ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUA
Itajubá

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

"INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE O PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO E O TRANSFORMADOR NA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE UMA SUBESTAÇÃO EM ALTA TENSÃO

JOAQUIM PAULO DA SILVA

ORIENTADOR :

PROF. MANOEL EDUARDO MIRANDA NEGRISOLI

TRABALHO DE DISSERTAÇÃO APRESENTADO À COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ITAJUBÁ - MG

1992

CLASS. 621.316.98:621.314
CUTT. 5586 i
TOMBO 719

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA ÚLTIMA DATA CARIMBADA.

30.11.95	17/01/95	13/04/97
10.12.95	31.01.96	27-01-97
28.12.95	14/02/96	31-01-97
11-01-94	28/02/96	24-02-97
25.01.94	11/03/96	
05/03/94	25/03/96	
11.4.94	08.04.96	
02/08/94	22.4.96	
16.9.94	27/05/96	
02.9.94	11.07.96	
14/12/94	25.7.96	
5-5-95	8-8-96	
14/08/95	23/08/96	
01/09/95	05.09.96	
14/09/95	20/09/96	
28/09/95	04.10.96	
12/10/95	24/10/96	
25.10.95	09.11.96	
06.11.95	27/11/96	
20.11.95	12.12.96	
03.12.95	01.01.97	
18.12.95		

Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecica Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 105 de 09.03.93, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "**Influência da Distância entre Pára-Raios de Óxido de Zinco e o Transformador na Coordenação de Isolamento de uma Subestação em Alta Tensão**" 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 **Joaquim Paulo da Silva.**

Itajubá, 12 de Março de 1993.

Prof. Ioshiaki Doi
1º Examinador - UNICAMP

Prof. Márcio Antônio Curi
2º Examinador - EFEI

Prof. Manuel Eduardo Miranda Negrisoli
3º Examinador - Orientador - EFEI

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

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação *"Influência da Distância entre Pára-Raios de Óxido de Zinco e o Transformador na Coordenação de Isolamento de uma Subestação em Alta Tensão"*

Autor: JOAQUIM PAULO DA SILVA

JULGAMENTO

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

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

Observações: _____

Itajubá, 12 de março de 1993.

Prof. Ioshiaki Doi
1º Examinador - UNICAMP

Prof. Márcio Antônio Curi
2º Examinador - EFEI

Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrisoli
3º Examinador - Orientador - EFEI

Aos meus pais,

pela existência

Aos meus irmãos e familiares,

pelo apoio

Aos amigos,

pela amizade

Aos professores,

pelo aprendizado

Aos funcionários da EFEI,

pela dedicação

À Liete e a Suzete,

pelo amor e carinho

Aos amigos

Prof. MANOEL EDUARDO MIRANDA NEGRISOLI E

Eng. MANUEL LUIS BARREIRA MARTINEZ,

pelo zêlo, esclarecimentos e acompanhamento no desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

A G R A D E C I M E N T O S

Creio eu, que citar nominalmente todos aqueles, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, certamente me levaria ao constrangimento de esquecer algum nome, que ao longo destes últimos anos me auxiliaram na elaboração deste, portanto, valho-me deste espaço para citar apenas o nome de alguém, que não vive mais conosco, mas certamente não esquecerei jamais e todos aqueles que me ajudaram peço-lhes desculpa por esta ousadia, e externo em seu nome os meus mais sinceros agradecimentos, pelo ontem,pelo hoje e por todos os dias de minha vida que virão, o meu " MUITO OBRIGADO " : DR. GERALDO RIBEIRO DE RESENDE JÚNIOR.

D E D I C A T Ó R I A

Na elaboração de uma dissertação, busca-se o saber e neste caminho ausenta-se dos amigos, familiares, esportes, enfim, passa-se a viver no mundo da tecnologia, dos livros, artigos e toda uma gama de equipamentos eletrônicos, que nos levam a acreditar, que a mais importante das descobertas é também a mais simples de todas. Que é a busca da paz com Deus e com todas as pessoas.

Dedico este trabalho a todas as pessoas, que extraíram das entrelinhas do contínuo evoluir um espaço para um aperto de mão e para algumas palavras sinceras de consideração e amizade.

E também a todos os mestrandos, que no decorrer da elaboração de sua dissertação foram impelidos a adiar seus propósitos, com a certeza, creio eu, de um dia retomar seus trabalhos.

RESUMO

Atualmente a coordenação de isolamento de uma subestação é feita de maneira clássica, estabelecendo-se uma margem de segurança (normalizada) entre as características de disrupção de um pára-raios convencional ou de tensão residual de um pára-raios a óxido de zinco e os níveis de isolamento dos equipamentos por ele protegidos. O caso mais crítico desta coordenação é o transformador por se constituir em um equipamento terminal, não possuir isolação auto-regenerativa e também por ser o equipamento de maior custo da subestação.

Devido a distância existente entre o pára-raios e o transformador, ocorre uma amplificação entre a tensão mantida nos terminais do equipamento protetor em relação ao transformador. Esta amplificação surge por reflexões devidas ao fenômeno das ondas viajantes e ao comportamento transitório dos enrolamentos do transformador. Dependendo da distância entre o pára-raios e o transformador , a margem de segurança entre a tensão mantida nos terminais do pára-raios e o nível de isolamento do transformador pode não ser satisfeita, vindo então a colocar em risco o isolamento do mesmo.

Neste trabalho propõe-se uma análise desta distância, comparando-se o desempenho de pára-raios convencionais de Carboneto de Silício (SiC) e os de tecnologia mais recente de Óxido de Zinco(ZnO).

A B S T R A C T

Nowadays the HV substation insulation coordination design is realized in a classic manner establishing a safety margin (normalized) between the conventional arresters sparkover voltage or the zinc oxide residual voltage characteristics and the protected equipments insulation levels. The most critical coordination case is the one related to the transformer because it is a terminal equipment and it doesn't have self-restoring isolation, and besides it is the most expensive equipment in a substation.

Due to the distance between the arrester and the transformer occurs a voltage amplification between the arrester voltage in the protective device, in relation to the transformer. These reflections are related to traveling waves phenomenon and the transformer windings transient behavior. Depending on the distance between the arrester and the transformer, this safety margin might not be satisfied and this may represents a risk to the transformer insulation.

The purpose of this reserch is the analysis of such distances, and compare the performance of the conventional arresters of silicon-carbide (SiC), and the most recent tecnology of zinc-oxide(ZnO).

CONTEÚDO

PÁGINA

RESUMO 06

ABSTRACT 07

CONTEÚDO 08

LISTA DE TABELAS 11

LISTA DOS GRÁFICOS 12

LISTA DAS CURVAS TÍPICAS 13

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais 15

1.2 - Estrutura da Dissertação 16

CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR

2.1 - Aspectos Gerais 18

2.2 - Distribuição Inicial de Tensão em um Enrolamento. 21

2.3 - Método das Ondas Estacionárias 22

CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE DISRUPÇÃO DOS PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO E DE CARBONETO DE SILÍCIO

3.1 - Evolução 34

3.2 - Aspectos Gerais 35

3.3 - Principais Características do Pára-raios à Base de Óxido de Zinco 40

3.3.1 - Degradação dos Elementos de Óxido Metálico..... 46

3.3.2 - Curva Característica Tensão-Corrente do Bloco de Óxido de Zinco..... 46

3.3.3 - Operação do Pára-raios de Óxido de Zinco e o de Carboneto de Silício..... 47

3.3.4 - Considerações..... 48

3.4 - Principais Características do Pára-raios de Carboneto de Silício..... 49

3.4.1 - Considerações..... 51

CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DOS PARÂMETROS PARA OS ESTUDOS

4.1 - Introdução..... 53

4.2 - Simulação Utilizando Modelo Monofásico..... 57

4.3 - Origem das Sobretensões..... 58

4.3.1 - Sobretensões Atmosféricas que podem Atingir uma Subestação..... 60

4.3.2 - Cálculo da Impedância de Surto do Barramento da Subestação..... 61

4.3.3 - Velocidade de Propagação do Surto..... 62

4.3.4 - Capacitância de Surto do Transformador... 63

4.3.5 - Características dos Pára-raios..... 63

4.4 - Configuração da Subestação..... 68

4.5 - Objetivo dos Estudos..... 69

4.6 - Parâmetros que Afetam a Distância de Separação... 69

4.7 - Critérios Adotados..... 70

4.8 - Considerações a Respeito dos Parâmetros adotados na Simulação..... 72

4.8.1 - Passo de Integração..... 72

4.8.2 - Curva Característica Tensão x Corrente do Pára-raios..... 72

CAPÍTULO 5 - RESULTADO OBTIDOS

5.1 - Introdução..... 74

5.2 - Principais Observações dos Resultados Obtidos.... 75

5.2.1 - Pára-raios de 228 KV com Base na Norma IEC para seu Limite Inferior..... 75

5.2.2 - Pára-raios de 228 KV com Base na Norma IEC para seu Limite Superior..... 80

5.2.3 - Pára-raios de 192 KV, de óxido de Zinco... 85

5.2.4 - Pára-raios de 228 KV, de óxido de Zinco... 90

5.2.5 - Pára-raios Convencional de 216 KV..... 95

5.2.6 - Curvas Típicas..... 100

5.3 - Variação do Comprimento da Conexão de Descida ... 105

5.4 - Curva Final..... 107

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

UTILIZAÇÃO DO ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP). 118

LISTA DE TABELAS

Página

5.1...Tabela com os resultados referentes ao Pára-raios de tensão nominal de 228kV com características V x I da Norma IEC para o limite inferior..... 76

5.1.1.Tabela com os valores da relação entre a tensão no transformador e tensão no pára-raios com base na tabela 5.1..... 77

5.2.. Tabela com os resultados referentes ao Pára-raios de tensão nominal de 228kV com características V x I da Norma IEC para o limite superior..... 81

5.2.1.Tabela com os valores da relação entre a tensão no transformador e tensão no pára-raios com base na tabela 5.2..... 82

5.3...Tabela com os resultados referentes ao Pára-raios de tensão nominal de 192kV de óxido de Zinco..... 86

5.3.1.Tabela com os valores da relação entre a tensão no transformador e tensão no pára-raios com base na tabela 5.3..... 87

5.4...Tabela com os resultados referentes ao Pára-raios de tensão nominal de 228kV de óxido de Zinco..... 91

5.4.1.Tabela com os valores da relação entre a tensão no transformador e tensão no pára-raios com base na tabela 5.4..... 92

5.5...Tabela com os resultados referentes ao Pára-raios de tensão nominal de 216kV de óxido de Zinco..... 96

5.5.1.Tabela com os valores da relação entre a tensão no transformador e tensão no pára-raios com base na tabela 5.5..... 97

5.6...Tabela com os resultados referentes ao Pára-raios de tensão nominal de 216kV Convencional 96

5.6.1.Tabela com os valores da relação entre a tensão no transformador e tensão no pára-raios com base na tabela 5.6..... 97

5.7...Tabela com os resultados para a variação do comprimento da conexão de descida.....106

LISTA DOS GRÁFICOS

Página

5.1...Gráfico da Tabela 5.1, acrescentado os valores de sobretensão obtidos através da fórmula matemática... 78

5.1.1.Gráfico da Tabela 5.1 79

5.2...Gráfico da Tabela 5.2, acrescentado os valores de sobretensão obtidos através da fórmula matemática... 83

5.2.1.Gráfico da Tabela 5.2 84

5.3...Gráfico da Tabela 5.3, acrescentado os valores de sobretensão obtidos através da fórmula matemática... 88

5.3.1.Gráfico da Tabela 5.3 89

5.4...Gráfico da Tabela 5.4, acrescentado os valores de sobretensão obtidos através da fórmula matemática... 93

5.4.1.Gráfico da Tabela 5.4 94

5.5...Gráfico da Tabela 5.6, acrescentado os valores de sobretensão obtidos através da fórmula matemática... 98

5.5.1.Gráfico da Tabela 5.6 99

LISTA DAS CURVAS TÍPICAS

Página

5.1...Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 5m referente ao pára-raios de 228 kV da IEC limite inferior..... 101

5.1.1.Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 60m referente ao pára-raios de 228 kV da IEC limite inferior..... 101

5.2...Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 5m referente ao pára-raios de 228 kV da IEC limite superior..... 101

5.2.1.Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 60m referente ao pára-raios de 228 kV da IEC limite superior..... 102

5.3...Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 5m referente ao pára-raios de 192 kV de Óxido de Zinco..... 102

5.3.1.Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 60m referente ao pára-raios de 192 kV de Óxido de Zinco..... 102

5.4...Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 5m referente ao pára-raios de 228 kV de Óxido de Zinco..... 103

5.4.1.Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 60m referente ao pára-raios de 228 kV de Óxido de Zinco..... 103

5.5...Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 5m referente ao pára-raios de 216 kV de Óxido de Zinco..... 103

5.5.1.Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 60m referente ao pára-raios de 216 kV de Óxido de Zinco..... 104

5.6...Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 5m referente ao pára-raios de 216 kV Convencional..... 104

5.6.1.Curvas típicas de tensão no pára-raios e no transformador para uma distância de 60m referente ao pára-raios de 216 kV Convencional..... 104

5.7...Curva Final..... 108

C A P Í T U L O 1

INTRODUÇÃO

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A coordenação de isolamento em sistemas de alta tensão é um problema complexo. Visto que os equipamentos instalados nos sistemas elétricos estão sujeitos aos mais diversos tipos de esforços, sendo que cada um tem suas características próprias, provocando para tanto, um determinado tipo de esforço nos equipamentos, o que pode levar a possíveis situações de falha e, que em casos menos severos, prejudicam o bom funcionamento do equipamento individualmente, fato que, por sua vez, compromete o sistema de modo global. Neste estudo serão tratadas as solicitações impostas por descargas atmosféricas, salientando que este parâmetro é de fundamental importância para a coordenação de isolamento de sistemas elétricos com tensões nominais até 242 KV.

E dentro deste contexto serão analisadas as sobretensões em um transformador de potência terminal que é o equipamento de valor mais elevado dentro de uma subestação, considerando sua proteção efetuada por um pára-raios. Este pára-raios deve garantir ao transformador de potência um nível de sobretensão inferior ao nível básico de isolamento, dentro da margem de segurança, a fim de evitar danos irreversíveis ao mesmo.O pára-raios pode ser constituído por centelhadores em série com pastilhas carboneto de silício ou como modernamente, somente por pastilhas de óxido de zinco.

Um transformador de potência possui um isolamento não regenerativo o que leva a elaboração de um projeto de proteção do mesmo de forma determinística, levando-se em consideração ainda uma margem de proteção. Neste ponto que entram em cena os estudos de coordenação de isolamento, que visam garantir uma proteção mínima aos equipamentos, proporcionando custos menores,em termos de isolamento, pois, os mesmos são preponderantes em sistemas elétricos de potência.

1.2 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A abordagem da dissertação constará de seis capítulos, mais os anexos julgados necessários para uma completa compreensão do estudo desenvolvido.A seguir será mostrado de forma sucinta o conteúdo de cada capítulo.

No segundo capítulo apresentou-se a distribuição inicial da tensão nos enrolamentos do transformador de potência, através de uma formulação matemática e apresentação de gráficos representativos deste comportamento.

No terceiro capítulo buscou-se a apresentação das características básicas das duas tecnologias utilizadas na construção dos pára-raios para sistemas de potência, inclusive contrastando as características de uma tecnologia com a outra.

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 as possibilidades de representação são muitas e não se tem o conhecimento completo das inúmeras variáveis envolvidas com o fenômeno.As aproximações realizadas, foram feitas de modo a garantir uma real representação do comportamento dos equipamentos, a fim de se obter resultados que reflitam a realidade e também voltadas para o lado da segurança. Isto é, buscou-se nas simulações, as situações mais críticas onde as solicitações aos equipamentos fossem mais severas, verificando o nível de proteção proporcionado pelo pára-raios.

No quinto capítulo foram apresentados os resultados obtidos, respectivos gráficos e dados ilustrativos.

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

Finalmente colocou-se o anexo para a entrada de dados no programa computacional utilizado nas simulações, com um breve histórico sobre o mesmo, face a grande utilização deste programa para cálculos de transitórios eletromagnéticos.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

2.1 -ASPECTOS GERAIS

Um transformador de potência sob condições normais de operação possui uma distribuição linear uniforme de tensão em seus enrolamentos. O mesmo não ocorre para o período transitório; nesta condição, um transformador de potência responde a uma tensão de impulso como uma rede de capacitâncias séries, capacitâncias para terra, resistências e indutâncias [1,2].

Em uma análise de transitórios, a precisão dos resultados são dependentes do grau de refinamento contido na representação matemática dos enrolamentos. Um modelo minucioso representa todas as espiras, bem como, inclui todas as capacitâncias e indutâncias entre espiras do enrolamento. No modelo muito utilizado em estudos de coordenação de isolamento os enrolamentos são representados por capacitâncias concentradas, no qual se obtém razoável precisão nos estudos a efetuar. Considerando um enrolamento composto de uma série de discos, camadas ou panquecas como mostra a figura 2.1, temos que cada bloco retangular com a sua referida numeração representa a seção transversal de uma espira. O enrolamento terminal de linha é o ponto A e o enrolamento continua da mesma maneira além do ponto E.

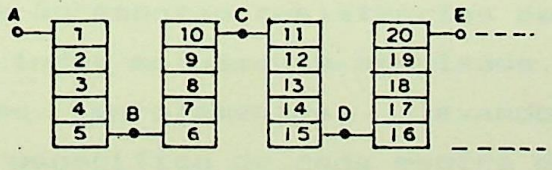


Fig. 2.1 - Enrolamento de um transformador de potência

Fazendo a equivaléncia de cada seção transversal às indutâncias e capacitâncias para a terra e série referidas a elas, e realizando a associação de todas as seções obtém-se a figura 2.2

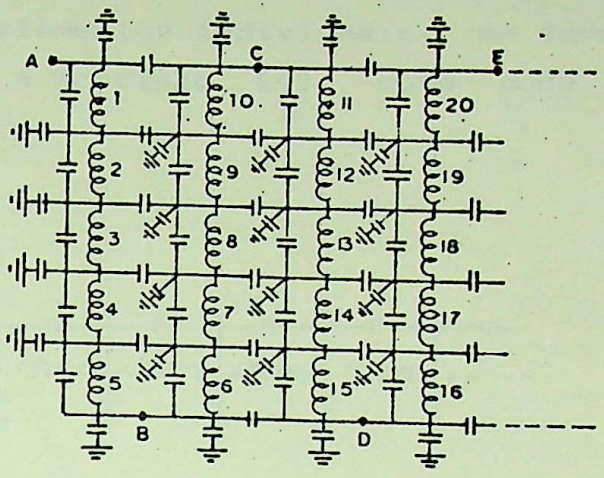


Fig. 2.2 - Rede de Indutâncias e Capacitâncias

Na figura 2.2, não foram representadas todas as capacitâncias entre espiras,todas as indutâncias mútuas entre espiras. E a resistência não foi incluída. 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 superficies 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 [3]. 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 enrolamemto, pode não ser justificada.

Para obter-se um equivalente mais simples, realiza-se uma associação dos elementos consecutivamente no trecho do enrolamento que houver esta possibilidade. A exatidão, neste caso de supressão dos elementos individuais, em favor dos globais não afeta grandemente a precisão [4], como pode ser observado na figura 2.3.

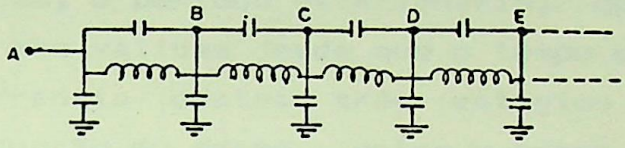


Fig. 2.3- Representação Simplificada do Enrolamento do Transformador de Potência

Nota-se que na figura 2.3, a diferença entre uma linha de transmissão, representada por parâmetros concentrados e um enrolamento de transformador de potência representado da mesma forma são as capacitâncias séries e as indutâncias mútuas.

Quando um surto de tensão atinge um transformador de potência , seus enrolamentos se comportam de forma diferente com o decorrer do tempo, no primeiro instante os enrolamentos se comportam como uma rede de capacitâncias para terra e série . 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 rápidamente, 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 de potência pode alcançar duas vezes a magnitude da tensão do surto ou duas vezes a tensão apresentada pelos terminais do pára-raios. Este fenômeno acontece no chamado período inicial da solicitação do surto.

Decorridos os instantes iniciais, a corrente através dos enrolamentos do transformador de potência começa a se estabelecer criando interações entre o campo elétrico e magnético. Isto causa oscilações de corrente e tensões de alta freqüência; este é o período intermediário[5].

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 μs após a aplicação do surto de tensão [6]. Isto causaria uma nova equalização do surto, sob às condições já existentes no mesmo, solicitando ainda mais o enrolamento.

2.2 - DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE TENSÃO EM UM ENROLAMENTO

Quando um surto de tensão penetra nos terminais do enrolamento de um transformador de potência , a distribuição inicial da tensão no mesmo depende praticamente apenas da magnitude e distribuição das capacitâncias, isto é, capacitâncias entre bobinas, entre espiras e bobinas e entre estes elementos e os demais elementos aterrados do transformador de potência , o tanque, o núcleo, a estrutura e as fases remanescentes, ou melhor, depende especificamente da relação entre a capacitância para a terra e a capacitância série do enrolamento [8,9].

Conforme simplificação mencionada anteriormente, assume-se que cada espira está blindada pelas espiras adjacentes. O desenvolvimento acima é válido somente para tempo de estudos da ordem de décimos de microsegundos, onde a corrente que flui pela indutância é desprezível. Internamente em um transformador de potência sob tais condições, podem ocorrer oscilações de altas freqüências ocasionando altos gradientes nos enrolamentos. A análise desta distribuição pode ser realizada através do método das ondas estacionárias.

A distribuição inicial de tensão tem a forma de uma curva exponencial, isto porque, a tensão tem uma maior concentração nas espiras mais próximas do lado da linha por onde o surto alcança o enrolamento. Tem que fazer aqui uma referência ao fato do transformador de potência possuir o neutro isolado ou aterrado.Para avaliar estes dois fatores e os demais que possuirem alguma relevância, será feito o estudo da resposta do enrolamento uniforme de camada simples de um transformador de potência monofásico a um surto de tensão. Na análise leva-se em conta apenas um enrolamento simples,porque um transformador de potência trifásico pode ser representado por apenas uma fase,com a condição de que as outras fases estejam aterradas.

2.3 - MÉTODO DAS ONDAS ESTACIONÁRIAS

De acordo com a representação do enrolamento do transformador de potência pela figura 2.3, considera-se agora a capacitância distribuída uniformemente ao longo da camada do enrolamento com um número finito de malhas.Se um surto de tensão é subitamente aplicado na rede de indutâncias e capacitâncias do enrolamento, a resposta da solicitação do mesmo será o resultado dos campos elétrico e magnético que surgirão ao longo da bobina, e será função do tempo e do lugar em que se deseja conhecer a resposta. Para o curto espaço de tempo do período inicial, a distribuição da tensão, é apenas em função do campo elétrico, ou seja das capacitâncias.

Para fins desta análise, considera-se o enrolamento dividido em muitos elementos diferenciais, cada um possuindo capacitância para terra e série,como pode ser visto na figura 2.4.

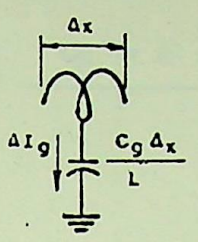


Fig. 2.4 - Representação do Elemento Diferencial

A capacitância para terra por unidade de comprimento é C_g / l e a capacitância série é C_s por unidade de comprimento. Sendo que l é o comprimento do enrolamento.

A direção positiva para x por convenção é do neutro para o terminal de linha. Considera-se um comprimento Δx da figura 2.4. A capacitância para terra será (C_g / l) Δx. Equacionando-se, tem-se o seguinte desenvolvimento abaixo [5,7]:

A corrente que flui para a terra através deste elemento é

$$\Delta I_g = \frac{C_g \, \Delta x \, w \, E}{l} \qquad (2.1)$$

onde, E = Tensão em relação a um ponto do enrolamento
I_g = Corrente total na capacitância de terra
w = velocidade angular $= 2\pi f$

como,

$$\Delta I_g = \frac{dI_s}{dx} \, \Delta x \qquad (2.2)$$

associa-se as equações (2.1) (2.2)

$$\frac{d\,I_s}{dx} = \frac{C_g\ w\ E}{l} \qquad (2.3)$$

onde,

I_s = corrente na capacitância série

Faz-se agora a corrente para a capacitância série

$$I_s = C\,\frac{dE}{dt} \qquad (2.4)$$

$$C_s\ \Delta x = l\ C_s \qquad (2.5)$$

A capacitância série para um comprimento elementar é:

$$C_s = \frac{l\ C_s}{\Delta x} \qquad (2.6)$$

A tensão através do elemento é:

$$\Delta E_s = \frac{dE}{dx}\ \Delta x \qquad (2.7)$$

A corrente na capacitância série será então:

$$I_s = \frac{l C_s}{\Delta x} \frac{dE}{dx} \Delta x \qquad (2.8a)$$

$$I_s = l C_s w \frac{dE}{dx} \qquad (2.8b)$$

Deriva-se, temos:

$$\frac{dI_s}{dx} = l C_s w \frac{d^2 E}{dx^2} \qquad (2.9)$$

Iguala-se, as equações (2.3) e (2.9)

$$\frac{C_g w E}{l} = l C_s w \frac{d^2 E}{dx^2}$$

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{C_g w E}{l} \cdot \frac{1}{l C_s w}$$

$$\frac{d^2 E}{dx^2} - \frac{1}{l^2} \cdot \frac{C_g}{C_s} E = 0 \qquad (2.10)$$

A solução para a equação 2.10, é realizada através da utilização do operador diferencial de Heaviside, $p = d / dt$, para uma equação diferencial homogênea, então:

$$p^2 E - \frac{1}{l^2} \cdot \frac{C_g}{C_s} E = 0$$

$$\left[p^2 - \frac{1}{l^2} \cdot \frac{C_g}{C_s} \right] E = 0$$

Logo,

$$Y_H(x) = p^2 - \frac{1}{l^2} \cdot \frac{C_g}{C_s}$$

E a equação característica é:

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

As raízes características são:

$$p = \pm \frac{1}{l} \sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$$

Assim

$$E(x) = K_1 \varepsilon^{px} + K_2 \varepsilon^{-px} \qquad (2.11)$$

Onde as constantes K_1 e K_2 dependem das condições de fronteira da análise.

Faz-se a análise para o neutro do transformador de potência aterrado, tem-se:

em $x = 0$ $E = 0$

em $x = l$ $E' = V$

Sendo V a amplitude da Função do surto, leva em (2.11)

$$\begin{cases} 0 = K_1 + K_2 \\ V = K_1\, \varepsilon^{pl} + K_2\, \varepsilon^{-pl} \end{cases}$$

Resolve-se o sistema

$$K_2 = -K_1$$
$$V = K_1\, \varepsilon^{pl} - K_1\, \varepsilon^{-pl}$$
$$V = K_1\, (\, \varepsilon^{pl} - \varepsilon^{-pl}\,)$$

$$K_1 = \frac{V}{\varepsilon^{pl} - \varepsilon^{-pl}}$$

Faz-se

$$pl = \alpha = \sqrt{\frac{Cg}{Cs}}$$

Agora

$$K_1 = \frac{V}{\varepsilon^{\alpha} - \varepsilon^{-\alpha}} \qquad (2.12)$$

Relaciona-se a expressão exponencial (2.12) com a definição da função hiperbólica:

$$\text{senh } x = \frac{\varepsilon^{x} - \varepsilon^{-x}}{2}$$

Encontra-se:

$$2 \text{ senh } x = \varepsilon^{x} - \varepsilon^{-x}$$

Isto é,

$$2 \text{ senh } \alpha = \varepsilon^{\alpha} - \varepsilon^{-\alpha}$$

A expressão (2.12) fica assim

$$K_2 = -K_1 = \frac{V}{2 \text{ senh } \alpha} \qquad (2.13)$$

Substituindo (2.13) em (2.11)

$$E = \frac{V}{2 \text{ senh } \alpha} \varepsilon^{px} - \frac{V}{2 \text{ senh } \alpha} \varepsilon^{-px}$$

$$E = \frac{V}{2 \text{ senh } \alpha} (\varepsilon^{px} - \varepsilon^{-px})$$

$$E = \frac{V}{2 \text{ senh } \alpha} \; 2 \text{ senh } px$$

$$E = V \frac{\text{senh } px}{\text{senh } \alpha}$$

$$\alpha = pl \rightarrow p = \frac{\alpha}{l}$$

$$E = V \frac{\text{senh } \left(\frac{\alpha x}{l} \right)}{\text{senh } \alpha} \qquad (2.14)$$

Fazendo a análise, agora para o neutro isolado.

em $x = l$ $\qquad E = V$

em $x = 0$ $\qquad I_s = 0$

Assim de 2.8b obtém-se

$$I_s = l\, C_s\, w \frac{dE}{dx} \qquad (2.15)$$

Substituindo (2.11) em (2.15)

$$I_s = l\, C_s\, w \frac{d}{dx} K_1\, \varepsilon^{px} + K_2\, \varepsilon^{-px}$$

$$I_s = l\, C_s\, w \left(K_1\, \varepsilon^{px} - K_2\, \varepsilon^{-px} \right) \qquad (2.16)$$

Para as condições de contorno $I_s = 0$ em $x = 0$

$$0 = l\, C_s\, w\, (K_1\, \varepsilon^0 - K_2\, \varepsilon^0)$$

$$0 = l\, C_s\, w\, (K_1 - K_2)\, \varepsilon^0$$

$$0 = l\, C_s\, w\, (K_1 - K_2)\, p \qquad (2.16b)$$

p = constante = 1

$$K_1 = K_2$$

Levando (2.16b) em (2.11)

$$E = K_1\, \varepsilon^{px} + K_1\, \varepsilon^{-px}$$

$$E = K_1\, (\varepsilon^{px} + \varepsilon^{-px})$$

$$E = K_1\, 2 \cosh px$$

Fazendo agora $x = l$ $E = V$; tem-se

$$V = K_1\, 2 \cosh pl$$

$$K_1 = \frac{V}{2 \cosh pl} \rightarrow K_1 = K_2 = \frac{V}{2 \cosh \alpha} \qquad (2.17)$$

Levando (2.17) em (2.11)

$$E = \frac{V}{2 \cosh \alpha}\, \varepsilon^{px} + \frac{V}{2 \cosh \alpha}\, \varepsilon^{-px}$$

$$E = \frac{V}{2 \cosh \alpha}\, (\varepsilon^{px} + \varepsilon^{-px})$$

$$E = \frac{V}{2 \cosh \alpha} \cdot 2 \cosh px$$

Então

$$E = V \frac{\cosh \left(\frac{\alpha x}{l} \right)}{\cosh \alpha} \qquad (2.18)$$

As equações (2.14) e (2.18) descrevem a distribuição inicial da tensão para um enrolamento solicitado por um surto de tensão para exemplificação da utilização das expressões citadas, tem-se então as curvas da distribuição inicial de tensão , em função da variação de α, isto porque este fator é de extrema importância no desenvolvimento da tensão inicial. Como pode ser observado abaixo, quanto menor for a relação entre a capacitância para a terra e a capacitância série do enrolamento, mais uniforme será a distribuição inicial da tensão.

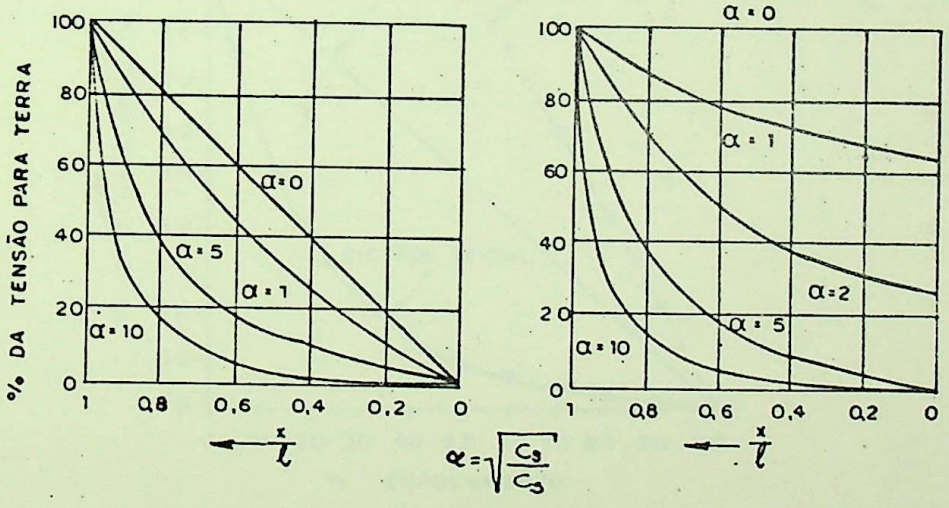
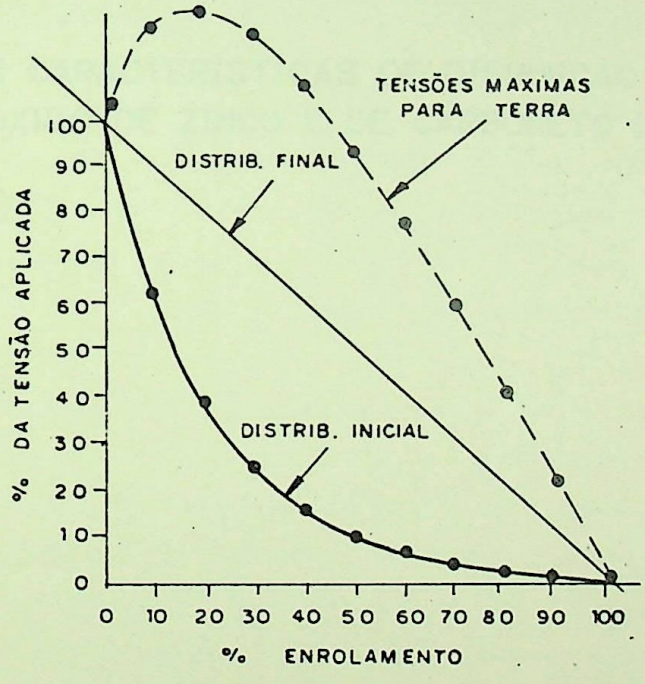


Fig.2.5-Distribuição inicial de tensão em um enrolamento uniforme em resposta a um surto de tensão de função unitária

(a) neutro aterrado (b) neutro isolado

Pode ser observado através dos gráficos, que para o caso de neutro aterrado os terminais do enrolamento são mantidos em um potencial fixo.No caso do neutro isolado o terminal do lado da linha é fixo em um valor, enquanto que o neutro é livre para oscilar.Estas oscilações ocorrem logo após a chegada do surto nos terminais do transformador de potência . Para grandes valores de α a distribuição inicial de tensão tende a se concentrar nos estágios iniciais do enrolamento, isto é, se concentra nas espiras iniciais. A capacitância do transformador de potência é um resultado da geometria dos enrolamentos, isto é , da disposição física das espiras e bobinas com relação às outras e com relação às partes aterradas da estrutura.



Na figura 2.6, temos a apresentação da distribuição inicial de surto de tensão e a envoltória das oscilações com $\alpha = 5$.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE DISRUPÇÃO DOS PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO E DE CARBONETO DE SILÍCIO

CAPÍTULO - 3

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE DISRUPÇÃO DOS PÁRA-RAIOS DE OXIDO DE ZINCO E DE CARBONETO DE SILÍCIO

3.1 - EVOLUÇÃO

Em estudos de coordenação de isolamento de subestações, a aplicação dos equipamentos protetores, deve contemplar entre outros os fatores relativos a custo do equipamento protegido, importância da instalação , metodologia das concessionárias, bem como, a necessidade de se dotar o sistema elétrico de alta confiabilidade, de modo a garantir aos setores produtivos e consumidores em geral a certeza de um fornecimento contínuo. A utilização adequada de equipamento para proteção contra surtos de tensão reduz as falhas do sistema, devido a sobretensões e permite o projeto do nível básico de isolamento dos equipamentos em níveis mais reduzidos, diminuindo os custos,pois, com a crescente elevação dos níveis de tensão, os custos dos isolamentos dos equipamentos tornam-se preponderantes, sendo então desejável um nível básico de isolamento o mais baixo possível, evento este possível com a utilização adequada de equipamentos para proteção entre outros aspectos.

Um dos equipamentos mais utilizado para esta finalidade é o pára-raios, cuja importância é garantida pelo elevado desempenho oferecido na proteção dos equipamentos terminais, entre eles, principalmente, o transformador de potência.

Historicamente, tem-se que o desenvolvimento deste equipamento foi de fundamental importância para a melhoria da continuidade e confiabilidade do atendimento dos sistemas elétricos. Uma vez que a utilização de centelhadores provoca em sua atuação um curto fase-terra, necessitando para tanto, da operação da proteção do sistema para eliminar a falha.

Passou-se logo após pela utilização de pára-raios com resistores lineares e em seguida passou para os de resistores não lineares, que são caracterizados por uma resistência que diminui com o aumento da tensão aplicada, ambos com centelhador série. Posteriormente evoluiu-se então para os pára-raios que se valiam do alongamento do arco nos centelhadores em série, para cortar o caminho da corrente subsequente pouco antes da passagem pelo zero de tensão [14].

Atualmente utiliza-se pára-raios a óxido metálico, última etapa evolutiva deste equipamento que possui características protetivas que mais se aproximam das características ideais.

E como consequência de todo este processo evolutivo, tem-se cada vez mais aprimoradas as técnicas de coordenação de isolamento, fato que garante uma melhor qualidade de atendimento, a todo este processo associa-se também uma otimização nos custos do isolamento dos equipamentos a proteger, pois, a melhoria das técnicas aplicadas e dos pára-raios, permitem reduzir as margens de segurança, fato que, resulta na otimização do isolamento dos equipamentos e consequente redução dos custos. Devido aos diversos modelos de pára-raios, e aos vários fabricantes dos mesmos, com filosofias próprias de fabricação. Procurar-se-á nesta análise dar a devida ênfase, aos aspectos comuns, afim de ser aplicáveis dentro de certos critérios ao universo de pára-raios.

3.2 - ASPECTOS GERAIS

Uma subestação está sujeita à sobretensões de manobra, atmosféricas e temporárias, a fim de evitar que os equipamentos da mesma se danifiquem, são colocados dispositivos de proteção para protegê-los.

Os pára-raios são os dispositivos mais utilizados para esta função.O equipamento inicialmente utilizado, para proteção foi o centelhador que consiste 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.

A principal desvantagem apresentada pela utilização do centelhador é que após sua disrupção,é estabelecido um curto fase-terra, que por sua vez leva a um desligamento. Isto ocorre devido a incapacidade do equipamento em interromper a corrente subsequente, após a sua atuação em presença da sobretensão. Foram introduzidos então os resistores não-lineares à base de carboneto de silício,em série com o centelhador, uma vez que os resistores de carboneto de silício possui uma elevada corrente de fuga para a tensão nominal fato que torna imprescindível o uso de centelhadores, cujo funcionamento ocorre como descrito abaixo.

Em regime normal o pára-raios é semelhante a um circuito aberto. Na presença de uma sobretensão o centelhador dispara em um valor predefinido e estabelece a circulação de uma corrente pelo resistor não linear, denominada corrente de descarga, que mantém o nível da tensão em seus terminais, aproximadamente constante, denominada tensão residual, conforme pode ser observado na figura 3.1, que mostra a característica transitória V x I, de um pára-raios convencional com centelhador [15].

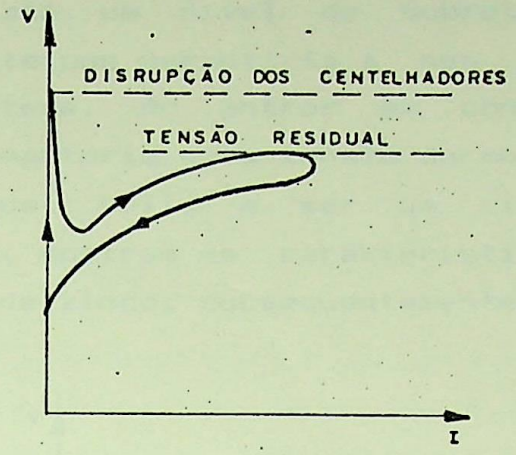


Fig. 3.1 - Trajetória do transiente V-I de um pára-raios convencional

A utilização de pára-raios com centelhadores apresenta algumas desvantagens, são elas:

-O pára-raios com centelhador é constituído de um grande número de peças comparado com o pára-raios a óxido de zinco aumentando consequentemente a probabilidade de falha ou erro na montagem.

-As condições atmosféricas e a natureza estatística das sobretensões influenciam no comportamento disruptivo do centelhador.

-Um equipamento protegido por um pára-raios com centelhador recebe uma tensão transitória, quando de sua atuação.

De modo a minimizar os problemas advindos da utilização de centelhadores na constituição dos pára-raios é necessário eliminá-los, ou seja, utilizar somente elementos extremamente não lineares, fato obtido com os resistores à base de óxido de zinco.Isto significa dizer que um pára-raios com resistores de óxido de zinco, sem centelhadores série, possui uma característica V x I, que muito se aproxima daquela de um pára-raios ideal.

Pára-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 [14].As figuras 3.2 e 3.3, mostram as características de um pára-raios ideal e de óxido de zinco, subsequentemente [9]:

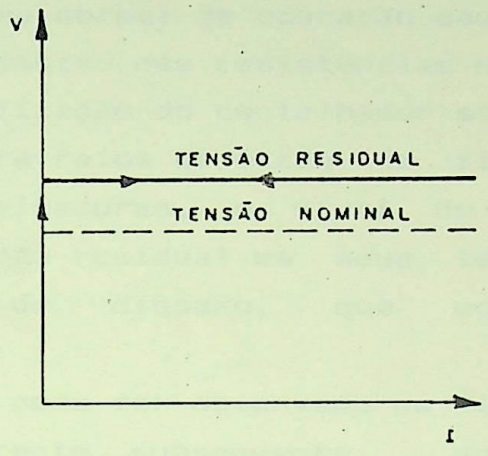


Fig. 3.2 -Característica V x I de um pára-raios Ideal

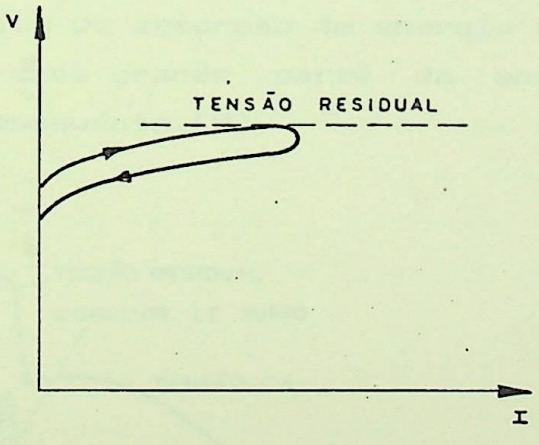


Fig 3.3 -Trajetória do Transiente V x I de um Pára-raios de Óxido Metálico

Os pára-raios de óxido de zinco não necessitam de centelhador, porque apresentam uma característica extremamente não linear. Isto é, para tensões de serviço, a corrente de fuga que circula nos blocos resistores é da ordem de microamperes permitindo a construção de um pará-raios sem centelhadores em série, fato que, no entanto, implica na aplicação de uma solicitação permanente da tensão fase-terra aos seus terminais, além das sobretensões que eventualmente ocorram.

No caso de carboneto de silício, a existência de uma corrente de fuga elevada, situada em torno de algumas centenas de amperes em regime normal de operação causa perdas apreciáveis e aquecimento excessivo nas resistências não lineares, necessitando portanto da utilização do centelhador série [11].

Nos pára-raios de óxido de zinco, justamente por não possuirem centelhadores, o nível de proteção está somente associado a tensão residual em seus terminais,uma vez que não existe tensão de disparo, que ocorre em presença dos centelhadores.

E como pode ser observado na figura 3.4, os mesmos não apresentam corrente subsequente , portanto, a capacidade de absorção de energia do óxido de zinco é maior quando comparada com a do carboneto de silício. Na figura 3.5 é apresentada a curva característica de absorção de energia do pára-raios de carboneto de silício, onde grande parte da energia absorvida deve-se à corrente subsequente [9].

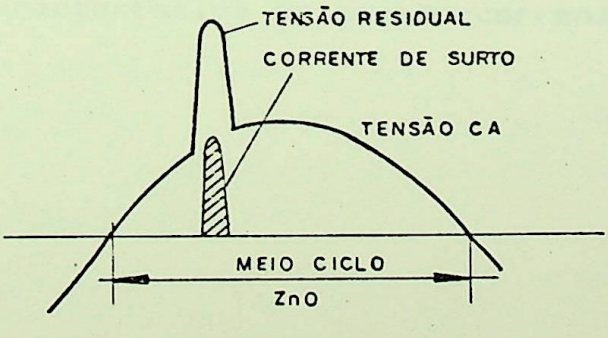


Figura 3.4

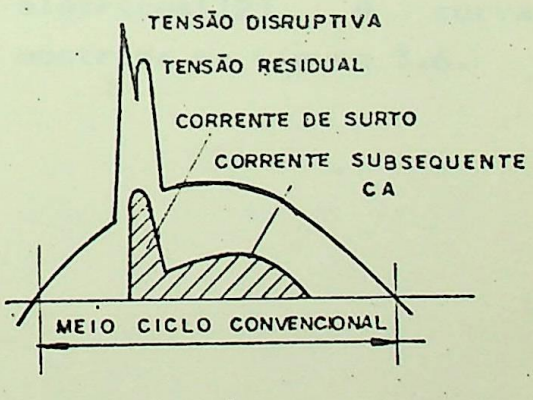


Figura 3.5

Observando-se as figuras 3.4 e 3.5 pode-se imaginar que os centelhadores são indesejáveis, mas eles apresentam uma característica que pode ser aproveitada. A colocação de centelhador série, em pára-raios de óxido de zinco, elimina a corrente de fuga, que por sua vez evita a degradação do mesmo após anos de uso, além de reduzir os custos.

A degradação térmica se reflete no constante aumento na corrente de fuga, que por sua vez ocasiona a elevação da temperatura de operação, a continuidade do fenômeno pode ocasionar um desequilíbrio entre a potência gerada nos blocos de óxido de zinco e a potência dissipada para o meio externo, o que pode vir a causar a danificação do pára-raios.

3.3 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PÁRA-RAIOS À BASE DE ÓXIDO DE ZINCO.

Um pára-raios de óxido de zinco é composto de blocos de elementos semicondutores cerâmicos, cuja característica de tensão-corrente é extremamente não-linear. Associado com uma elevada capacidade de absorção de energia e possibilidade de ausência do uso de centelhadores. Todos estes fatores justificam a grande utilização dos pára-raios a óxido de zinco para proteção contra sobretensões nos sistemas elétricos[12]. A curva característica de tensão-corrente, está mostrada na Figura 3.6.

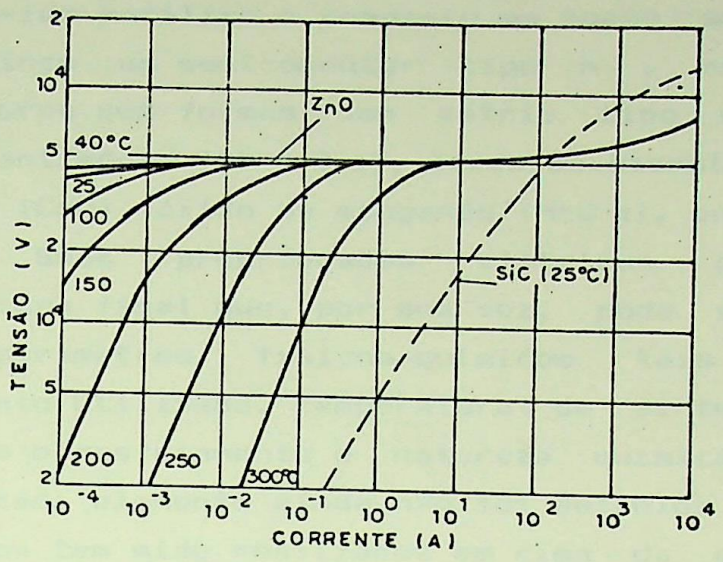


Fig. 3.6 - Características Térmicas dos Elementos de Óxido de Zinco e de Carboneto de Silício [13].

Como mostra a figura 3.6, a curva V x I pode ser dividida em três regiões [10,18]:

1- a região linear, para baixa densidade de corrente

2- a região não-linear

3- a região linear, para alta densidade de corrente

A região 1, é caracterizada por uma baixa densidade de corrente, pela dependência da temperatura e variação linear entre a densidade de corrente e a tensão aplicada. Na região 2, a densidade da corrente aumenta abruptamente para pequenas variações na tensão aplicada. A região 3, se caracteriza 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.

Conforme se observa na figura 3.6, a não linearidade da curva característica V x I é dada pela constituição do bloco. Um bloco de óxido metálico é composto em quase sua totalidade pelo óxido de zinco ,um semicondutor tipo n , os outros elementos semicondutores que formam uma matriz tipo p, adicionados são óxidos de antimônio (Sb_2O_3), óxido de bismuto (Bi_2O_3), óxido de cobalto (CoO), óxido de manganês (MnO_2), entre outros [20].

Suas propriedades elétricas dependem da sua microestrutura final que, por sua vez, pode ser controlada por diversos parâmetros físicos-químicos tais como: tipo de processamento utilizado, temperatura de sinterização, taxas de aquecimento e resfriamento e natureza química dos aditivos. A função de cada elemento ainda não foi definida com muita clareza, e os estudos tem sido realizados em cima da estrutura final do bloco cerâmico [21].

O processo que permite transformar a mistura dos diversos elementos que compoêm o bloco de óxido de zinco em um corpo cerâmico denso é chamado de sinterização que é um tratamento térmico a uma temperatura entre 1150 e 1350°C [16].

Este bloco cerâmico denso em sua microestrutura é constituído com grãos de óxido de zinco que possuem uma baixa resistividade, circundados por uma camada intergranular, responsável pela característica não-linear. Esta camada intergranular de elevada resistividade, deve ser homogeneamente distribuída em todo o bloco.

Então, o bloco pode ser representado por uma rede série-paralelo de grãos de óxido de zinco separados por junções intergranulares. Estas junções podem também ser chamadas de regiões de depleção; Elas surgem durante o processo de sinterização, uma vez que os vários elementos químicos são distribuídos pela microestrutura de tal forma que regiões perto do contorno do grão tornam-se altamente resistivas e o interior do grão altamente condutivo, resultando, quando o bloco está em presença de um campo elétrico, em uma queda abrupta na resistividade na direção do contorno do grão para o interior do grão.

O tamanho do grão de óxido de zinco '*d* ', para uma temperatura de sinterização de 1350°C é de 10 microns segundo Matsuoka [17], ou em torno 25 microns para Haddad [23] e de 10 a 20 microns segundo Menth [13].Por outro lado, a espessura da camada intergranular é em torno de 1 micron, podendo apresentar valores menores de acordo com o processo de fabricação.

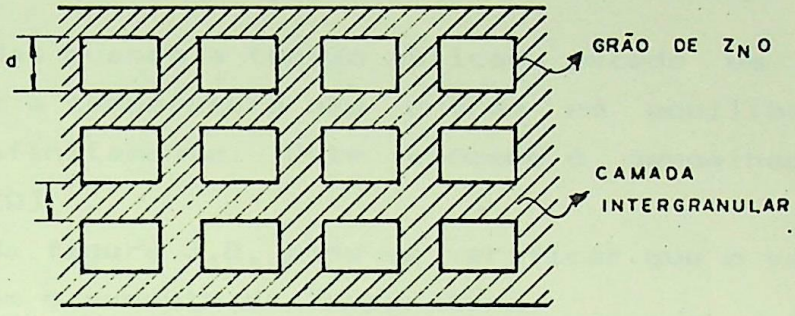


Figura 3.7 - Microestrutura simplificada de um bloco de óxido de zinco

Na figura 3.7 temos que cada grão de óxido de zinco é circundado por uma camada intergranular que é responsável pela característica não linear. A resistividade elétrica na camada intergranular é estimada em 10^{19} ohm.cm para 25°C e a resistividade dos grãos de óxido de zinco é estimada entre 1 a 10 ohm.cm com base no modelo apresentado na figura 3.7 [16].Através dos valores apresentados verifica-se que a resistividade da camada intergranular é muito mais elevada que a resistividade dos grãos de óxido de zinco. Portanto, a tensão aplicada no bloco cerâmico está concentrada nas camadas intergranulares para as regiões de baixas correntes. E interessante salientar uma característica dos blocos de óxido de zinco, que é o efeito da avalanche térmica.

Quando uma tensão é aplicada em um elemento de óxido metálico continuamente uma certa quantidade de calor é gerada no elemento elevando sua temperatura, um processo de realimentação positiva pode ocorrer devido a temperatura dependente da corrente de fuga. Ocorre que com a elevação da temperatura no elemento, aumenta a corrente de fuga, e o aumento na corrente eleva mais a temperatura. Se a tensão aplicada é moderada, a temperatura do elemento encontrará seu equilíbrio no nível onde o calor gerado é balanceado com o calor dissipado para o meio exterior pelo elemento.

Mas quando a tensão aplicada excede um certo nível, a corrente e a temperatura não entram em equilíbrio, o processo aumenta infinitamente. Este fenômeno é denominado de avalanche térmica.[20]

Na figura 3.8, pode-se verificar que o valor de α também diminui com o aumento da temperatura.

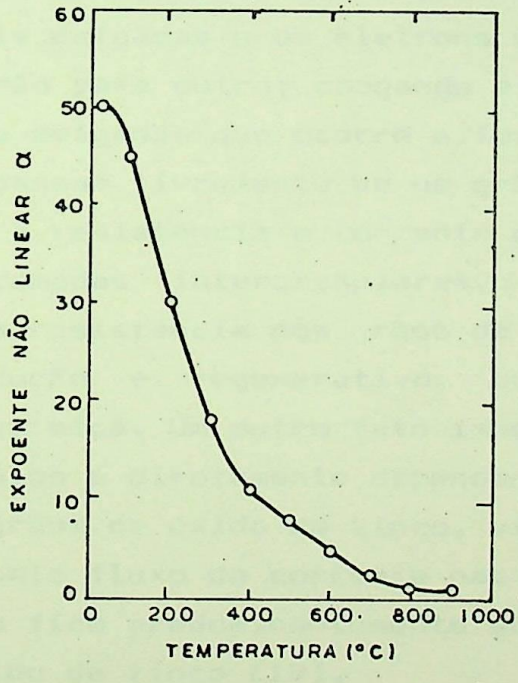


Fig. 3.8 - Efeito da Variação da Temperatura no Varistor

Quando o bloco de óxido de zinco se encontra na região 1, relativa às correntes de fuga na curva característica V x I ,isto é, solicitado por tensões normais, são as camadas intergranulares com sua alta resistividade que respondem por quase toda tensão aplicada. Ficando os grãos de óxido de zinco, com uma parcela ínfima da tensão aplicada.

Esta região de baixas correntes, é altamente sensível à temperatura. e é nesta faixa de correntes que o pára-raios estará em regime normal de operação. Nesta região, a corrente é predominantemente capacitiva, supõe-se os grãos de óxidos de zinco como eletrodos e a camada intergranular como dielétrico, tem-se também uma componente resistiva, que é a componente responsável pelo aquecimento do bloco por efeito Joule. Através do controle da componente resistiva, pode-se precisar o tempo de vida útil do pára-raios de óxido de zinco [10].

Nesta região,também denominada região das barreiras de Schottky, qualquer acréscimo de corrente é significativo, se a tensão aplicada aumentar gradativamente, as barreiras de Schotty vão se tornando mais delgadas e os eletrons se movimentarão mais facilmente de um grão para outro; chegando a um ponto em que as barreiras estão tão delgadas que ocorre a formação de túneis pelos quais os elétrons passam livremente de um grão para outro [11].

Com isso, a resistência a corrente que anteriormente era basicamente das camadas intergranulares, agora passa a ser predominantemente a resistência dos grãos de óxido de zinco. Este mecanismo de condução é regenerativo, portanto, sujeito a degradação físico-química. Um outro fato importante é que a tensão residual do pára-raios é diretamente dependente do tamanho e da resistividade dos grãos de óxido de zinco, visto que, a descarga de energia ocorre pelo fluxo de corrente nas barreiras de Schotty e a queda de tensão fica predominantemente sobre a resistividade dos grânulos de óxido de zinco [19].

3.3.1 - DEGRADAÇÃO DOS ELEMENTOS DE ÓXIDO METÁLICO

A característica não linear pode se degradar em presença das seguintes solicitações [17,23]:

-contínua solicitação da tensão de operação;
-solicitação de tensão da corrente de descargas atmosféricas;
-solicitação da energia de uma sobretensão temporária ou sobretensão de longa duração;
-solicitação térmica do meio ambiente de serviço.

3.3.2 - CURVA CARACTERÍSTICA TENSÃO CORRENTE DO BLOCO DE ÓXIDO DE ZINCO

A curva característica tensão corrente do bloco de óxido de zinco, segue a seguinte equação empírica [13,16] :

$$I = \left(\frac{V}{C} \right)^{\alpha} \qquad (3.1)$$

onde:

V é a tensão através do bloco, em volts;

I é a corrente que flui através do bloco, em miliamperes;

C é a constante de proporcionalidade;

O expoente não linear alfa (α) da equação 3.1, é calculado pela seguinte equação [17,13]:

$$\alpha = \frac{d\,I\,/\,I}{d\,V\,/\,V} = \frac{d(\,\mathrm{Log}\,I\,)}{d(\,\mathrm{Log}\,V\,)} \cong \frac{\mathrm{Log}_{10} I_2 - \mathrm{Log}_{10} I_1}{\mathrm{Log}_{10} V_2 - \mathrm{Log}_{10} V_1} \qquad (3.2)$$

onde,

V_1 e V_2 são as tensões, e I_1 e I_2 são as correntes através deste bloco, ou seja, em dois pares de pontos arbitrários da característica V x I deste bloco. O expoente α, dentro de limites, é tido como fator de qualidade do resistor não linear e, portanto, quanto maior for seu valor, melhor será a eficácia do material. A combinação de vários aditivos, na composição da microestrutura do bloco pode levar a uma variação da tensão de ruptura de 10 V / mm a 135 V / mm e do expoente não linear (α) de 4 a 50, de acordo com o artigo de M. Matsuoka [17].

3.3.3 - OPERAÇÃO DO PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO E DE CARBONETO DE SILÍCIO

Na figura 3.9 verifica-se a diferente forma de atuação do pára-raios de óxido de zinco e do carboneto de silício em resposta a um surto e(t)[16].

A característica da tensão em relação ao tempo para o óxido de zinco é bastante suave. O mesmo não ocorre para o pára-raios de carboneto de silício, pois, sua forma de onda tem um pico de tensão devido a atuação do centelhador, posteriormente a sua disrupção.

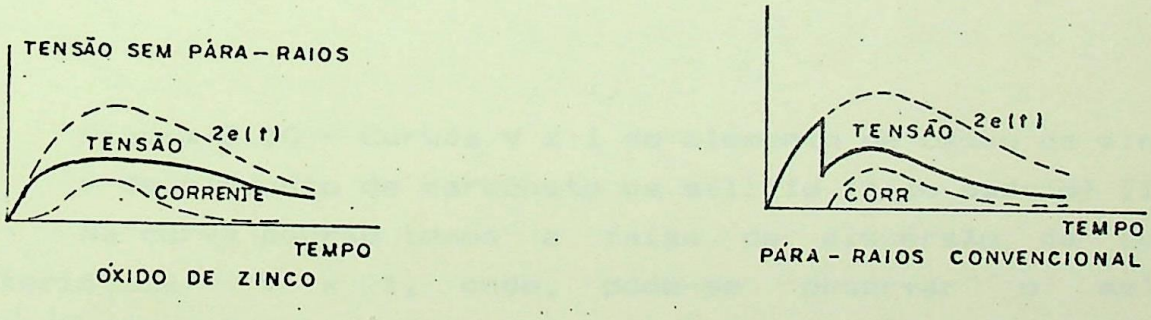


Figura 3.9- Resposta da operação do pára-raios de óxido de zinco e carboneto de silício a um surto.

3.3.4 - CONSIDERAÇÕES

O processo de fabricação e a qualidade do material utilizado na produção dos blocos, proporcionam diferenças evidentes no desempenho dos pára-raios. Assim sendo, ao levar em conta a curva característica, deve-se avaliar que haverá diferenças entre os diversos fabricantes

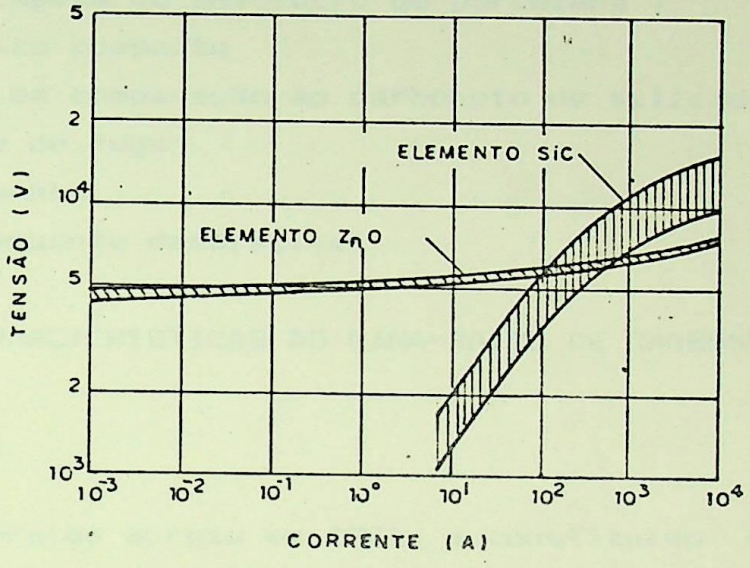


Figura 3.10 - Curvas V x I do elemento de óxido de zinco e do elemento de carboneto de silício (tipo padrão) [13].

Na curva padrão temos a faixa de dispersão da curva característica V x I, onde, pode-se observar o melhor comportamento não linear do pára-raios de óxido de zinco, visto que, sua característica V x I , é bem mais próxima da característica V x I do pára-raios ideal.

Esta característica não linear, dos blocos de óxidos de zinco, produzidos com propriedades elétricas pré-determinadas, já na mistura dos diversos elementos, permite que dentro de um controle de fabricação elevado, o bloco de óxido de zinco apresente as seguintes propriedades:

-elevada não-linearidade da característica V x I
-baixa tensão residual (nível de proteção mais baixo e bem definido)
-rápida resposta frente a transientes de tensão
-alta capacidade de absorção de energia
-desempenho superior sob poluição(reduz custos de supervisão e limpeza do invólucro de porcelana)
-projeto mecânico compacto
-atuação suave em comparação ao carboneto de silício
-baixa corrente de fuga
-redução do tamanho
-corrente subsequente desprezível

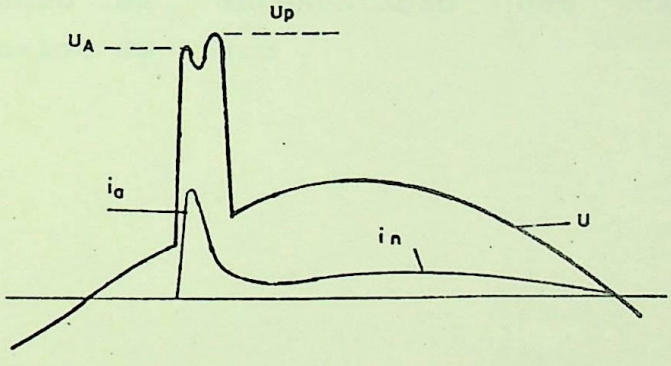
3.4 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PÁRA-RAIOS DE CARBONETO DE SILÍCIO

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 [21].

O bloco de carboneto de silício é um corpo cerâmico, com as características de um resistor não linear, que em presença de uma tensão equivalente à tensão nominal do mesmo, deixa fluir uma corrente relativamente alta. Para reduzir esta corrente a níveis aceitáveis, é que se utilizam os centelhadores série.O expoente não linear α do carboneto de silício está compreendido entre 4 e 6 [12,14,37].

Os blocos resistores de carboneto de silício possuem uma alta capacidade de absorção de energia, mas como seu coeficiente não linear é baixo, implica que somente os resistores não lineares, não são capazes de realizar o ciclo completo de um circuito aberto-descarga- circuito aberto, por isso necessita dos centelhadores[12].

Em sua parte interna o pára-raios de carboneto de silício possui inúmeras peças, que constituem os centelhadores e o circuito de equalização o que o torna mais suscetível a falhas. Na ocorrência de uma sobretensão, o centelhador dispara e, deste modo flui uma corrente pelos resistores não lineares, que limita a tensão em seus terminais em um determinado nível em função de suas propriedades e dentro dos limites estabelecidos em projeto.Neste pára-raios, equipado com centelhadores não ativos, a corrente de descarga apenas será interrompida quando a tensão passar por zero, como poderá ser observado na figura 3.11.



i_a — CORRENTE DE DESCARGA U_A – TENSÃO DE DISPARO

i_n – CORRENTE SUBSEQUENTE U_p – TENSÃO RESIDUAL

U – TENSÃO DO SISTEMA

Fig.3.11- Curva Caraterística de Atuação do Pára-raios de Carboneto de Silício

3.4.1 - CONSIDERAÇÕES

Na continuidade do processo evolutivo do pára-raios de carboneto de silício surgiu o pára-raios com sopro magnético. Seu funcionamento é baseado no alongamento do arco nos centelhadores com o auxílio de um campo magnético, que proporcionam o corte da corrente subsequente antes de sua passagem pelo zero de tensão[9].

Em um pára-raios de carboneto de silício, é desejável que após sua atuação na presença de um surto, ele não atue mais, principalmente em presença de uma sobretensão temporária.

Deste modo a tensão nominal de um pára-raios convencional deve ser igual ou superior a maior sobretensão na freqüência industrial que pode ocorrer no sistema, para evitar que o pára-raios seja submetido a disparos consecutivos e com possibilidades de vir a se danificar.

Existem alguns fabricantes, que garantem que seus pára-raios suportam sobretensões temporárias. As outras características do pára-raios de carboneto de silício foram reportadas quando da apresentação das características do pára-raios de óxido de zinco .

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DOS PARÂMETROS PARA OS ESTUDOS

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DOS PARÂMETROS PARA OS ESTUDOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Estudos de surtos atmosféricos em subestações são necessários para determinação dos níveis de tensão que os equipamentos da subestação estarão expostos quando da ocorrência de descargas atmosféricas fazendo a devida verificação do nível de proteção oferecido pelo pára-raios. Os diversos equipamentos de uma subestação convencional estão sujeitos à solicitações por descargas atmosféricas oriundas de queda direta nos condutores fase e através de descargas indiretas nas linhas que chegam a subestação.

As quedas diretas são aquelas que atingem os cabos fase e são geralmente de valor baixo.A máxima corrente que pode atingir o cabo fase de uma linha de transmissão pode ser calculada através do modelo eletrogeométrico da linha. Esta corrente é função da distância de incidência r_s que pode ser obtida pela fórmula abaixo descrita, esta fórmula é mais conservativa de todas as outras utilizadas para cálculo da distância de incidência, apresentando valores maiores de corrente [35]:

$$r_s = 9\ I^{0.65} \text{ metros} \qquad (4.1)$$

onde,

r_s é a distância máxima de incidência, em metros;

I é a corrente máxima que incide no condutor fase, em kA;

Fazendo os cálculos pelo modelo eletrogeométrico, podemos calcular a máxima sobretensão que se propagará pela linha.

A suportabilidade do isolamento da linha é de natureza probabilística, deste modo haverá uma maior ou menor probabilidade de ocorrer uma descarga através da cadeia de isoladores dependendo do nível a que esta tensão atinja.

A pior situação é aquela em que não ocorre esta descarga disruptiva , pois, na ocorrência desta uma onda inversa se somará às ondas incidentes, atenuando bastante o pico de tensão dentro da subestação.

Correntes maiores que a calculada pelo modelo eletrogeométrico que atingirem o cabo pára-raios no meio do vão ou na própria torre poderão causar uma diferença entre a tensão no topo da torre e a tensão acoplada no condutor fase maior do que a suportabilidade da cadeia de isoladores, ocorrendo então uma descarga entre condutor e a torre, ocasionando a injeção de um surto maior do que aquele calculado para uma falha de blindagem.

A ocorrência ou não desta descarga é função da taxa de crescimento da corrente de raio, da amplitude desta corrente, da impedância de surto da torre, da sua altura e da resistência de aterramento da torre. Outro parâmetro importante é o acoplamento entre o cabo pára-raios e o condutor fase.

Freqüentemente esta tensão é suficientemente elevada para provocar descargas através das cadeias de isoladores nas torres adjacentes, atenuando o surto.

Tendo como base, os dados relativos à uma linha de 230 KV provenientes do CIGRÉ [32], calculou-se os valores para exemplificação de cálculo pelo modelo eletrogeométrico:

$H = 28$ m
$Y = 16$ m
$\theta = 15$ °

onde,

H é a altura do cabo pára-raios, em metros
Y é a altura do cabo fase, em metros
θ é o ângulo de proteção , em graus

Fazendo os cálculos :

$$r_s = \frac{H + Y}{2(1 - \text{sen } \theta)} = \frac{28 + 16}{2(1 - \text{sen } 15)} \qquad (4.2)$$

r_s = 29,68 metros

Então com base na equação (4.1) ,calcula-se a corrente.

I = 6,27 KA

Para uma impedância Z = 352 ohms a tensão máxima será :

$$V_{máx} = \frac{I_{máx}}{2} \times Z_s \qquad (4.3)$$

$V_{máx}$ = 1104 KV

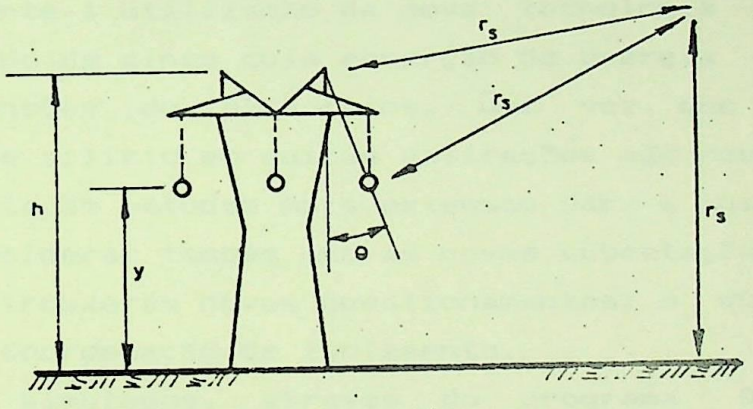


Figura 4.1- Geometria da Torre

Com relação aos pára-raios verifica-se também a localização e a capacidade de absorção de energia,ou seja, se as dimensões do mesmo, estão apropriadas para a proteção da isolação interna dos equipamentos devido a descarga atmosférica.

Nestes estudos de descargas atmosféricas as frequências envolvidas estão na ordem de 10 Khz a 3 Mhz [25].Existem ainda muitas dúvidas sobre as formas de onda , amplitude, localização da descarga atmosférica, dispersão devido ao efeito corona, transferência do surto para as malhas de terra,também para a resistência de pé de torre entre outras.

O transformador de potência por ser o equipamento terminal, apresenta o caso mais crítico destes estudos, portanto, as análises a serem consideradas, tem como objetivo constatar o efeito da distância entre o pára-raios e o transformador de potência . No procedimento do estudo computacional com a finalidade de observar o desenvolvimento das sobretensões no interior de uma subestação, utilizou-se de dados de projetos da subestação de uma concessionária com o fim de obter simulações bastante realísticas.

A retomada dos estudos de coordenação de isolamento, deve-se principalmente à utilização da nova tecnologia de pára-raios a base de óxido de zinco cuja absorção de energia está relacionada com as dimensões do pára-raios, uma vez que a tecnologia a carboneto de silício em muitas aplicações não requeriam por parte do projetista de estudos mais extensos para a instalação do mesmo. Tem que considerar também que as novas subestações a hexafluoreto de enxofre trouxeram novos questionamentos, o que nos leva aos estudos de coordenação de isolamento.

Serão simulados, através do programa ATP (ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM), surtos atmosféricos provientes por descargas diretas nos condutores de fase, falha de blindagem , com o valor de sobretensão máxima limitado pela suportabilidade da cadeia de isoladores ,de forma a identificar as solicitações impostas ao transformador de potência .

4.2 - SIMULAÇÃO UTILIZANDO O MODELO MONOFÁSICO

Estudos de surtos atmosféricos utilizando parâmetros monofásicos são usualmente elaborados ignorando as perdas da linha. A linha de transmissão é então caracterizada pela sua impedância de surto e seu tempo de propagação conforme equacionamento abaixo:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (4.4)$$

Onde L e C são respectivamente a indutância e capacitância por unidade de comprimento.

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (4.5)$$

onde c é a velocidade de propagação da onda.

$$\tau = \frac{l}{c} \qquad (4.6)$$

onde τ é o tempo de viagem da onda e l é o comprimento da linha. Com a utilização deste equacionamento acima é possível representar uma linha de transmissão aérea, um cabo subterrâneo ou um barramento de subestação[31].

4.3 - ORIGEM DAS SOBRETENSÕES

As descargas atmosféricas que atingem uma subestação podem ser provenientes de descarga direta na subestação, queda direta nos condutores fase ou indireta (aquelas que atingem o cabo pára-raios e posteriormente provocam uma descarga através da cadeia de isoladores do condutor fase devido a elevação da tensão na torre em relação à tensão na fase.

Não será tratado neste estudo a queda de descargas atmosféricas nas subestações visto que a resistência da malha de terra da subestação é muito baixa, o que reduz rapidamente o potencial no topo dos pórticos, impedindo descargas através da cadeia de isoladores. Considerar também o caso de queda direta de descargas atmosféricas nos condutores do interior da subestação não é do interesse deste trabalho, mesmo porque está se levando em conta um projeto de proteção adequado, com mastros e cabos pára-raios[27] .

A máxima corrente que pode atingir o condutor de fase de uma linha de transmissão pode ser calculada através do modelo eletrogeométrico da linha. Obtendo-se este valor de corrente e conhecendo-se a impedância de surto do condutor de fase, pode-se calcular a sobretensão máxima, que se propagará pela linha e incidirá na subestação, provocada por uma queda direta.

Para realização deste estudo será considerado um nível de sobretensão, que se propagará pela linha com um valor máximo limitado pela máxima suportabilidade a impulso atmosférico da mesma que deste modo flui pela linha sem causar descargas disruptivas nas cadeias de isoladores e nos equipamentos ao longo da linha. Esta situação foi escolhida para que a solicitação nos equipamentos seja máxima. Pode-se então, verificar esta tensão máxima através da utilização da curva característica tempo x tensão da cadeia de isoladores[31].

Levando em consideração que a suportabilidade do isolamento da linha é de natureza probabilística , havendo uma maior ou menor probabilidade de ocorrer uma descarga através da cadeia de isoladores dependendo do nível que esta tensão alcance.

A forma de onda tempo x tensão da figura 4.2,é inadequada para descrever descargas disruptivas para formas de onda irregulares, como elas realmente ocorrem na prática. A figura 4.2 define uma característica tempo x tensão para uma forma de onda idealizada em laboratório e torna-se sem utilidade para formas de onda mais complicadas.

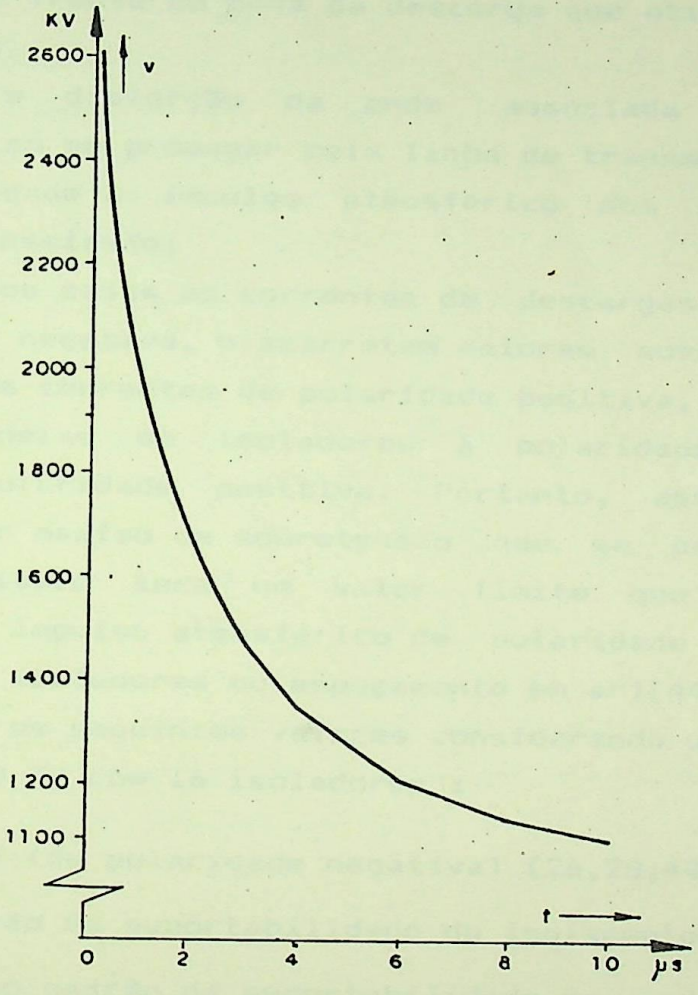


Figura 4.2 - Característica Tensão x Tempo de uma Cadeia de Isoladores de 220KV

4.3.1 - SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS QUE PODEM ATINGIR UMA SUBESTAÇÃO

A amplitude e a forma das ondas que podem atingir uma subestação são determinadas e modificadas basicamente pelos seguintes fatores :

-número de linhas conectadas à subestação;
-capacitância para a terra dos equipamentos;
-extensão dos barramentos;
-eventual atuação dos pára-raios;
-amplitude e frente de onda da descarga que atinge a linha de transmissão;
-atenuação e distorção da onda associada à descarga atmosférica ao se propagar pela linha de transmissão;
-suportabilidade a impulso atmosférico dos isoladores da linha de transmissão;

Na maioria dos casos as correntes de descargas atmosféricas são de polaridade negativa, e acarretam maiores sobretensões nas subestações que as correntes de polaridade positiva, pois, o valor disruptivo das cadeias de isoladores à polaridade negativa é superior ao de polaridade positiva. Portanto, assume-se neste estudo que o valor máximo da sobretensão que se propagará pela linha de transmissão terá um valor limite que é a máxima suportabilidade à impulso atmosférico de polaridade negativa da linha (cadeias de isoladores ou espaçamento em ar)[44,45].

Adotou então os seguintes valores considerando uma linha de transmissão de 230 KV com 16 isoladores :

CFO = 1440 KV (de polaridade negativa) [26,28,44,45].

O desvio padrão da suportabilidade do isolamento é:

σ = 3% (desvio padrão da suportabilidade do isolamento para surtos atmosféricos)[29].

A tensão máxima de surtos considerando o desvio padrão para a sua mais severa condição que seria o mesmo em seu limite superior positivo permite obter o seguinte resultado :

$$V_{máx} = CFO \cdot (1 + 3\sigma)$$

$$V_{máx} = 1570 \text{ KV}$$

onde,

Vmáx = surto máximo admitido pela cadeia de isoladores, sem a ocorrência de disrupção, em KV

CFO = tensão disruptiva crítica dos isoladores, em KV

A inclinação da frente de onda a ser utilizada é de 2000KV/μs, com uma amplitude de 1570 KV. Este valor de inclinação de frente foi utilizado por ser o mais severo considerado pela literatura atual.[43]

4.3.2 - CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE SURTO DO BARRAMENTO DA SUBESTAÇÃO

Normalmente é representado por uma linha de transmissão sem perdas[31].

Para cálculo da impedância de surto do barramento, será utilizado o seguinte equacionamento [27]:

$$GMR_B = [\, N\,(GMR_c)\, A^{N-1}\,]^{1/N} \qquad (4.7)$$

Sendo:

GMR_B - o raio médio geométrico dos barramentos, em metros.
N - número de condutores por fase do barramento.
GMR_c - o raio médio geométrico do condutor, em metros.
A - raio do círculo que envolve os condutores, em metros.

Para :
N = 2
GMR_c = 0.010729 m
A = 0.2 m

$$GMR_B = [\ 2\ (\ 0{,}010729\ )\ 0{,}2^{\ 2-1}\ ]^{\ 1/2}$$

Temos :

$GMR_B = 0.06551\ m$

Calculando agora a impedância de surto do barramento temos, a fórmula clássica :

$$Z_{sb} = 60\ \ln \frac{2H}{GMR_B} \qquad (4.8)$$

Onde :

Z_{sb} - é a impedância de surto do barramento , em ohms.
H - é a altura dos barramentos, em metros.

Para :

$H = 11{,}5\ m$

Têm-se

$$Z_{sb} = 60\ \ln \frac{2\ .\ 11{,}5}{0.065551}$$

$Z_{sb} = 352$ ohms

4.3.3 - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SURTO

A velocidade de propagação dos surtos atmosféricos, utilizada é igual a velocidade da luz .

$c = 3 \times 10^8\ m/s$

4.3.4 - CAPACITÂNCIA DE SURTO DO TRANSFORMADOR

Para representar o transformador de potência usou-se os valores de capacitância de surto mais representativos, para os diversos tipos construtivos de transformadores de potência [7,43].

Conforme a referência 27 o transformador de potência de 230 KV apresenta o seguinte valor medido de capacitância .

Transformador .....= 3000 pF

Optou-se também por representar o transformador de potência para mais outros três valores de capacitância. Sendo eles 1000 pF, 2000 pF e 4000 pF.

4.3.5 - CARACTERÍSTICAS DOS PÁRA-RAIOS

Serão considerados para fins deste estudo os valores característicos da curva tensão x corrente,em seus mínimos e máximos baseados na norma Internacional Electrotechnical Commission (IEC) [36], para pára-raios sem centelhador e dados dos catálogos dos fabricantes de pára-raios.

O fato de se usar a norma, garante que os valores da característica tensão x corrente abrangem todo o universo dos vários fabricantes, uma vez que a aceitação desta norma é de alcance praticamente mundial.

O Quadro 4.1, mostrado a seguir foi retirado da Norma IEC [35], realizada apenas a transcrição para o português.

-Tensão Residual para Pára-Raios de 20.000 A e 10.000 A em p.u da tensão nominal.

Tensão Nominal Ur [kV r.m.s]	20.000 A kV(pico)/Ur			10.000 A kV(pico)/Ur		
	1) Impulso fngreme	2) Atmos-férico	3) Chavea-mento	1) Impulso fngreme	2) Atmos-férico	3) Chavea-mento
3 - 29				2,6-4,0	2,3-3,6	2,0-2,9
30 - 132	2,6-3,1	2,3-2,8	2,0-2,3	2,6-3,7	2,3-3,3	2,0-2,6
144 - 336	2,6-3,1	2,3-2,8	2,0-2,3	2,6-3,7	2,3-3,3	2,0-2,6
360 - 720	2,6-3,1	2,3-2,8	2,0-2,3	2,6-3,1	2,3-2,8	2,0-2,3

Quadro 4.1 - Norma IEC [35]

Com base no quadro 4.1, obtém-se as seguintes características de tensão e corrente :

Para um pára-raios com tensão nominal de 228 KV encontra-se os valores abaixo, usando o limite inferior da tabela :

Característica Tensão x Corrente do Pára-raios

Corrente (KA)	tensão (KV)
1.0	456.0
2.5	482.1
5.0	502.8
10.0	524,4
15.0	537.5

Os valores de tensão para uma corrente 1.0 e 10.0 KA foram obtidos multiplicando a tensão nominal do pára-raios pelos valores mínimos do quadro 4.1 , que são 2.3 e 2.0 respectivamente para sua classe de tensão nominal.O primeiro percentual refere-se a correntes devido a descargas atmosféricas e o segundo a correntes de chaveamento. Os demais valores foram obtidos utilizando o seguinte equacionamento descrito a seguir.

Com base em valores de corrente e tensão obtidos para uma região do pára-raios pode-se extrair o valor do expoente não-linear da tensão (α) :

$$\alpha \cong \frac{\log_{10} I_2 - \log_{10} I_1}{\log_{10} V_2 - \log_{10} V_1} \qquad (3.2)$$

Sendo $I_1 = 1000A$; $V_1 = 456000\ V$; $I_2 = 10000A$; $V_2 = 524400V$.

Temos $\alpha \cong 16.47505084$

Pode-se agora calcular os demais valores de tensão residual, usando os seguintes equacionamentos: utilização da equação (3.1), ou então a utilização da formulação abaixo [12,38]:

$$\frac{I}{Iref} = \left(\frac{V}{Vref} \right)^{\alpha} \qquad (4.9)$$

Passa-se agora para o cálculo dos valores de tensão residual para correntes de 2500 e 5000 A. Bastando apenas substituir na equação 4.9, os valores de α e da corrente desejada, juntamente com os valores de tensão e corrente de referência para obtermos os valores aproximados de tensão residual.

Verifica-se que os valores calculados possuem na maioria das vezes valores inferiores aos medidos. Outro fato que se deve atentar é que para correntes de surto elevadas onde a resistência dos grãos de óxido de zinco torna-se dominante sendo então responsável pela tensão residual do pára-raios, o que pode acarretar em erros maiores nos resultados obtidos, pois, a resistência dos grãos de óxido é linear.

Com base na equação 4.9,temos

Então para Iref = 1000 A , Vref = 456000 V e α = 16,47505084.

Para I = 5000 A ,temos

V = 502.8 KV;

Para I = 2500A , temos

V = 482.1 KV

Se fizermos o mesmo cálculo para o outro valor de corrente e tensão de referência verifica-se que o resultado encontrado é o mesmo.

Usando a mesma metodologia para o limite superior

Curva Característica Tensão x Corrente do Pára-raios

Corrente (KA)	Tensão (KV)
1.0	592.8
2.5	651.8
5.0	700.3
10.0	752.4
15.0	784.7

α = 9.65804718

Para os demais pára-raios utilizados, suas características de tensão x corrente , foram obtidas de seus respectivos dados de catálogos, e são transcritos a seguir [40,41].

Dados do pára-raios de carboneto de silício da Sprecher Energie BHF8E , tipo estação classe 10 KA, de tensão nominal de 216 KV e com a seguinte característica V x I para impulso de corrente de 8/20 μs.

I (KA)	V (KV)
5	603
10	648
20	703

Dados dos pára-raios da Asea Brown Boveri, tipo EXLIM Q , tipo estação classe 10 KA. Característica de tensão x corrente para impulso de corrente de 8/20μs, para os diversos valores de tensão nominal.

Corrente (kA)	Tensão Nominal (KV)		
	192 KV	216 KV	228 KV
5	436	491	518
10	461	519	548
20	507	571	602

4.4 - CONFIGURAÇÃO DA SUBESTAÇÃO

Será considerado um surto proveniente de uma linha, estando a subestação em condições normais de operação, para que o surto possa atingir todos os equipamentos. A magnitude das sobretensões nos diversos pontos da subestação dependerá do número de linhas, transformadores de potência em operação. Como determinante, para verificação da suportabilidade dos isolamentos dos enrolamentos do transformador de potência , será analisada a situação mais crítica, que é a subestação operando com uma linha alimentando apenas um transformador de potência .

As outras linhas adicionais serão consideradas suficientemente longas para desprezarmos as reflexões em seus terminais , resultando desta fundamentação uma maior severidade nas magnitudes dos surtos incidentes no transformador de potência. Isto porque um maior número de conexões , permite que os surtos incidentes sofram reflexões resultando em surtos de menor intensidade, levando em conta que não haverá reflexão nos terminais das mesmas para este estudo [27,33]. Os parâmetros utilizados no diagrama esquemático foram obtidos a partir de uma Subestação da ELETRONORTE [26].

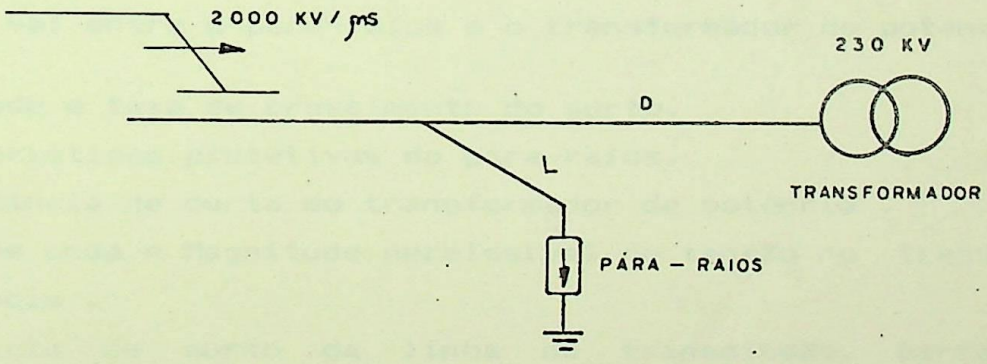


Figura 4.3 -Modelo para os Estudos

O modelo a ser estudado é com base em uma subestação de 230Kv como mostra a figura 4.3.

4.5 - OBJETIVO DOS ESTUDOS

Verificar o nível de proteção proporcionado pelo pára-raios em função da distância entre o mesmo e o equipamento a ser protegido que no caso é o transformador de potência ,devido às solicitações oriundas de surtos atmosféricos. Utilizando pára-raios de tecnologia de óxido de zinco e de carboneto de silício para diversas variações no circuito a ser simulado, busca-se a constatação de qual pára-raios apresenta o melhor desempenho frente a surtos atmosféricos, originados por descargas atmosféricas por queda direta no condutor fase (falha de blindagem) verificando assim, qual deles apresenta a proteção mais segura do equipamento terminal.

4.6 - PARAMETROS QUE AFETAM A DISTANCIA DE SEPARAÇÃO

Os seguintes paramêtros afetam a distância de separação permissível entre o pára-raios e o transformador de potência [24]:

-Magnitude e taxa de crescimento do surto.
-Caracteristicas protetivas do pára-raios.
-Capacitância de surto do transformador de potência .
-Forma de onda e Magnitude permissível de tensão no transformador de potência .
-Impedância de surto da linha de transmissão, barramento e condutor de descida do pára-raios.
-Tensão nominal do sistema.

4.7 - CRITÉRIOS ADOTADOS

Considerou-se como critério, que a máxima sobretensão admissível no interior da subestação devido aos surtos atmosféricos provenientes da linha de transmissão deveria manter uma margem de proteção de 10 % em relação ao nível de isolamento dos equipamentos. Para o nível de isolamento de 950 Kv adotado para os equipamentos de 230 KV, a máxima sobretensão admissível é:

$$\frac{\text{nível de isolamento}}{\text{máxima sobretensão}} \geq 1{,}10$$

ou seja,

$$\text{Máxima sobretensão admissível} = \frac{950}{1.10} = 864 \text{ KV}$$

$$\text{Máxima sobretensão admissível} = \frac{950}{1.20} = 792 \text{ KV}$$

Deve-se ressaltar que as normas indicam que deve ser utilizada uma margem de 20 % , segundo IEC 71-1976 para surtos atmosféricos.Esta margem é recomendada visando cobrir as distâncias entre o pára-raios e os transformadores de potência,eventuais discrepâncias entre as distâncias de projeto e as existentes nas subestações, assim como imprecisões nos dados utilizados.

Além de possíveis variações nos níveis de proteção dos pára-raios, incerteza sobre o comportamento dos isolamentos dos equipamentos às solicitações por sobretensões com forma de onda diferentes das ondas padronizadas utilizadas nos ensaios de impulso atmosférico dos equipamentos, envelhecimento e perda da qualidade de isolação durante o vida útil dos equipamentos. É prática comum entre as diversas concessionárias brasileiras a aceitação da margem de segurança de 10% ,para cálculos utilizando o programa ATP e com dados de boa precisão [26,27,28].

Será considerado o maior valor da tensão que poderia atingir as subestações que é definido pela máxima suportabilidade das linhas de transmissão frente a sobretensões do tipo atmosféricas.

Serão simulados casos considerando a inexistência de tensão a 60 Hz, de forma que a injeção do surto atmosférico no interior da subestação se dará no instante em que a tensão no sistema, à freqüência industrial é zero. A não consideração da tensão a freqüência industrial é coberta pelas margens de segurança adotadas em relação às máximas sobretensões calculadas, uma vez que o efeito da sua consideração apresenta variações em torno de 5% nos resultados esperados de sobretensões. [33,34]

A descarga disruptiva do pára-raios de carboneto de silício não é uma constante, mas depende da forma de onda do surto envolvido. Nos laboratórios a forma de onda é idealizada , o que mais uma vez não se encontra na prática. Apesar de não possuirem centelhadores os pára-raios de óxido de zinco também apresentam uma dependência entre as tensões residuais e a forma de onda do surto envolvido que deve ser considerada [37,38].

Breve histórico sobre os parâmetros utilizados nas simulações

-Tensão de surto de valor igual ao Nível Básico de isolamento da linha, em função da tensão crítica disruptiva da cadeia de isoladores.

-Característica V X I dos pára-raios obtida da norma IEC e fabricantes.

-Capacitância variando de 1000pF, 2000pF, 30000pF e 4000pF.

-Distâncias variando de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 e 60 m.

-Conexão de descida com 12m, 8m e 6m.

-Inclinação da frente de onda de 2000KV/μs com amplitude de 1570KV

4.8 - CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS PARÂMETROS ADOTADOS NA SIMULAÇÃO

4.8.1 - Passo de Integração

A seleção do passo de integração em programas digitais é de fundamental importância para a obtenção de respostas com elevado grau de precisão. E tem-se ainda que o passo de integração não pode ser maior que o menor tempo de viagem da menor seção do circuito. Deve-se adotar os seguintes parâmetros para calcular o passo de integração, com base na mais alta freqüência esperada e assumindo que dez pontos possam definir um período desta curva de freqüência f_{max} com suficiente precisão, então o passo de integração é dado pela seguinte equação [25] :

$$\Delta t \leq \frac{1}{10 \cdot f_{max}} \qquad (4.10)$$

O passo de integração utilizado nas simulações atendem a esta exigência.

4.8.2 - Curva Característica tensão x Corrente do Pára-raios

A curva característica tensão x corrente dos pára-raios a ser utilizada será a normalizada 8x20 μs. A correção da mesma para surtos com frente diferente da normalizada deve ser analisada para o caso específico quando da realização de estudos de surtos atmosféricos em funcão da distância da queda do surto, distorção devido ao efeito corona e demais fatores.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS OBTIDOS

CAPÍTULO 5

RESULTADOS OBTIDOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Com a finalidade de realizar comparações com as simulações efetuadas utilizamos a equação 5.1 ,que fornece valores aproximados de tensão no equipamento protegido por um pára-raios.

$$V = Vres + (2 \cdot S \cdot L) / c \qquad (5.1)$$

onde,

V = tensão no equipamento protegido, em kV
Vres = tensão residual no pára-raios, em kV
S = inclinação da frente de onda de tensão, em kV/μs
L = distância entre o pára-raios e o equipamento protegido incluindo as conexões do pára-raios e a sua altura,em metros
c = velocidade de propagação da onda, em m/μs (como aproximação utiliza a velocidade da luz 300m/μs para linhas aéreas)

Esta fórmula fornece valores estimados e podem apresentar resultados extremamente conservativos, dependendo da distância considerada, como também apresentar resultados de tensão no equipamento protegido extremamente baixos quando comparados com os resultados obtidos computacionalmente.

Estas discrepâncias ocorrem principalmente porque a fórmula não leva em conta a capacitância do objeto protegido, a variação das características do pára-raios em função da frente de onda, o valor da tensão inicial no instante do surto.

Com base na formulação acima efetou-se os cálculos, sendo os mesmos fornecidos nas respectivas tabelas dos pára-raios.

5.2 - PRINCIPAIS OBSERVAÇÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS

Em seguida serão realizados comentários a respeito dos valores de tensão encontrados para cada tipo de pára-raios. Elaborou-se duas tabelas, sendo que uma fornece os valores de tensão máxima no pára-raios e no transformador em kV e a outra mostra a relação entre a tensão no transformador e a tensão no pára-raios.

5.2.1 - Pára-raios de 228kV com Base na Norma IEC para seu Limite Inferior.

Nas tabelas 5.1 e 5.1.1, pode-se observar que para distâncias superiores a 35 m os mais elevados valores de tensão foram encontrados para a capacitância de 2000pF.

Para as distâncias inferiores a 35m valeu a seguinte regra: maiores distâncias e maiores valores de capacitância de surto , proporcionaram os mais elevados valores de tensão.

Para as menores distâncias entre o pára-raios e transformador verifica-se que ocorrem variações razoáveis na tensão, mas para os maiores valores desta distância já não se verifica tão acentuada variação, sugerindo inclusive uma tendência a estabilização.

Com base nos valores calculados através da fórmula pode-se constatar que para valores até 15m de separação, a fórmula apresenta valores de tensão inferiores ao simulado. A partir deste ponto os valores de tensão foram sempre superiores aos valores fornecidos pelo modelo simulado. Sendo que para grandes distâncias estes valores tem discrepâncias elevadas com relação ao simulado.

Com base na Tabela 5.1.1, pode-se observar que em nenhum caso a tensão no transformador atingiu a duas vezes o valor da tensão residual do pára-raios. Os valores mais freqüentes estão entre 1.80 e 1.90.

TABELA 5.1
IEC LIMITE INFERIOR 228kV

CS	1000pF		2000pF		3000pF		4000pF		CALCULADO
D(m)	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	
5.00	521.90	783.70	525.60	819.70	527.60	834.50	529.20	840.40	751.10
10.00	522.20	830.80	525.70	865.10	527.60	878.40	529.20	883.30	817.70
15.00	522.40	870.20	525.80	900.90	527.60	912.10	529.10	915.60	884.40
20.00	522.60	900.90	525.60	928.30	527.40	937.00	528.80	938.70	951.10
25.00	522.80	925.60	525.40	947.60	527.20	954.00	528.50	954.50	1017.70
30.00	522.70	948.20	525.30	964.10	526.70	967.40	528.00	965.20	1084.40
35.00	522.40	964.50	525.10	975.10	526.50	975.70	527.70	973.60	1151.10
40.00	522.60	974.70	524.80	981.50	526.10	982.70	527.20	979.40	1217.70
45.00	523.00	981.10	525.00	987.20	526.30	990.20	527.40	983.20	1284.40
50.00	522.80	985.10	525.20	998.20	526.30	993.80	527.10	987.20	1351.10
55.00	522.60	993.00	525.00	1008.20	526.00	995.20	526.60	995.20	1417.70
60.00	522.30	1007.80	524.60	1015.50	525.40	995.20	526.90	1001.30	1484.40

TABELA 5.1.1

IEC - LIMITE INFERIOR

CS	1000pF	2000pF	3000pF	4000pF
D(m)				
5.00	1.50	1.56	1.58	1.59
10.00	1.59	1.65	1.66	1.67
15.00	1.67	1.71	1.73	1.73
20.00	1.72	1.77	1.78	1.78
25.00	1.77	1.80	1.81	1.81
30.00	1.81	1.84	1.84	1.83
35.00	1.85	1.86	1.85	1.84
40.00	1.87	1.87	1.87	1.86
45.00	1.88	1.88	1.88	1.86
50.00	1.88	1.90	1.89	1.87
55.00	1.90	1.92	1.89	1.89
60.00	1.93	1.94	1.89	1.90

GRAFICO 5.1

ZnO IEC LIMITE INFERIOR

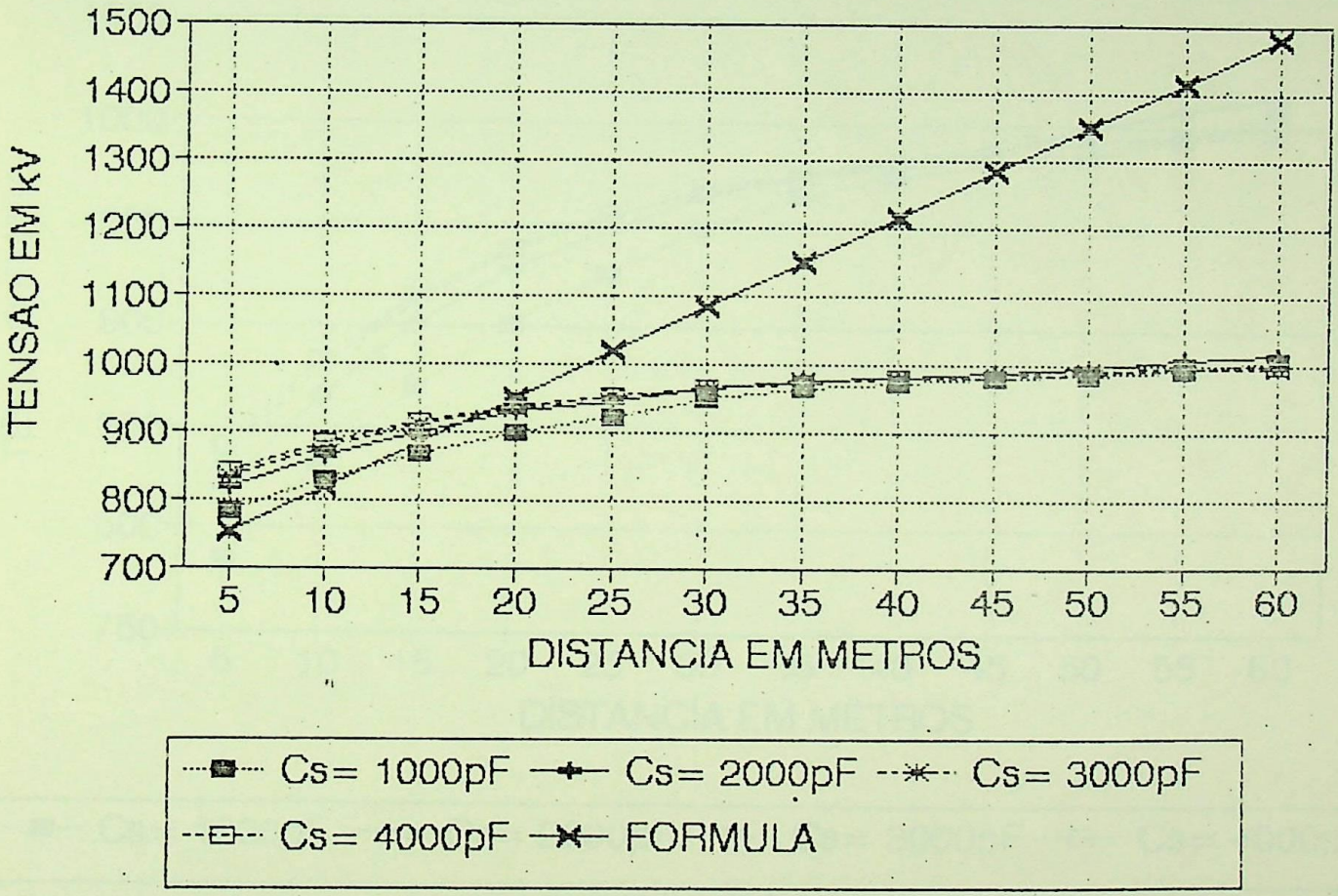
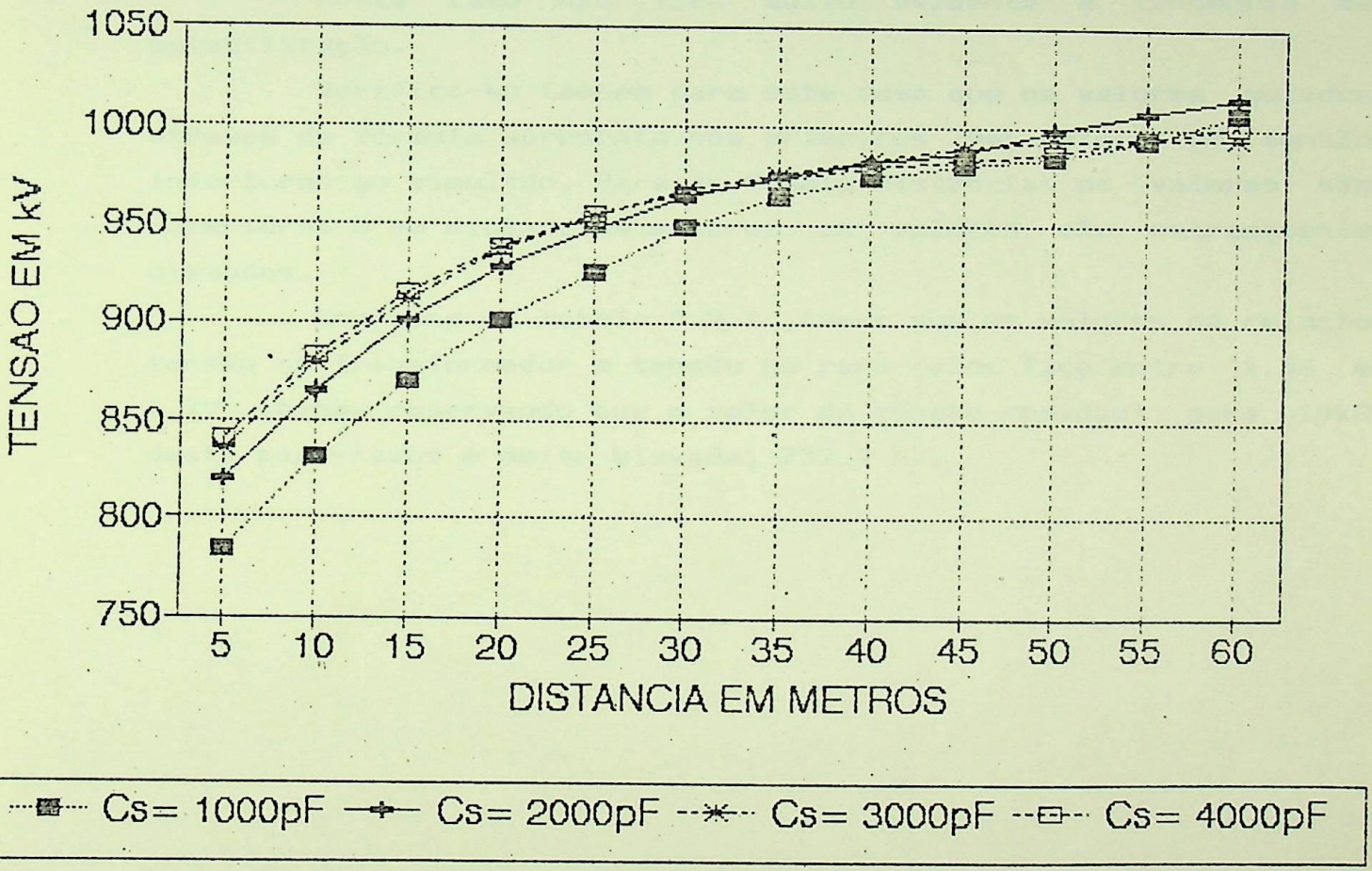


GRAFICO 5.1.1

ZnO IEC LIMITE INFERIOR



5.2.2 - Pára-raios de 228kV com Base na Norma IEC para seu Limite Superior.

Tendo como base a Tabela 5.2, observa-se que houve uma dispersão dos valores de sobretensão máxima no pára-raios. O valor de tensão residual do mesmo para uma corrente de 10KA é 752.4KV e o mesmo apresentou valores entre 739,2 KV até 759.9 KV.

Nestes casos simulados evidencia-se que os mais elevados valores de tensão foram encontrados para a capacitância de surto de 2000pF. Praticamente para todas as distâncias simuladas, apresentando um ou outro valor para as menores distâncias inferiores a algum outro valor de capacitância."

Neste caso não fica muito evidente a tendência de estabilização.

Verifica-se também para este caso que os valores obtidos através da fórmula apresenta nos primeiros 20m, valores de tensão inferiores ao simulado. Para as demais distâncias os valores são superiores e em distâncias maiores os valores são extremamente elevados.

Com base na tabela 5.2.1 ,temos que os valores da relação tensão no transformador e tensão no pára-raios fica entre 1.34 e 1.79 ,apenas observando que o valor da tensão residual para 10kA deste pára-raios é muito elevada, 752.4 kV.

TABELA 5.2
IEC LIMITE SUPERIOR 228kV

CS	1000pF		2000pF		3000pF		4000pF		CALCULADO
D(m)	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	
5	739.20	989.30	750.60	1042.40	755.70	1054.80	758.30	1047.50	979.10
10	740.60	1048.20	752.00	1098.80	756.50	1108.60	759.20	1099.80	1045.10
15	741.90	1101.30	752.80	1147.70	757.20	1154.60	759.70	1143.80	1112.40
20	743.30	1149.00	752.70	1189.20	757.30	1193.20	759.90	1180.90	1179.10
25	744.00	1189.20	753.20	1224.10	757.10	1225.00	759.80	1211.40	1245.70
30	744.80	1223.70	753.30	1251.80	757.10	1250.90	759.60	1236.20	1312.40
35	744.90	1255.80	753.50	1276.30	757.10	1271.70	759.50	1256.10	1379.10
40	744.70	1282.40	753.10	1295.70	756.70	1288.20	758.80	1273.40	1445.70
45	744.50	1302.40	752.60	1309.90	756.00	1301.60	758.20	1287.30	1512.40
50	745.70	1316.00	752.60	1320.60	756.00	1312.70	758.00	1298.00	1579.10
55	745.60	1326.40	753.00	1334.30	755.90	1321.10	756.90	1307.60	1645.70
60	744.90	1335.70	752.40	1347.20	754.60	1327.40	757.20	1318.80	1712.40

TABELA 5.2.1

IEC - LIMITE SUPERIOR

CS	1000pF	2000pF	3000pF	4000pF
D(m)				
5.00	1.34	1.39	1.40	1.38
10.00	1.42	1.46	1.47	1.45
15.00	1.48	1.52	1.52	1.51
20.00	1.55	1.58	1.58	1.55
25.00	1.60	1.63	1.62	1.59
30.00	1.64	1.66	1.65	1.63
35.00	1.69	1.69	1.68	1.65
40.00	1.72	1.72	1.70	1.68
45.00	1.75	1.74	1.72	1.70
50.00	1.76	1.75	1.74	1.71
55.00	1.78	1.77	1.75	1.73
60.00	1.79	1.79	1.76	1.74

GRAFICO 5.2

ZnO IEC LIMITE SUPERIOR

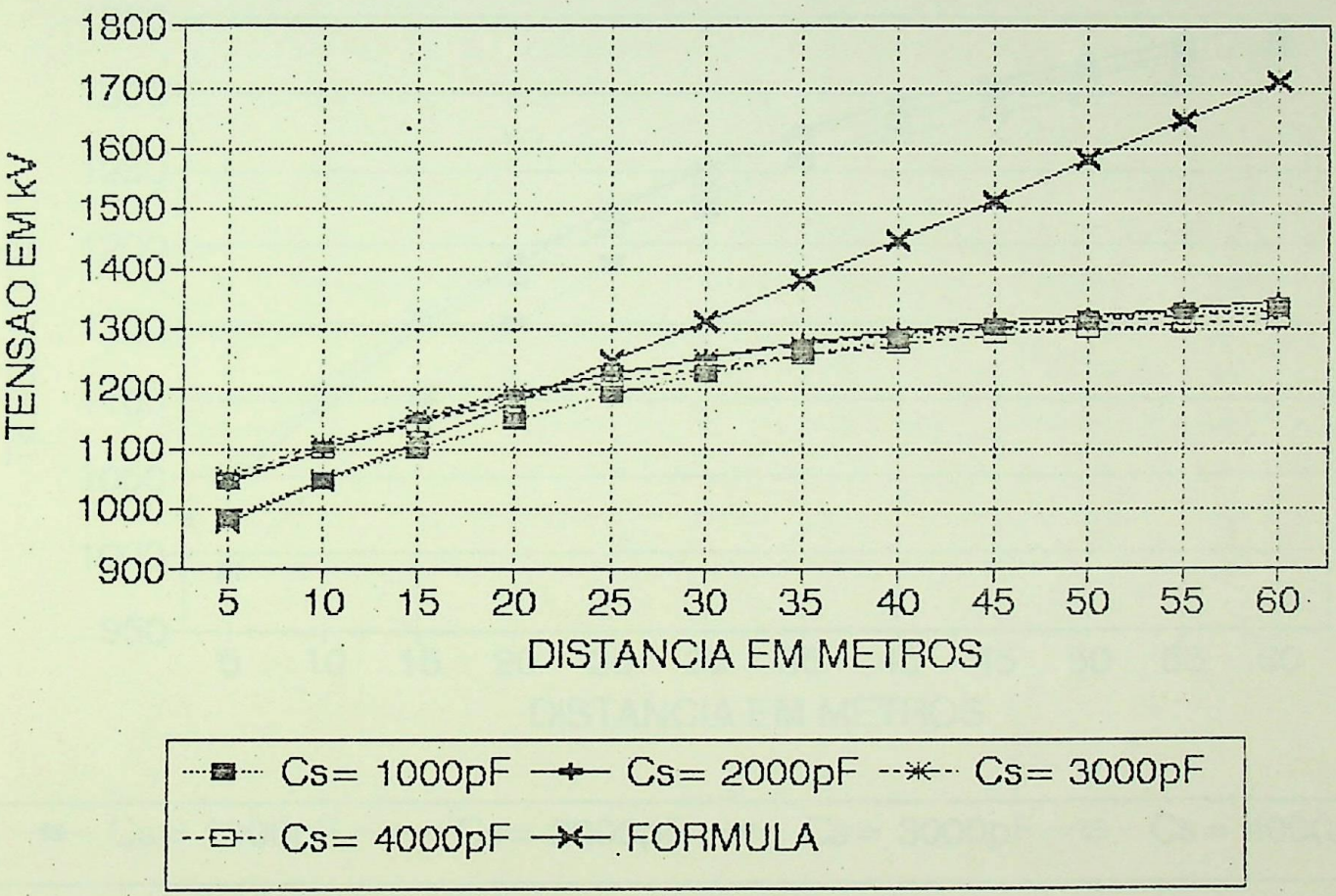
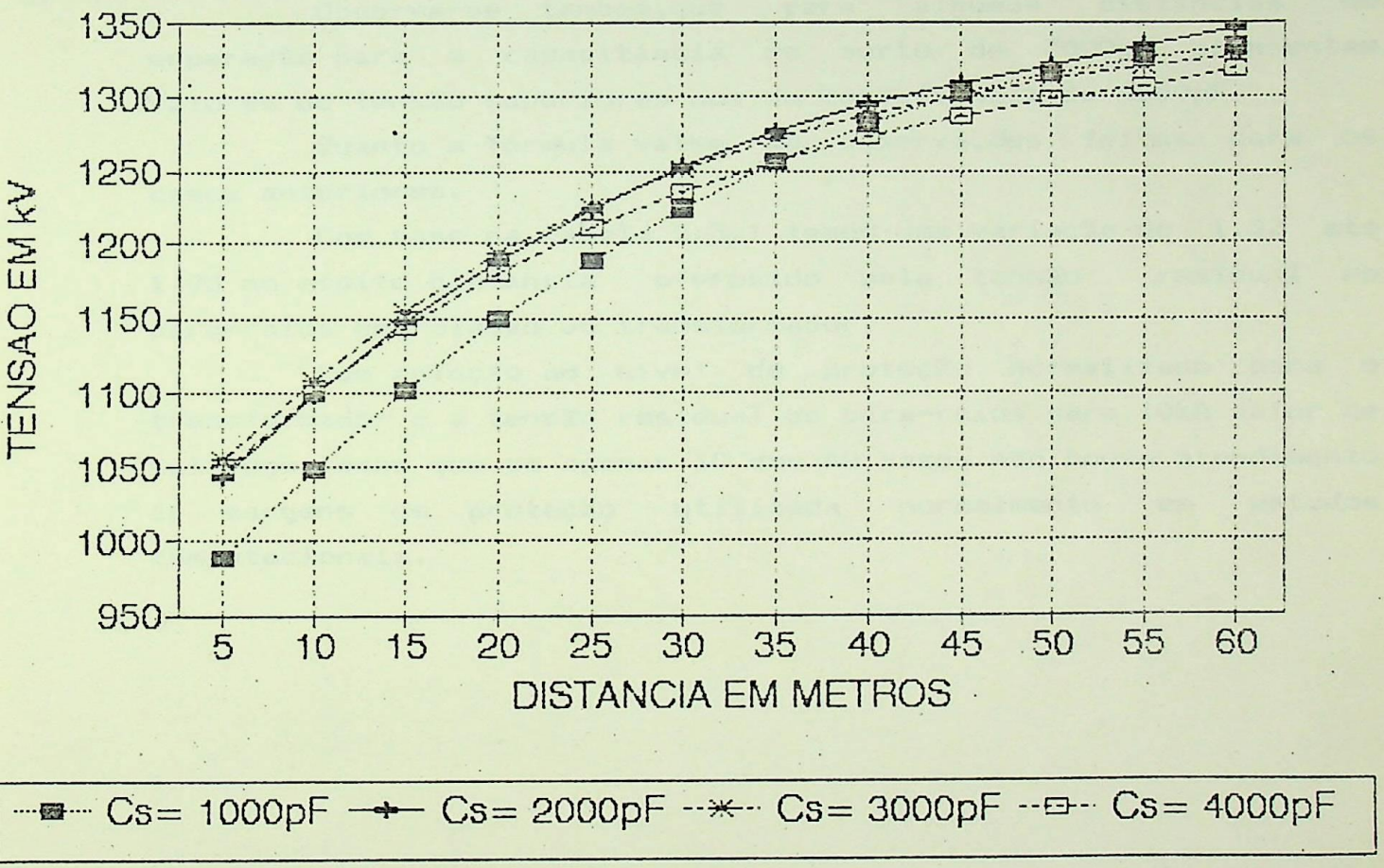


GRAFICO 5.2.1

ZnO IEC LIMITE SUPERIOR



5.2.3 - Pára-raios de 192kV, de óxido de Zinco

Tem as seguintes considerações a serem feitas, com base na tabela 5.3 observa-se uma diferença de 10.2kV entre o valor mínimo e máximo da tensão residual máxima para os diversos parâmetros utilizados.

Os valores mais elevados de sobretensão foram encontrados para as maiores distâncias de separação com o valor de capacitância de surto de 2000pF.

Volta a observar uma forte tendência a estabilização, isto é aumenta-se as distâncias,mas os valores de tensão impressa nos equipamentos não se elevam tanto.

Observa-se também,que para algumas distâncias de separação para a capacitância de surto de 3000pF apresentam valores de tensão superiores aos da capacitância de 4000pF.

Quanto a fórmula valem as observações feitas para os casos anteriores.

Com base na tabela 5.3.1 temos uma variação de 1.52 até 1.93 no efeito distância oferecido pela tensão residual no pára-raios em relação ao transformador.

Com relação ao nível de proteção normalizado para o transformador e a tensão residual do pára-raios para 10kA valor de catálogo temos que em apenas 10 dos 48 casos não houve atendimento às margens de proteção utilizada normalmente em estudos computacionais.

TABELA 5.3
OXIDO DE ZINCO - 192kV

CS	1000pF		2000pF		3000pF		4000pF		CALCULADO
D(m)	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	
5.00	458.20	696.80	462.30	728.40	465.70	742.30	468.30	748.10	687.70
10.00	458.40	737.70	462.60	767.80	465.80	779.80	468.20	784.40	754.30
15.00	458.40	770.00	462.70	796.50	465.40	806.30	467.60	809.70	821.00
20.00	458.50	793.80	462.50	816.60	464.90	824.00	467.00	825.90	887.70
25.00	458.70	813.50	462.00	831.00	464.60	836.90	466.50	837.70	954.30
30.00	458.50	830.20	461.60	843.10	463.80	846.10	465.70	845.30	1021.00
35.00	458.10	841.60	461.40	850.60	463.70	851.80	465.30	852.00	1087.70
40.00	458.80	849.00	460.80	855.30	462.90	859.50	464.90	856.10	1154.30
45.00	458.90	853.20	461.50	860.60	463.40	866.30	465.10	858.60	1221.00
50.00	458.80	855.50	461.60	871.80	463.30	869.40	464.40	862.50	1287.70
55.00	458.60	866.00	461.20	880.80	462.70	869.70	463.80	870.20	1354.30
60.00	458.30	879.30	460.70	887.70	461.90	868.70	464.10	875.70	1421.00

TABELA 5.3.1

OXIDO DE ZINCO - 192kV

CS	1000pF	2000pF	3000pF	4000pF
D(m)				
5.00	1.52	1.58	1.59	1.60
10.00	1.61	1.66	1.67	1.68
15.00	1.68	1.72	1.73	1.73
20.00	1.73	1.77	1.77	1.77
25.00	1.77	1.80	1.80	1.80
30.00	1.81	1.83	1.82	1.82
35.00	1.84	1.84	1.84	1.83
40.00	1.85	1.86	1.86	1.84
45.00	1.86	1.86	1.87	1.85
50.00	1.86	1.89	1.88	1.86
55.00	1.89	1.91	1.88	1.88
60.00	1.92	1.93	1.88	1.89

GRAFICO 5.3

OXIDO DE ZINCO - 192kV

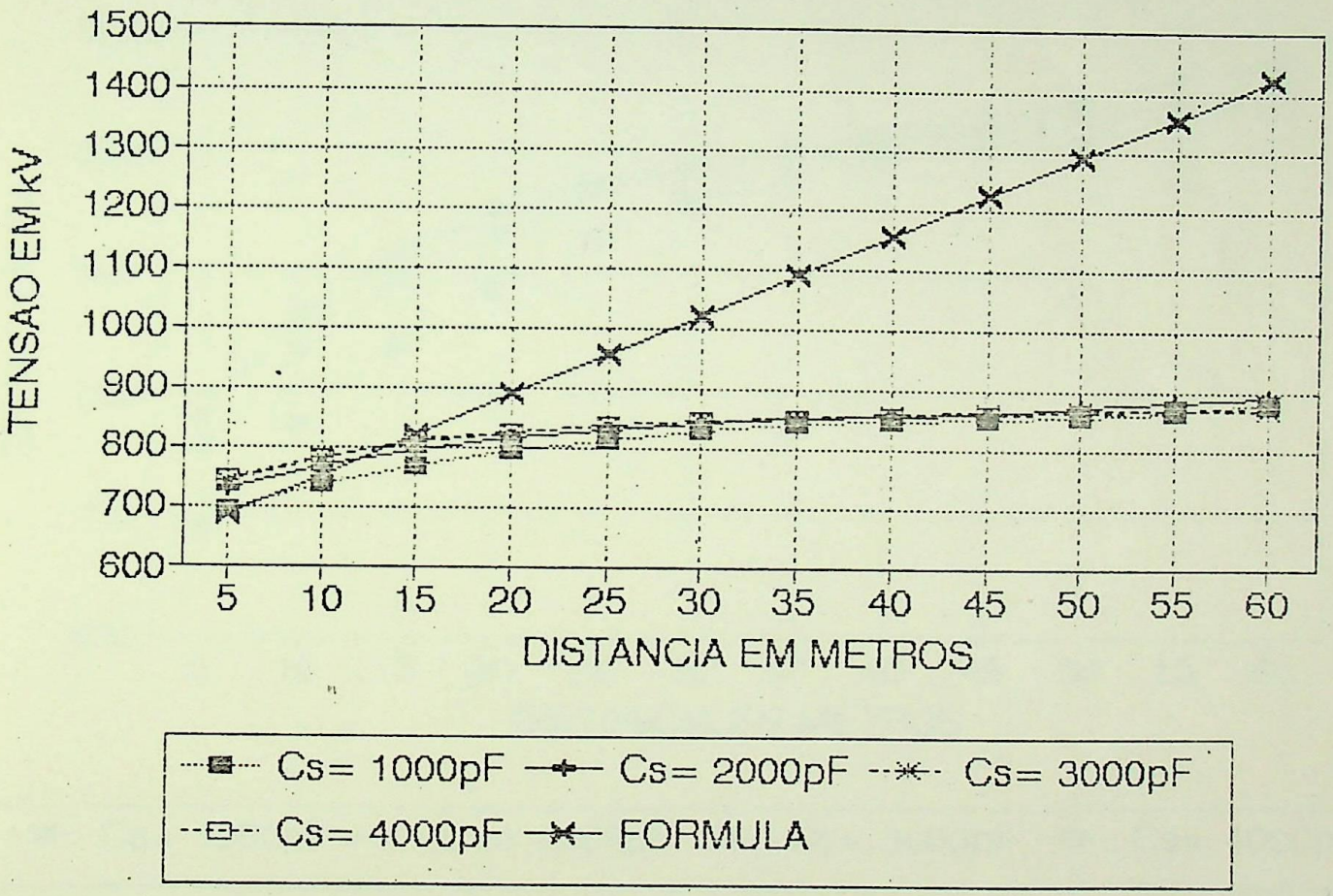
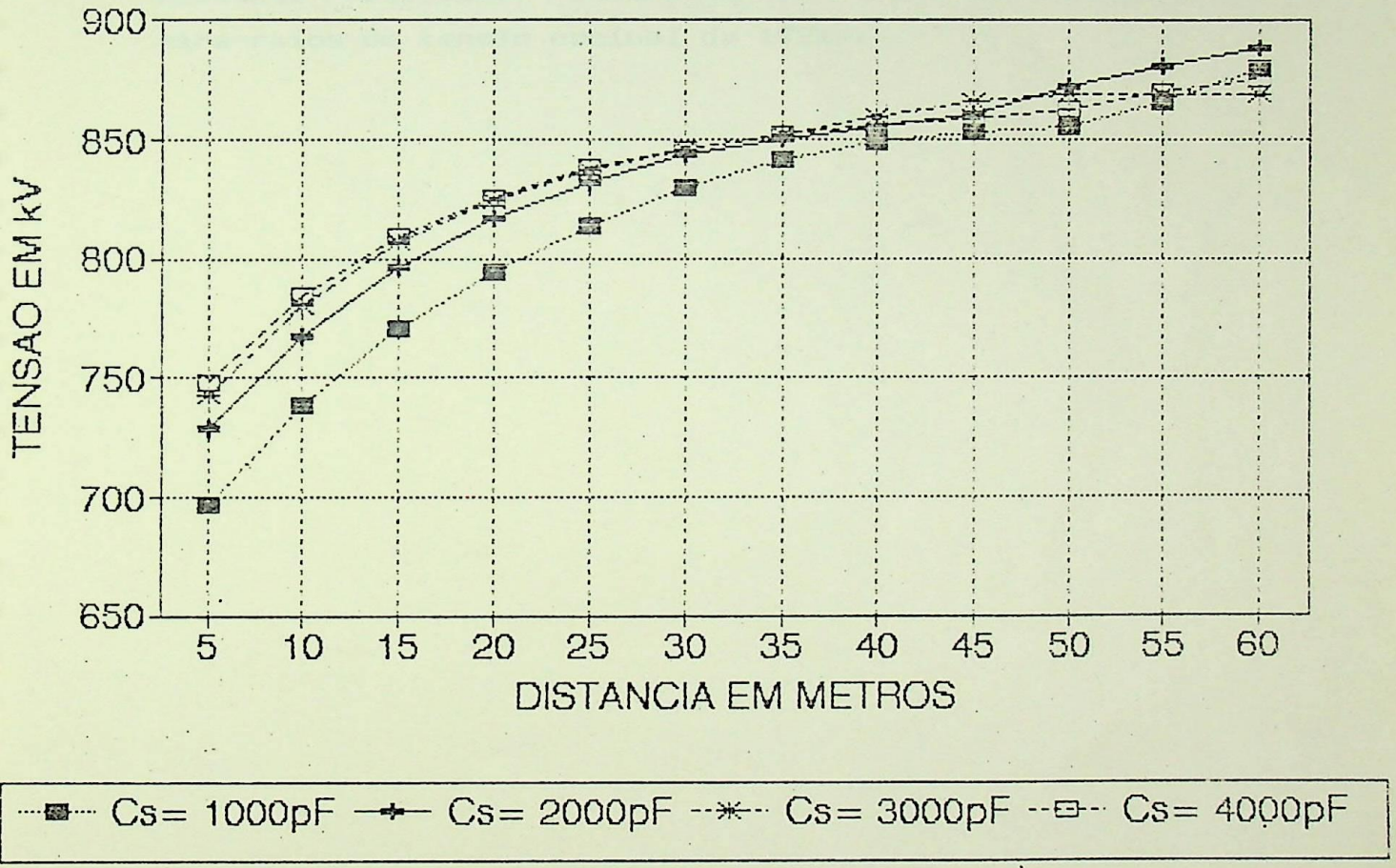


GRAFICO 5.3.1

OXIDO DE ZINCO - 192kV



5.2.4 - Pára-raios de 228kV, de óxido de Zinco

Com base na tabela 5.4 ,verifica-se uma tendência estabilização em função da variação da distância.

Novamente os valores mais elevados de sobretensão foram encontrados para o valor de C = 2000pF.

Também se observa que para a maioria dos valores de tensão encontrados para a capacitância de 3000pF superam os valores para a capacitância de 4000pF.

Conforme pode-se constatar, para esta tensão nominal do pára-raios de óxido de zinco, as distâncias de coordenação são bastante reduzidas contrastando significativamente com os pára-raios de tensão nominal de 192KV.

TABELA 5.4
OXIDO DE ZINCO - 228kV

CS	1000pF		2000pF		3000pF		4000pF		CALCULADO
D(m)	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	
5.00	543.90	797.30	549.70	835.70	553.60	850.80	556.70	855.80	774.70
10.00	544.30	845.60	550.10	882.30	553.90	895.70	556.90	899.50	841.30
15.00	544.70	886.40	550.30	919.40	553.90	930.70	556.70	932.90	908.00
20.00	545.00	918.70	550.00	948.30	553.50	956.90	556.20	957.50	974.70
25.00	545.40	944.60	549.50	968.80	553.10	975.00	555.70	974.80	1041.30
30.00	545.30	968.70	549.60	986.30	552.30	989.50	554.80	986.90	1108.00
35.00	544.90	986.60	549.20	998.70	552.00	999.00	554.30	996.20	1174.70
40.00	545.00	998.00	548.50	1006.10	551.20	1006.30	553.40	1003.00	1241.30
45.00	545.60	1005.40	548.80	1012.20	551.50	1014.60	553.70	1007.40	1308.00
50.00	545.50	1010.00	549.30	1023.20	551.60	1019.00	553.20	1011.80	1374.70
55.00	545.20	1017.00	548.90	1034.00	550.90	1021.20	552.10	1020.10	1441.30
60.00	544.80	1032.60	548.30	1042.30	549.80	1022.00	552.70	1026.90	1508.00

TABELA 5.4.1

OXIDO DE ZINCO - 228kV

CS	1000pF	2000pF	3000pF	4000pF
D(m)				
5.00	1.47	1.52	1.54	1.54
10.00	1.55	1.60	1.62	1.62
15.00	1.63	1.67	1.68	1.68
20.00	1.69	1.72	1.73	1.72
25.00	1.73	1.76	1.76	1.75
30.00	1.78	1.79	1.79	1.78
35.00	1.81	1.82	1.81	1.80
40.00	1.83	1.83	1.83	1.81
45.00	1.84	1.84	1.84	1.82
50.00	1.85	1.88	1.85	1.83
55.00	1.87	1.88	1.85	1.85
60.00	1.90	1.90	1.86	1.86

GRAFICO 5.4

OXIDO DE ZINCO - 228kV

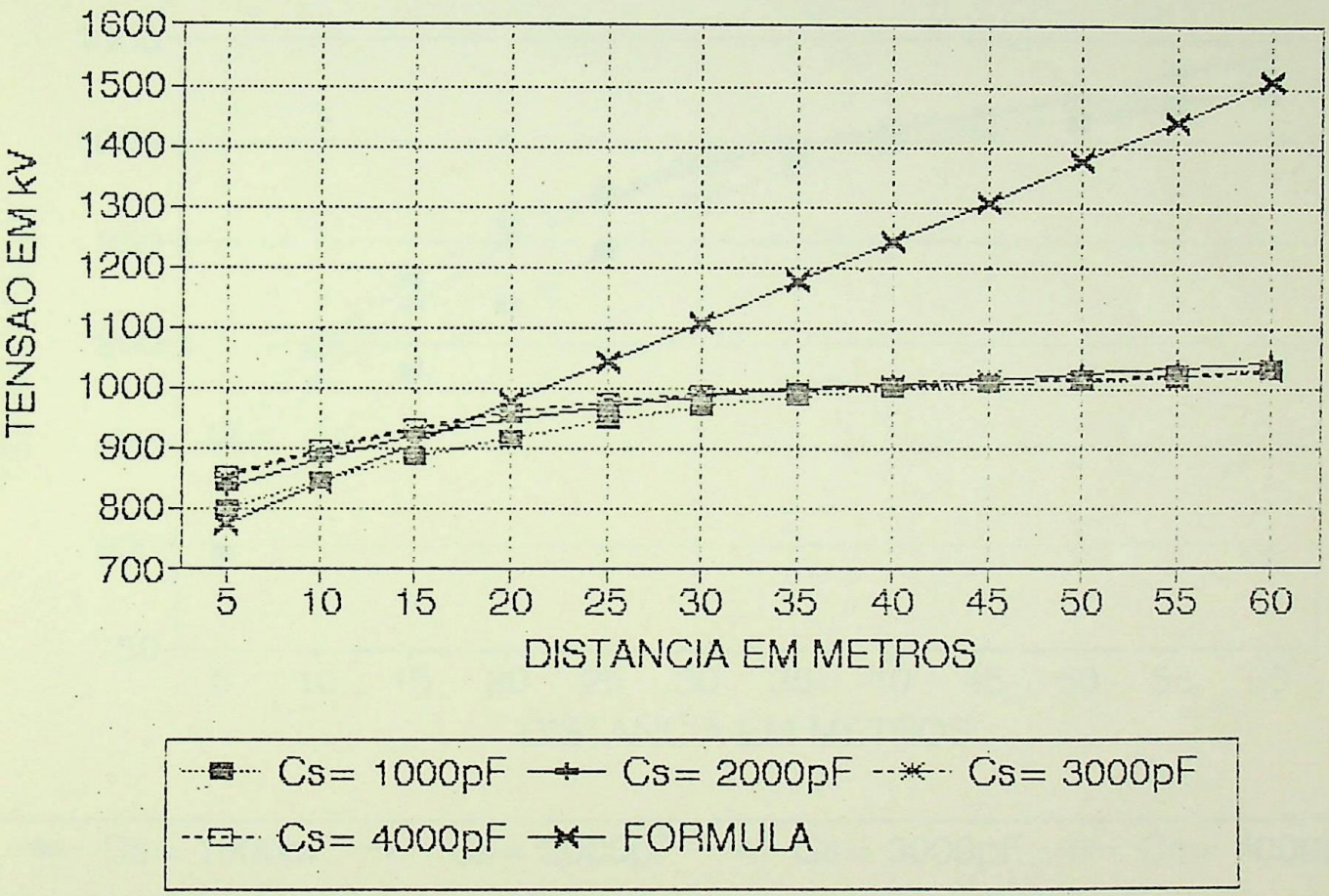
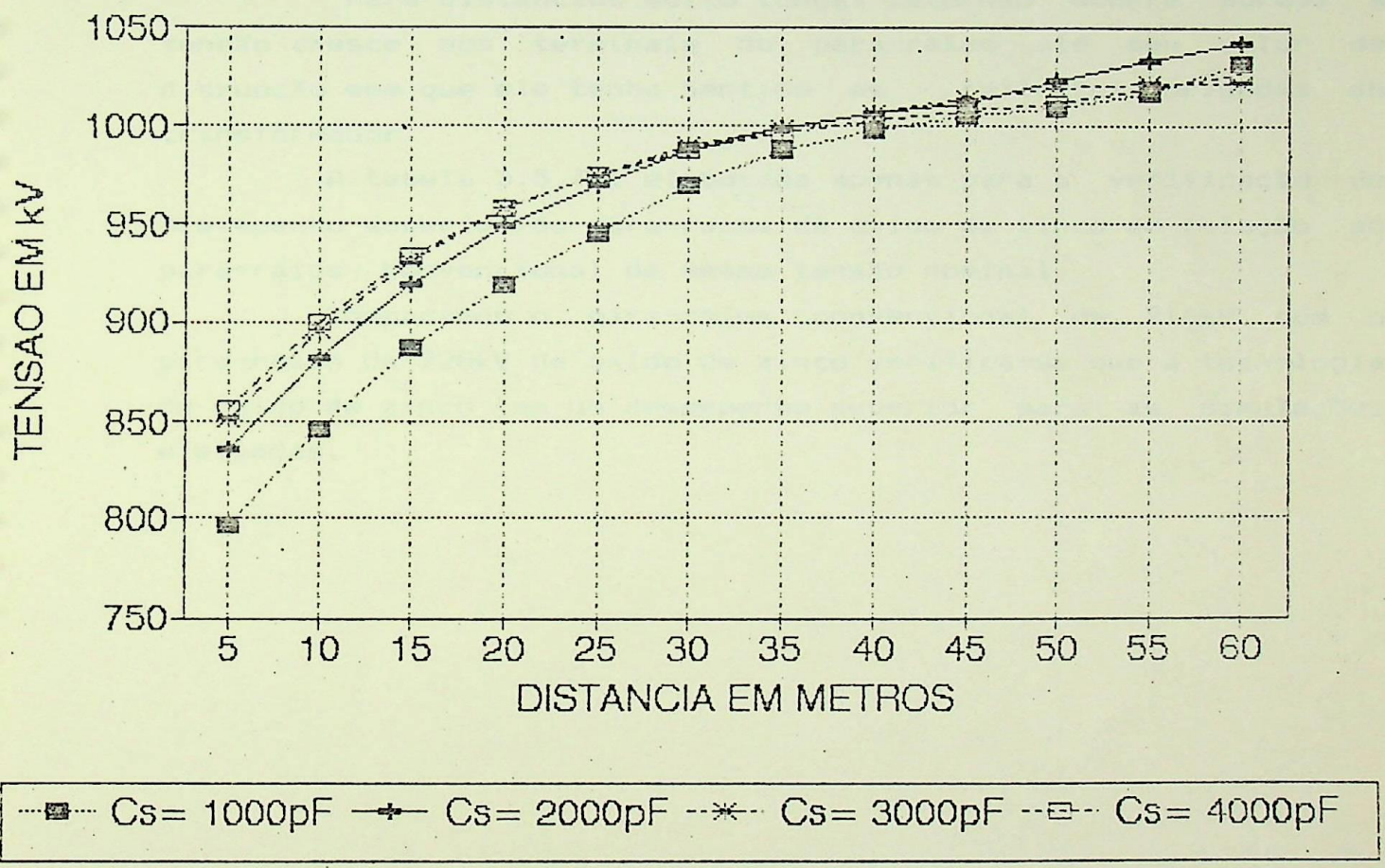


GRAFICO 5.4.1

OXIDO DE ZINCO - 228kV



5.2.5 - Pára-raios Convencional de 216KV

Com base na tabela 5.6, constata-se que os piores resultados de sobretensão são verificados para a capacitância de surto de 1000pF.

Verifica-se uma diminuição nos valores de sobretensão a partir de 40m de distância de separação e logo depois os valores voltam a aumentar. Isto ocorre devido ao fenômeno das ondas viajantes para estas distâncias, pois elas representam o limite de influência da tensão refletida no transformador na atuação do pára-raios.

Para distâncias muito longas isto não ocorre porque a tensão cresce nos terminais do pára-raios até seu valor de disrupção sem que ele tenha sentido as reflexões oriundas do transformador.

A tabela 5.5 foi elaborada apenas para a verificação do desempenho superior do pára-raios de óxido de zinco em relação ao pára-raios convencional de mesma tensão nominal.

Comparando o pára-raios convencional de 216kV com o pára-raios de 228kV de óxido de zinco verifica-se que a tecnologia de óxido de zinco tem um desempenho superior para as simulações efetuadas.

TABELA 5.6
CARBONETO DE SILICIO - 216 kV

CS	1000pF		2000pF		3000pF		4000pF		CALCULADO
D(m)	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	
5.00	725.40	966.90	724.10	993.70	725.40	1004.40	725.60	998.70	952.70
10.00	725.40	1023.40	724.40	1047.20	724.60	1047.00	725.40	1044.80	1019.30
15.00	724.50	1073.20	725.10	1090.40	725.00	1084.00	725.50	1083.40	1086.00
20.00	725.80	1117.90	725.60	1124.00	724.90	1115.30	725.90	1113.10	1152.70
25.00	724.60	1154.80	724.60	1149.60	726.00	1141.00	725.90	1135.40	1219.30
30.00	725.50	1186.20	725.10	1170.00	725.10	1158.20	725.50	1151.60	1286.00
35.00	725.10	1206.40	725.70	1184.00	725.80	1166.70	725.50	1161.30	1352.70
40.00	725.50	1204.90	726.00	1188.20	725.90	1161.40	725.80	1160.30	1419.30
45.00	725.30	1149.20	725.30	1166.70	725.30	1153.80	725.30	1136.60	1486.00
50.00	725.30	1175.20	725.30	1185.20	725.30	1159.00	725.30	1149.40	1552.70
55.00	725.30	1199.30	725.30	1199.40	725.30	1161.50	725.30	1164.40	1619.30
60.00	725.30	1221.30	725.30	1209.20	725.30	1162.20	725.30	1175.00	1686.00

TABELA 5.5
OXIDO DE ZINCO - 216kV

5.00		524.40	815.50		745.70
60.00		520.50	971.80		1319.00

TABELA 5.6.1

CARBONETO DE SILICIO - 216kV

CS	1000pF	2000pF	3000pF	4000pF
D(m)				
5.00	1.33	1.37	1.38	1.38
10.00	1.41	1.45	1.44	1.44
15.00	1.48	1.50	1.50	1.49
20.00	1.54	1.55	1.54	1.53
25.00	1.59	1.59	1.57	1.56
30.00	1.64	1.61	1.60	1.59
35.00	1.66	1.63	1.61	1.60
40.00	1.66	1.64	1.60	1.60
45.00	1.58	1.61	1.59	1.57
50.00	1.62	1.63	1.60	1.58
55.00	1.65	1.65	1.60	1.61
60.00	1.68	1.67	1.60	1.62

TABELA 5.5.1

OXIDO DE ZINCO - 216kV

CS			3000pF	
D(m)				
5.00			1.56	
60.00			1.87	

GRAFICO 5.5

CONVENCIONAL - 216kV

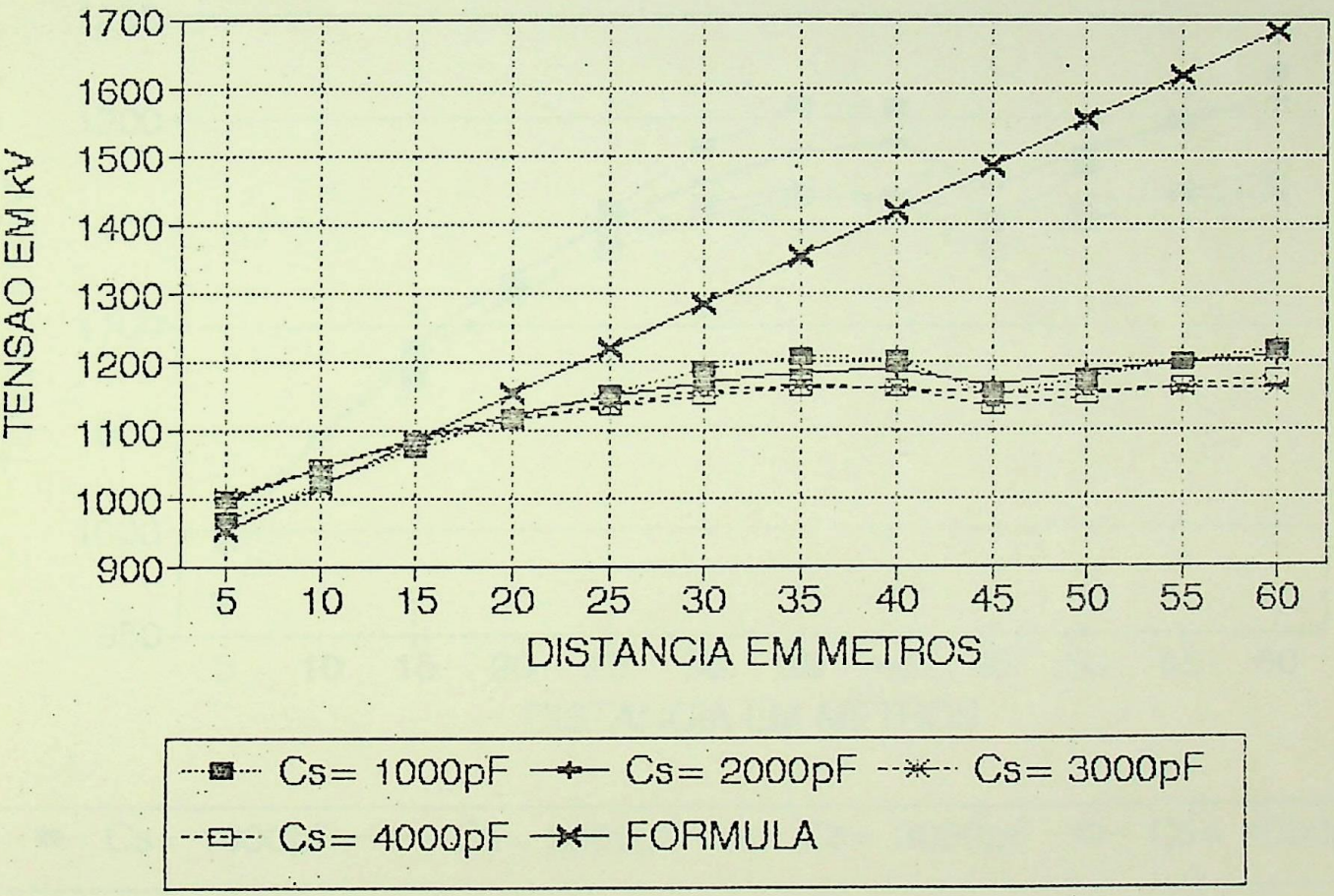
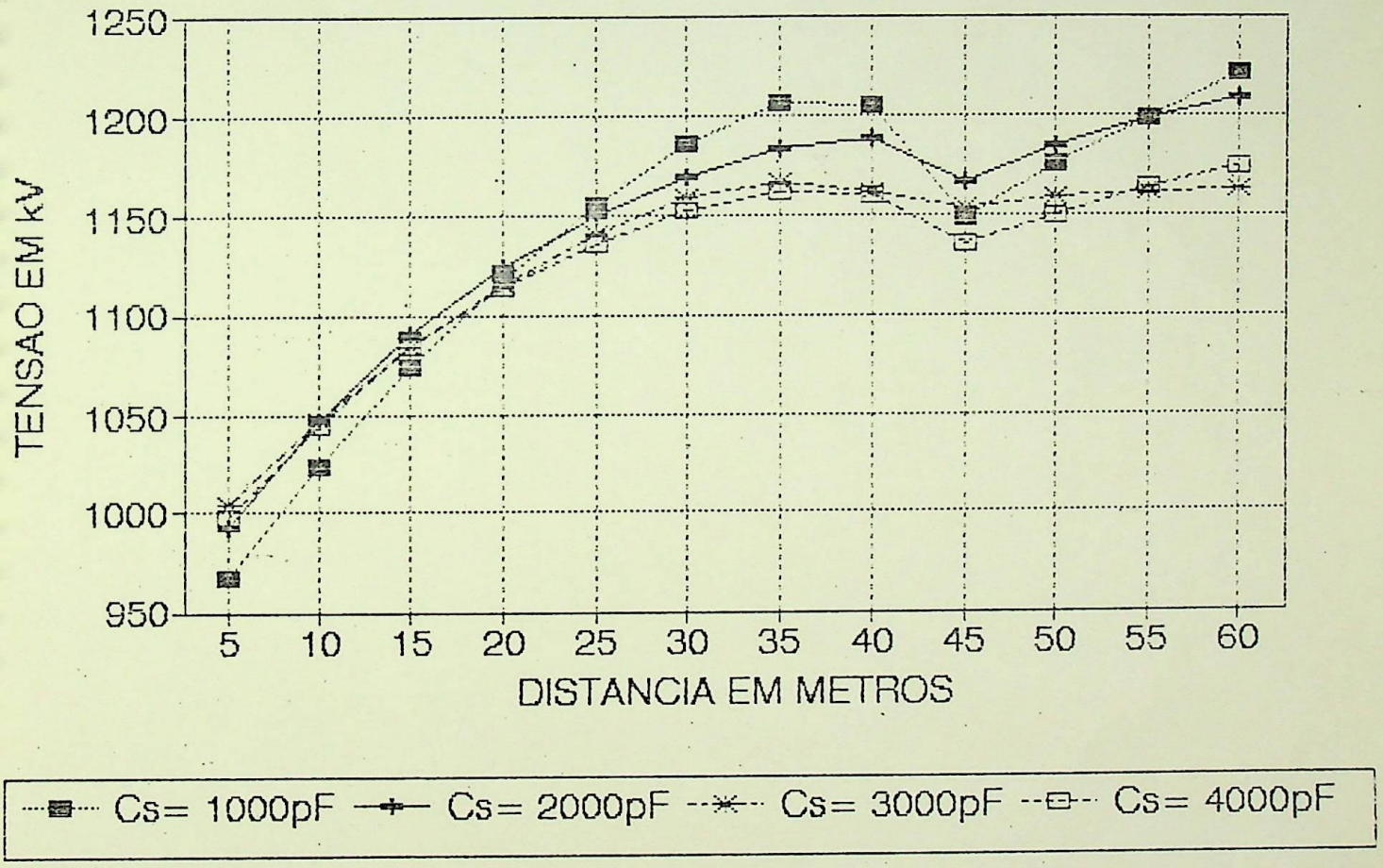


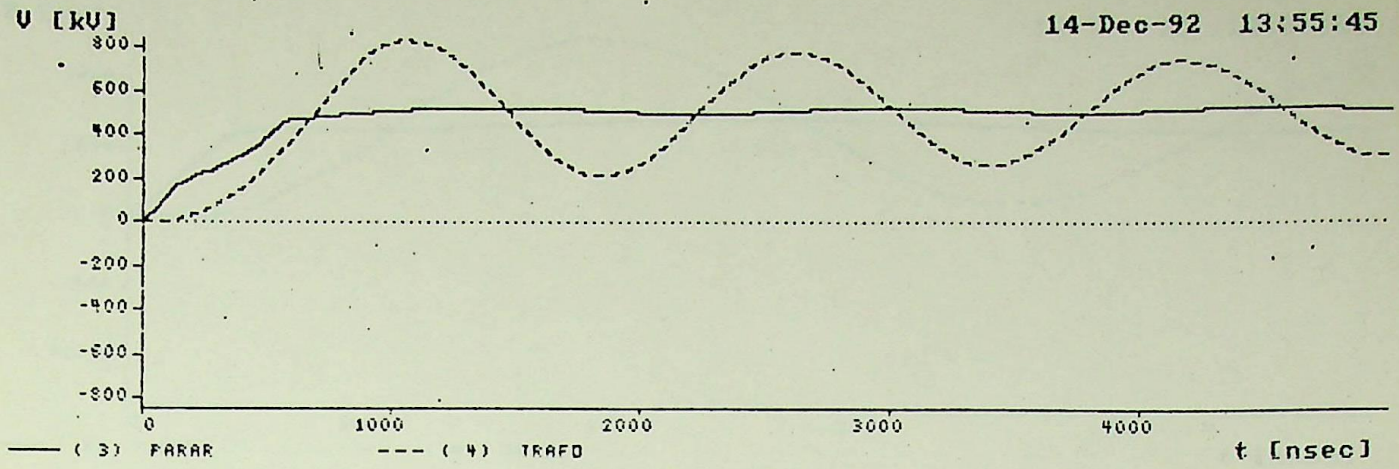
GRAFICO 5.5.1

CONVENCIONAL - 216kV

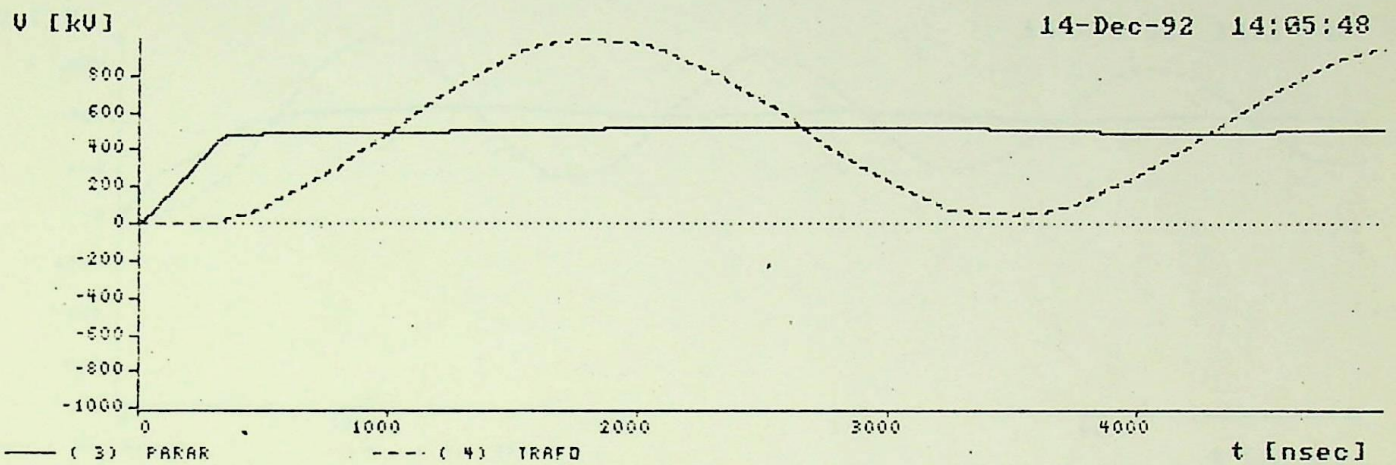


5.2.6 - Curvas Típicas

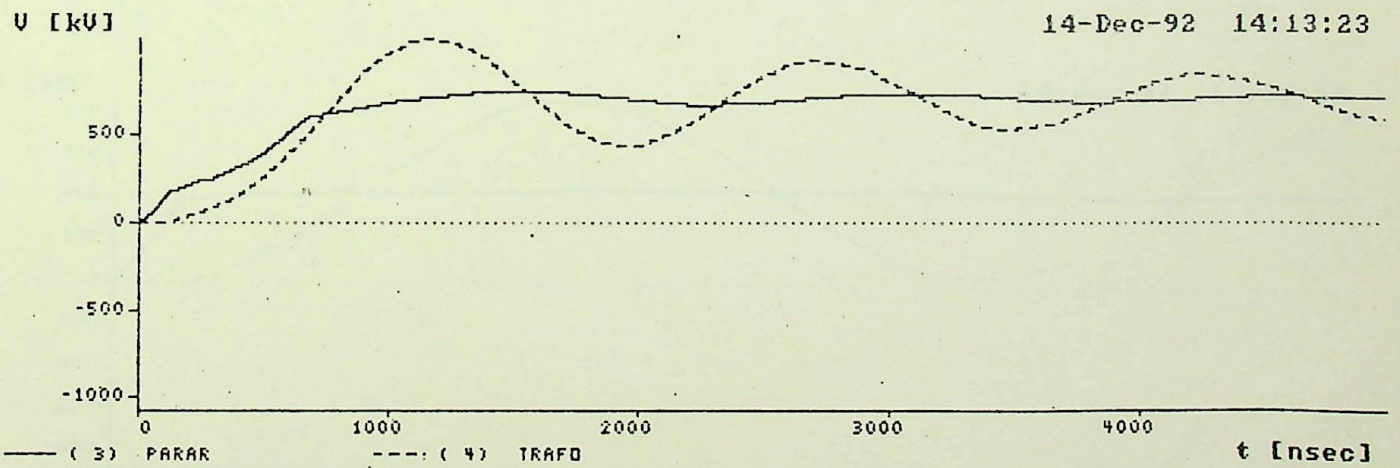
A seguir são apresentadas as curvas típicas dos resultados obtidos no programa ATP, para as simulações realizadas.



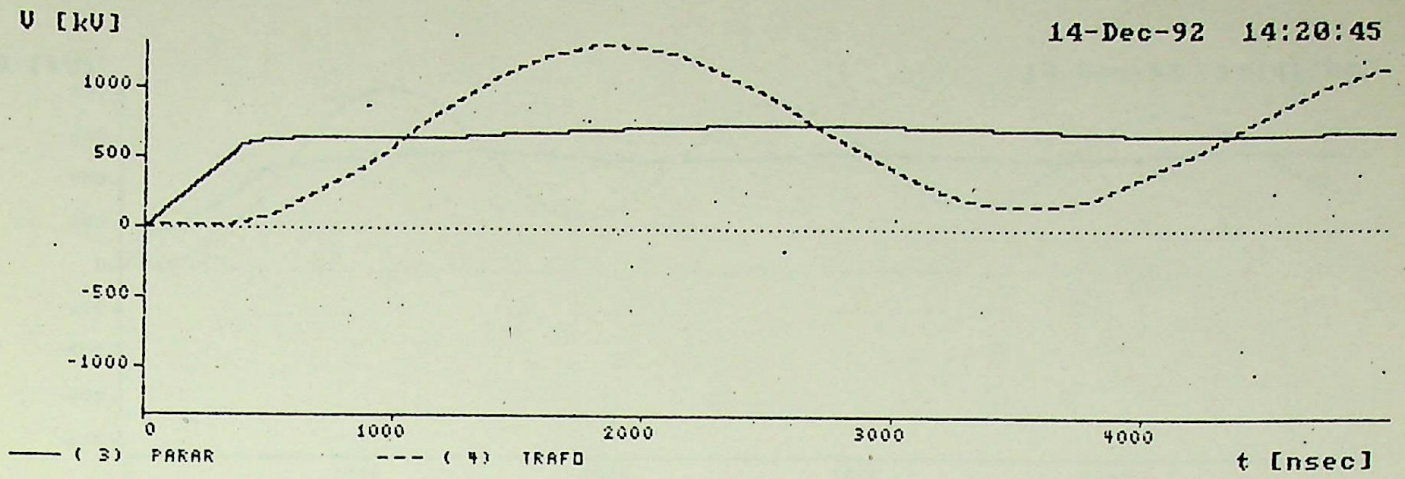
OXIDO DE ZINCO - IEC LIMITE INFERIOR
Cs= 3000pF Zs=352 D= 5m
CURVA 5.1



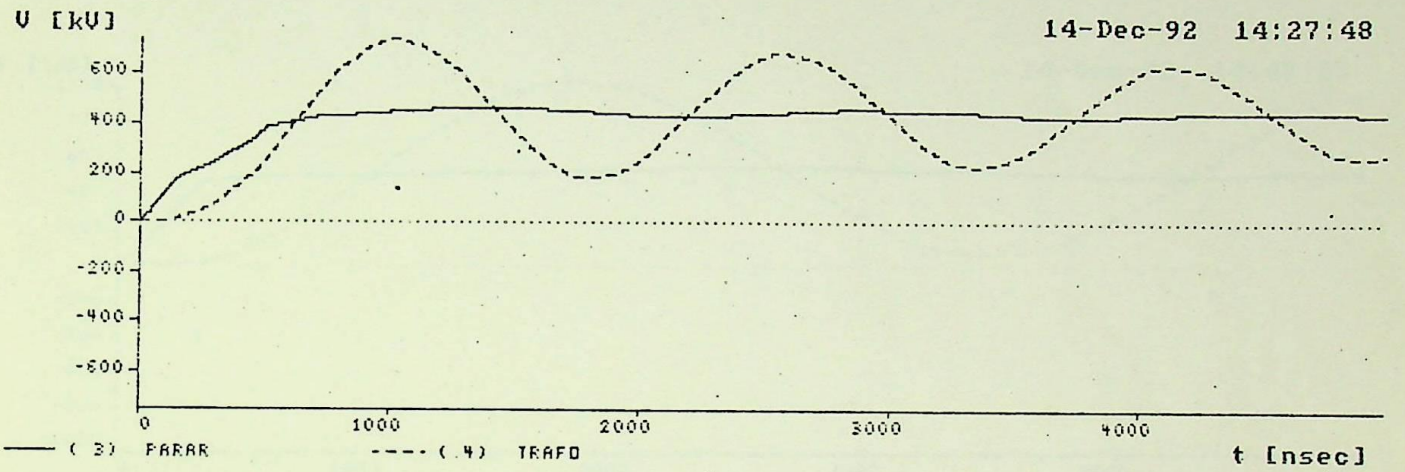
OXIDO DE ZINCO - IEC LIMITE INFERIOR
Cs= 3000pF Zs=352 D= 60m
CURVA 5.1.1



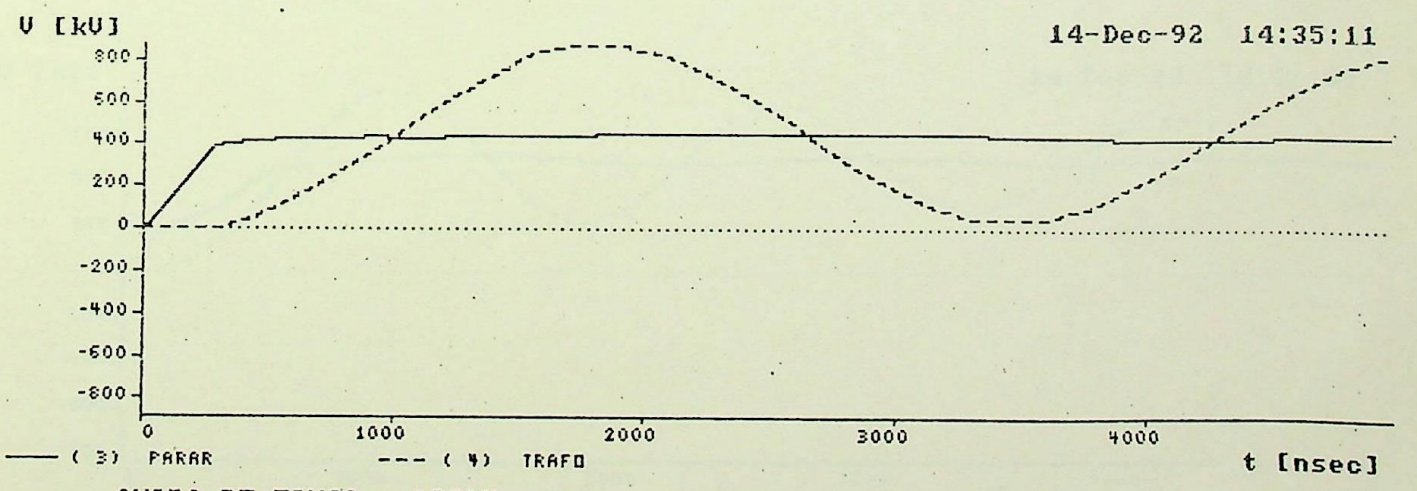
OXIDO DE ZINCO - IEC LIMITE SUPERIOR
Cs= 3000pF Zs=352 D=5m
CURVA 5.2



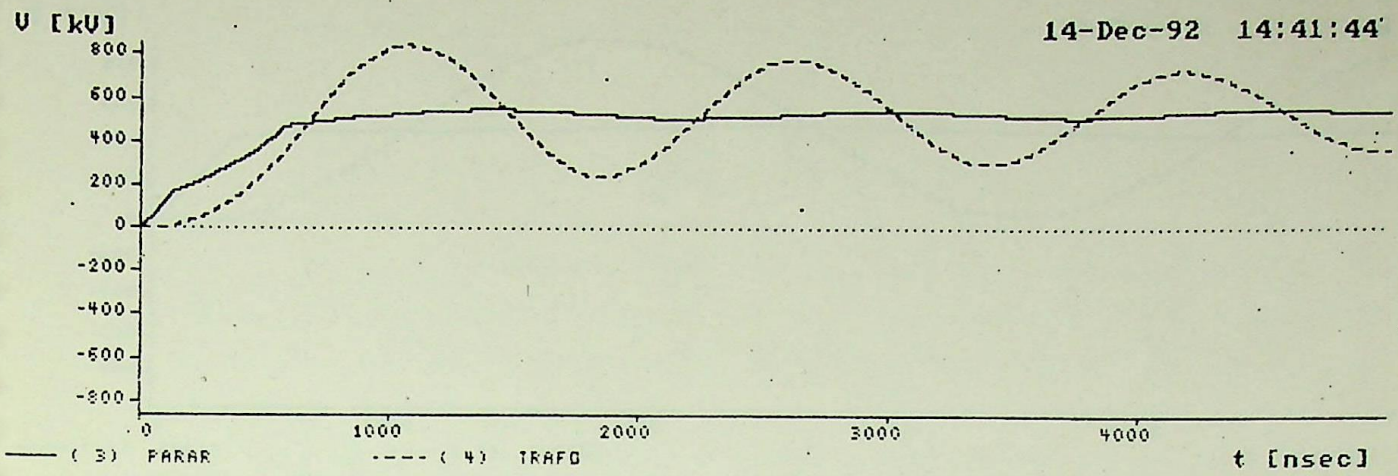
OXIDO DE ZINCO - IEC LIMITE SUPERIOR
Cs= 3000pF Zs=352 D=60m
CURVA 5.2.1



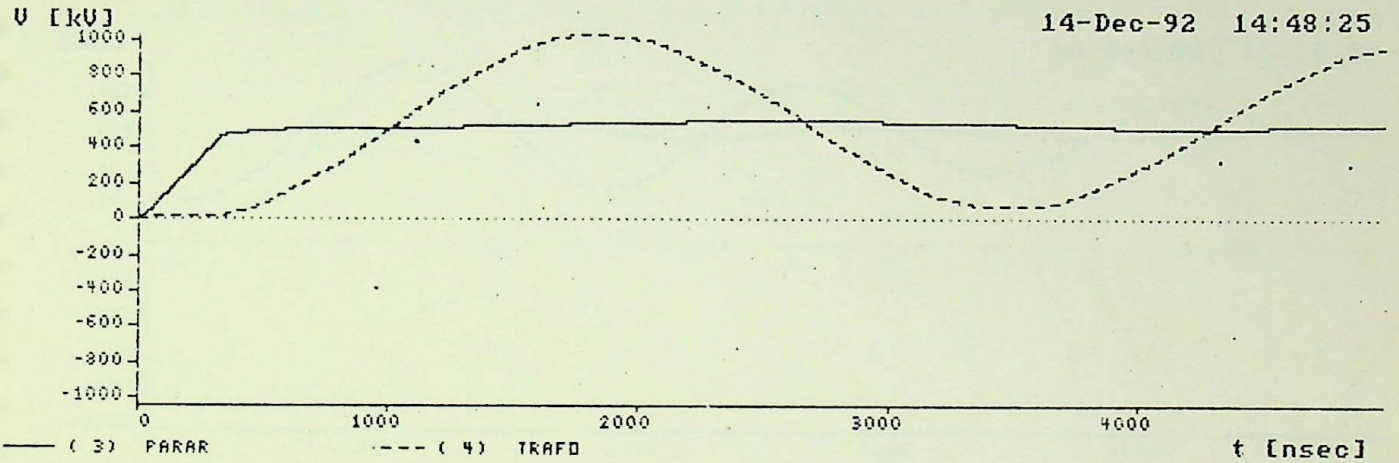
OXIDO DE ZINCO - 192kV
Cs= 3000pF Zs=352 D= 5m
CURVA 5.3



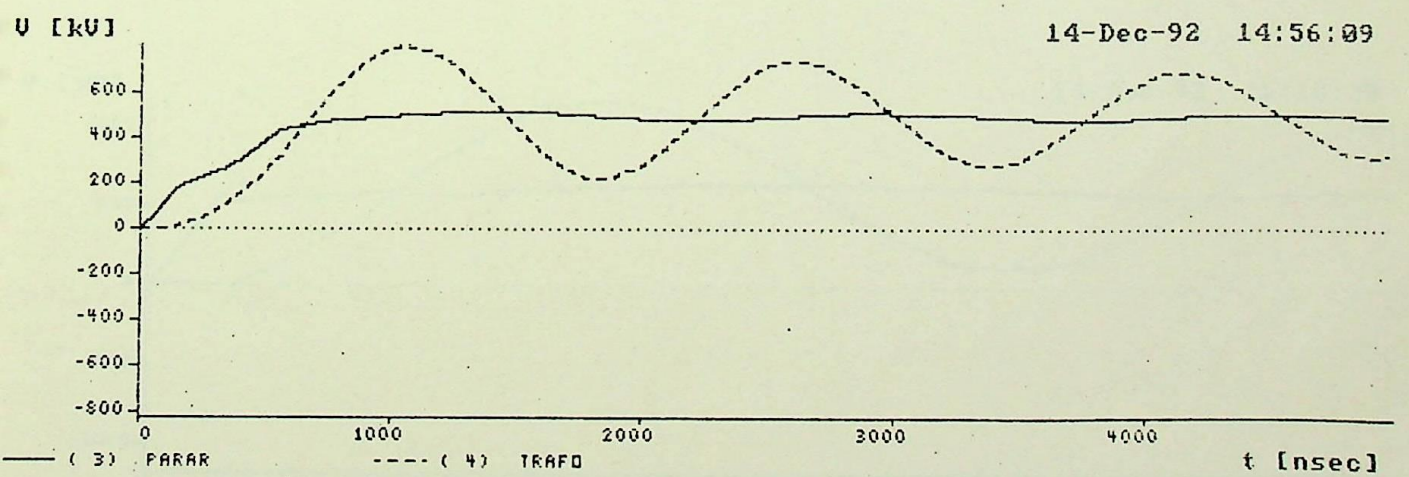
OXIDO DE ZINCO - 192kV
Cs= 3000pF Zs=352 D=60m
CURVA 5.3.1



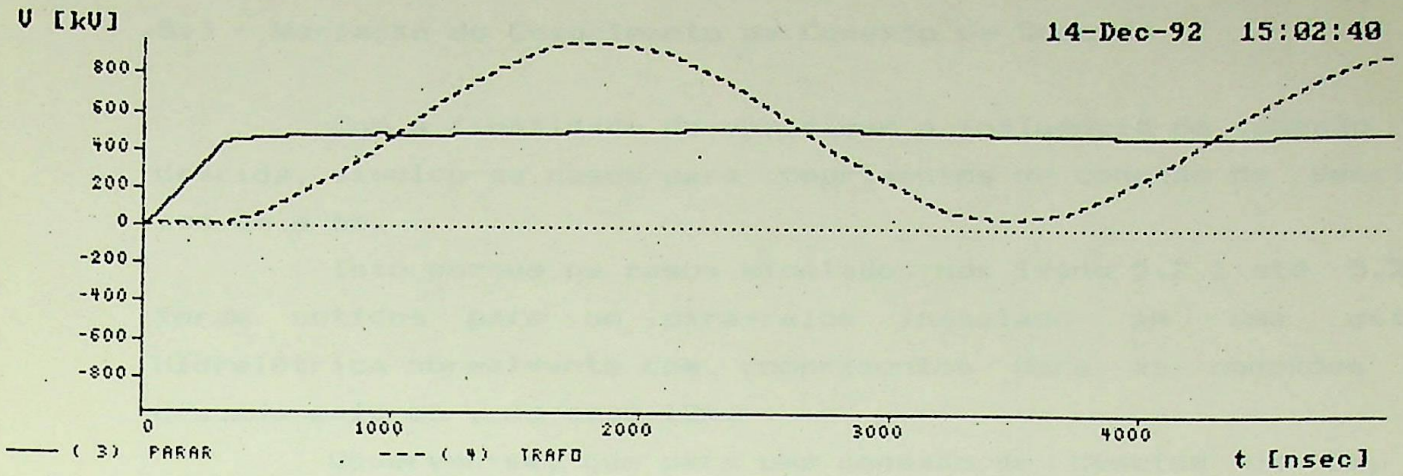
OXIDO DE ZINCO - 228kV
Cs= 3000pF Zs=352 D=5m
CURVA 5.4



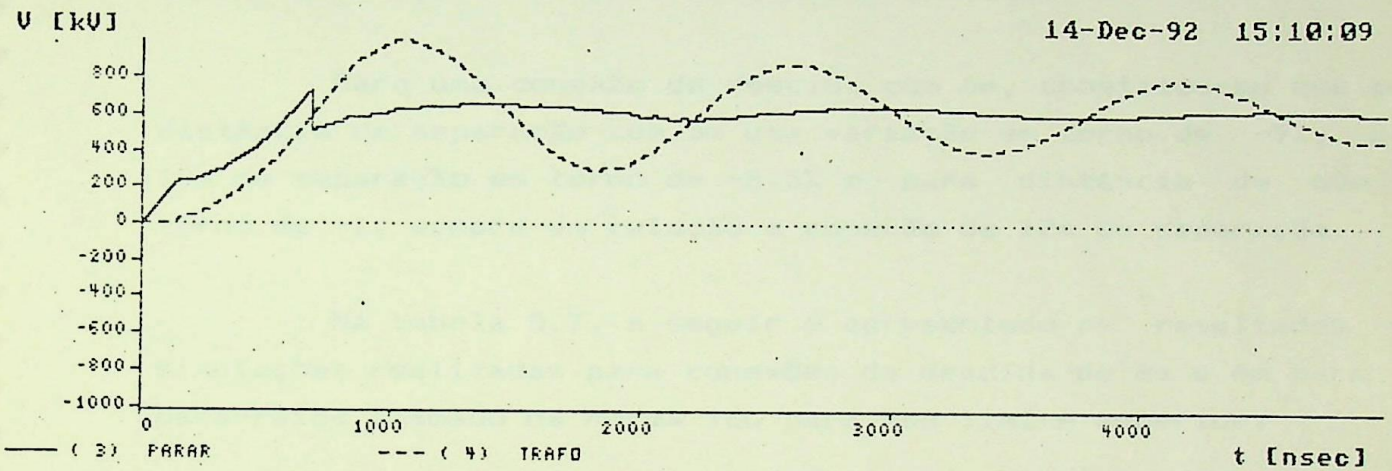
OXIDO DE ZINCO - 228kV
Cs= 3000pF Zs=352 D=60m
CURVA 5.4.1



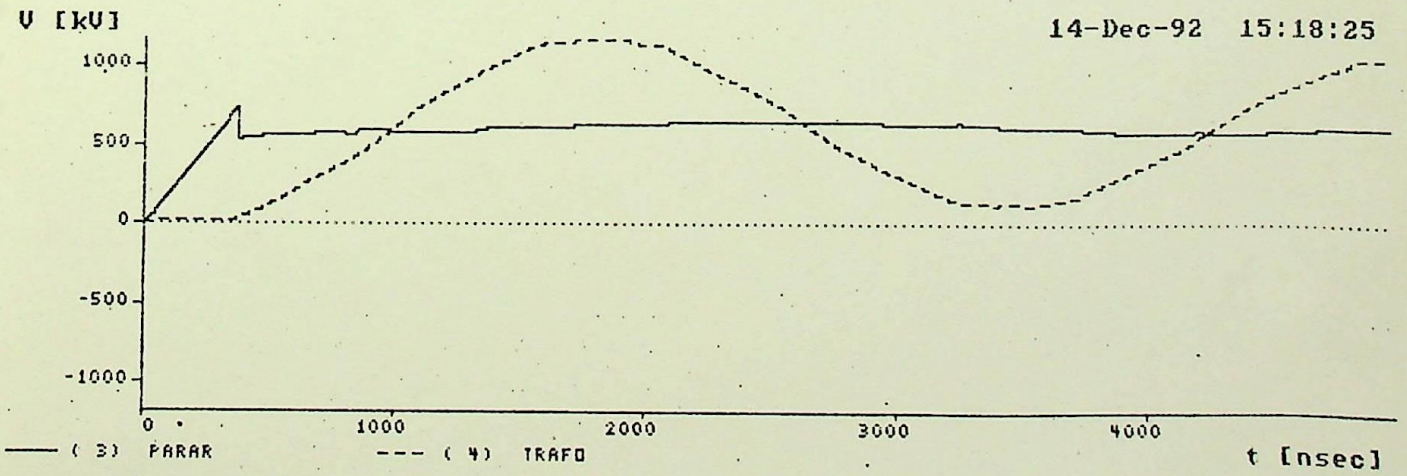
OXIDO DE ZINCO - 216kV
Cs= 3000pF Zs=352 D= 5m
CURVA 5.5



OXIDO DE ZINCO - 216kV
Cs= 3000pF Zs=352 D=60m
CURVA 5.5.1



CONVENCIONAL - 216kV
Cs= 3000pF Zs=352 D= 5m
CURVA 5.6



CONVENCIONAL - 216kV
Cs= 3000pF Zs=352 D=60m
CURVA 5.6.1

5.3 - Variação do Comprimento da Conexão de Descida

Com a finalidade de verificar a influência da conexão de descida, simulou-se casos para comprimentos de conexão de descida com 8m e 6m.

Isto porque os casos simulados nos iténs 5.2.1 até 5.2.5 foram obtidos para um pára-raios instalado em uma usina hidrelétrica normalmente com comprimentos para as conexões de descida maiores , no caso 12m.

Observou-se, que para uma conexão de descida de 8m, a variação da tensão no equipamento protegido foi em torno de -5.5% para a distância de 5m de separação, em torno de -4% para a distância de 10m e em torno de -1% para as distâncias de 60m, todas em relação à conexão de descida com 12m.

Para uma conexão de descida com 6m, constatou-se que para distância de separação com 5m uma variação em torno de -9%, para 10m de separação em torno de -6.5% e para distância de 60m em torno de -1, sempre em relação a conexão de 12m de separação.

Na tabela 5.7, a seguir é apresentado os resultados das simulações realizadas para conexões de descida de 8m e 6m para um pára-raios baseado na norma IEC para seu limite superior.

TABELA 5.7
IEC SUPERIOR PARA UMA CONEXAO DE DESCIDA DE 8 m

CS	1000pF		2000pF		3000pF		4000pF	
D(m)	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO
5.00	736.90	935.20	748.70	989.10	754.70	1004.20	757.30	998.60
10.00	739.60	1001.70	750.90	1054.60	756.00	1066.20	758.60	1058.70
15.00	740.80	1059.30	752.30	1109.20	756.60	1118.40	759.30	1109.20
30.00	744.10	1196.30	753.30	1230.10	757.10	1230.70	759.80	1216.80
45.00	744.60	1286.90	753.00	1299.00	756.60	1291.10	758.70	1276.50
60.00	745.50	1328.20	753.00	1337.20	755.70	1322.50	756.80	1309.70

IEC SUPERIOR PARA UMA CONEXAO DE DESCIDA DE 6m

CS	1000pF		2000pF		3000pF		4000pF	
D(m)	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO	PARA-RAIOS	TRAFO
5.00	736.00	905.80	747.30	959.70	754.00	975.80	756.40	971.10
10.00	738.60	976.40	750.20	1029.80	755.50	1043.00	758.20	1036.00
15.00	740.50	1036.90	751.60	1088.20	756.40	1098.40	759.20	1090.00
30.00	743.90	1181.80	753.20	1217.70	757.00	1219.20	759.90	1205.80
45.00	744.70	1277.50	753.20	1292.30	756.80	1285.20	758.90	1270.20
60.00	745.70	1324.50	753.00	1331.40	756.00	1319.60	757.20	1305.60

5.4 - Curva Final

Com base nos dados utilizados para a simulação realizada para as características de um pára-raios segundo a norma IEC para seu limite superior obteve-se a curva final 5.7. Estes dados foram utilizados porque são os mais conservativos, isto é, apresentam os mais elevados valores de tensão para os casos simulados.

Esta curva foi obtida buscando os valores mais elevados da relação da tensão no transformador e a tensão no pára-raios dos diversos valores de capacitância de surto do transformador para uma dada distância, acrescentando ainda um fator de 10% para cobrir eventuais discrepâncias nos dados da simulação. Salienta-se ainda que deverá incidir sobre este valor as margens normais de segurança estabelecida pelas normas IEC ou ANSI.

A seguir é apresentada a curva final 5.7, para uma conexão de descida de 12m.

Esta curva tem como objetivo permitir uma verificação rápida das distâncias de proteção oferecidas pelo pára-raios de óxido de zinco.

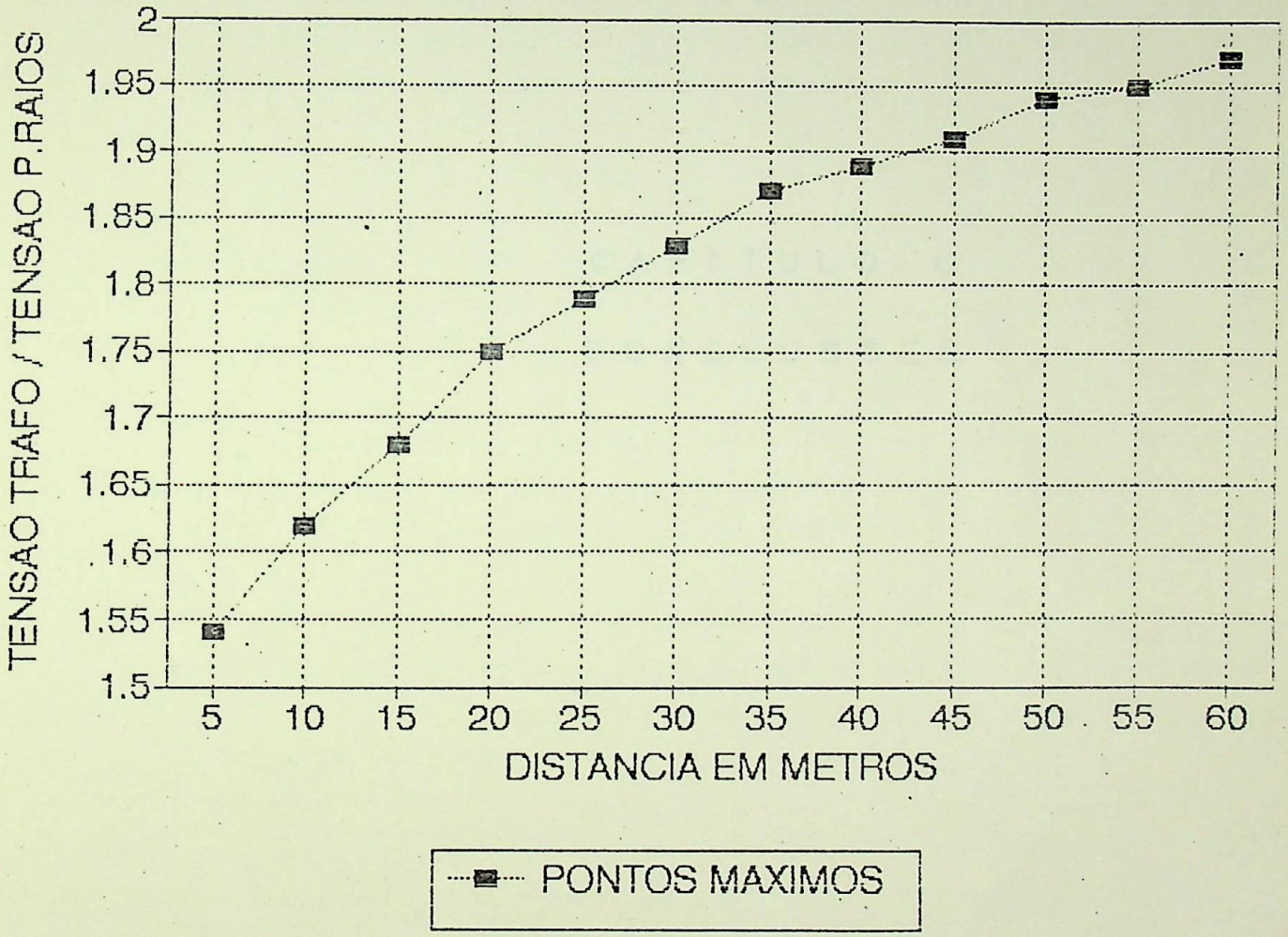
No intuito de verificar a eficácia desta curva comparou-se com os resultados da referencia [42], e constatou-se que o a curva final apresenta resultado mais conservativos para 242kV e 362kV.

A curva da figura 5.7 pode ser representada pela seguinte expressão calculada pelo método das funções racionais [48].

$$FS = \frac{1.153078 + 0.748634E\text{-}3D}{1 + 0.604686D} \; D$$

Com um erro máximo de -6,9%, apenas para a distância de 5m, de -3,47 para a distância de 15m e para os demais resultados apresenta erros inferiores a 2.25%.

CURVA FINAL


TENSAO TRAFO / TENSAO P.RAIOS
2
1.95
1.9
1.85
1.8
1.75
1.7
1.65
1.6
1.55
1.5
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
DISTANCIA EM METROS
PONTOS MAXIMOS

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos nas simulações realizadas obtém-se as seguintes conclusões:

-Normalmente o desempenho do pára-raios convencional é inferior ao desempenho de um pára-raios de óxido de zinco, para uma mesma tensão nominal do pára-raios.

-A utilização da fórmula simplificada 5.1, para distâncias de separação entre pára-raios e transformador inferiores a 20m, não apresenta margens de segurança, que garanta a integridade do equipamento protegido. Pois a mesma apresenta valores de sobretensão inferiores ao encontrado nas simulações. Para distâncias maiores os valores apresentados são extremamente elevados, portanto, incompatíveis com os resultados reais.

-Os mais elevados valores de sobretensão, foram encontrados para a capacitância de 2000pF, isto porque a constante de tempo ZcCs , do modelo é aproximadamente igual ao tempo de frente de onda que é 0.785 E-6 e a constante de tempo ZcCs é 0.704 E-6.

-Verifica-se também que os mais elevados valores de capacitância de surto do transformador não proporcionaram sempre os mais elevados valores de sobretensão.

-A medida que a distância de separação aumenta, constata-se também uma tendência a estabilização do valor de sobretensão no equipamento protegido, pois, perde-se a influência das reflexões de onda no transformador.

Constata-se portanto através da tabela 5.7, que a pior condição para a coordenação da distância entre o pára-raios e transformador considerando o comprimento da conexão de descida é encontrada para 12m de conexão de descida , que representa a instalação dos mesmos em uma usina hidrelétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - ABETTI, P.A. Transformer Models for the Determination of Transient Voltages. AIEE TPAS, vol.72, part. III, p.468-475, June. 1953.

[2] - FERGESTAD, P. I. et alii. Transient Oscillations in Multiwinding transformers. IEEE TPAS,vol.93,p.500-509, 1974.

[3] - HEDMAN,D.E. Teoria das Linhas de Transmissão II, Vol.3, Série P.T.I., UFSM,1978.

[4] - MCNUTT,W.J. et alii. Response of Transformer Winding to System Transient Voltages.IEEE TPAS, vol.93, p.457-467,1974.

[5] - BLUME,L.F. et alii. Abnormal Voltages Within Transformers. Trans. AIEE, vol. 38 , p 577-614,1919.

[6] - SAY,M.G. Manual do Engenheiro Eletricista . Hemus .vol 3, p 9-18.s.d.

[7] - GREENWOOD, A. Electrical Transients in Power Systems. Editora Wiley. 1971

[8] - FILHO, O.B. O. et alii. Análise de Tensões Criticas ao longo do Enrolamentos de Transformadores de Distribuição. :XI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA,Blumenau. Setembro,1992.

[9] - FEINBERG, R. Modern Power Transformer Practice. London, Ed.Macmillan Press Ltd, 1979, cap.5 p.112 a 138.

[10] - D'AJUZ, A. et alii. Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão. Rio de Janeiro, FURNAS, EDUFF, 1987. 435p.

[11]- FILHO, O. B. de O. & VERDOLIN, R. T. Corrente de fuga e perda Joule em pára-raios de óxido de Zinco. Eletricidade Moderna, : 26-33, nov. 1985.

[12] - TOMINAGA, S. et alii. Reliability and application of metal oxide surge arresters for power systems. IEEE-TPAS, Vol. Pas-98, (3) : 805-816, may/june. 1979.

[13] - MENTH , A. et alii. Present State and Development Potential of Solid-state Varistors. In : Ragaller, K. SURGE IN HIGH-VOLTAGE NETWORKS. Plenum Press,New York.1980 p.283-298.

[14] - KOBAYASHI , M. et alii. Development of zinc-oxide non-linear resistors and their applications to gapless surge arresters. IEEE-TPAS, vol. Pas-97, (4) : 1149-1158, july/aug. 1978.

[15] - D'AJUZ, A. et alii. Equipamentos elétricos; especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Rio de Janeiro, FURNAS, EDUFF, 1985. 300p.

[16] - TOMINAGA, S. et alii. Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic V - I characteristics. IEEE-TPAS, vol. Pas-98, (6) : 1860-1871, nov/dec. 1979.

[17] - MATSUOKA, M. Nonohmic properties of zinc oxide ceramics. Japanese Journal of Applied Physics, vol. 10, (6): 736-746 june.1971.

[18] - EKSTRÖM, A, & ANDERSSON, G. Guidelines for the application of metal oxide arresters without gaps for HVDC converter stations. ELECTRA,VOL. 127 : 110-135.1991.

[19] - PHILIPP, H. R. & LEVINSON L. M. High-temperature behavior of ZnO - based ceramic varistors. Japanese Journal of Applied Physics,vol 50, (1): 383-389 jan.1979.

[20] - PIZARRO, A. R. Efeito de dopantes sobre a degradação de varistores a base de ZnO . São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, 1990. Dissertação (mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais).

[21] - ASEA BROWN BOVERI. Zinc Oxide Surge Arrester. Publ. SESWGA-2350E. 1.ED.SWEDEN,1990.

[22] - LEITE, D. M. & AKAMATSU, J. I. Estudos e Ensaios para Definição da Tensão de Referência dos Pára-raios de Óxido-Metálico.In : XI SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Rio de Janeiro, 1991.RJ/GEM/07.6p.

[23] - HADDAD, a. et alii. Characterisation of ZnO Surge Arrester Elements with Direct and Power Frequency Voltages.IEE PROCEEDINGS,Vol.137,Pt.A,No. 5,September,1990.

[24] - TOMINAGA, s. et alii. Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters.IEEE TPAS. Vol.PAS 99. No.4.July/Ago.1980.

[25] - AIEE, Working Group of the Lightning Protective Devices Subcommittee.Simplified Method for Determining Permissible Separation between Arresters and Transformers. AIEE- PAS (Special Supplement),vol.81.1963.

[26] - CIGRÉ,Working Group 33.02(Internal Overvoltages).Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients). 1990.

[27] - SISTEMA ACRE-RONDÔNIA. Estudo de Coordenação de Isolamento para as UHE e SE Samuel. Relatório MAIN - 4.020/88-RE.

[28] - SISTEMA AMAPÁ. Estudo de Coordenação de Isolamento para UHE Coaracy e SE Central. EPT- 5.005/90 RE

[29] - SILVA,L. L. A. & RAMIRES, A. L. Estudo de Coordenação de Isolamento Aplicado à uma Se de 138 KV. Brasília, Abril. 1990.

[30] - IEC. PUBLICATION 71 -1972

[31] - Transitórios Eletromagnéticos.vol. 5 .FUPAI.1991.

[32] - CIGRÉ, Study Committee N 22 (Overhead Lines). Lightning as a Factor in the Reliability of EHF and Proposed UHV Transmission Lines. Sienna,Italy.September,1979.

[33] - CARVALHO , F.M.S. et alii. Reavaliação dos níveis de isolamento a impulso atmosférico dos transformadores das subestações de 500 KV do tronco de Itaipu. In : IX SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Belo Horizonte,1987.BH/GSP/08.

[34] - CARVALHO, F.M.S. Coordenação de isolamento de SE'S isoladas a SF6. Itajubá, EFEI ,1982. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica)

[35] - MORAIS, M. S. Avaliação das probabilidades de backflashover em linhas de transmissão. Itajubá, EFEI, 1990. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica)

[36] - DRAFT INTERNACIONAL STANDARD - IEC. Surge Arresters.Part 1: Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps For A. C. Systems.

[37] - BURGER,U. & kNECHT, B. Surge Arresters: Conventional Technology Metal Oxide Resistors. Brown Boveri Rev. No.11.1979. 4 p.

[38] -KNECHT, B. & MENTH, A. Zinc-Oxide Based Non-Linear Resistência.Brown Boveri Rev.11-79.4p.

[39] -Weck, K.-H. Principles and Procedures of Insulation Co-ordination. IEE Proceedings. Vol.134, PT. C, No. 2, March,1987.8p.

[40] - ASEA BROWN BOVERI. Zinc Oxide Surge Arrester. Publ. SESWG/ A2220E. 3.ED.1991

[41] - CATÁLOGO DA SPRECHER ENERGIE

[42] - ASEA BROWN BOVERI. Zinc Oxide Surge Arrester. Publ. SESWGA/ 2300E. 2.ED.SWEDEN,1991.

[43] - ASEA BROWN BOVERI. Zinc Oxide Surge Arrester. Publ. SESWGA/ 2310E. 1.ED.SWEDEN,1990.

[44] - TRANSMISSION LINE REFERNCE BOOK 115-138 KV COMPACT LINE DESIGN - EPRI 1982.

[45] - TRANSMISSION LINE REFENCE BOOK 345KV AND ABOVE- SECOND EDITION- EPRI 1982.

[46] - FONSECA, C. S. et alii. Experiência de Utilização do Programa ATP-micro em Simulações de Transitórios Eletromagnéticos. In : XI SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Rio de Janeiro, 1991. RJ/GSI/10.6p.

[47] - ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP) - RULE BOOK - Leuven EMTP Center (LEC) -Bélgica.1987

[48] - PEREIRA, P.S. & MARTINEZ, M. L. Simulação do Comportamento Transitório dos TC'S. VII SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, BRASÍLIA,1984.

A N E X O

UTILIZAÇÃO DO ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP)

A N E X O

UTILIZAÇÃO DO ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP)

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E CARTÕES PARA OS ESTUDOS DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO RELATIVOS À SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS NO PROGRAMA ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM

ÍNDICE :

PÁGINA

I.....Histórico.....120

II.....Introdução.....120

II.1..Dimensões do Programa.....121

III.....Principais Cartões.....121

III.1....Primeiro Cartão do Programa.....121

III.2....Cartões Miscelânea.....122

III.2.1..Primeiro Cartão.....122

III.2.2..Segundo Cartão.....122

III.3....Elementos R-L-C Concentrados.....123

III.4....Parâmetros Distribuídos.....124

III.5....Resistência Não-Linear - Elemento 99...125

III.6....Fontes de Surto.....125

III.7....Variáveis de Saída.....127

III.8....Plotagem de Gráficos.....128

III.9....Último Cartão do Programa.....128

A N E X O

UTILIZAÇÃO DO ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM

I - HISTÓRICO

Este programa utilizado para simulação de transitórios eletromagnéticos foi inicialmente desenvolvido por H.W.Dommel na década de 60, e a partir deste trabalho a Bonneville Power Administration (BPA), dos Estados Unidos realizou profundas alterações em sua estrutura nos anos seguintes, tornando-se portanto, de acordo com as leis norte-americanas, um programa de utilidade pública.

No ano de 1982 foi criado o DCG (Development Coordination Group) com o objetivo de aprimorar o programa, com a utilização de informações obtidas junto aos usuários americanos. Após alguns anos de atividades o grupo resolveu tornar de propriedade do grupo a versão em que eles estavam trabalhando, o que provocou o rompimento com os colaboradores no desenvolvimento do EMTP (Electromagnetic Transients Program).

Em resposta à atitude do DCG de comercializar o programa, Scott Meyer no ano de 1985, apresentou uma versão também baseada na versão M39 do EMTP para utilização em microcomputadores e computadores de grande porte, que foi levada para a Bélgica, onde foi instalado o LEC (Leuven EMTP Center), para a distribuição mundial do programa, agora denominado ATP (Alternative Transients Program). Para a obtenção do programa a parte interessada deve procurar o representante pela distribuição do programa e assinar um termo de compromisso comprometendo a não utilizar o desenvolvimento do programa para fins comerciais [46].

II - INTRODUÇÃO

Em se tratando de transitórios eletromagnéticos o originalmente programa EMTP é o mais difundido entre os pesquisadores e empresas que necessitam destes estudos.

Sua estrutura permite a representação de circuitos elétricos, transformadores, torres, reatores, pára-raios, enfim toda uma série de equipamentos e parâmetros presentes nas redes elétricas para uma adequada simulação do fenômeno a ser estudado[28,47].

As redes elétricas monofásicas ou polifásicas de topologia diversas são representadas no programa através de um conjunto de equações diferenciais e algébricas que são solucionadas em intervalos discretos. Pode-se também representar elementos não-lineares com parâmetros concentrados ou distribuídos

II.1 - DIMENSÕES DO PROGRAMA

Sendo este um programa computacional, ele possui suas restrições. Este programa é distribuído apenas no modo executável, portanto, não permite modificações na sua lista de dimensões quando se fizer necessário.

Por ser também um programa gerenciado pelo programa operacional Microsoft Disk Operating System (MS-DOS), ele limita o acesso de até 640 Kb da memória RAM do microcomputador, permitindo portanto, um redimensionamento limitado nas dimensões do programa, na versão para utilização para microcomputadores-386 esta restrição não é tão evidente, pois, a capacidade foi aumentada em 3 vezes.

A seguir será citado alguns itens da lista de dimensões

LBUS.....214	(número de nós da rede elétrica)
LBRANCH.....254	(número de ramos da rede elétrica)
LDATA.....424	(dados da tabela R,L e C)
LEXCT.....42	(número de fontes da rede elétrica)
LPAST.....1487	(histórico dos pontos de parâmetros distribuídos da linha)
LNONL.....63	(número de elementos não-lineares)
LCHAR.....135	(pontos de característica não-linear)
LSIZ12.....50	(número total de variáveis de saída)

Outra restrição encontra-se na rotina de plotagem, que permite somente a apresentação de apenas três curvas para cada gráfico por vez, o que limita substancialmente as comparações.

III - PRINCIPAIS CARTÕES

III.1 - PRIMEIRO CARTÃO DO PROGRAMA

Colunas.....de 01 a 19
Descrição...Deve-se escrever "BEGIN NEW DATA CASE"

III.2 - CARTÕES MISCELANEA

III.2.1 - PRIMEIRO CARTÃO

Colunas....de 01 a 08
Descrição..Campo onde deve-se fornecer o passo para a integração numérica em segundos. (DELTAT)

Colunas....de 09 a 16
Descrição..Campo para a entrada do tempo de simulação. (TMAX)

Colunas....de 17 a 24
Descrição..Usa-se reatância para representar a indutância, se o campo for deixado em branco a indutância estará em miliHenrys.Para representá-la no domínio da freqüência deve-se colocar o valor representativo da freqüência (x = wL ,f = 60 Hz). (XOPT)

Colunas....de 25 a 32
Descrição..Usa-se susceptância para representar a capacitância, se o campo for deixado em branco a capacitância estará em microFarads. Para representá-la no domínio do freqüência deve-se colocar o valor representativo da freqüência (x = wC, f = 60 Hz). (COPT)

III.2.2 - SEGUNDO CARTÃO

Colunas....de 01 a 08
Descrição..Controla a freqüência de saída dos dados na tabela. Se for deixado em branco ou colocado o número zero a tabela será impressa com todos os valores calculados.No caso de se desejar imprimir determinados intervalos deve-se colocar o tamanho do mesmo, representado por uma constante maior que 1. (IOUT)

Colunas....de 09 a 16
Descrição..Permite o controle sobre a freqüência dos pontos dos gráficos a serem plotados. Desejando plotar todos os pontos deve-se colocar o número 1, 0(zero), ou deixar o campo em branco. Caso não queira plotar o gráfico deve-se colocar o número -1. Colocando algum valor maior que 1, somente serão plotados os múltiplos deste valor. (IPLOT)

Colunas....de 17 a 24

Descrição..Campo que permite a impressão de tabela indicando a ligação entre barras. Caso se coloque o número zero a tabela não será impressa, se for colocado o número 1 a tabela é fornecida. (IDOUBL)

Colunas....de 33 a 40

Descrição..Campo que controla a impressão dos valores máximos e mínimos das variáveis desejadas. Se for colocado o número 1 no campo os valores serão impressos, caso seja colocado o número zero os valores não serão impressos. (MAXOUT)

III.3 - ELEMENTOS R-L-C CONCENTRADOS

Colunas....01 a 02

Descrição..Para representação destes elementos deve preencher o campo com o número zero ou deixar o campo em branco. (ITYPE)

Colunas....03 a 08 e 09 a 14

Descrição..Deve-se especificar os dois nós onde está conectado o elemento por nomes alfanuméricos. Caso o elemento esteja aterrado pode deixar o referido campo em branco. (BUS1 e BUS2)

Colunas....27 a 32

Descrição..Campo onde deve colocar o valor da resistência do elemento em ohms.

Colunas....33 a 38

Descrição..Campo onde deve ser colocado o valor da indutância L do elemento em miliHenrys ou como reatância wL em ohms (dependendo do XOPT colocado no cartão miscelânea).

Colunas....39 a 44

Descrição..Campo onde deve ser colocado o valor da capacitância C do elemento em microFarads ou como susceptância wC em micromhos (dependendo do valor do COPT colocado no cartão miscelânea).

III.4 - PARAMETROS DISTRIBUIDOS

Colunas....01 a 02

Descrição..Campo onde é colocado o número representativo da fase, sendo que este número varia de -1 até -9 não podendo ultrapassar a nove fases. Cada fase deve ser representada individualmente em um cartão. Por exemplo, no caso de modelos monofásicos utiliza-se o valor de -1.

Colunas....03 a 08 e 09 a 14

Descrição..Deve-se especificar para cada fase,que pode variar de -1 até -9 os nomes dos nós onde estão conectadas.

Colunas....27 a 32

Descrição..Deve-se colocar a resistência em ohms por unidade de comprimento.

Colunas....33 a 38 e 39 a 44

Descrição..Para a representação nestes campos é necessário observar o campo do ILINE (colunas 51 a 52), que nos permite três opções, sendo elas 0,1 ou 2.

Opção 1 ILINE = 0 (zero), então:

A indutância L'estará em miliHenrys por unidade de comprimento para XOPT = 0, ou reatância wL'em ohms por unidade de comprimento para XOPT ≠ 0. (colunas 33 a 38)

A capacitância C' estará em microFarads por unidade de comprimento para COPT = 0, ou susceptância wC' em microohms por unidade de comprimento para COPT ≠ 0. (colunas 39 a 44)

Opção 2 ILINE = 1 (um), então:

Deve-se colocar a impedância de surto (Z) em ohms. (colunas 33 a 38)

Deve-se colocar a velocidade da onda (v) em unidade de comprimento por segundo. (colunas 39 a 44)

Opção 3 ILINE = 2, então:

Deve-se colocar a impedância de surto (Z) em ohms (colunas 33 a 38).

Deve-se colocar o tempo de viagem (τ) em segundos, sendo que o mesmo tem que ser maior que o passo de integração e é calculado dividindo o comprimento da linha pela velocidade da onda. (colunas 39 a 44)

Colunas....45 a 50

Descrição..Deve-se colocar o comprimento da linha na mesma unidade de comprimento utilizado nos parâmetros anteriores.

Colunas....51 a 52
Descrição..São as opções do 0,1 ou 2 do ILINE que foi utilizada para a entrada de dados nas colunas de 33 a 44.

Colunas....53 a 54
Descrição..Nestas colunas são especificadas o tipo de modelagem que podem ser:

0 - modelagem com resistência concentrada.
1 - modelagem no modo sem distorção.
-1 - modelagem no modo com dependência da freqüência.

Observação: O valor utilizado nas colunas de 27 a 50 não podem ser zero.

III.5 - RESISTÊNCIA NÃO-LINEAR - ELEMENTO TIPO 99

(Cartão elaborado para o elemento Tipo 99 representativo de pára-raios)

Colunas....01 a 02
Descrição..Deve-se colocar o número "99",para representar pára-raios. (ITYPE)

Colunas....03 a 08 e 09 a 14
Descrição..Nomes alfanuméricos dos dois nós onde está conectado o elemento. Caso tenha um nó aterrado basta deixar o mesmo em branco.

Colunas....27 a 32
Descrição..Os pára-raios constituídos de um centelhador em série com as resistências não-lineares, são modelados como uma chave em série com a resistência não-linear. O campo VFLASH especifica a tensão em que ocorre a disrupção do centelhador e o elemento não-linear começa a conduzir. Para pára-raios sem centelhador série o valor de VFLASH deve ser zero.

Colunas....33 a 36
Descrição..Este campo permite um controle sobre o tempo de abertura do centelhador estando este sob condução. Para os pára-raios de óxido de zinco sem centelhador, usa-se um TDELAY grande em relação ao tempo de simulação para garantir que a chave não abra durante a simulação. (TDELAY)

Colunas....39 a 44
Descrição..A curva do elemento não-linear é aproximada por segmentos de reta. No campo JUMP especifica-se em qual segmento deve-se iniciar os cálculos. este segmento deve ser indicado de acordo com o valor de VFLASH.Para os pára-raios de óxido de zinco sem centelhador série (VFLASH = 0), deve-se indicar certamente o segmento 1.

Nos cartões a seguir, deve-se proceder a entrada dos pontos da curva característica tensão x corrente do elemento não-linear.Cada par ordenado deve ocupar um cartão, conforme demonstrado abaixo:

Colunas....09 a 16
Descrição..Valor da Corrente em Ampéres.

Colunas....25 a 32
Descrição..Valor da tensão em Volts.

Finalizando a entrada de dados da curva característica do elemento não-linear ,no último cartão deve ser colocado nas:

Colunas....13 a 16
Descrição..O número "9999".

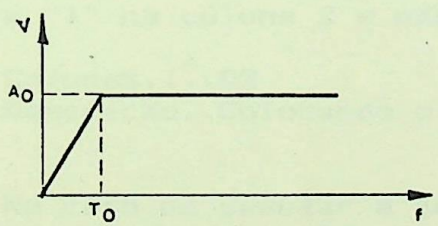
Após a entrada de todos os dados de ramo e de chaves (BRANCH CARDS e SWITCH CARDS), deve haver dois(2) cartões brancos para indicar o fim destes dados.

III.6 - FONTES DE SURTO

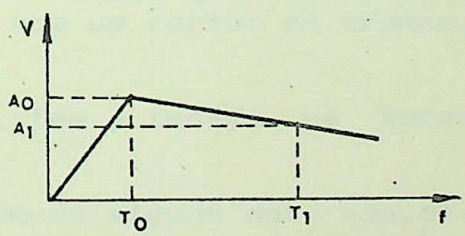
As fontes de surto comumente usadas para simulação de descargas atmosféricas, são as de tipo 12 e 13.

A fonte tipo 12 é uma função rampa com crescimento linear de t= 0 a t = to e amplitude constante para t > to.

A fonte tipo 13 é uma função com crescimento linear de t = 0 a t = to e com decaimento linear para t > to.



Fonte tipo 12



Fonte tipo 13

Colunas....01 a 02
Descrição..Coloca o tipo da fonte igual a "12" ou "13".

Colunas....03 a 08
Descrição..Nome alfanumérico onde está conectada a fonte, o outro terminal está aterrado.

Colunas....09 a 10
Descrição..Para indicar que é uma fonte de tensão deve-se colocar um número inteiro e não negativo (> 0 ou branco). Para indicar que é uma fonte de corrente deve-se colocar um número inteiro negativo(< 0).

Colunas....11 a 20
Descrição..Valor da amplitude da função em volts ou ampères.

Colunas....31 a 40
Descrição..To em segundos.

Colunas....41 a 50
Descrição..Valor de A_i (ignorado se tipo ≠ 13)

Colunas....51 a 60
Descrição..Tempo t_i em segundos (ignorado se tipo ≠ 13)

Para finalizar a entrada de dados relativo a fonte de surto, coloca-se um cartão em branco.

III.7 - VARIÁVEIS DE SAÍDA

Para obter as tensões em todos os nós, deve-se colocar o número "1" na coluna 2 e não terminar com um cartão em branco.

Colunas....02
Descrição..Colocando o valor "1", tem a tensão em todos os nós.

No caso de desejar a tensão em apenas alguns dos nós,deve-se proceder da seguinte forma :

Nas colunas 01 e 02 devem ser deixadas em branco.

Nas demais colunas subsequentes de seis em seis colunas devem ser colocados os nomes dos nós em que se desejam as tensões e terminar com um cartão em branco.

Colunas....01 a 02
Descrição..Deve-se deixar em branco.

Colunas....03 a 08, 09 a 14, 15 a 20,...
Descrição..Nome dos nós em que se desejam os valores de tensão.

III.8 - PLOTAGEM DE GRÁFICOS

Colunas....03 a 14
Descrição..Deve-se colocar a expressão "PRINTER PLOT".

III.9 - ÚLTIMO CARTÃO DO PROGRAMA

Colunas....01 a 19
Descrição..Deve-se colocar a expressão "BEGIN NEW DATA CASE".

DATA 01/07/1993
PROC.
PED. PPG
LIV.
Cz$ DOAÇÃO

FICHA 011 T. 719
EFEI / Biblioteca Mauá
S586i
SILVA, J. P. da
Influência da distância entre o pára-raios de óxido de zinco e o transformador na coordenação de isolamento de...

Data	N.o Registro	D... Devo...
3	Amy°José Souza	Pa...

EFEI
BIBLIOTECA MAUÁ
Esta publicação deverá ser devolvida dentro do prazo estipulado.
O leitor é responsável pela publicação em seu poder.

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200719
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA