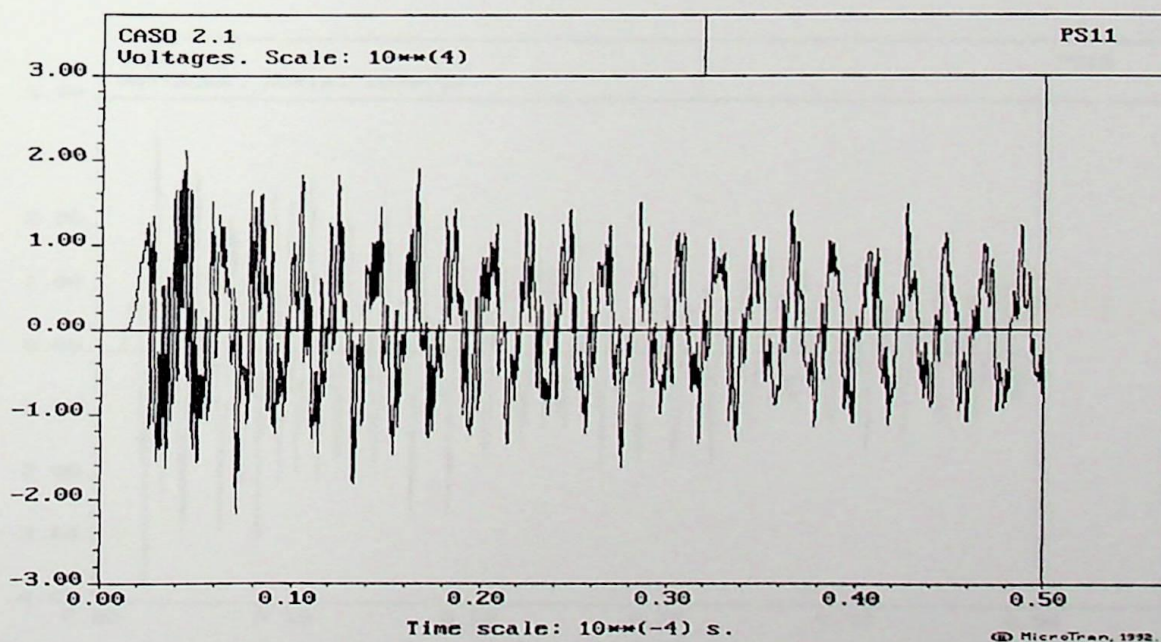


GRÁFICO 5.9 - Tensão no poste PS11, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

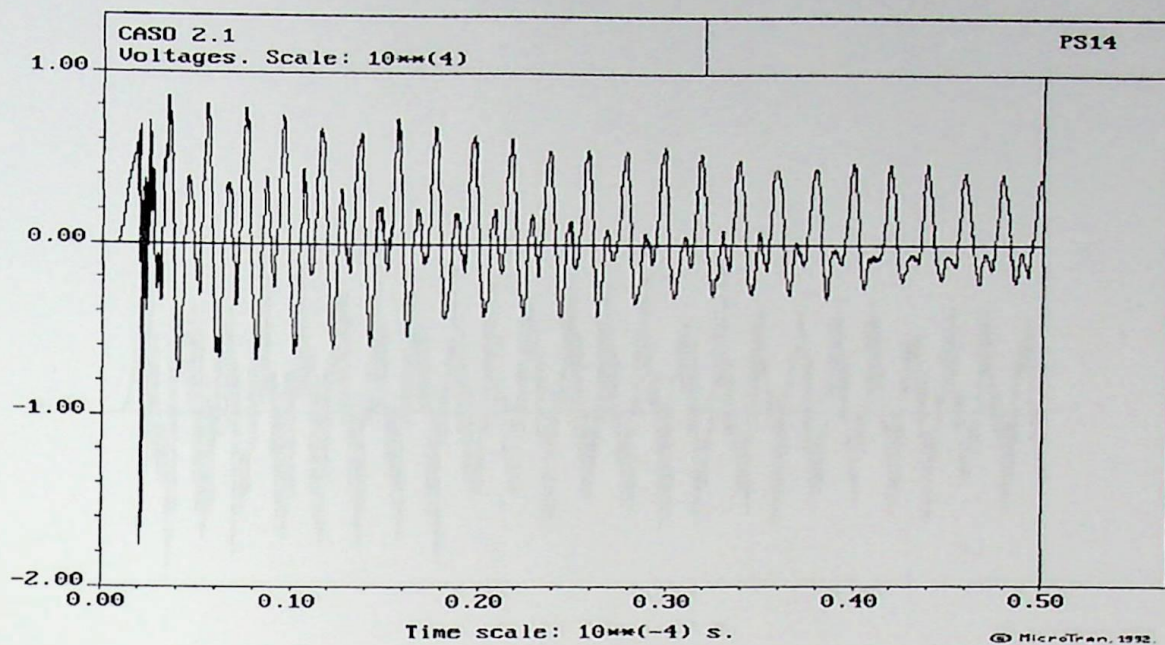


GRÁFICO 5.10 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

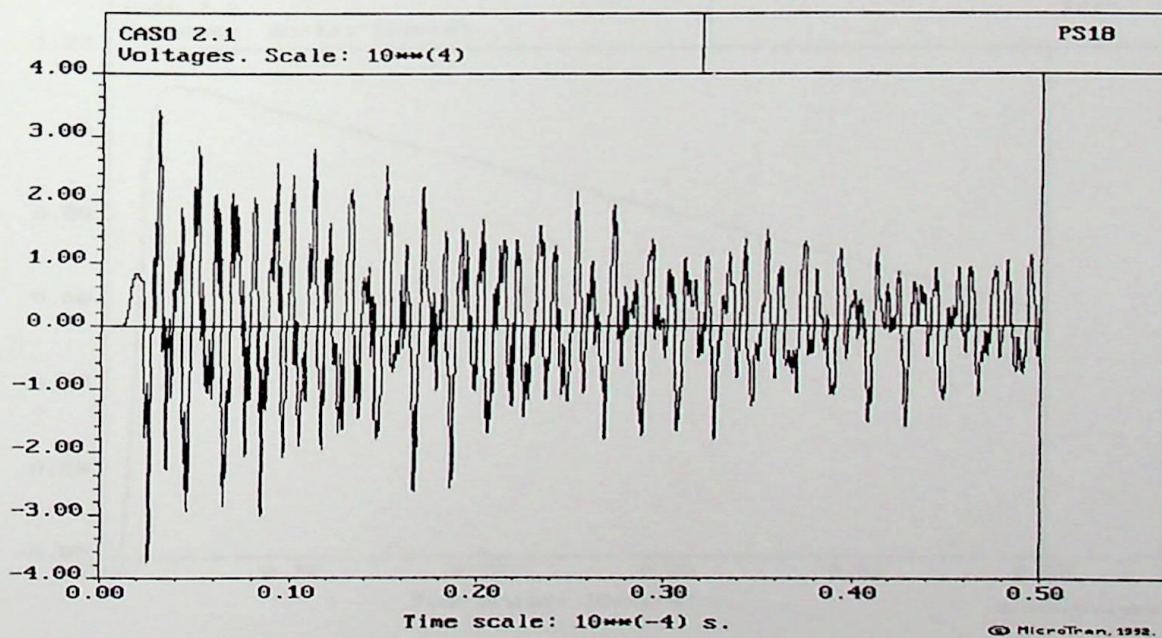


GRÁFICO 5.11 - Tensão no poste PS18, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

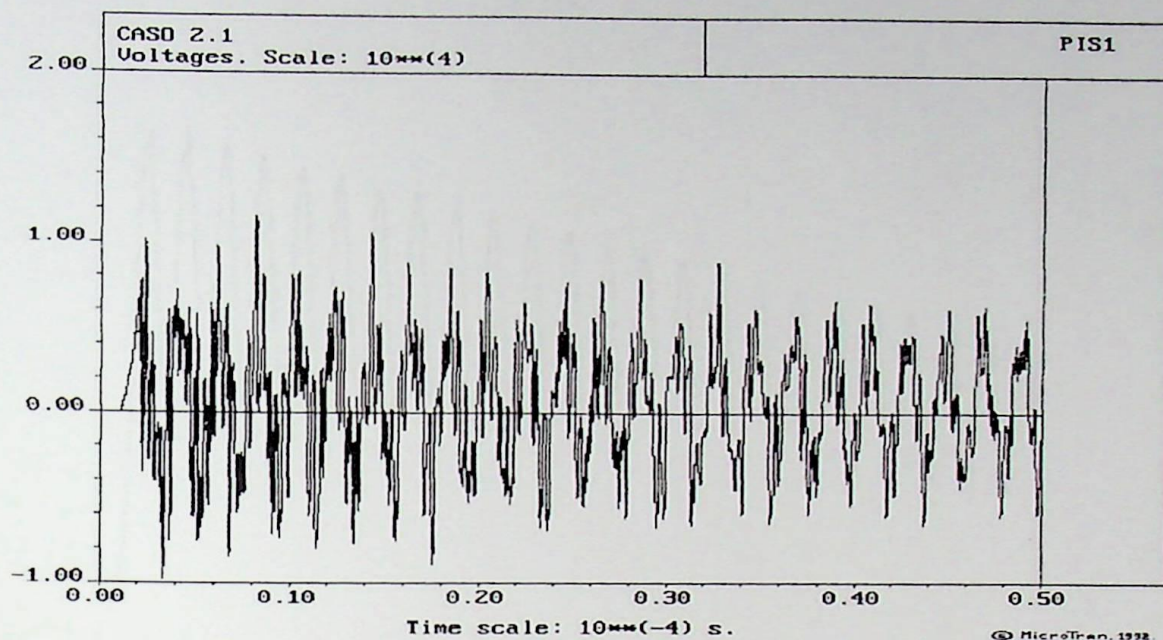


GRÁFICO 5.12 - Tensão no Ponto de interseção PIS1, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.1.

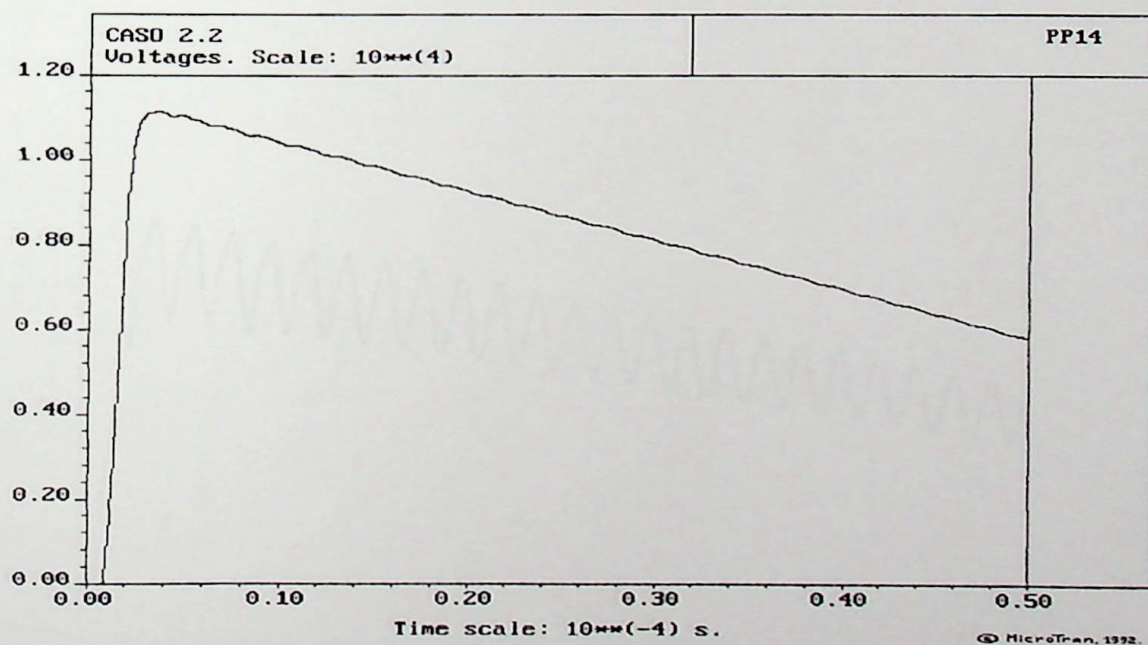


GRÁFICO 5.13 - Tensão no primário do transformador (PP14), com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.2.

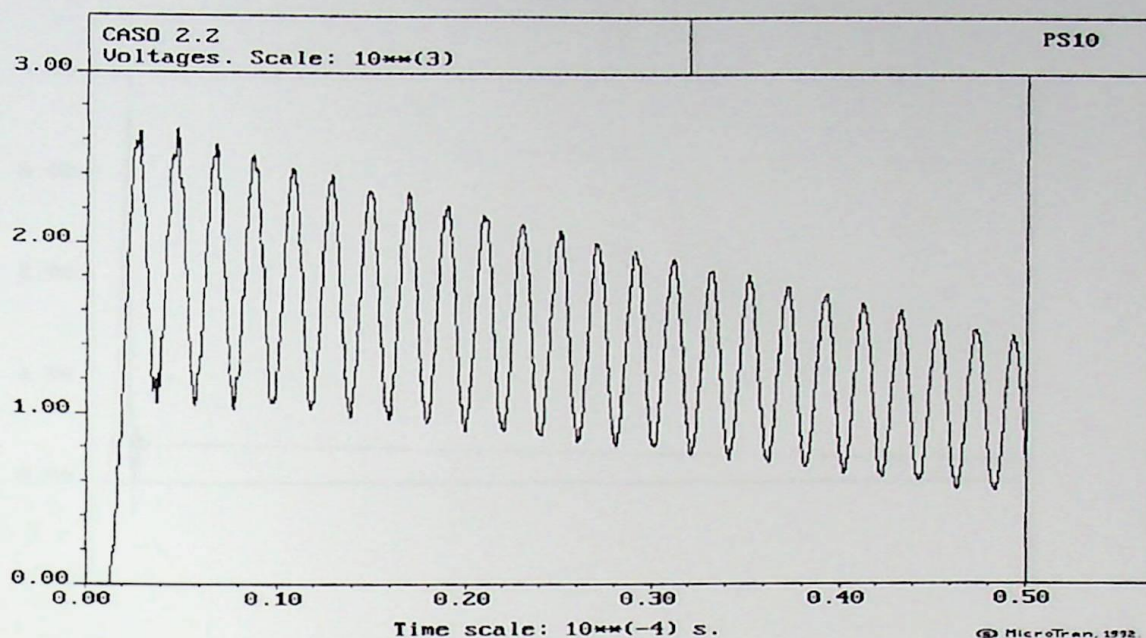


GRÁFICO 5.14 - Tensão no poste PS10, com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.2.

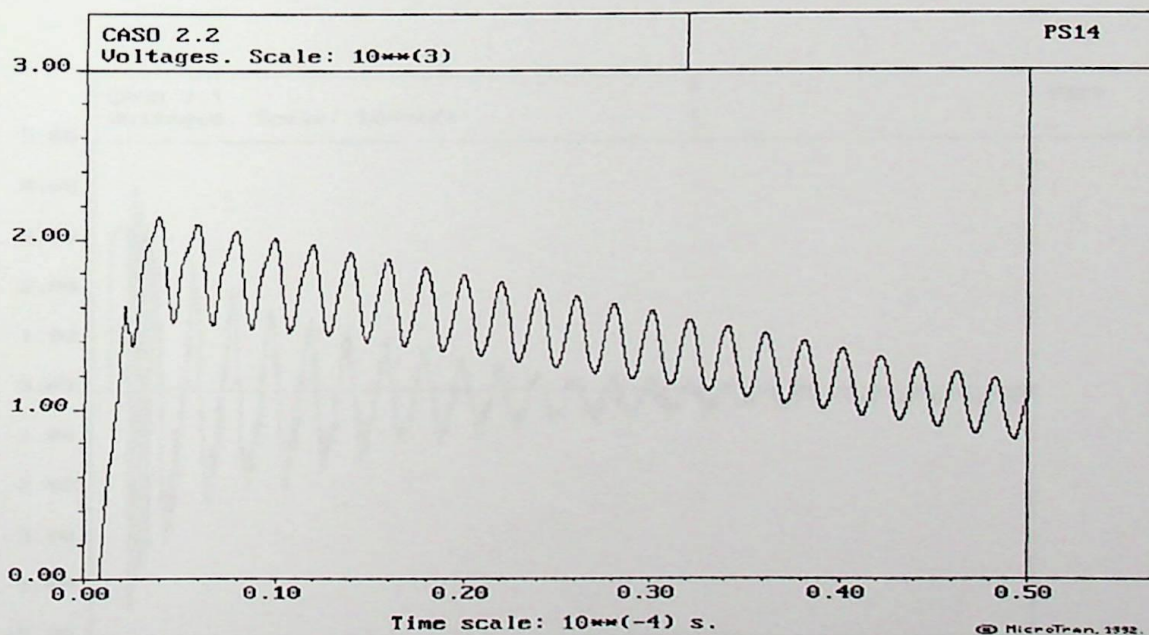


GRÁFICO 5.15 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e sem o uso do varistor. CASO 2.2.

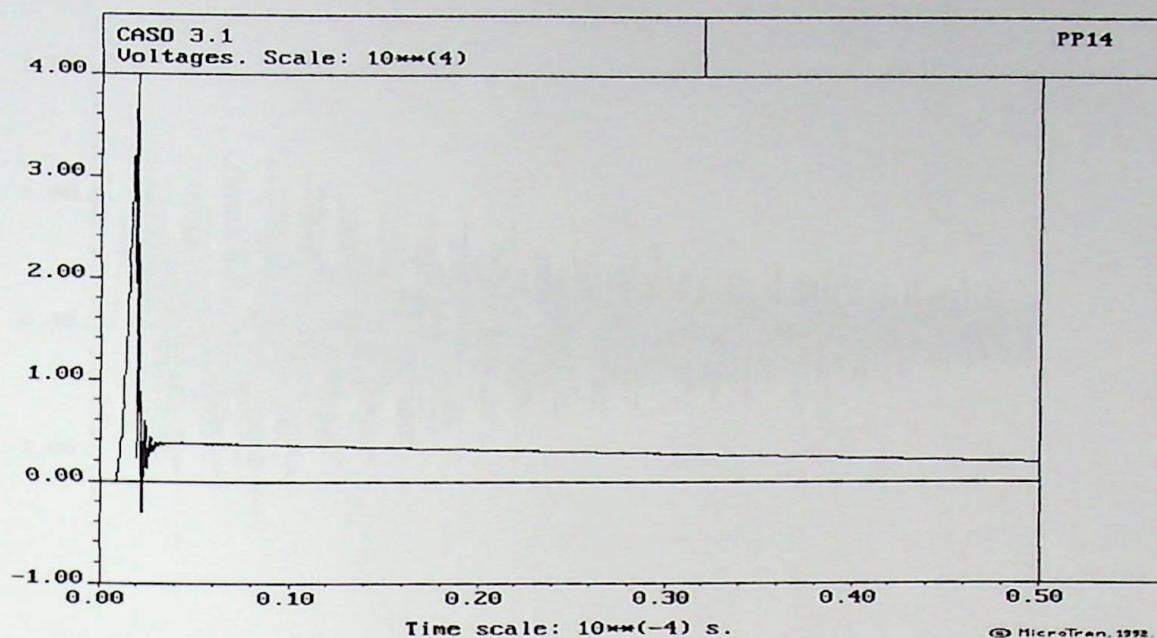


GRÁFICO 5.16 - Tensão no primário do transformador (PP14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador. CASO 3.1.

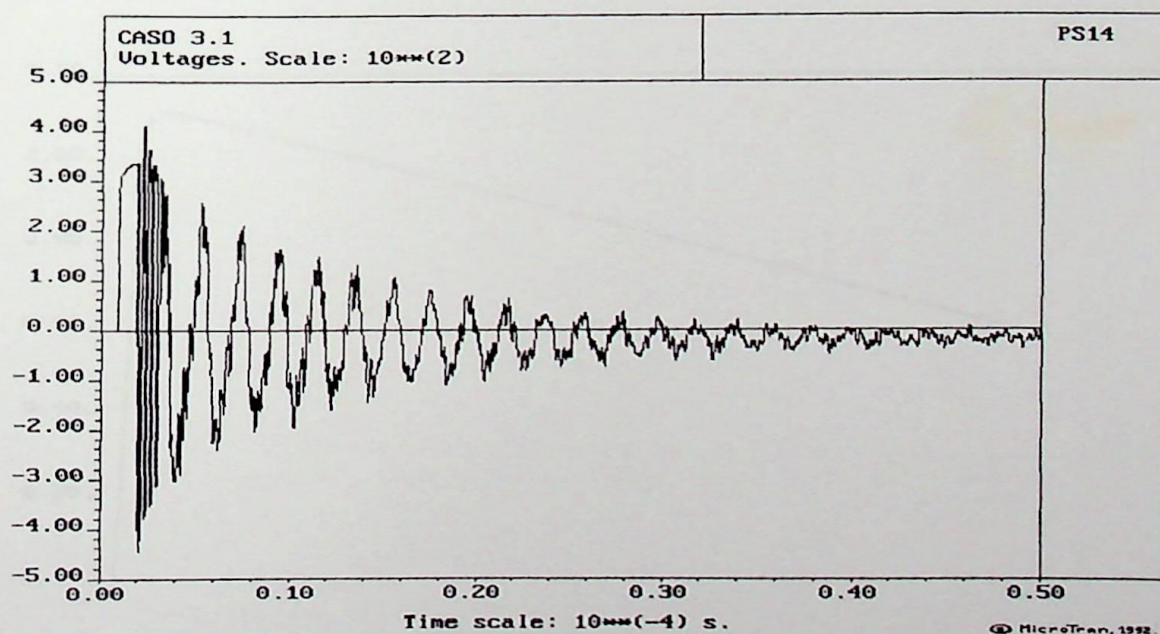


GRÁFICO 5.17 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador. CASO 3.1.

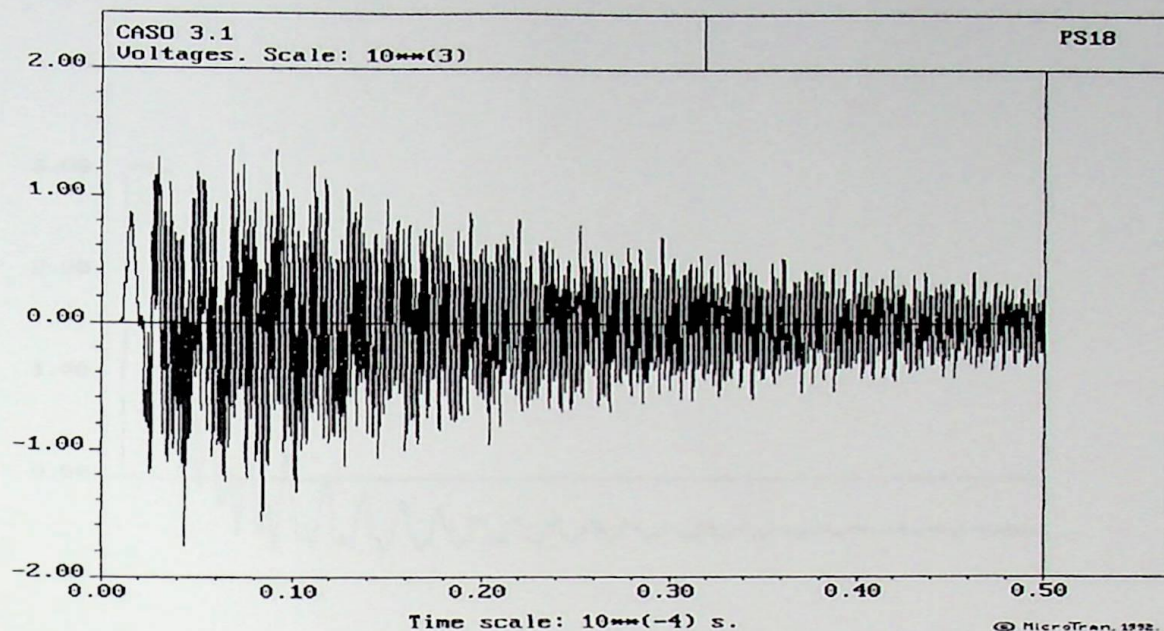


GRÁFICO 5.18 - Tensão no poste PS18, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador.

CASO 3.1.

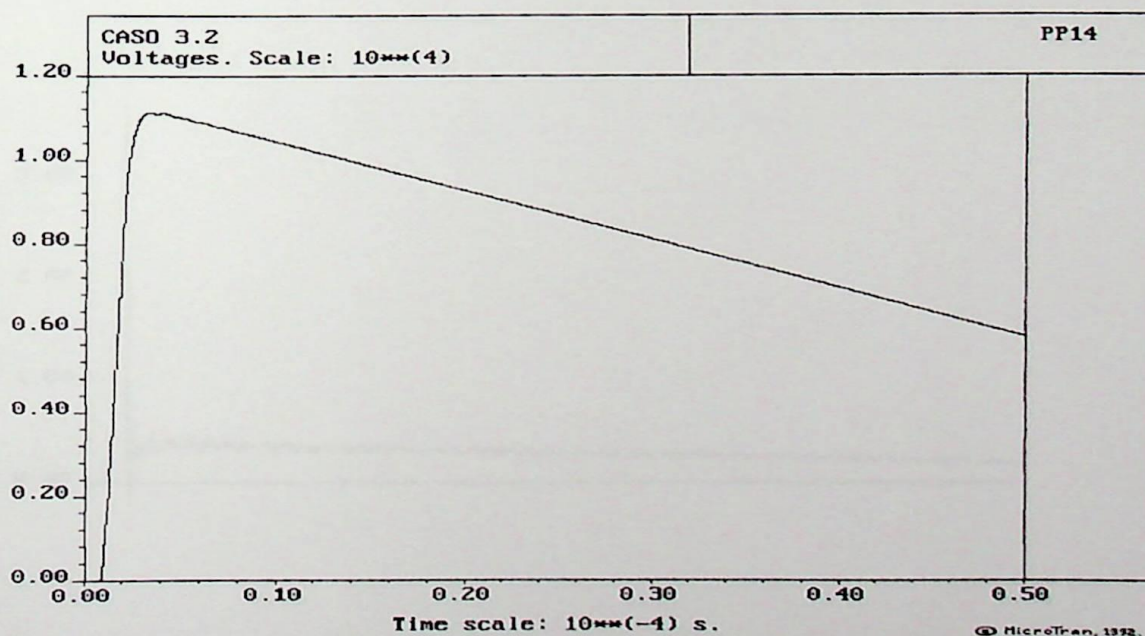


GRÁFICO 5.19 - Tensão no primário do transformador (PP14), com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador. CASO 3.2.

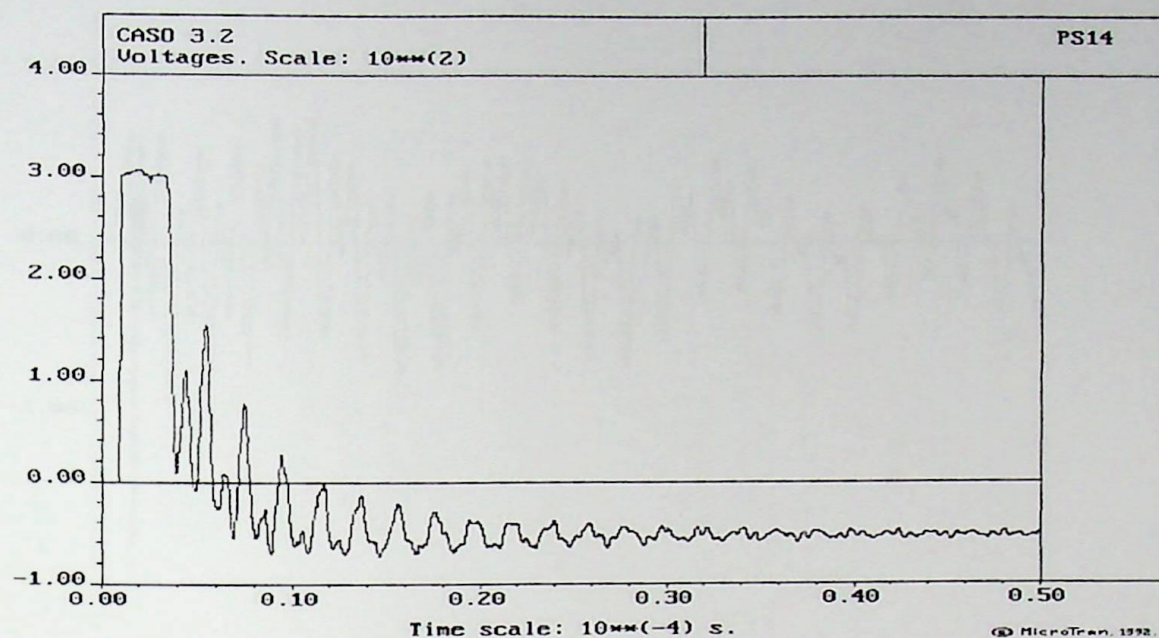


GRÁFICO 5.20 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador. CASO 3.2.

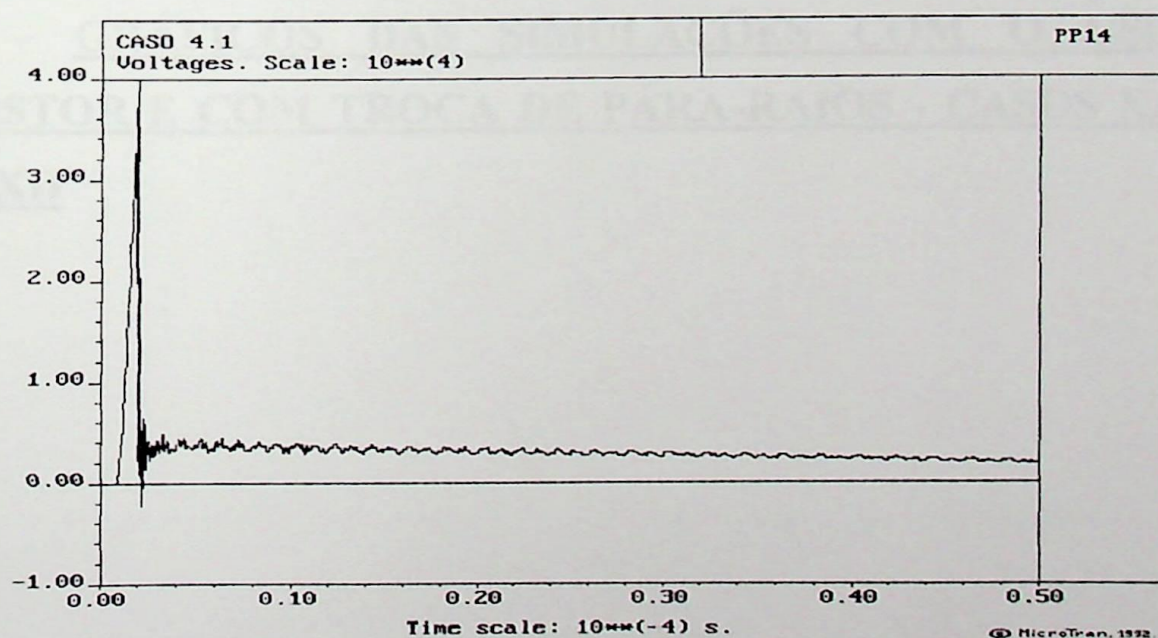


GRÁFICO 5.21 - Tensão no primário do transformador (PP14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador, sem o uso do varistor e com carga na linha de distribuição secundária. CASO 4.1.

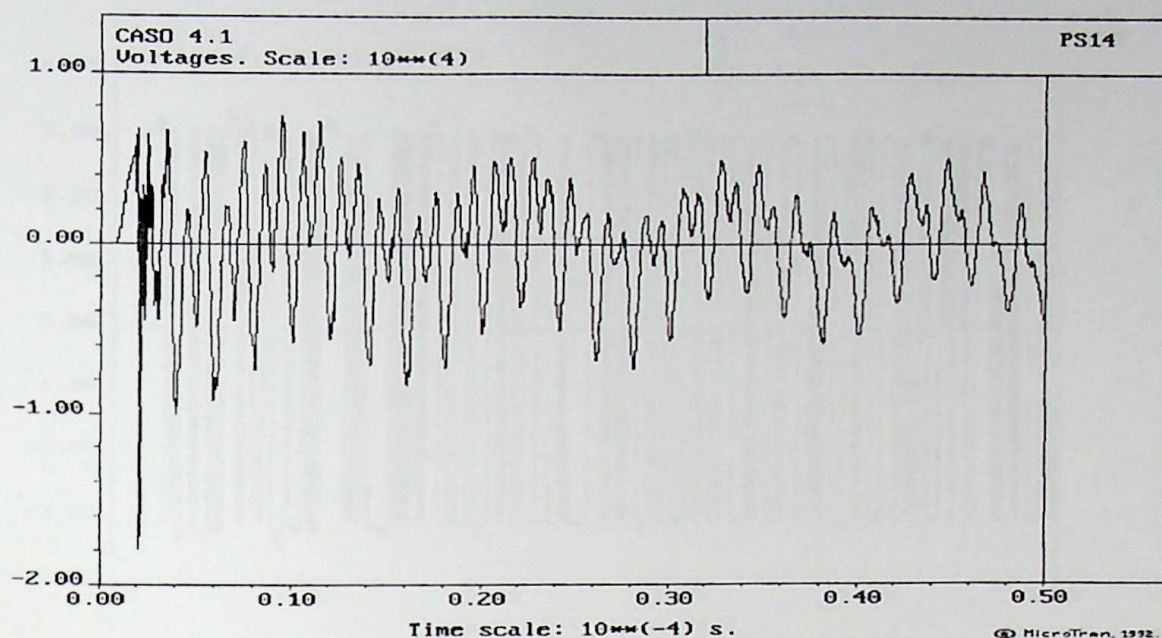


GRÁFICO 5.22 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador, sem o uso do varistor e com carga na linha de distribuição secundária. CASO 4.1.

5.3.2 - GRÁFICOS DAS SIMULAÇÕES COM O USO DO VARISTOR E COM TROCA DE PÁRA-RAIOS - CASOS XA, XB, XC e XD

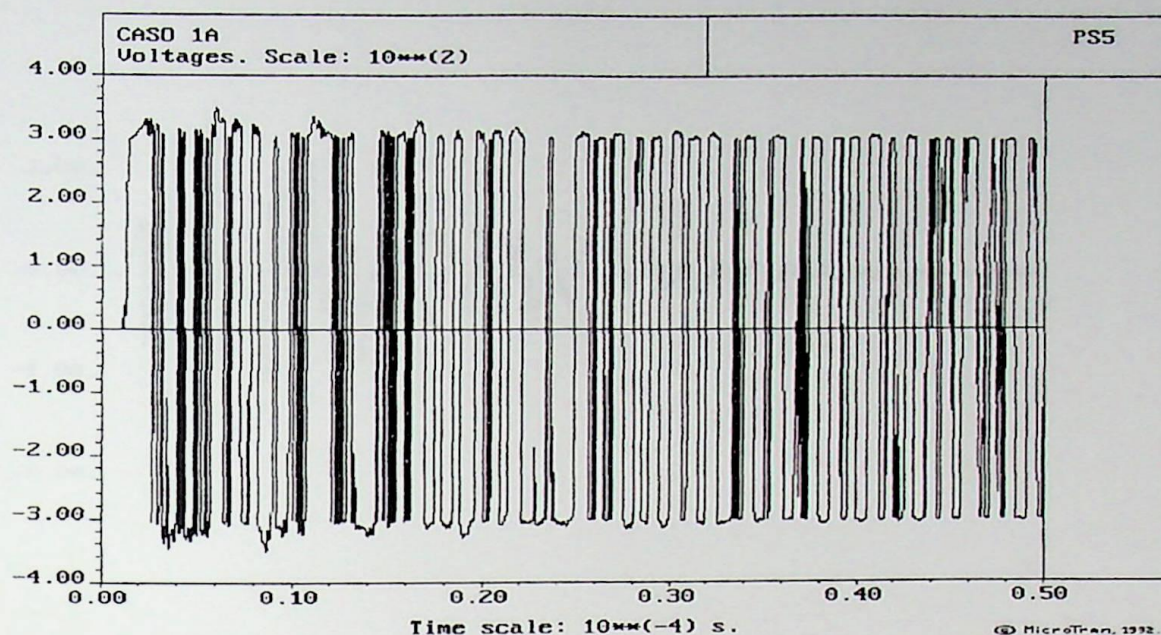


GRÁFICO 5.23 - Tensão no Poste PS5, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS5. CASO 1A.

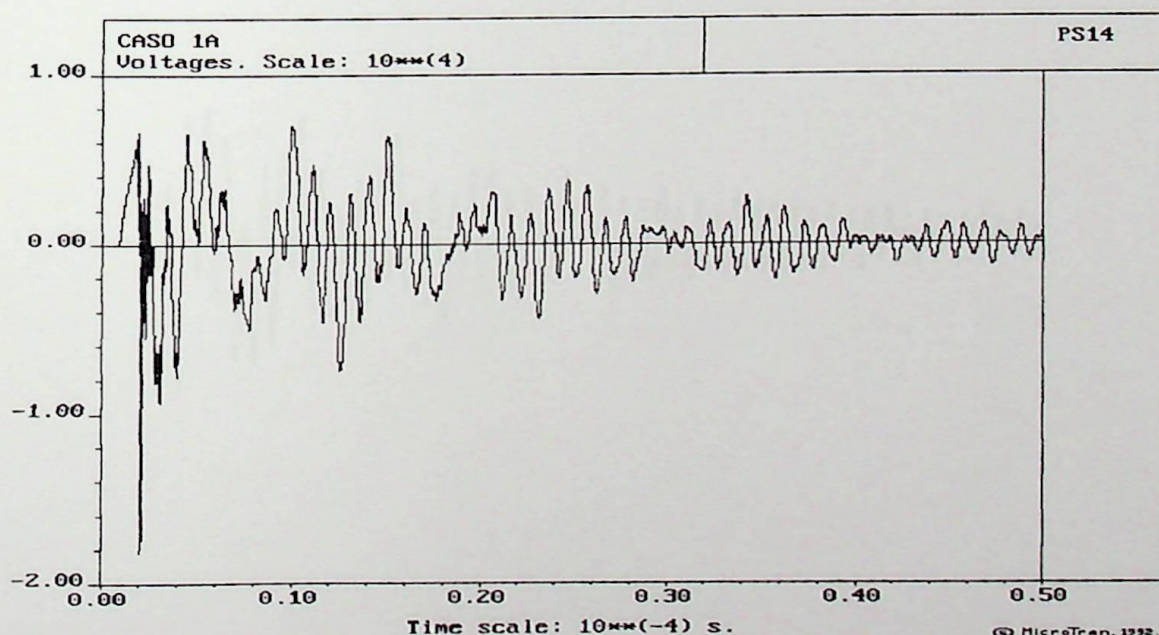


GRÁFICO 5.24 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS5. CASO 1A.

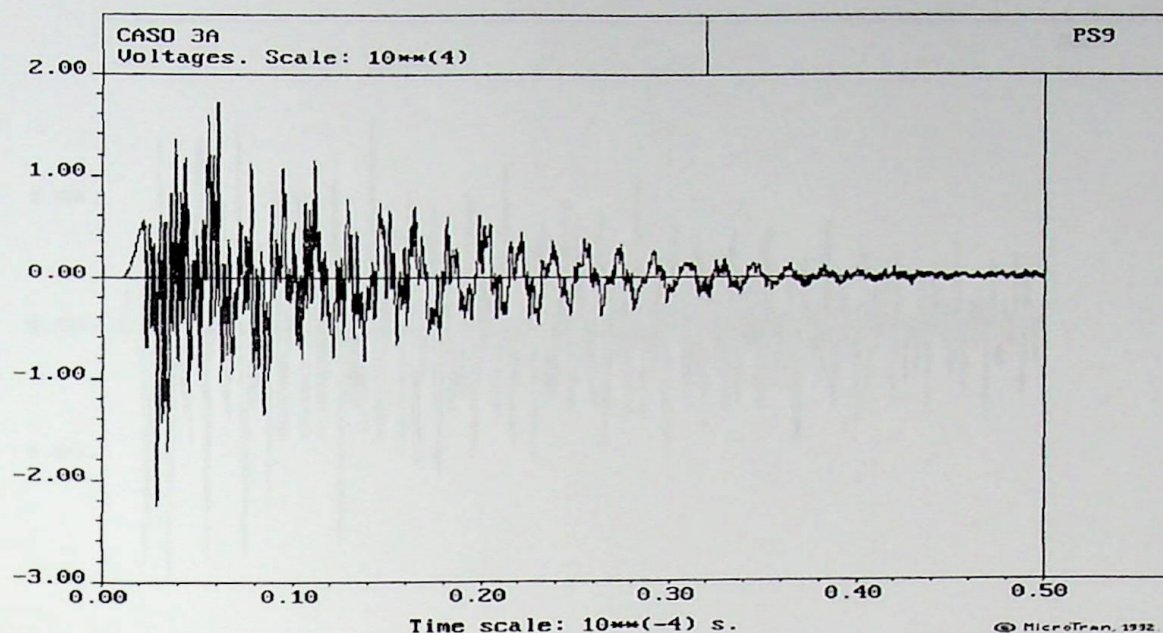


GRÁFICO 5.25 - Tensão no Poste PS9, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS8. CASO 3A.

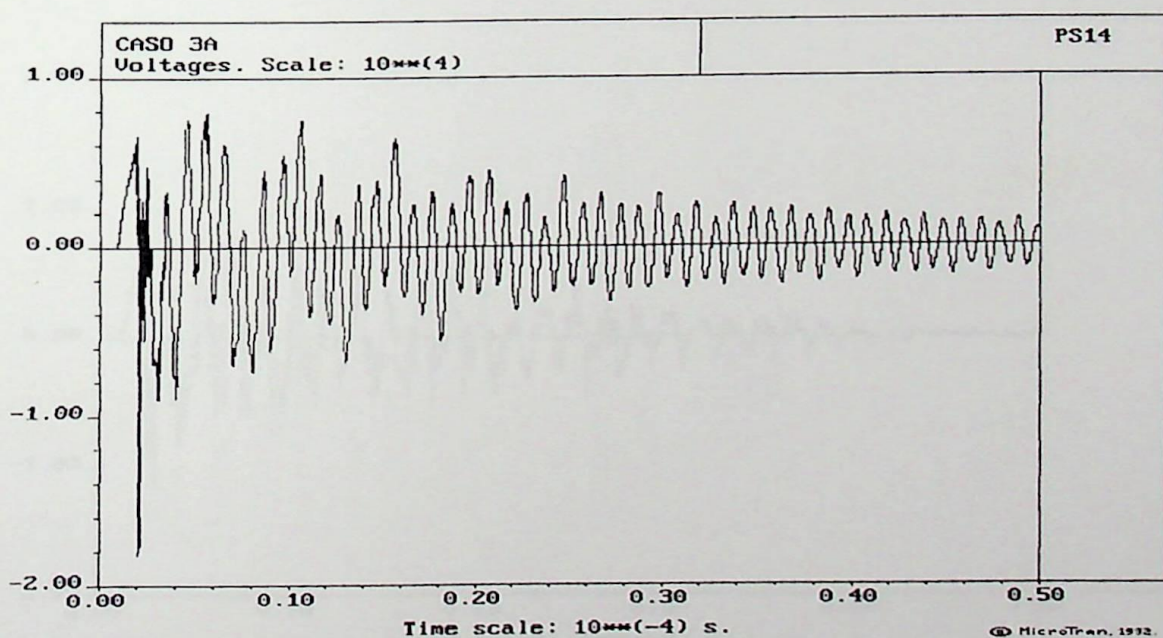


GRÁFICO 5.26 - Tensão no secundário do transformador (PS14), com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS8. CASO 3A.

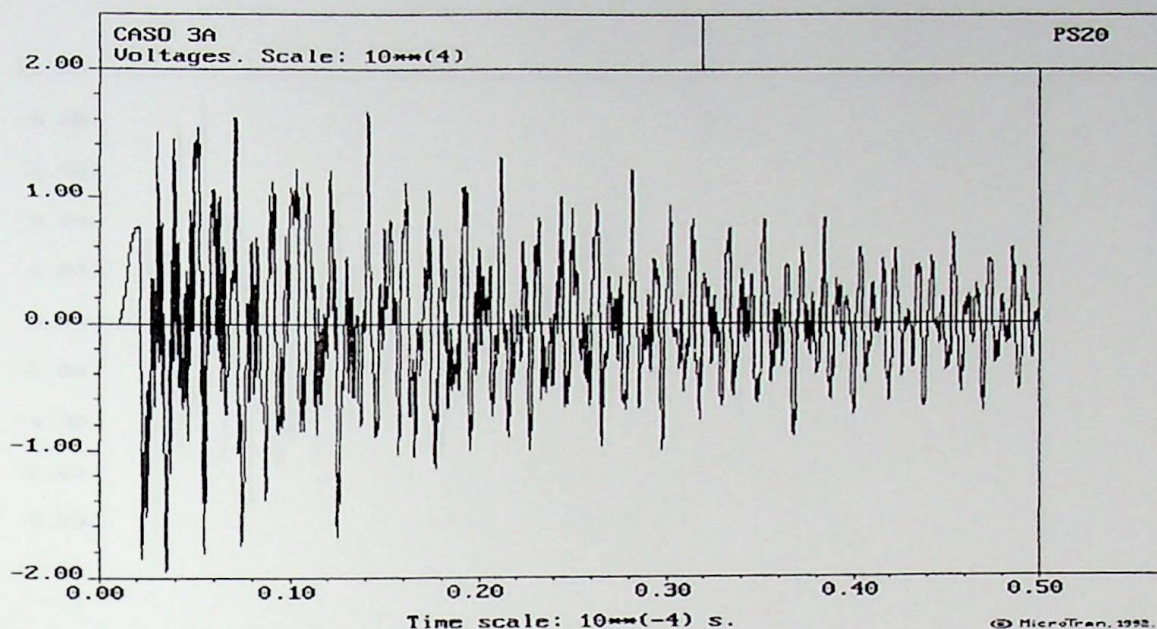


GRÁFICO 5.27 - Tensão no Poste PS20, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS8. CASO 3A.

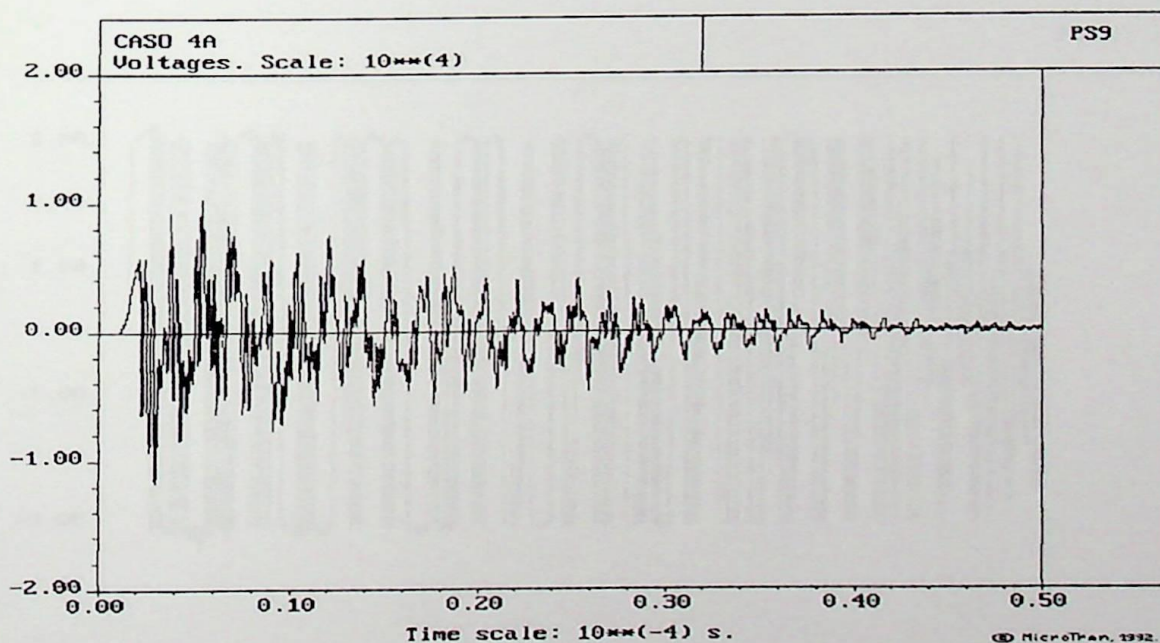


GRÁFICO 5.28 - Tensão no Poste PS9, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS11. CASO 4A.

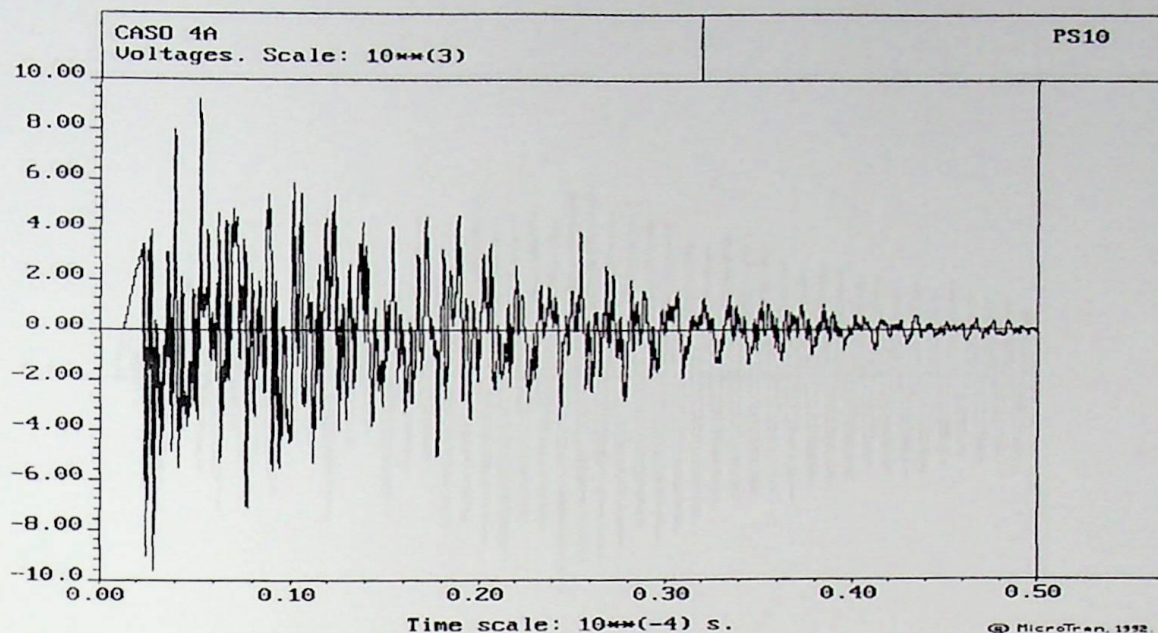


GRÁFICO 5.29 - Tensão no Poste PS10, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS11. CASO 4A.

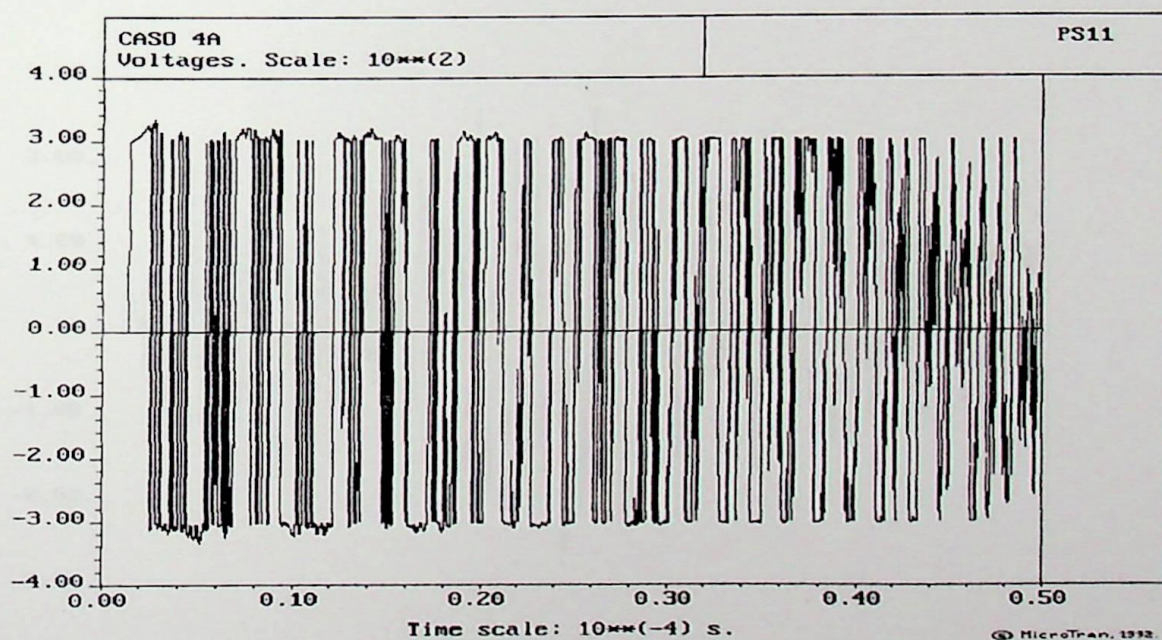


GRÁFICO 5.30 - Tensão no Poste PS11, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no poste PS11. CASO 4A.

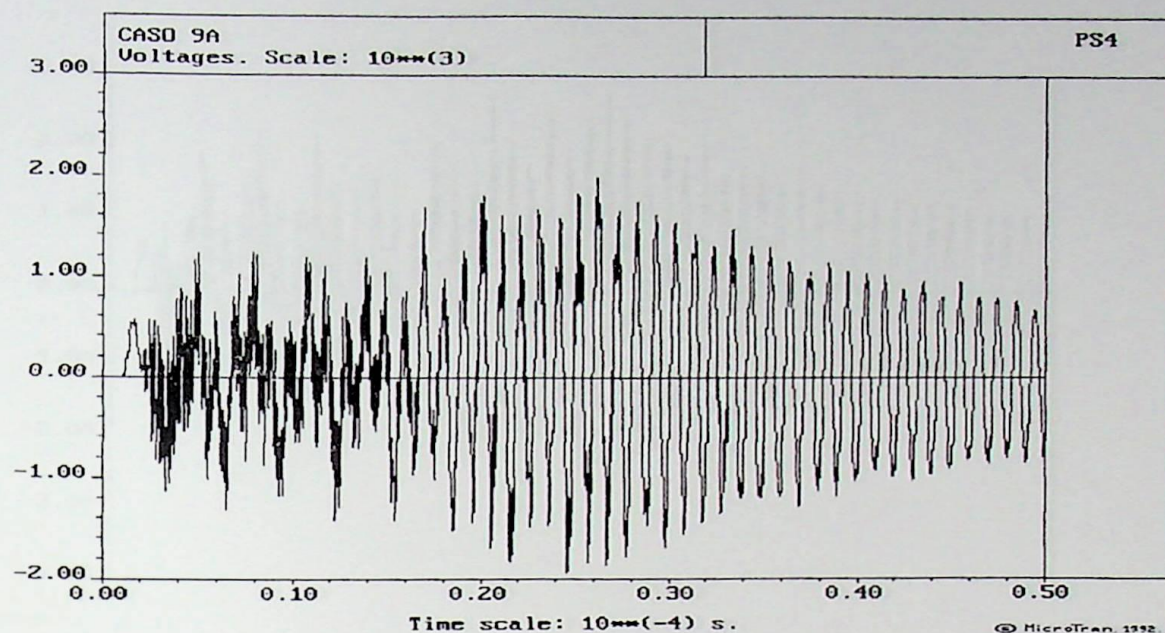


GRÁFICO 5.31 - Tensão no Poste PS4, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A.

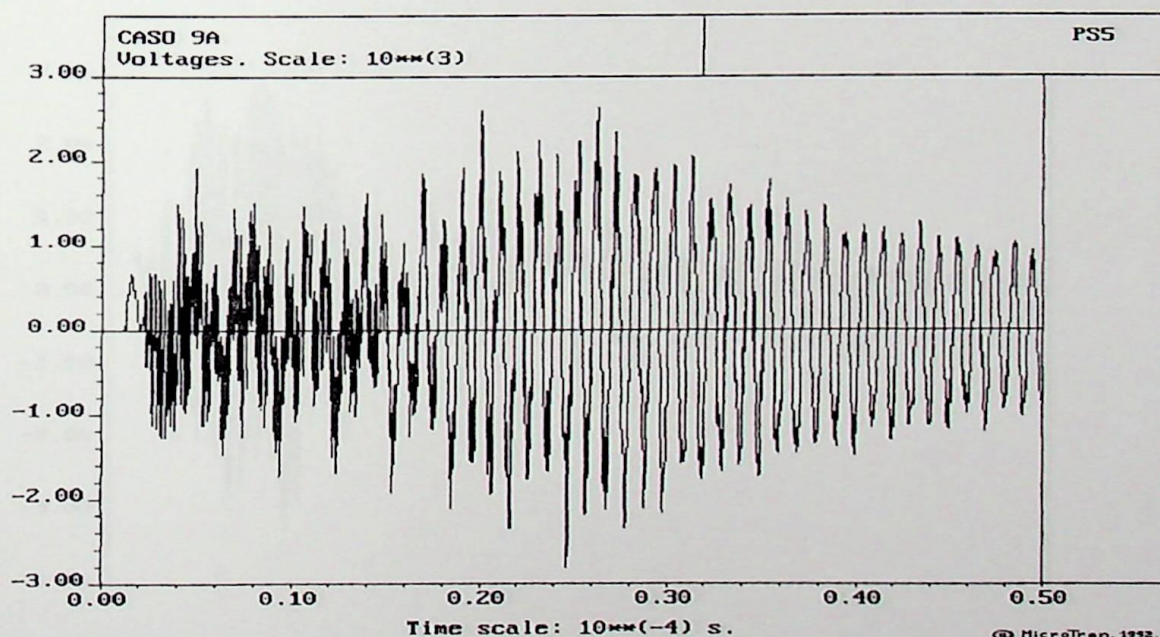


GRÁFICO 5.32 - Tensão no Poste PS5, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A.

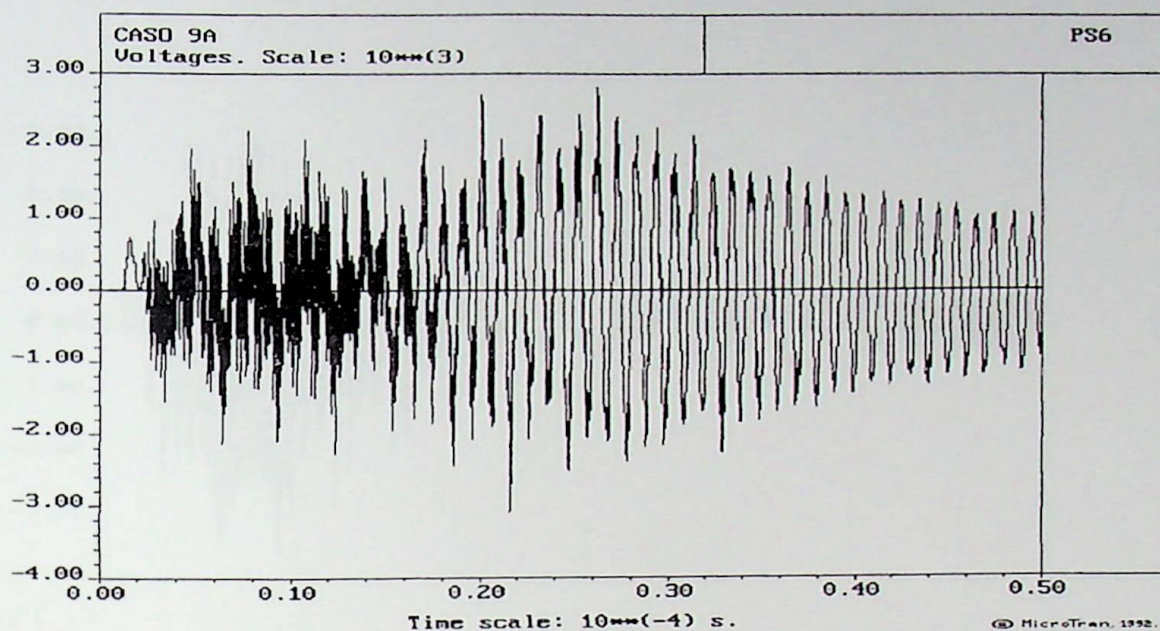


GRÁFICO 5.33 - Tensão no Poste PS6, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A.

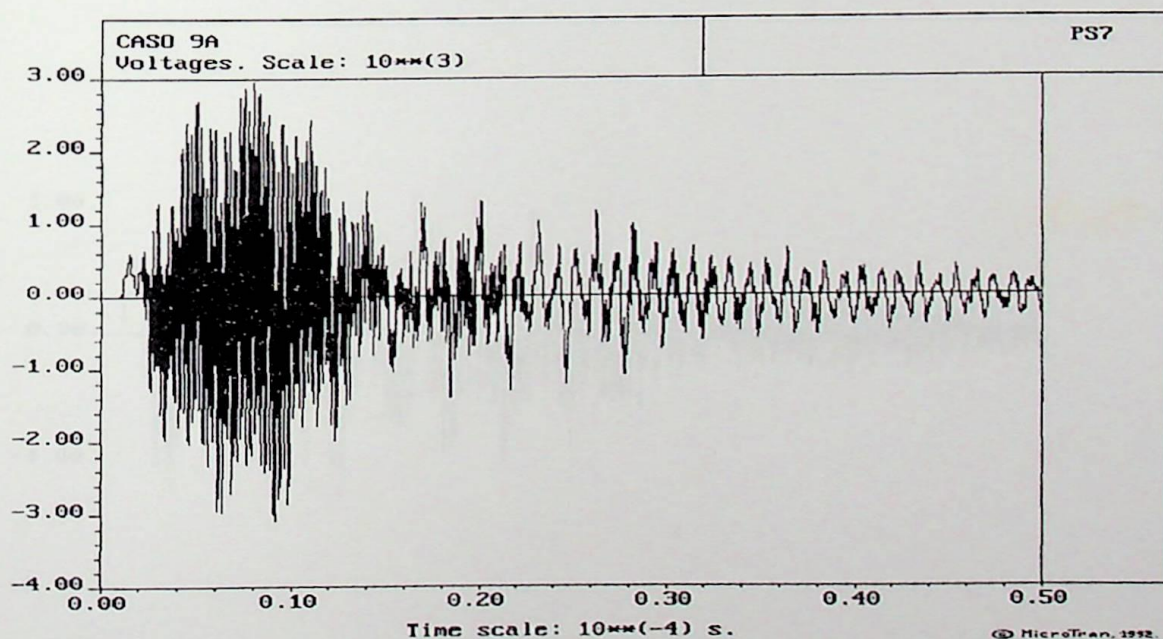


GRÁFICO 5.34 - Tensão no Poste PS7, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A.

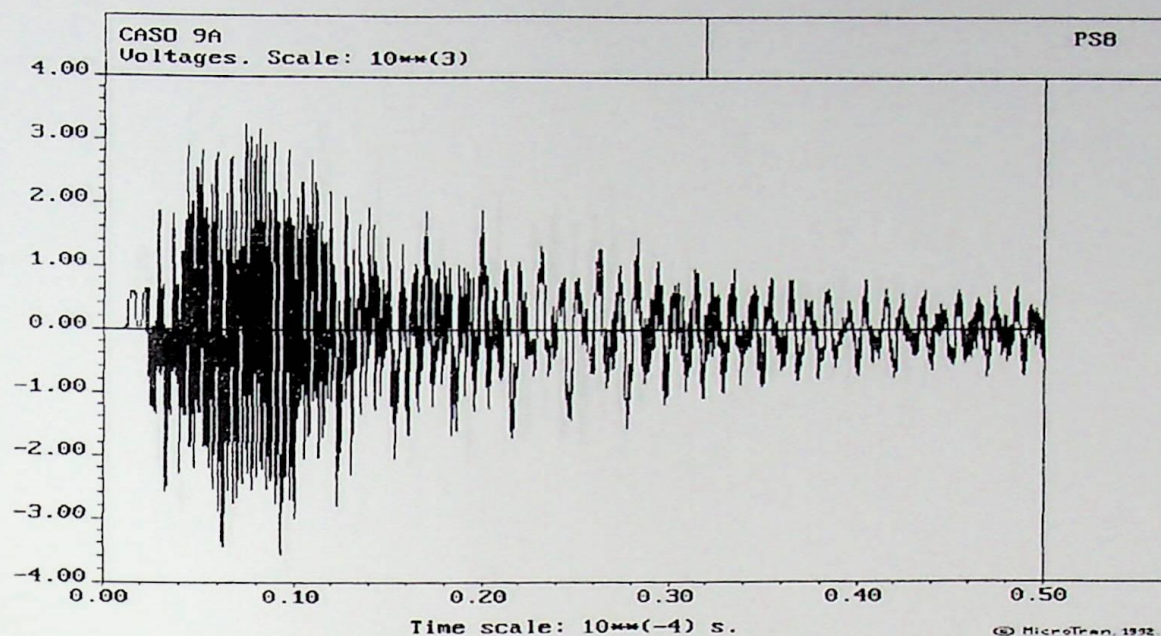


GRÁFICO 5.35 - Tensão no Poste PS8, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A.

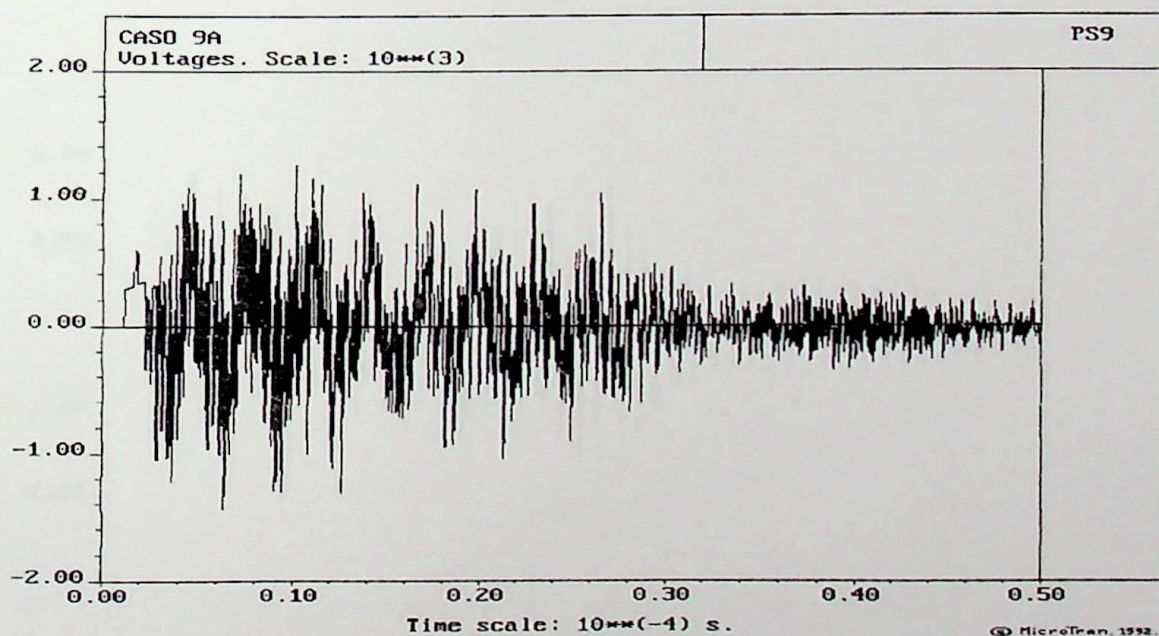


GRÁFICO 5.36 - Tensão no Poste PS9, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A.

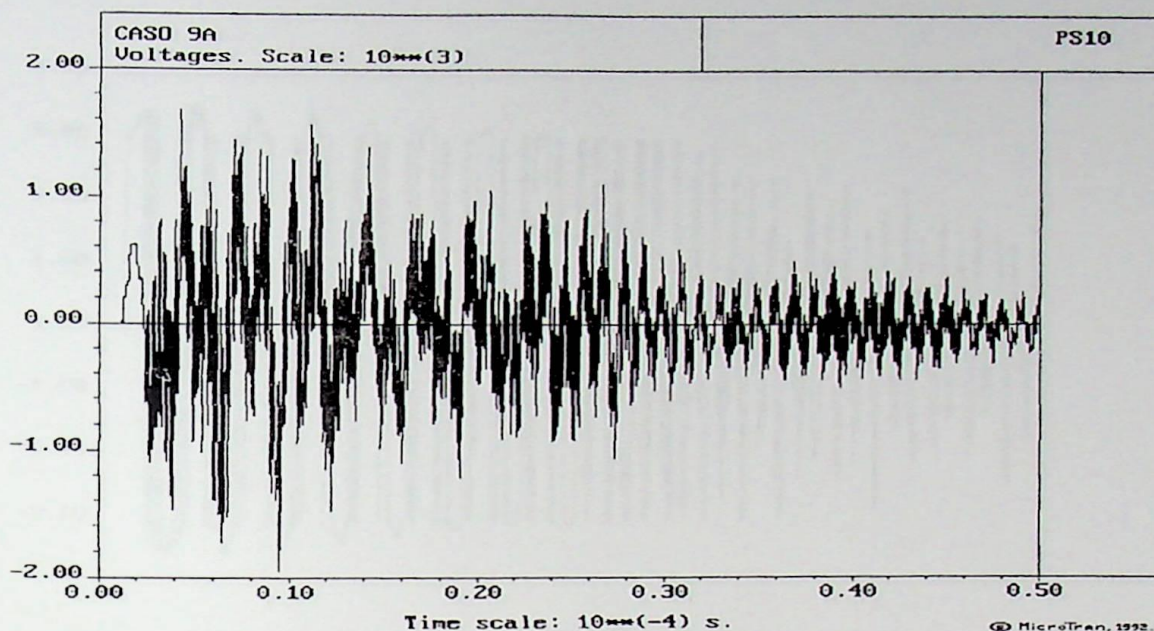


GRÁFICO 5.37 - Tensão no Poste PS10, com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A.

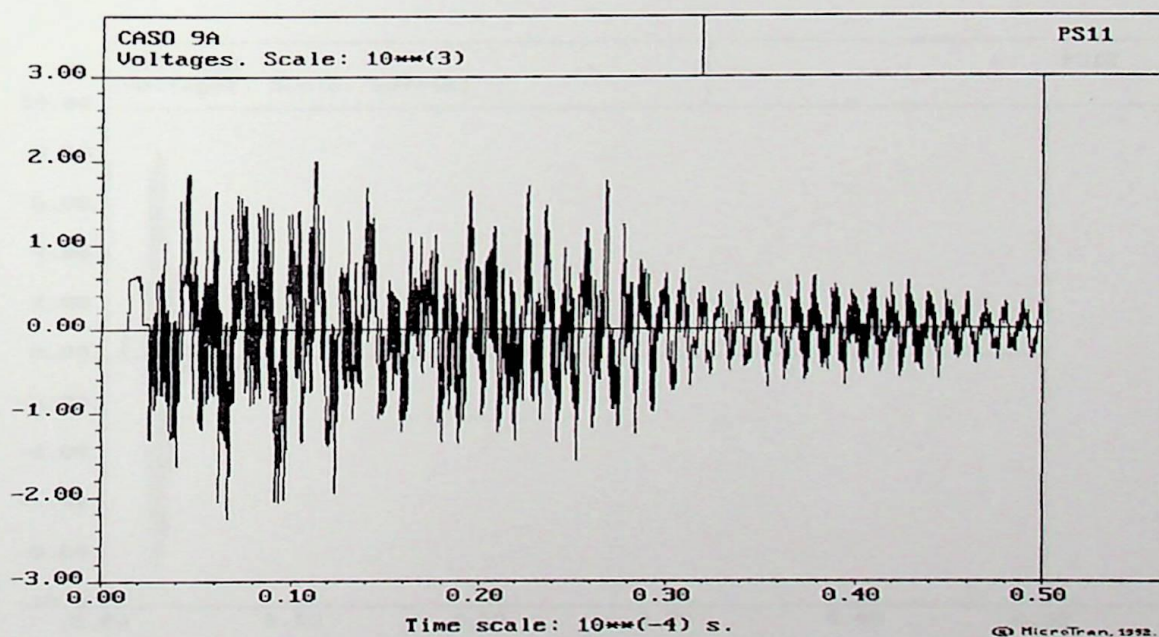


GRÁFICO 5.38 - Tensão no Poste PS11 com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A.

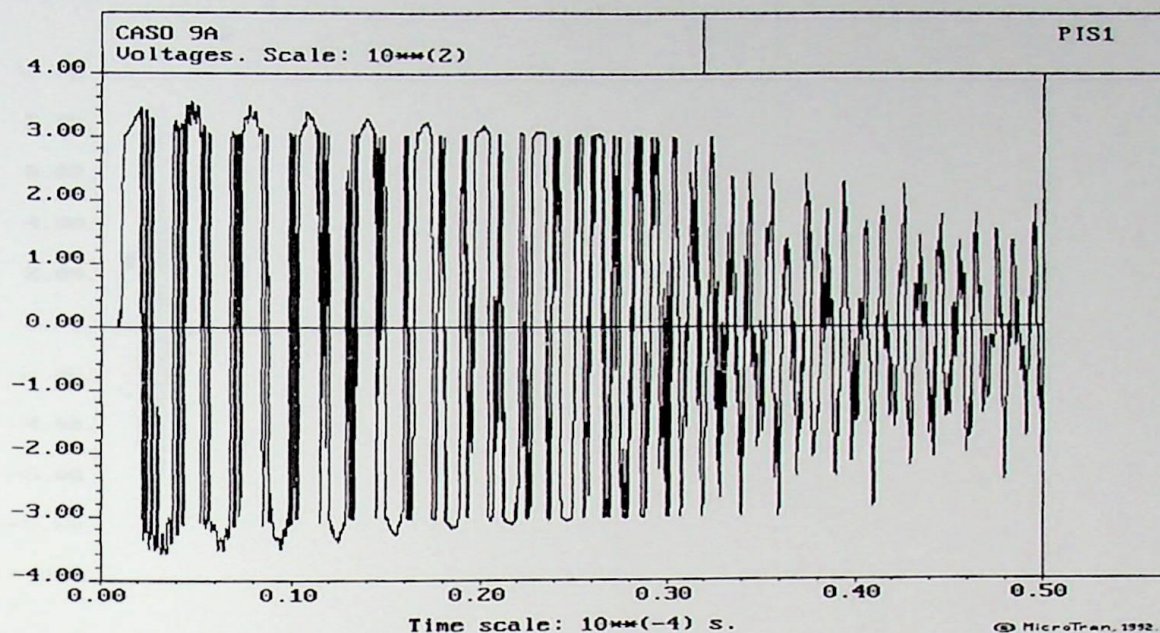


GRÁFICO 5.39 - Tensão no Ponto de interseção PIS1 com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e com um varistor no ponto de interseção PIS1. CASO 9A.

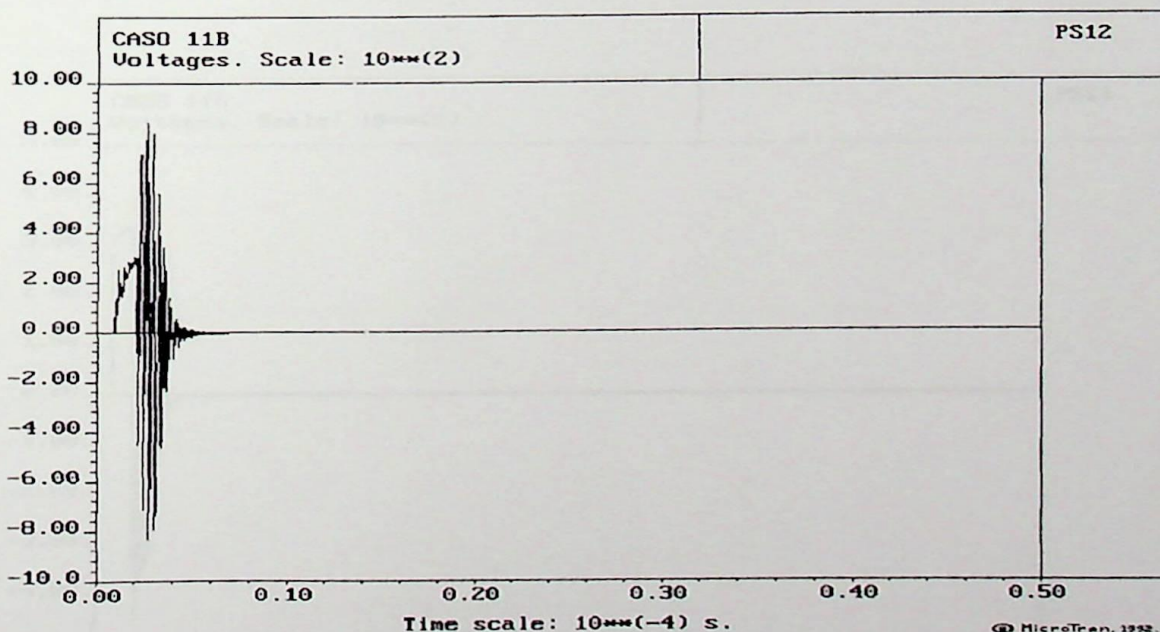


GRÁFICO 5.40 - Tensão no Poste PS12 com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e com varistores ligados, ao mesmo tempo, nos postes PS5, PS6, PS8, PS11, PS15, PS18 e PS20. CASO 11B.

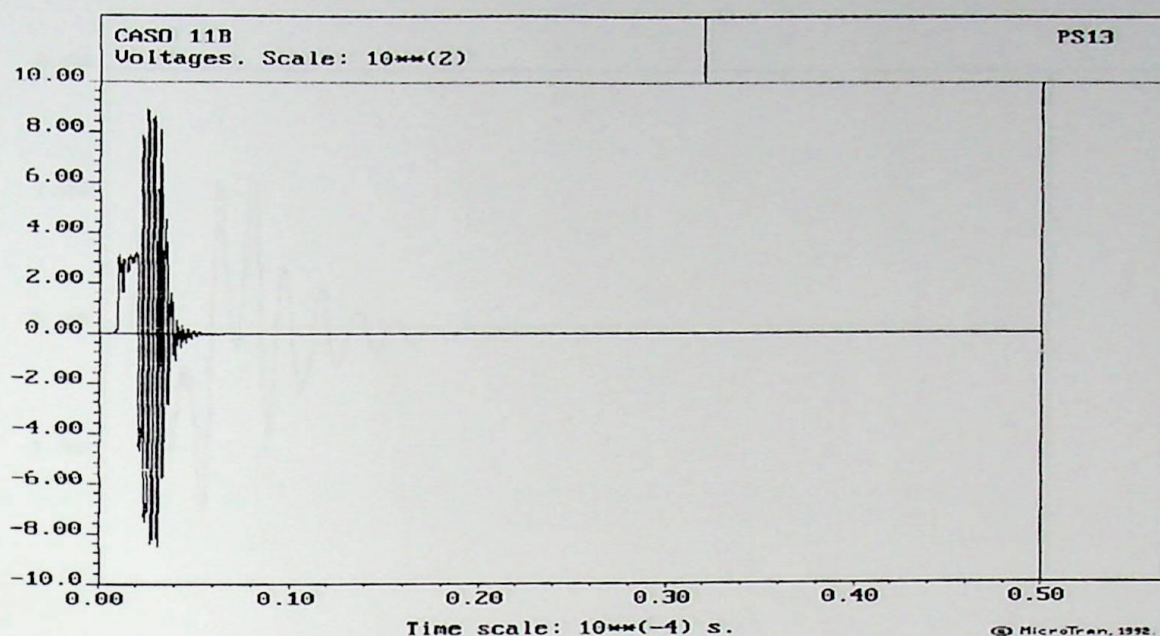


GRÁFICO 5.41 - Tensão no Poste PS13 com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e com varistores ligados, ao mesmo tempo, nos postes PS5, PS6, PS8, PS11, PS15, PS18 e PS20. CASO 11B.

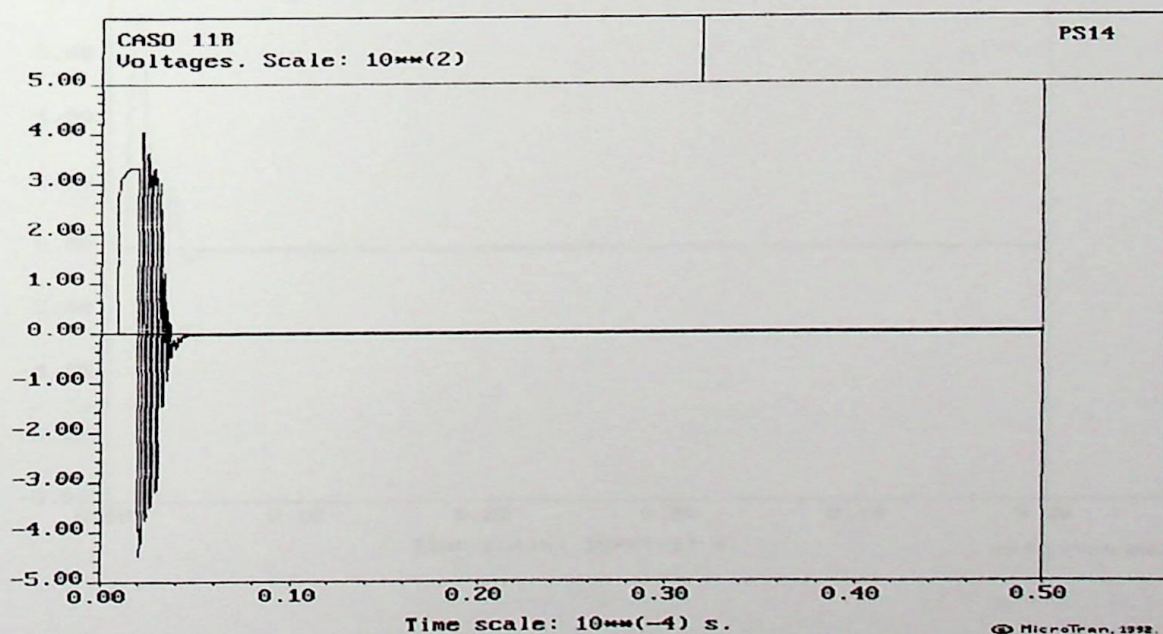


GRÁFICO 5.42 - Tensão no Poste PS14 com um pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e com varistores ligados, ao mesmo tempo, nos postes PS5, PS6, PS8, PS11, PS15, PS18 e PS20. CASO 11B.

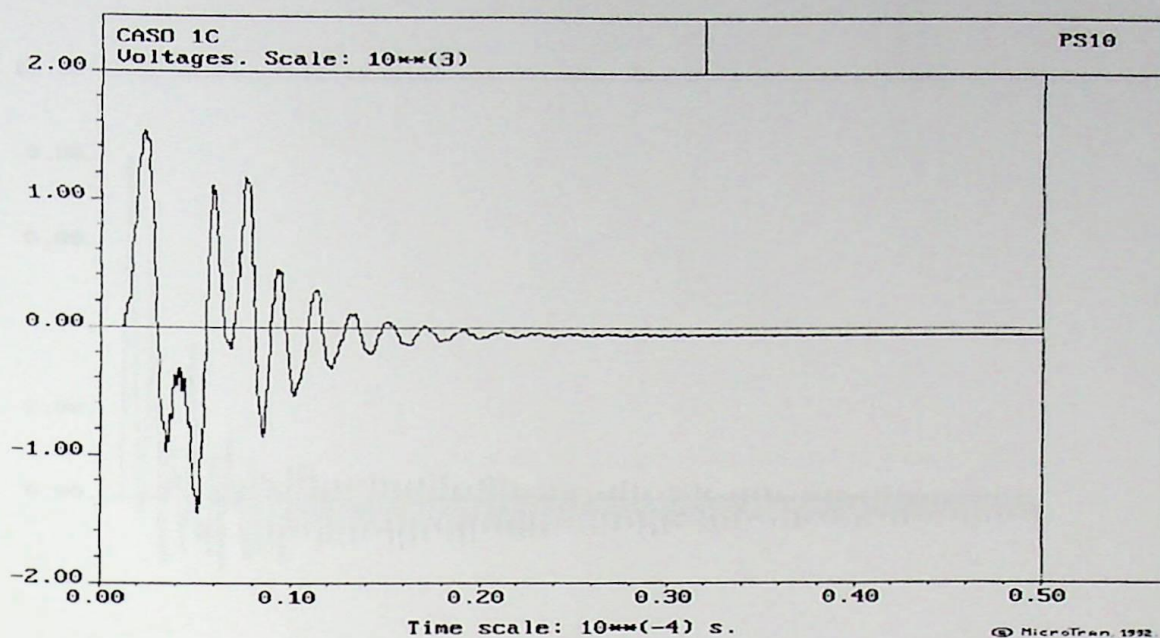


GRÁFICO 5.43 - Tensão no Poste PS10 com um para-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e com um varistor no poste PS5. CASO 1C.

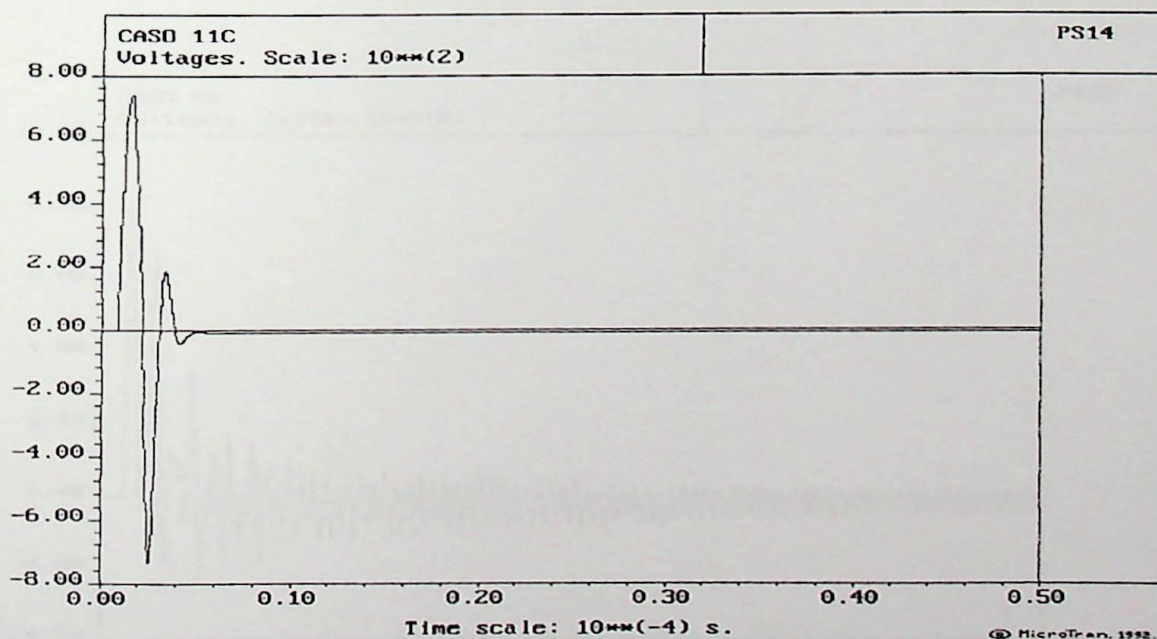


GRÁFICO 5.44 - Tensão no Poste PS14 com um para-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e com varistores ligados, ao mesmo tempo, nos postes PS5, PS6, PS8, PS11, PS15, PS18 e PS20. CASO 11C.

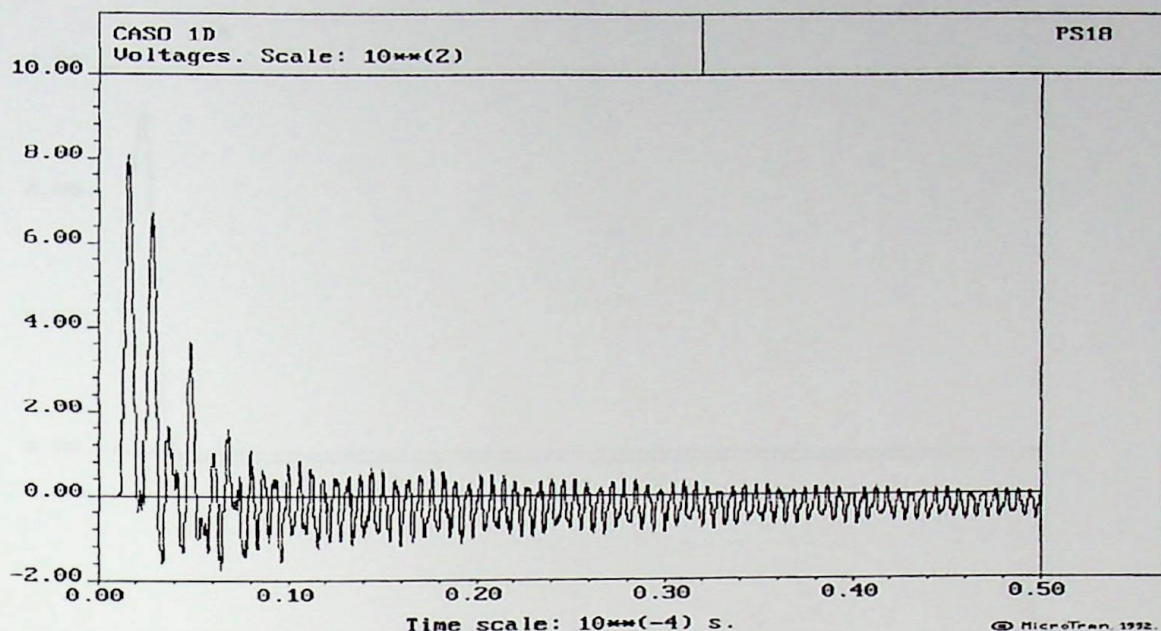


GRÁFICO 5.45 - Tensão no Poste PS18 com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e um varistor no poste PS5. CASO 1D.

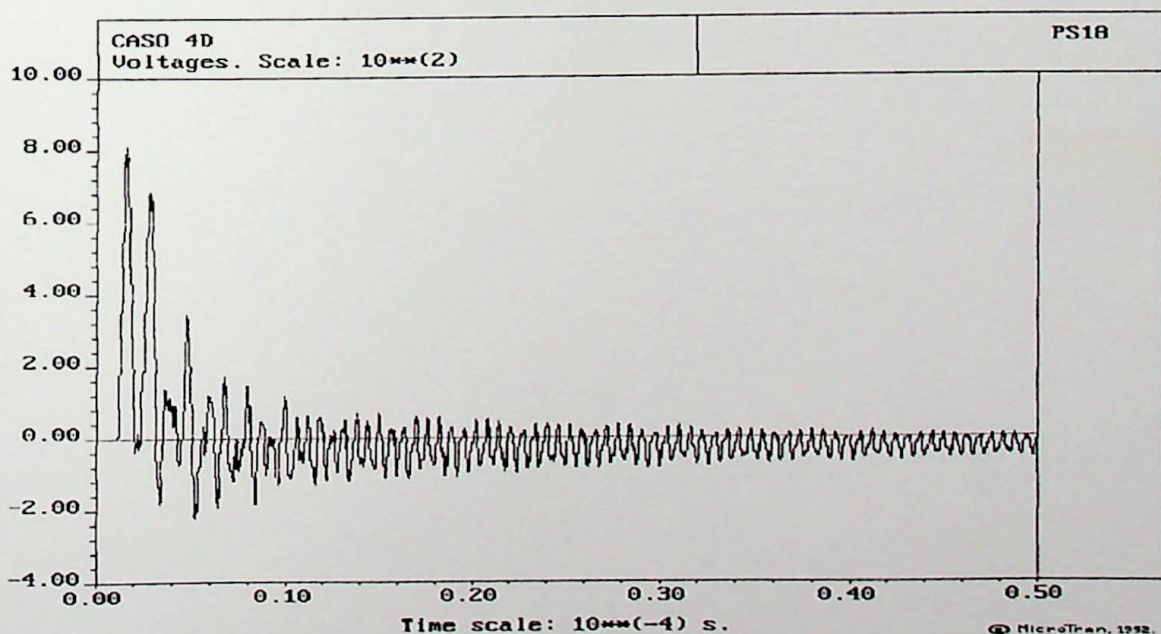


GRÁFICO 5.46 - Tensão no Poste PS18 com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e um varistor no poste PS11. CASO 4D.

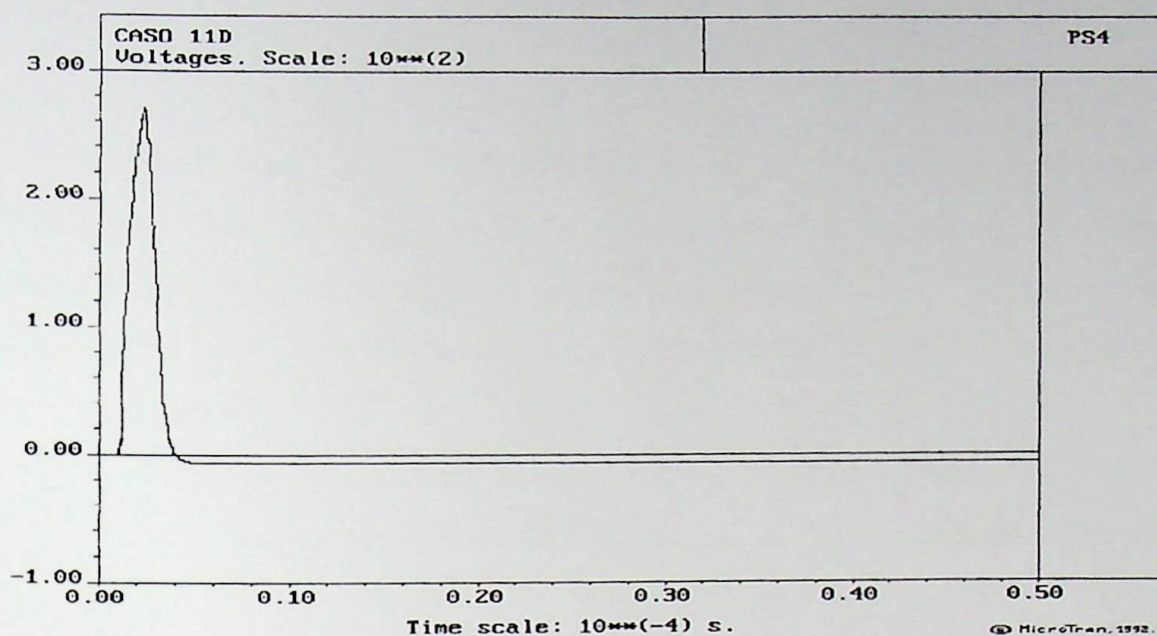


GRÁFICO 5.47 - Tensão no Poste PS4 com um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador, um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador e com varistores ligados, ao mesmo tempo, nos postes PS5, PS6, PS8, PS11, PS15, PS18 e PS20.

CASO 11D.

CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

As várias tabelas e gráficos do capítulo 5 fornecem os seguintes comentários:

As simulações realizadas mostram que as tensões nos postes PP1, PP2 e PP3 praticamente se mantêm as mesmas (obs.: a tensão no poste PP1 não poderia variar, já que é neste ponto onde é aplicada a suposta descarga atmosférica), com uma variação mínima, ao longo das simulações.

As tensões nos pontos de transferência da descarga atmosférica da linha de distribuição primária para a linha secundária, postes PP14 e PS14, tem uma grande variação dependendo do tipo de pára-raios utilizado e a sua localização.

Se no primário do transformador for usado o pára-raios de Carboneto de Silício, a tensão no poste PP14 ficará igual à tensão de disrupção do pára-raios que nesse caso é 40 kV, enquanto se for um pára-raios de Óxido de Zinco, a tensão abaixa em torno de 72,18% (caso 2.2).

Para o secundário do transformador, percebe-se que com o pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador a tensão chega a níveis impraticáveis (17,6 kV, caso 2.1), o que já melhora com o pára-raios de Óxido de Zinco (2,1 kV, caso 2.2), mas a colocação do varistor de Óxido de Zinco põe o valor de tensão a níveis aceitáveis (0,3 kV, caso 3.2).

O pára-raios de Carboneto de Silício colocado no primário eleva sobremaneira a tensão na linha de distribuição secundária, chegando a tensões de 37,4 kV (Poste 18, caso 2.1), porém a colocação de um varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador reduz a tensão no Poste 18 em 95,31% (1,7 kV, caso 3.1). E esta redução, sem seguir a mesma proporção, acontece em todos os outros pontos da linha de distribuição secundária. Com o pára-raios de Óxido de Zinco colocado no primário do transformador, a tensão na linha secundária se mantém em um média de 2,4 kV (caso 2.2), que é ainda muito alta comparada com a tensão fase-terra de 127 V. Mas com a colocação do varistor no secundário do transformador (caso 3.2), a tensão média fica no valor de 0,6 kV.

A colocação de carga na linha de distribuição secundária mudou pouco as tensões na linha de distribuição primária, em comparação com os mesmos casos sem carga, podendo ser consideradas desprezíveis estas mudanças.

E na linha de distribuição secundária, somente nos casos 4.2, 5.1 e 5.2 é que ocorre uma mudança mais expressiva. Nestes casos, as tensões diminuíram os seus valores em comparação com os mesmos casos sem carga (casos 2.2, 3.1 e 3.2).

Para o caso 4.1 (pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador) as mudanças podem ser consideradas desprezíveis.

Nos casos de 1A até 7A a tensão nos postes onde foram colocados os varistores é baixa, ficando na média de 0,3 kV. Porém, os outros pontos continuam com valores altos de tensão, bem próximos àqueles conseguidos sem a colocação dos varistores, incluindo a linha de distribuição primária.

Nos casos 3A, 4A, 6A e 7A verifica-se um efeito mais amplo da colocação do varistor. É que a tensão no ramo onde se encontra o varistor é menor do que as tensões sem o varistor. E esta tensão aumenta à medida que se afasta do poste onde o varistor está colocado. Exemplo:

No caso 4A, tem-se:

POSTE	TENSÃO NO POSTE (EM kV)
PS9	11,6405
PS10	9,6387
PS11	0,3361

E no caso 2.1, tem-se:

POSTE	TENSÃO NO POSTE (EM kV)
PS9	16,6854
PS10	17,1946
PS11	21,6991

Nos casos de 8A até 10A, muitos postes continuam com uma tensão elevada, mas as tensões depois da bifurcação e interseção da linha de distribuição secundária, locais onde se encontra os varistores, são menores que as tensões do caso 2.1. A tensão é menor no local onde se encontra o varistor e aumenta à medida que se aproxima do final da linha de distribuição secundária. Exemplo:

No caso 9A, tem-se:

POSTE	TENSÃO NO POSTE (EM kV)
PIS1	0,3590
PS4	1,9990
PS5	2,8066
PS6	3,0857
PS7	3,0947
PS8	3,5535
PS9	1,4340
PS10	1,9490
PS11	2,2454

E no caso 2.1, tem-se:

POSTE	TENSÃO NO POSTE (EM kV)
PIS1	11,5797
PS4	14,1699
PS5	16,5236
PS6	15,1552
PS7	15,1331
PS8	17,4321
PS9	16,6854
PS10	17,1946
PS11	21,6991

E nos casos 11A e 12A ocorre uma diminuição do nível de tensão considerável, porém com o caso 12A consegue-se níveis mais baixos de tensão com menos varistores (3 varistores) do que os outros casos anteriores.

Nos casos 1A até 12A, o valor de tensão no secundário do transformador (PS14) e nos postes PS12 e PS13 foi elevado, e é capaz de causar danos nos consumidores ligados nestes postes. Mesmo no caso 12A, existe valores de tensão proibitivos para, por exemplo, aparelhos eletrônicos.

Nos casos XB (Pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador e varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador), ocorre uma melhora considerável em todos os postes da linha secundária, em qualquer dos 12 casos. Na linha primária, as tensões continuam elevadas.

Os mesmos efeitos que ocorriam com os casos 3A, 4A, 6A, 7A, 8A, 9A e 10A (Pára-raios de Carboneto de Silício no primário do transformador), ocorre agora com os casos 3B, 4B, 6B, 7B, 8B, 9B e 10B, porém, a comparação não é feita com o caso 2.1, mas com o caso 3.1.

O caso 11B foi onde se obteve os melhores valores de tensão na linha de distribuição secundária entre os casos XB. A maior tensão neste caso foi de 0,9 kV (PS13), seguido de uma tensão de 0,8 kV, no poste PS12. Excluindo estas duas tensões, a maior tensão, no caso 11B, encontra-se no poste PS14 (secundário do transformador) que é de 0,4 kV.

Nos casos XC (Pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador), a tensão sofreu uma diminuição tanto na linha de distribuição primária quanto com a linha de distribuição secundária, isto com relação ao caso 2.1, que representa a linha real. Mas com relação ao caso 2.2, a tensão reduziu pouco em números absolutos, contudo, em números percentuais houve um redução considerável. Exemplo: A tensão no poste PS10, no caso 2.2, foi de 2,7 kV enquanto que a mesma tensão no caso 1C foi de 1,5 kV, ou seja, houve uma redução de 1,1 kV em números absolutos e de 42,37% em números percentuais.

Os mesmos efeitos que ocorriam nos casos 3A, 4A, 6A, 7A, 8A, 9A e 10A, também, ocorrem nos casos 3C, 4C, 6C, 7C, 8C, 9C e 10C, porém, a comparação se faz agora com o caso 2.2, só que os níveis de tensão são menores que os níveis alcançados nos respectivos casos 3B, 4B, 6B, 7B, 8B, 9B e 10B.

Nos casos 11C e 12C foi onde ocorreram os níveis mais baixos de tensões na linha de distribuição secundária entre os casos XC. Nenhuma tensão ultrapassou o nível de 1 kV, a maior tensão foi de 0,7 kV no poste PS14, no caso 11C. E a média da tensão nos postes na linha de distribuição secundária ficou em torno de 0,4 kV, no caso 11C, e 0,5 kV no caso 12C.

Os casos XD (Pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador e varistor de Óxido de Zinco no secundário do transformador) foram os que forneceram os níveis mais baixos de tensão. Não existiu nenhuma tensão na linha de distribuição secundária, em todos os 12 casos simulados, que fosse maior do que 1 kV. A maior tensão encontrada foi de 0,8 kV no poste PS18, que foi encontrada simultaneamente nos casos 1D, 2D, 3D, 4D, 8D e 9D; a menor tensão foi de 0,27 kV no poste PS4, no caso 11D.

O melhor caso foi o caso 11D que obteve uma tensão média nos postes da linha de distribuição secundária de 0,29 kV e uma tensão máxima de 0,3 kV.

Diante dos comentários anteriores, obtém-se as seguintes conclusões:

- O uso do pára-raios de Carboneto de Silício implica na existência de fortes transitórios eletromagnéticos devido a disrupção do centelhador, gerando elevadas tensões no sistema e ruídos que se propagam ao longo de todo sistema de distribuição secundário;
- O pára-raios de Óxido de Zinco demonstrou grande potencialidade como pára-raios de distribuição, pois sua aplicação resulta em uma grande diminuição das sobretensões, sem geração de nenhuma espécie de transitório, devido à presença dos centelhadores;
- A instalação de um varistor no secundário do transformador ajuda bastante a proteção contra sobretensões, mas não pode ser considerada a melhor solução;
- Os casos onde foram colocados varistores no final de cada ramificação da linha de distribuição secundária (CASOS 11A, 11B, 11C e 11D) e nos casos onde foram colocados varistores nos pontos de bifurcação ou interseção da linha de

distribuição secundária (CASOS 12A, 12B, 12C e 12D) são os mais favoráveis no controle das sobretensões. Com uma leve vantagem, com relação ao nível de tensão, para os casos do tipo 11 sobre os casos do tipo 12, porém os casos do tipo 12 usam menos varistores do que os casos do tipo 11;

- Dentre todos os 58 casos simulados, o que mais próximo chegou do ideal foi o que representa um pára-raios de Óxido de Zinco no primário do transformador, um varistor no secundário do transformador e varistores ligados ao mesmo tempo nos postes 5, 6, 7, 8, 11, 15, 18 e 20, que são finais das ramificações da linha de distribuição secundária - caso 11D. Nesta simulação, a tensão média na linha de distribuição secundária foi de 0,29 kV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADNETT, P. A. Transformer models for the determination of transient voltages. *IEEE TPAS*, v. 72, part III, p. 463-471, Jan. 1953.
2. MCNITE, W. L., BLALOCK, T. L., HINSON, R. L. Response of transformer windings to system transient voltages. *IEEE TPAS*, v. 93, part I, p. 457-467, 1974.
3. AIEE COMMITTEE REPORT. Laplace transforms of combinations of sine functions, air gaps and wood dielectric members. *AIEE TPAS*, v. 75, part III, p. 150-161, Apr. 1956.
4. DARVENIZA, M., HORNUMBER, B. C., STRALMAN, R. H. An improved method for calculating the impulse strength of wood porcelain insulation. *IEEE TPAS*, v. 92, p. 1900-1915, Nov/Dec 1973.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - SILVA, J.P. **Influência da distância entre o pára-raios de óxido de zinco e o transformador na coordenação de isolamento de uma subestação em alta tensão.** Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1992. 128p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [2] - WELLAWER, M. **Introdução à técnica das altas tensões.** 1.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1973. 367p.
- [3] - GOMES, D.S.F., MACEDO, F.F., GUILLIOD, S.M. **Aterramento e proteção contra sobretensões em sistemas aéreos de distribuição.** 1.ed. Niterói: EDUFF, 1990. 358p.
- [4] - CIPOLI, J.A. **Engenharia de distribuição.** 1.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 1993. 340p.
- [5] - ABETTI, P.A. **Transformer models for the determination of transient voltages.** AIEE TPAS, v.72, part. III, p.468-475, jun. 1953.
- [6] - MCNUTT, W.J., BLALOCK, T.J., HINTON, R.K. **Response of transformer windings to system transient voltages.** IEEE TPAS, v.93, part I, p.457-467, 1974.
- [7] - AIEE COMMITTEE REPORT. **Impulse flashovers of combinations of line insulators, air gaps and wood structural members.** AIEE TPAS, v.75, part III, p.16-21, apr. 1956.
- [8] - DARVENIZA, M., HOLCOMBE, B.C., STILLMAN, R.H. **An improved method for calculating the impulse strength of wood porcelain insulation.** IEEE TPAS, v.98, n.6, p.1909-1915, nov./dec. 1979.

- [9] - GRZYBOWSKI, S., JACOB, P.B. **The steep-front, short duration pulse characteristics of distribution insulators with wood.** IEEE Transactions on Power Delivery, v.5, n.3, p.1608-1616, jul. 1990.
- [10] - BLUME, L.F., BOYAJIAN, A. **Abnormal voltages within transformers.** AIEE, v.38, part I, p.577-620, 1919.
- [11] - GREENWOOD, A. **Eletrical transients in power systems.** 1.ed. New York: John Wiley & sons, 1971. 544p.
- [12] - FUCHS, R.D. **Transmissão de energia elétrica: Linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente.** 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1979. 588p.
- [13] - HEDMAN, D.E. **Teoria das linhas de transmissão I.** 1.ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1979. 208p.
- [14] - HEDMAN, D.E. **Teoria das linhas de transmissão II.** 1.ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1978. 182p.
- [15] - FUCHS, R.D., ALMEIDA, M.T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão.** 1.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982. 360p.
- [16] - CLAYTON, J.M., SHANKLE, D.F. **Insulation characteristics of wood and suspension insulators in series.** AIEE TPAS, v.74, part III, p.1305-1312, dec. 1955.
- [17] - FINK, D.G. (ed.) **Standard handbook for electrical engineers.** 10.ed. New York: MacGraw Hill, 1969. 2400p.

- [18] - FUCHS, R.D. et al. **Transmissão de energia elétrica**. Itajubá: Escola Federal de Engenharia Itajubá, 1992. 300p. (Notas de aula).
- [19] - HEDMAN, D.E. **Coordenação de isolamento**. 1.ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1979. 200p.
- [20] - LEITE, D.M., LEITE, C.M. **Proteção contra descargas atmosféricas**. 1.ed. São Paulo: MM Editora, 1993.
- [21] - KOBAYASHI, M. et al. **Development of zinc-oxide non-linear resistors and their applications to gapless surge arresters**. IEEE TPAS, v.97, n.4, p.1149-1158, jul./aug. 1978.
- [22] - TOMINAGA, S. et al. **Stability and long term degradation of metal oxide surge arresters**. IEEE TPAS, v.99, n.4, p.1548-1556, jul./aug. 1980.
- [23] - BRONIKOWSKI, R.J., DUPONT, J.P. **Development and testing of move arrester elements**. IEEE TPAS, v.101, n.6, p.1638-1642, jun. 1982.
- [24] - SAKSHAUG, E.C., KRESGE, J.S., MISKE JR., S.A. **A new concept in station arrester design**. IEEE TPAS, v. 96, n.2, p.647-656, mar./apr. 1977.
- [25] - TOMINAGA, S. et al. **Reliability and application of metal oxide surge arresters for power systems**. IEEE TPAS, v.98, n.3, p.805-816, may/jun. 1979.
- [26] - KERSHAW, S.S. et al. **Applying metal-oxide surge arresters on distribution systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, v.4, n.1, p.301-307, jan. 1989.
- [27] - MARTINEZ, M.L.B. **Pára-raios para sistemas de média tensão características técnica e aplicação a sistemas de potência**. Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1992. 528p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica).

- [28] - CATÁLOGO SIEMENS - **Varistores**
- [29] - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro: **NBR 5434; redes de distribuição aérea urbana de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 1982. 116p.

ANEXOS

CARTÕES DE ENTRADA DO PROGRAMA MICROTRAN

1	P01	P02	200.00	1.00	200.00
2	P03	P04	200.00	1.00	200.00
3	P05	P06	200.00	1.00	200.00
4	P07	P08	200.00	1.00	200.00
5	P09	P10	200.00	1.00	200.00
6	P11	P12	200.00	1.00	200.00
7	P13	P14	200.00	1.00	200.00
8	P15	P16	200.00	1.00	200.00
9	P17	P18	200.00	1.00	200.00
10	P19	P20	200.00	1.00	200.00
11	P21	P22	200.00	1.00	200.00
12	P23	P24	200.00	1.00	200.00
13	P25	P26	200.00	1.00	200.00
14	P27	P28	200.00	1.00	200.00
15	P29	P30	200.00	1.00	200.00
16	P31	P32	200.00	1.00	200.00
17	P33	P34	200.00	1.00	200.00
18	P35	P36	200.00	1.00	200.00
19	P37	P38	200.00	1.00	200.00
20	P39	P40	200.00	1.00	200.00
21	P41	P42	200.00	1.00	200.00
22	P43	P44	200.00	1.00	200.00
23	P45	P46	200.00	1.00	200.00
24	P47	P48	200.00	1.00	200.00
25	P49	P50	200.00	1.00	200.00
26	P51	P52	200.00	1.00	200.00
27	P53	P54	200.00	1.00	200.00
28	P55	P56	200.00	1.00	200.00
29	P57	P58	200.00	1.00	200.00
30	P59	P60	200.00	1.00	200.00
31	P61	P62	200.00	1.00	200.00
32	P63	P64	200.00	1.00	200.00
33	P65	P66	200.00	1.00	200.00
34	P67	P68	200.00	1.00	200.00
35	P69	P70	200.00	1.00	200.00
36	P71	P72	200.00	1.00	200.00
37	P73	P74	200.00	1.00	200.00
38	P75	P76	200.00	1.00	200.00
39	P77	P78	200.00	1.00	200.00
40	P79	P80	200.00	1.00	200.00
41	P81	P82	200.00	1.00	200.00
42	P83	P84	200.00	1.00	200.00
43	P85	P86	200.00	1.00	200.00
44	P87	P88	200.00	1.00	200.00
45	P89	P90	200.00	1.00	200.00
46	P91	P92	200.00	1.00	200.00
47	P93	P94	200.00	1.00	200.00
48	P95	P96	200.00	1.00	200.00
49	P97	P98	200.00	1.00	200.00
50	P99	P00	200.00	1.00	200.00

ANEXOS

CARTÕES DE ENTRADA DO PROGRAMA MICROTRAN

Neste anexo se encontra os cartões de entrada de alguns casos que foram simulados para a realização desta dissertação. São eles:

CASO 2.1

```

*
* . . . . . Case identification card
CASO 2.1
* SIMULACAO COM UM PARA-RAIOS DE SiC NO PRIMARIO DO TRANSFORMADOR
* E SEM O USO DO VARISTOR.
*
* . . . . . Time card
3.E-9 50.E-6 1.E-30
*
* . . . . . Lumped RLC branch
PP8 333.64
PP11 333.64
PP20 333.64
F1 PP1 333.64
PT14 4.8E-4
PT14 PS14 1.5E-3
PS14 2.E-3
*
* . . . . . Constant-parameters line
-1 PP1 PP2 333.64 3.E8 43. 1
-1 PP2 PP3 333.64 3.E8 56. 1
-1 PP3 PP4 333.64 3.E8 74. 1
-1 PP4 PIP1 333.64 3.E8 25. 1
-1 PIP1 PP7 333.64 3.E8 23. 1
-1 PP7 PP8 333.64 3.E8 34. 1
-1 PIP1 PP9 333.64 3.E8 18. 1
-1 PP9 PP10 333.64 3.E8 42. 1
-1 PP10 PP11 333.64 3.E8 42. 1
-1 PIP1 PP12 333.64 3.E8 7. 1
-1 PP12 PP13 333.64 3.E8 15. 1
-1 PP13 PP14 333.64 3.E8 23. 1
-1 PP14 PP19 333.64 3.E8 24. 1
-1 PP19 PP20 333.64 3.E8 29. 1
-1 PP14 PT14 333.64 3.E8 1. 1
-1 PS4 PS5 269.46 3.E8 29. 1
-1 PS4 PS6 297.15 3.E8 34. 1
-1 PS4 PIS1 269.46 3.E8 25. 1
-1 PIS1 PS7 269.46 3.E8 23. 1
-1 PS7 PS8 269.46 3.E8 34. 1
-1 PIS1 PS9 269.46 3.E8 18. 1
-1 PS9 PS10 269.46 3.E8 42. 1
-1 PS10 PS11 269.46 3.E8 42. 1
-1 PIS1 PS12 269.46 3.E8 7. 1
-1 PS12 PS13 269.46 3.E8 15. 1

```



```

-1 PS13 PS14      269.46 3.E8 23. 1
-1 PS14 PIS2      269.46 3.E8 20. 1
-1 PIS2 PS15      269.46 3.E8 36. 1
-1 PIS2 PS16      269.46 3.E8 8. 1
-1 PS16 PS17      269.46 3.E8 25. 1
-1 PS17 PS18      269.46 3.E8 25. 1
-1 PIS2 PS19      269.46 3.E8 5. 1
-1 PS19 PS20      269.46 3.E8 29. 1
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PP14          40.E3
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
-20.E3 -43.E3
-10.E3 -39.E3
-5.E3 -35.E3
0. 0.
5.E3 35.E3
10.E3 39.E3
20.E3 43.E3
99999999.
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements ==
$ == End of level 2: Switches and piecewise linear elements ==
*
* . . . . . Voltage or current sources
13 F1 1 200.E3 1.2E-6 100.E3 50.E-6
$ == End of level 3: Sources ==
*
* . . . . . Voltage-output nodes
PP1 PP2 PP3 PP4 PP7 PP8 PP9 PP10 PP11 PP12 PP13 PP14 PP19
PP20 PP1 PT14 PS4 PS5 PS6 PS7 PS8 PS9 PS10 PS11 PS12 PS13
PS14 PS15 PS16 PS17 PS18 PS19 PS20 PIS1 PIS2
$ == End of level 4: User-defined voltage output ==
$ == Level 5: End of data case ==

```

CASO 4.1

```

*
* . . . . . Case identification card
CASO 4.1
* SIMULACAO COM UM PARA-RAIOS DE SiC NO PRIMARIO DO TRANSFORMADOR,
* SEM O USO DO VARISTOR E COM CARGA NA LINHA DE DISTRIBUICAO
* SECUNDARIA.
*
* . . . . . Time card
3.E-9 50.E-6 1.E-30
*
* . . . . . Lumped RLC branch
PP8 333.64
PP11 333.64
PP20 333.64
F1 PP1 333.64
PT14 4.8E-4
PT14 PS14 1.5E-3
PS14 2.E-3
* RESISTENCIAS E INDUTANCIAS RELATIVAS A CARGA NA LINHA DE DISTRI. SECUNDARIA
PS4 6.94626.0561

```


PS5	6.94626.0561
PS6	6.94626.0561
PS7	6.94626.0561
PS8	6.94626.0561
PS9	6.94626.0561
PS10	6.94626.0561
PS11	6.94626.0561
PS12	6.94626.0561
PS13	6.94626.0561
PS14	6.94626.0561
PS15	6.94626.0561
PS16	6.94626.0561
PS17	6.94626.0561
PS18	6.94626.0561
PS19	6.94626.0561
PS20	6.94626.0561

*
* Constant-parameters line

-1	PP1	PP2	333.64	3.E8	43. 1
-1	PP2	PP3	333.64	3.E8	56. 1
-1	PP3	PP4	333.64	3.E8	74. 1
-1	PP4	PIP1	333.64	3.E8	25. 1
-1	PIP1	PP7	333.64	3.E8	23. 1
-1	PP7	PP8	333.64	3.E8	34. 1
-1	PIP1	PP9	333.64	3.E8	18. 1
-1	PP9	PP10	333.64	3.E8	42. 1
-1	PP10	PP11	333.64	3.E8	42. 1
-1	PIP1	PP12	333.64	3.E8	7. 1
-1	PP12	PP13	333.64	3.E8	15. 1
-1	PP13	PP14	333.64	3.E8	23. 1
-1	PP14	PP19	333.64	3.E8	24. 1
-1	PP19	PP20	333.64	3.E8	29. 1
-1	PP14	PT14	333.64	3.E8	1. 1
-1	PS4	PS5	269.46	3.E8	29. 1
-1	PS4	PS6	297.15	3.E8	34. 1
-1	PS4	PIS1	269.46	3.E8	25. 1
-1	PIS1	PS7	269.46	3.E8	23. 1
-1	PS7	PS8	269.46	3.E8	34. 1
-1	PIS1	PS9	269.46	3.E8	18. 1
-1	PS9	PS10	269.46	3.E8	42. 1
-1	PS10	PS11	269.46	3.E8	42. 1
-1	PIS1	PS12	269.46	3.E8	7. 1
-1	PS12	PS13	269.46	3.E8	15. 1
-1	PS13	PS14	269.46	3.E8	23. 1
-1	PS14	PIS2	269.46	3.E8	20. 1
-1	PIS2	PS15	269.46	3.E8	36. 1
-1	PIS2	PS16	269.46	3.E8	8. 1
-1	PS16	PS17	269.46	3.E8	25. 1
-1	PS17	PS18	269.46	3.E8	25. 1
-1	PIS2	PS19	269.46	3.E8	5. 1
-1	PS19	PS20	269.46	3.E8	29. 1

*
* Nonlinear resistance (card 1)
92 PP14 40.E3

*
* Nonlinear resistance (card 2)
-20.E3 -43.E3
-10.E3 -39.E3
-5.E3 -35.E3
0. 0.
5.E3 35.E3


```

10.E3 39.E3
20.E3 43.E3
9999999.
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements ==
$ == End of level 2: Switches and piecewise linear elements ==
*
* . . . . . Voltage or current sources
13 F1 1 200.E3 1.2E-6 100.E3 50.E-6
$ == End of level 3: Sources ==
*
* . . . . . Voltage-output nodes
PP1 PP2 PP3 PP4 PP7 PP8 PP9 PP10 PP11 PP12 PP13 PP14 PP19
PP20 PIP1 PT14 PS4 PS5 PS6 PS7 PS8 PS9 PS10 PS11 PS12 PS13
PS14 PS15 PS16 PS17 PS18 PS19 PS20 PIS1 PIS2
$ == End of level 4: User-defined voltage output ==
$ == Level 5: End of data case ==

```

CASO 9A

```

*
* . . . . . Case identification card
CASO 9A
* SIMULACAO COM UM PARA-RAIOS DE SiC NO PRIMARIO DO TRANSFORMADOR
* E UM VARISTOR NO PONTO DE INTERSECAO PIS1.
*
* . . . . . Time card
3.E-9 50.E-6 1.E-30
*
* . . . . . Lumped RLC branch
PP8 333.64
PP11 333.64
PP20 333.64
F1 PP1 333.64
PT14 4.8E-4
PT14 PS14 1.5E-3
PS14 2.E-3
*
* . . . . . Constant-parameters line
-1 PP1 PP2 333.64 3.E8 43. 1
-1 PP2 PP3 333.64 3.E8 56. 1
-1 PP3 PP4 333.64 3.E8 74. 1
-1 PP4 PIP1 333.64 3.E8 25. 1
-1 PIP1 PP7 333.64 3.E8 23. 1
-1 PP7 PP8 333.64 3.E8 34. 1
-1 PIP1 PP9 333.64 3.E8 18. 1
-1 PP9 PP10 333.64 3.E8 42. 1
-1 PP10 PP11 333.64 3.E8 42. 1
-1 PIP1 PP12 333.64 3.E8 7. 1
-1 PP12 PP13 333.64 3.E8 15. 1
-1 PP13 PP14 333.64 3.E8 23. 1
-1 PP14 PP19 333.64 3.E8 24. 1
-1 PP19 PP20 333.64 3.E8 29. 1
-1 PP14 PT14 333.64 3.E8 1. 1
-1 PS4 PS5 269.46 3.E8 29. 1
-1 PS4 PS6 297.15 3.E8 34. 1
-1 PS4 PIS1 269.46 3.E8 25. 1
-1 PIS1 PS7 269.46 3.E8 23. 1

```



```

-1 PS7 PS8      269.46 3.E8 34.1
-1 PIS1 PS9      269.46 3.E8 18.1
-1 PS9 PS10      269.46 3.E8 42.1
-1 PS10 PS11     269.46 3.E8 42.1
-1 PIS1 PS12     269.46 3.E8 7.1
-1 PS12 PS13     269.46 3.E8 15.1
-1 PS13 PS14     269.46 3.E8 23.1
-1 PS14 PIS2     269.46 3.E8 20.1
-1 PIS2 PS15     269.46 3.E8 36.1
-1 PIS2 PS16     269.46 3.E8 8.1
-1 PS16 PS17     269.46 3.E8 25.1
-1 PS17 PS18     269.46 3.E8 25.1
-1 PIS2 PS19     269.46 3.E8 5.1
-1 PS19 PS20     269.46 3.E8 29.1

```

```

*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)

```

```

92 PP14      40.E3

```

```

*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)

```

```

-20.E3 -43.E3
-10.E3 -39.E3
-5.E3 -35.E3
0. 0.
5.E3 35.E3
10.E3 39.E3
20.E3 43.E3

```

```

99999999.

```

```

*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)

```

```

92 PIS1

```

```

*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)

```

```

-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.

```

```

99999999.

```

```

$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements ==

```

```

$ == End of level 2: Switches and piecewise linear elements ==

```

```

*
* . . . . . Voltage or current sources

```

```

13 F1 1 200.E3 1.2E-6 100.E3 50.E-6

```

```

$ == End of level 3: Sources ==

```

```

*
* . . . . . Voltage-output nodes

```

```

PP1 PP2 PP3 PP4 PP7 PP8 PP9 PP10 PP11 PP12 PP13 PP14 PP19
PP20 PIP1 PT14 PS4 PS5 PS6 PS7 PS8 PS9 PS10 PS11 PS12 PS13
PS14 PS15 PS16 PS17 PS18 PS19 PS20 PIS1 PIS2

```

```

$ == End of level 4: User-defined voltage output ==

```

```

$ == Level 5: End of data case ==

```


CASO 11B

*

* Case identification card

CASO 11B

* SIMULACAO COM UM PARA-RAIOS DE SiC NO PRIMARIO DO TRANSFORMADOR,

* UM VARISTOR DE ZnO NO SECUNDARIO DO TRANSFORMADOR E COM

* VARISTORES LIGADOS, AO MESMO TEMPO, NOS POSTES 5,6,8,11,15,18 E

* 20.

*

* Time card

3.E-9 50.E-6 1.E-30

*

* Lumped RLC branch

PP8 333.64

PP11 333.64

PP20 333.64

F1 PP1 333.64

PT14 4.8E-4

PT14 PS14 1.5E-3

PS14 2.E-3

*

* Constant-parameters line

-1 PP1 PP2 333.64 3.E8 43.1

-1 PP2 PP3 333.64 3.E8 56.1

-1 PP3 PP4 333.64 3.E8 74.1

-1 PP4 PIP1 333.64 3.E8 25.1

-1 PIP1 PP7 333.64 3.E8 23.1

-1 PP7 PP8 333.64 3.E8 34.1

-1 PIP1 PP9 333.64 3.E8 18.1

-1 PP9 PP10 333.64 3.E8 42.1

-1 PP10 PP11 333.64 3.E8 42.1

-1 PIP1 PP12 333.64 3.E8 7.1

-1 PP12 PP13 333.64 3.E8 15.1

-1 PP13 PP14 333.64 3.E8 23.1

-1 PP14 PP19 333.64 3.E8 24.1

-1 PP19 PP20 333.64 3.E8 29.1

-1 PP14 PT14 333.64 3.E8 1.1

-1 PS4 PS5 269.46 3.E8 29.1

-1 PS4 PS6 297.15 3.E8 34.1

-1 PS4 PIS1 269.46 3.E8 25.1

-1 PIS1 PS7 269.46 3.E8 23.1

-1 PS7 PS8 269.46 3.E8 34.1

-1 PIS1 PS9 269.46 3.E8 18.1

-1 PS9 PS10 269.46 3.E8 42.1

-1 PS10 PS11 269.46 3.E8 42.1

-1 PIS1 PS12 269.46 3.E8 7.1

-1 PS12 PS13 269.46 3.E8 15.1

-1 PS13 PS14 269.46 3.E8 23.1

-1 PS14 PIS2 269.46 3.E8 20.1

-1 PIS2 PS15 269.46 3.E8 36.1

-1 PIS2 PS16 269.46 3.E8 8.1

-1 PS16 PS17 269.46 3.E8 25.1

-1 PS17 PS18 269.46 3.E8 25.1

-1 PIS2 PS19 269.46 3.E8 5.1

-1 PS19 PS20 269.46 3.E8 29.1

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PP14 40.E3

*
* Nonlinear resistance (card 2)

-20.E3 -43.E3
-10.E3 -39.E3
-5.E3 -35.E3
0. 0.
5.E3 35.E3
10.E3 39.E3
20.E3 43.E3

9999999.

*
* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS5

*
* Nonlinear resistance (card 2)

-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.

9999999.

*
* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS6

*
* Nonlinear resistance (card 2)

-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.

9999999.

*
* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS8

*
* Nonlinear resistance (card 2)

-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.


```

100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.
9999999.
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PS11
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.
9999999.
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PS14
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.
9999999.
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PS15
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.

```



```

10.E3 600.
9999999.
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PS18
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.
9999999.
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PS20
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.
9999999.
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ == End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
13 F1 1 200.E3 1.2E-6 100.E3 50.E-6
$ == End of level 3: Sources =====
*
* . . . . . Voltage-output nodes
PP1 PP2 PP3 PP4 PP7 PP8 PP9 PP10 PP11 PP12 PP13 PP14 PP19
PP20 PIP1 PT14 PS4 PS5 PS6 PS7 PS8 PS9 PS10 PS11 PS12 PS13
PS14 PS15 PS16 PS17 PS18 PS19 PS20 PIS1 PIS2
$ == End of level 4: User-defined voltage output =====
$ == Level 5: End of data case =====

```

CASO 11C

*

* Case identification card

CASO 11C

* SIMULACAO COM UM PARA-RAIOS DE ZnO NO PRIMARIO DO TRANSFORMADOR

* E COM VARISTORES LIGADOS, AO MESMO TEMPO, NOS POSTES 5,6,8,11,

* 15,18 E 20.

*

* Time card

3.E-9 50.E-6 1.E-30

*

* Lumped RLC branch

PP8 333.64

PP11 333.64

PP20 333.64

F1 PP1 333.64

PT14 4.8E-4

PT14 PS14 1.5E-3

PS14 2.E-3

*

* Constant-parameters line

-1 PP1 PP2 333.64 3.E8 43. 1

-1 PP2 PP3 333.64 3.E8 56. 1

-1 PP3 PP4 333.64 3.E8 74. 1

-1 PP4 PIP1 333.64 3.E8 25. 1

-1 PIP1 PP7 333.64 3.E8 23. 1

-1 PP7 PP8 333.64 3.E8 34. 1

-1 PIP1 PP9 333.64 3.E8 18. 1

-1 PP9 PP10 333.64 3.E8 42. 1

-1 PP10 PP11 333.64 3.E8 42. 1

-1 PIP1 PP12 333.64 3.E8 7. 1

-1 PP12 PP13 333.64 3.E8 15. 1

-1 PP13 PP14 333.64 3.E8 23. 1

-1 PP14 PP19 333.64 3.E8 24. 1

-1 PP19 PP20 333.64 3.E8 29. 1

-1 PP14 PT14 333.64 3.E8 1. 1

-1 PS4 PS5 269.46 3.E8 29. 1

-1 PS4 PS6 297.15 3.E8 34. 1

-1 PS4 PIS1 269.46 3.E8 25. 1

-1 PIS1 PS7 269.46 3.E8 23. 1

-1 PS7 PS8 269.46 3.E8 34. 1

-1 PIS1 PS9 269.46 3.E8 18. 1

-1 PS9 PS10 269.46 3.E8 42. 1

-1 PS10 PS11 269.46 3.E8 42. 1

-1 PIS1 PS12 269.46 3.E8 7. 1

-1 PS12 PS13 269.46 3.E8 15. 1

-1 PS13 PS14 269.46 3.E8 23. 1

-1 PS14 PIS2 269.46 3.E8 20. 1

-1 PIS2 PS15 269.46 3.E8 36. 1

-1 PIS2 PS16 269.46 3.E8 8. 1

-1 PS16 PS17 269.46 3.E8 25. 1

-1 PS17 PS18 269.46 3.E8 25. 1

-1 PIS2 PS19 269.46 3.E8 5. 1

-1 PS19 PS20 269.46 3.E8 29. 1

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PP14

*

* Nonlinear resistance (card 2)

0. 0.

1.E3 24.4E3

5.E3 27.3E3

10.E3 28.8E3


```

20.E3 31.7E3
9999999.
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PS5
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.
9999999.
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PS6
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.
9999999.
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PS8
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.
9999999.
*
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)

```


92 PS11

*

* Nonlinear resistance (card 2)

-10.E3 -600.

-5.E3 -550.

-1.E3 -450.

-500. -400.

-100. -350.

-1. -300.

0. 0.

1. 300.

100. 350.

500. 400.

1.E3 450.

5.E3 550.

10.E3 600.

9999999.

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS15

*

* Nonlinear resistance (card 2)

-10.E3 -600.

-5.E3 -550.

-1.E3 -450.

-500. -400.

-100. -350.

-1. -300.

0. 0.

1. 300.

100. 350.

500. 400.

1.E3 450.

5.E3 550.

10.E3 600.

9999999.

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS18

*

* Nonlinear resistance (card 2)

-10.E3 -600.

-5.E3 -550.

-1.E3 -450.

-500. -400.

-100. -350.

-1. -300.

0. 0.

1. 300.

100. 350.

500. 400.

1.E3 450.

5.E3 550.

10.E3 600.

9999999.

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS20

*

* Nonlinear resistance (card 2)

-10.E3 -600.


```

-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.
9999999.
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ == End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
13 F1 1 200.E3 1.2E-6 100.E3 50.E-6
$ == End of level 3: Sources =====
*
* . . . . . Voltage-output nodes
PP1 PP2 PP3 PP4 PP7 PP8 PP9 PP10 PP11 PP12 PP13 PP14 PP19
PP20 PIP1 PT14 PS4 PS5 PS6 PS7 PS8 PS9 PS10 PS11 PS12 PS13
PS14 PS15 PS16 PS17 PS18 PS19 PS20 PIS1 PIS2
$ == End of level 4: User-defined voltage output =====
$ == Level 5: End of data case =====

```

CASO 11D

```

*
* . . . . . Case identification card
CASO 11D
* SIMULACAO COM UM PARA-RAIOS DE ZnO NO PRIMARIO DO TRANSFORMADOR,
* UM VARISTOR DE ZnO NO SECUNDARIO DO TRANSFORMADOR E COM
* VARISTORES LIGADOS, AO MESMO TEMPO, NOS POSTES 5,6,8,11,15,18 E
* 20.
*
* . . . . . Time card
3.E-9 50.E-6 1.E-30
*
* . . . . . Lumped RLC branch
PP8 333.64
PP11 333.64
PP20 333.64
F1 PP1 333.64
PT14 4.8E-4
PT14 PS14 1.5E-3
PS14 2.E-3
*
* . . . . . Constant-parameters line
-1 PP1 PP2 333.64 3.E8 43. 1
-1 PP2 PP3 333.64 3.E8 56. 1
-1 PP3 PP4 333.64 3.E8 74. 1
-1 PP4 PIP1 333.64 3.E8 25. 1
-1 PIP1 PP7 333.64 3.E8 23. 1
-1 PP7 PP8 333.64 3.E8 34. 1
-1 PIP1 PP9 333.64 3.E8 18. 1

```



```

-1 PP9 PP10      333.64 3.E8 42. 1
-1 PP10 PP11     333.64 3.E8 42. 1
-1 PIP1 PP12     333.64 3.E8 7. 1
-1 PP12 PP13     333.64 3.E8 15. 1
-1 PP13 PP14     333.64 3.E8 23. 1
-1 PP14 PP19     333.64 3.E8 24. 1
-1 PP19 PP20     333.64 3.E8 29. 1
-1 PP14 PT14     333.64 3.E8 1. 1
-1 PS4 PS5       269.46 3.E8 29. 1
-1 PS4 PS6       297.15 3.E8 34. 1
-1 PS4 PIS1      269.46 3.E8 25. 1
-1 PIS1 PS7      269.46 3.E8 23. 1
-1 PS7 PS8       269.46 3.E8 34. 1
-1 PIS1 PS9      269.46 3.E8 18. 1
-1 PS9 PS10      269.46 3.E8 42. 1
-1 PS10 PS11     269.46 3.E8 42. 1
-1 PIS1 PS12     269.46 3.E8 7. 1
-1 PS12 PS13     269.46 3.E8 15. 1
-1 PS13 PS14     269.46 3.E8 23. 1
-1 PS14 PIS2     269.46 3.E8 20. 1
-1 PIS2 PS15     269.46 3.E8 36. 1
-1 PIS2 PS16     269.46 3.E8 8. 1
-1 PS16 PS17     269.46 3.E8 25. 1
-1 PS17 PS18     269.46 3.E8 25. 1
-1 PIS2 PS19     269.46 3.E8 5. 1
-1 PS19 PS20     269.46 3.E8 29. 1

```

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PP14

*

* Nonlinear resistance (card 2)

```

0. 0.
1.E3 24.4E3
5.E3 27.3E3
10.E3 28.8E3
20.E3 31.7E3

```

9999999.

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS5

*

* Nonlinear resistance (card 2)

```

-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.

```

9999999.

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS6

*

* Nonlinear resistance (card 2)


```

-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.

```

```
9999999.
```

```
*
```

```
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
```

```
92 PS8
```

```
*
```

```
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
```

```

-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.

```

```
9999999.
```

```
*
```

```
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
```

```
92 PS11
```

```
*
```

```
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
```

```

-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.
-100. -350.
-1. -300.
0. 0.
1. 300.
100. 350.
500. 400.
1.E3 450.
5.E3 550.
10.E3 600.

```

```
9999999.
```

```
*
```

```
* . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
```

```
92 PS14
```

```
*
```

```
* . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
```

```

-10.E3 -600.
-5.E3 -550.
-1.E3 -450.
-500. -400.

```


-100. -350.
 -1. -300.
 0. 0.
 1. 300.
 100. 350.
 500. 400.
 1.E3 450.
 5.E3 550.
 10.E3 600.
 9999999.

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS15

*

* Nonlinear resistance (card 2)

-10.E3 -600.
 -5.E3 -550.
 -1.E3 -450.
 -500. -400.
 -100. -350.
 -1. -300.
 0. 0.
 1. 300.
 100. 350.
 500. 400.
 1.E3 450.
 5.E3 550.
 10.E3 600.
 9999999.

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS18

*

* Nonlinear resistance (card 2)

-10.E3 -600.
 -5.E3 -550.
 -1.E3 -450.
 -500. -400.
 -100. -350.
 -1. -300.
 0. 0.
 1. 300.
 100. 350.
 500. 400.
 1.E3 450.
 5.E3 550.
 10.E3 600.
 9999999.

*

* Nonlinear resistance (card 1)

92 PS20

*

* Nonlinear resistance (card 2)

-10.E3 -600.
 -5.E3 -550.
 -1.E3 -450.
 -500. -400.
 -100. -350.
 -1. -300.
 0. 0.
 1. 300.


```
100. 350.  
500. 400.  
1.E3 450.  
5.E3 550.  
10.E3 600.  
9999999.  
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements ==  
$ == End of level 2: Switches and piecewise linear elements ==  
*  
* . . . . . Voltage or current sources  
13 F1 1 200.E3 1.2E-6 100.E3 50.E-6  
$ == End of level 3: Sources ==  
*  
* . . . . . Voltage-output nodes  
PP1 PP2 PP3 PP4 PP7 PP8 PP9 PP10 PP11 PP12 PP13 PP14 PP19  
PP20 PIP1 PT14 PS4 PS5 PS6 PS7 PS8 PS9 PS10 PS11 PS12 PS13  
PS14 PS15 PS16 PS17 PS18 PS19 PS20 PIS1 PIS2  
$ == End of level 4: User-defined voltage output ==  
$ == Level 5: End of data case ==
```


[illegible]

NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA