

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE SOBRETENSÕES EM  
SUBESTAÇÕES CONVENCIONAIS E ISOLADAS A SF<sub>6</sub>

1983

Campinas, SP, Brasil

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE SOBRETENSÕES EM SUBESTAÇÕES  
CONVENCIONAIS E ISOLADAS A SF<sub>6</sub>

Por

Wanderley Mauro Dib

*Engº Eletricista, Faculdade de Engenharia da Fundação*

*Educacional de Barretos, 1974*

Tese apresentada à

Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Campinas  
para obtenção do título de Mestre

*Orientador:* Prof. Dr. Yoshiaki Doi

*Co-Orientador:* Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

1983

Campinas, SP; Brasil

## Dedicatória

*À minha esposa Eliane, pelo  
sacrifício, compreensão e incen-  
tivo.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Yoshiaki Doi, pela orientação, apoio, paciência e compreensão, externo minha eterna gratidão.

Ao Prof. José Carlos de Oliveira, pela orientação, amizade e incentivo demonstrado.

Aos amigos Claudinei, João e Kelly, pelo auxílio na elaboração dos desenhos e montagem deste trabalho.

À Fátima e à Margarida, pela dedicação e paciência no serviço de datilografia.

Ao Instituto Tecnológico e Científico "Roberto Rios" - INTEC, da Fundação Educacional de Barretos, por dispor da sua estrutura de pessoal para a elaboração deste trabalho.

À Fundação Educacional de Barretos, pelo incentivo e apoio dado durante todo o tempo.

Aos professores, colegas da Faculdade de Engenharia de Barretos, pelo apoio recebido.

Aos professores da Faculdade de Engenharia de Campinas, pelos ensinamentos durante os cursos realizados.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela disponibilização de e acesso ao computador.

Sinceros agradecimentos a todas as pessoas que colaboraram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O trabalho aqui desenvolvido se propôs a fazer comparações entre as subestações convencionais e as isoladas a  $SF_6$ , com relação às solicitações proporcionadas pelas sobretensões.

Para que se pudesse fazer tais comparações, adotou-se a mesma classe de tensão (500 kV) e a mesma configuração. Inicialmente, numa primeira parte, foram apresentados conceitos importantes que muito auxiliaram a compreensão e a simulação digital, apresentadas na segunda parte do trabalho.

Com as simulações apresentadas, pôde-se fazer comparações e tirar conclusões interessantes e importantes, com relação às sobretensões, para o dimensionamento de equipamentos e escolha da tecnologia adequada para a subestação a ser utilizada.

## ABSTRACT

This work proposes to make comparisons between conventional substations and those insulated at  $\text{SF}_6$  in relation to the strokes over voltage levels caused by lightning.

So that these comparisons could be made, we have adopted the same voltage class (500 kV) and the same configuration. The work was divided into two parts. The first introduce which greatly help the digital understanding and simulation, presented in the second part of this work.

With those simulations, comparisons can be made and important and interesting conclusions can be taken in relation to over voltages so that correct equipment and technology selection for the substation could be chosen.

## ÍNDICE

### PARTE I - APRESENTAÇÃO DOS TIPOS DE SUBESTAÇÕES E TEORIA DE SOBRETENSÕES APLICADAS A SUBESTA ÇÕES, DIRIGIDAS À SIMULAÇÃO DIGITAL.

|                                                             | pág. |
|-------------------------------------------------------------|------|
| CAPÍTULO I - APRESENTAÇÃO                                   |      |
| 1.1 - Objetivos .....                                       | 2    |
| 1.2 - Introdução .....                                      | 3    |
| CAPÍTULO II - COMPONENTES DE UMA SUBESTAÇÃO SF <sub>6</sub> |      |
| 2.1 - Generalidades .....                                   | 10   |
| 2.2 - Barramento .....                                      | 16   |
| 2.3 - Chave Seccionadora .....                              | 17   |
| 2.4 - Chave de aterramento .....                            | 19   |
| 2.5 - Chave de Aterramento à Prova de Curto-Circuito ..     | 23   |
| 2.6 - Transformador de Corrente .....                       | 23   |
| 2.7 - Conexão para cabos .....                              | 24   |
| 2.8 - Conexão com linha aérea .....                         | 25   |
| CAPÍTULO III - SOBRETENSÕES                                 |      |
| 3.1 - Introdução .....                                      | 30   |
| 3.2 - Classificação das Sobretensões .....                  | 39   |
| 3.2.1 - Descargas Atmosféricas .....                        | 39   |
| 3.2.2 - Sobretensões de Chaveamento .....                   | 41   |
| CAPÍTULO IV - PROPAGAÇÃO DE ONDAS                           |      |
| 4.1 - Introdução .....                                      | 47   |
| 4.2. - Propagação de Ondas em Sistemas Monofásicos .....    | 48   |

|                                                                                       | pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.3 - Interpretação física da propagação monofásica ..                                | 54   |
| 4.4 - Propagação de Ondas em Sistemas Bifásicos .....                                 | 55   |
| 4.4.1 - Método Clássico .....                                                         | 55   |
| 4.4.2 - Método Matricial .....                                                        | 63   |
| 4.5 - Aplicação do Método Matricial em Sistemas Polifásicos .....                     | 66   |
| 4.6 - Atenuação e Distorção .....                                                     | 69   |
| 4.7 - Descontinuidade .....                                                           | 74   |
| 4.8 - Desenvolvimento das Sobretensões num Barramento Isolado a SF <sub>6</sub> ..... | 78   |

## CAPÍTULO V - LIMITAÇÃO DE SOBRETENSÕES

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1 - Introdução .....                                                                                          | 88  |
| 5.2 - Descargas Atmosféricas - Valores Padrão .....                                                             | 88  |
| 5.3 - Limitação das sobretensões por cabos pára-raios e aterramento das linhas conectadas à subestação          | 90  |
| 5.4 - Cálculo da Sobretensão e Sobrecorrente de Descargas Atmosféricas através do modelo eletrogeométrico ..... | 91  |
| 5.4.1 - Descargas Diretas .....                                                                                 | 94  |
| 5.4.2 - Descargas Indiretas .....                                                                               | 98  |
| 5.5 - Limitação das Sobretensões por Centelhadores ...                                                          | 102 |
| 5.6 - Pára-raios como limitador de sobretensões .....                                                           | 106 |
| 5.6.1 - Localização dos pára-raios .....                                                                        | 109 |
| 5.6.2 - Comprimento das ligações dos pára-raios às fases                                                        | 109 |
| 5.7 - Proteção contra sobretensão de manobra .....                                                              | 111 |

## CAPÍTULO VI - COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

|     |                                                                                                                             |     |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1 | - Introdução .....                                                                                                          | 114 |
| 6.2 | - Características das Sobretensões Aplicadas a Subestações .....                                                            | 116 |
| 6.3 | - Níveis de isolamento .....                                                                                                | 119 |
| 6.4 | - Amplitude e taxa de crescimento das Ondas de Tensão que incidem na Subestação .....                                       | 122 |
| 6.5 | - Divisor Capacitivo de Potencial localizado na entrada do Compartimento do Barramento Isolado a SF <sub>6</sub> .....      | 123 |
| 6.6 | - Capacitância de surto do Transformador de Potência .....                                                                  | 123 |
| 6.7 | - Tensão à frequência industrial do sistema no instante de incidência da descarga atmosférica ....                          | 124 |
| 6.8 | - Arranjo físico da Subestação Isolada a SF <sub>6</sub> e Características das Linhas de Transmissão a ela conectadas ..... | 126 |
| 6.9 | - Recomendações para coordenação de isolamento ...                                                                          | 127 |

## CAPÍTULO VII - REPRESENTAÇÃO DE ELEMENTOS PARA ESTUDOS DE FENÔMENOS TRANSITÓRIOS

|     |                                                                                                       |     |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1 | - Introdução .....                                                                                    | 136 |
| 7.2 | - Tratamento clássico .....                                                                           | 137 |
| 7.3 | - Aproximação de elementos a parâmetros concentrados por secções de linhas ( <i>stub line</i> ) ..... | 142 |
| 7.4 | - Representação dos componentes de uma subestação.                                                    | 148 |

|                                                                            | pág. |
|----------------------------------------------------------------------------|------|
| 7.4.1 - Componentes dentro dos compartimentos isolados a SF <sub>6</sub> . | 148  |
| 7.4.2 - Elementos fora dos compartimentos isolados a SF <sub>6</sub>       | 156  |
| CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES - PARTE I .....                                 | 163  |

PARTE II - SIMULAÇÃO DIGITAL, ESTUDOS E COMPARAÇÃO  
DO COMPORTAMENTO DE SUBESTAÇÕES CONVEN-  
CIONAIS E ISOLADAS A SF<sub>6</sub> COM RELAÇÃO A  
SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS

CAPÍTULO IX - INTRODUÇÃO DA PARTE II

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 9.1 - Introdução ..... | 161 |
|------------------------|-----|

CAPÍTULO X - DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA DIGITAL

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 10.1 - Introdução .....                          | 170 |
| 10.2 - Identificação do Programa .....           | 175 |
| 10.3 - Dimensionamento do Programa .....         | 175 |
| 10.4 - Arquivo de Dados .....                    | 175 |
| 10.5 - Cartões de Identificação do Arquivo ..... | 175 |
| 10.6 - Cartões Códigos .....                     | 177 |
| 10.6.1 - Código 1 .....                          | 177 |
| 10.6.2 - Código 2 .....                          | 178 |
| 10.6.3 - Código 3 .....                          | 180 |
| 10.6.4 - Código 4 .....                          | 182 |
| 10.6.5 - Código 5 .....                          | 183 |
| 10.6.6 - Código 6 .....                          | 184 |
| 10.6.7 - Código 7 .....                          | 186 |

|                                                              | pág. |
|--------------------------------------------------------------|------|
| 10.6.8 - Código 8 .....                                      | 187  |
| 10.6.9 - Código 9 .....                                      | 190  |
| CAPÍTULO XI - CASOS SIMULADOS                                |      |
| 11.1 - Descrição dos Casos Simulados .....                   | 192  |
| CAPÍTULO XII - COMPARAÇÕES E COMENTÁRIOS DOS CASOS SIMULADOS |      |
| 12.1 - Comparação nº 1 .....                                 | 198  |
| 12.2 - Comparação nº 2 .....                                 | 203  |
| 12.3 - Comparação nº 3 .....                                 | 208  |
| 12.4 - Comparação nº 4 .....                                 | 212  |
| 12.5 - Comparação nº 5 .....                                 | 215  |
| 12.6 - Comparação nº 6 .....                                 | 219  |
| CAPÍTULO XIII - CONCLUSÕES .....                             | 225  |
| CAPÍTULO XIV - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....              | 228  |

PARTE I

APRESENTAÇÃO DOS TIPOS DE SUBESTAÇÕES  
E TEORIA DE SOBRETENSÕES APLICADAS A  
SUBESTAÇÕES, DIRIGIDAS À SIMULAÇÃO DI-  
GITAL.

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

## CAPÍTULO I

### APRESENTAÇÃO

#### 1.1. OBJETIVOS

Com o atual crescimento da demanda nos sistemas elétricos e a utilização de altíssimas tensões de serviço, torna-se a cada dia mais importante encontrar o ponto ótimo entre a solução técnica e a disponibilidade financeira.

A disponibilidade e preço de um terreno adequado para a instalação de subestações representam fatores importantes quando em locais como centros de grandes cidades, centros de aglomeração industrial, regiões montanhosas com vales estreitos, usinas geradoras em cavernas, etc.

Uma tecnologia muito discutida hoje em dia é aplicada a subestações à gás  $SF_6$ . A blindagem de todas as partes energizadas por compartimentos metálicos proporciona maior segurança para o pessoal de manobra, além do que é altamente resistente à influência do ambiente. Estas subestações podem ser instaladas em galpões de construção simples, para manter baixas as despesas de limpeza e manutenção. A área reduzida economiza gastos em terraplanagem, fundação e independe do clima para a sua montagem quando for instalação abrigada. Ao contrário das subestações convencionais, podem ser montadas perto de edifícios sem alterar a arquitetura local.

Em vista dos pontos abordados, que normalmente indicam as Subestações isoladas a  $SF_6$  como uma boa alternativa, neces-

sitarem de mais detalhes, desenvolver-se-á neste trabalho comparações que visarão contribuir para uma melhor utilização das duas tecnologias. Como existem diversos pontos importantes para serem discutidos e comparados, os quais se estenderiam demasiadamente, optou-se pela análise de sobretensões.

Para atingir estes objetivos, o trabalho aqui apresentado foi dividido em duas partes. A primeira parte apresenta conceitos teóricos importantes e indispensáveis para se entender as influências e consequências que podem ocorrer nos equipamentos e no sistema quando solicitado por sobretensões. Como as subestações convencionais são mais conhecidas dar-se-á aqui ênfase nas subestações isoladas a  $SF_6$ , com relação aos seus componentes.

A segunda parte trata da simulação digital, estudos e comparação do comportamento de subestações convencionais e isoladas a  $SF_6$  com a mesma configuração e a mesma classe de tensão.

Com a análise e comparação dos resultados obtidos, pretende-se contribuir para melhorar os critérios que definem o uso de subestações isoladas a  $SF_6$  e, conseqüentemente, das subestações convencionais.

## 1.2. INTRODUÇÃO

Para um observador que a vê, pela primeira vez, uma subestação blindada isolada a  $SF_6$  aparenta uma indústria petroquímica de dimensões reduzidas. A grande diferença em relação à

subestação convencional está exatamente nas formas construtivas das chaves seccionadoras, barramentos, disjuntores, etc. que fogem às normas convencionais devido aos tubos responsáveis pela blindagem.

A rigidez dielétrica do  $\text{SF}_6$  à pressão atmosférica é aproximadamente 3 vezes maior do que a do ar, ou seja, correspondente, mais ou menos, à capacidade isoladora do óleo[72]. O  $\text{SF}_6$  tem duas vantagens importantes em relação ao óleo: primeiro não é combustível e além disso, sendo gás, se deixa comprimir. O aumento de pressão dá, como resultado, um acréscimo das propriedades isolantes. Desta maneira ganha-se a redução apreciável de volume dos conjuntos que empregam  $\text{SF}_6$  como isolantes.

O  $\text{SF}_6$  é um gás eletronegativo, de tal maneira que o arco elétrico no disjuntor se desioniza rapidamente. Devido à pequena constante de tempo do arco, o  $\text{SF}_6$  tem maiores propriedades de extinção, na ordem de 10 vezes mais do que as do ar à mesma pressão[72]. Desta maneira se pode aumentar consideravelmente a potência de corte da câmara do disjuntor, o que equivale a dizer diminuição do número de câmaras a sobrepor em série. Isto significa um outro fator de redução de volume das instalações.

Uma vantagem a mais do  $\text{SF}_6$  é que ele não é inflamável e não propaga chamas, tendo assim uma grande proteção contra incêndios.

A tecnologia  $\text{SF}_6$  tem cerca de 25 anos. Os fabricantes

desses equipamentos afirmam que até hoje não foi preciso fazer manutenção das subestações, no sentido que conhecemos [72]. Nesse particular, o único problema que pode aparecer, diz respeito à dissociação do hexafluoreto de enxofre. Sob a ação dos arcos elétricos, o  $SF_6$ , devido às elevadas temperaturas, se dissocia, numa reação irreversível, numa pequena parte ao se resfriar.

A parcela que não volta a se associar ataca certos materiais como o ferro e o cobre, formando fluoretos metálicos como o fluoreto de cobre e o fluoreto de enxofre.

A experiência tem demonstrado que embora em mínima quantidade devem ser eliminados, para o que se utilizam filtros especiais constituídos de óxido de alumínio ativo ( $Al_2O_3$ ) que são colocados no caminho do gás, no ciclo hidráulico-pneumático do gás. Entretanto, esses filtros são usado no sistema à dupla pressão.

No sistema à única pressão, a eliminação desses elementos é feita por filtros eletrostáticos que atualmente são os mais utilizados. Estes filtros atraem os fluoretos e sua troca só é feita depois de cinco ou mais anos.

Da dissociação do  $SF_6$  resultam  $SF_5$  + F.E, naturalmente F é algo indesejável. No entanto, só aparecerão problemas se houver umidade. Se o compartimento estiver seco, os fluoretos comportam-se como bons isolantes e não colocam em riscos as propriedades dielétricas da isolação.

Um detalhe interessante é que nas primeiras instalações

de subestações a  $SF_6$  que foram feitas em 1960, existiam circuitos de monitorização, para verificar as eventuais fugas de gás, dotados de cilindro de reserva que completaria automaticamente qualquer parcela perdida em alguma fuga[72].

Além disso, essas primeiras instalações também possuíam estruturas feito andaimes, com escadas, que se prestavam à inspeção visual de todos os elementos. Entretanto, com o tempo, verificou-se que tanto a estrutura como o circuito de monitorização eram absolutamente desnecessários, sendo portanto suprimidos.

Decidiu-se eliminar aqueles elementos e em contrapartida, aperfeiçoar o sistema de alarme, que ganhou sensores de umidade, pressão e mais sinalizadores. Qualquer anormalidade faz soar o alarme e o técnico vai então inspecionar executando a manutenção, se necessária. Entretanto, a densidade é um dado mais importante que a pressão, porque representa a pressão já compensada pela temperatura ambiente. A densidade é a referência absoluta para se verificar a manutenção ou não das características dielétricas originais do equipamento. Nunca a pressão ou a temperatura isoladamente.

As características dielétricas do gás  $SF_6$  à pressão normal indicam que ele se mantém para as tensões nominais como isolante, porém não se deve ter sobretensões e as chaves ou disjuntores não devem operar nestas condições. Este fato justifica a não instalação de elementos que disparariam os disjuntores e chaves. Na posição que o equipamento se encontra ele de-

ve ficar até que a pressão se normalize, após indicações das pelos alarmes ao pessoal da manutenção.

Da mesma forma como a subpressão é problemática, a sobrepressão também o é. Existem limites para a compressão do gás  $SF_6$ , uma vez que ele se liquefaz à temperatura de  $-20^{\circ}C$  sob a pressão de 22 bars. Os equipamentos funcionam com 3,5 bars aproximadamente (nesta pressão ele se liquefaz a  $-40^{\circ}C$ ).

Em princípio poder-se-ia aumentar mais a pressão e, conseqüentemente, a sua segurança. Entretanto, em locais onde a temperatura é muito baixa poderíamos ter a liquefação do gás, o que não é conveniente.

O fato de poder-se aumentar a pressão desde que não ocorra problema com a temperatura, vai permitir a aplicação da mesma subestação para tensões mais elevadas na sua quase totalidade, isto porque certos compartimentos onde, por exemplo, se encontram os TCs e TPs exigem tratamentos especiais. Porém no compartimento do barramento não teríamos problemas. Estes fatos se traduzem em economia, visto que normalmente um aumento da tensão significaria num aumento nas dimensões de todo o sistema. Entretanto, os fabricantes devem especificar também as distâncias e o nível de isolamento (impulso).

Uma subestação a  $SF_6$  fabricada para 138 kV e para determinadas intensidades de corrente, como por exemplo 2.500A pode, se as suas características mecânicas suportarem o aumento da pressão e o novo nível de impulso, ser utilizada para tensões mais elevadas, porém sem ultrapassar a corrente nominal.

Caso na mesma tensão nominal (138 kV) ocorrer uma intensidade nominal de corrente de 4000A, torna-se necessário a mudança para outra classe de tensão, ou seja, 245 kV por exemplo. Isto se faz devido às dimensões serem maiores e a dissipação térmica provocada pelos 4000A ser facilitada.

Uma outra aplicação do  $SF_6$  é em cabos que se justificam, em alguns casos, como próximos de aeroportos ou locais de difícil instalação de torres de linhas de transmissão.

Evidentemente, os custos novamente são elevados. É fato comprovado que aplicações de equipamentos a  $SF_6$  só se justificam financeiramente para tensões acima de 245 kV comparando com os equipamentos convencionais, não se levando em conta o terreno[72]. Caso contrário, a opção para tensões menores pode se justificar, como é o caso de aplicações em 138 kV.

Nessa comparação de custos convém ainda citar a limitação do planejamento e construção, unicamente à etapa que é necessária, não sendo preciso prever estruturas e fundações como são indispensáveis nas subestações convencionais.

Como já foi comentado, as ampliações nestas subestações dispensam interrupções. A única previsão exigida é quanto à reserva de espaço. O trabalho de ampliação se resume a acoplamentos dos módulos.

## CAPÍTULO II

### COMPONENTES DE UMA SUBESTAÇÃO SF<sub>6</sub>

## CAPÍTULO II

COMPONENTES DE UMA SUBESTAÇÃO  $SF_6$  [72]

## 2.1. Generalidades

A figura 2.1 mostra uma fase de uma derivação (bay de linha) de uma subestação com barramento duplo. Como o barramento é duplo, naturalmente tem-se 3 fases do lado esquerdo, três seções de barramento e as outras três fases do lado direito.

É oportuno neste ponto lembrar que no mercado mundial existem dois tipos básicos de equipamentos  $SF_6$ . O primeiro deles, que é naturalmente o mais aceito, é o chamado monofásico, pois cada tubo, cada módulo, contém uma única fase e o bay logicamente seria uma tríplice união de todos os elementos que o compõem.

No segundo modelo, o "trifásico", o tubo com  $SF_6$  contém as três fases. O modelo monofásico é o mais recente. O monofásico comparado com o trifásico apresenta vantagens, pois só pode acontecer curto-circuito contra a terra e nunca trifásico ou bifásico, e além disso, todos os esforços eletrodinâmicos são de menores intensidades e a montagem é mais fácil. Assim, hoje quase todos os fabricantes apresentam suas subestações com o modelo monofásico, pois é mais competitivo. Vale lembrar também a vantagem que o sistema monofásico oferece do ponto de vista operacional, ou seja, a visualização mais fácil, o que facilita trabalhos de inspeção visual e de identificação de componentes.

Ainda na figura 2.1 observa-se a ligação do barramento para um disjuntor. A ligação é via seccionadoras. A abertura é mínima porque é isolado a  $SF_6$ . Assim, como pode-se notar, existem duas seccionadoras do barramento. Seu comando pode ser manual, a ar comprimido ou a motor elétrico. Quanto ao disjuntor, é preciso dizer que existem dois sistemas básicos: à pressão única e à dupla pressão. O primeiro é tecnologia mais recente e no seu movimento ele já comprime o gás e este é o que vai ser usado na extinção. É mais simples, mais barato, de menor manutenção e não tem tantos compressores como o de dupla pressão.

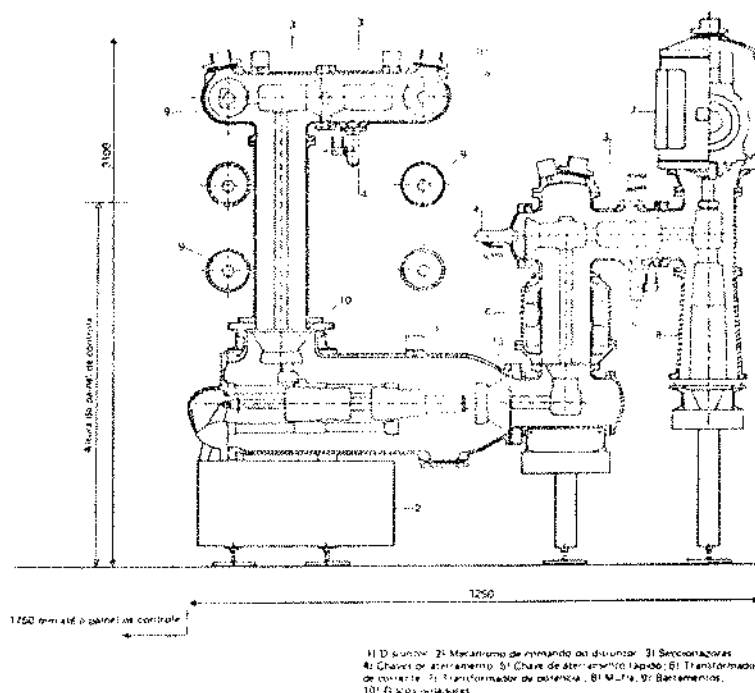


Fig. 2.1 - Corte de uma fase de um bay  $SF_6$  para 138 kV, aplicado a um arranjo de barramento duplo (o disjuntor é do tipo à pressão única).

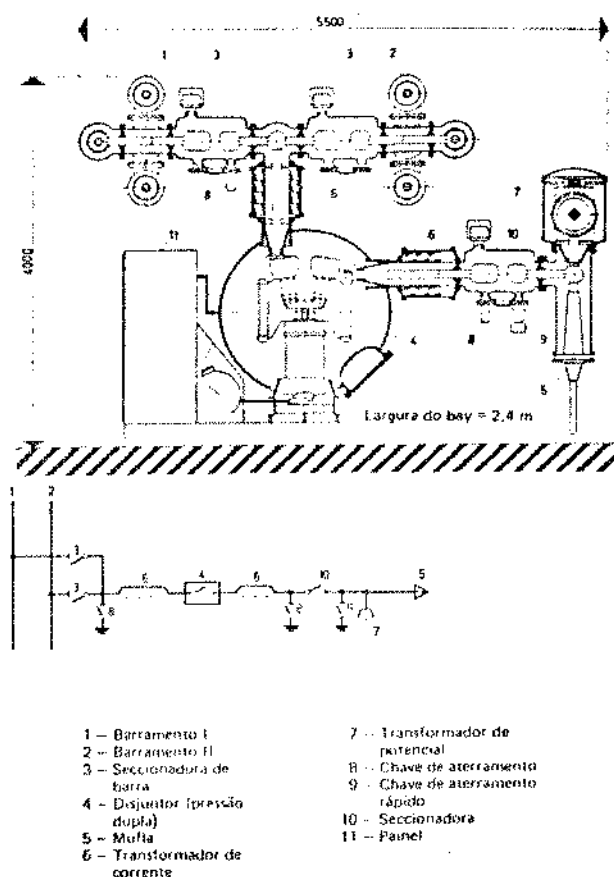


Fig. 2.2 - Corte de uma fase de um bay de linha de uma subestação  $\text{SF}_6$  de 245 kV com barramento duplo, sistema à dupla pressão.

A figura 2.2 mostra o disjuntor à pressão dupla. Ele é mais alto que seu painel de controle, enquanto que o modelo à pressão única tem a altura que é mais ou menos a metade do painel. Ambos tem a mesma capacidade.

A desvantagem que a pressão única tem é que sua capacidade de interrupção e sua velocidade de abertura são um pouco menores comparadas com o de pressão dupla. O tempo máximo para o de dupla pressão é de 40 ms contra 60 ms do de pressão

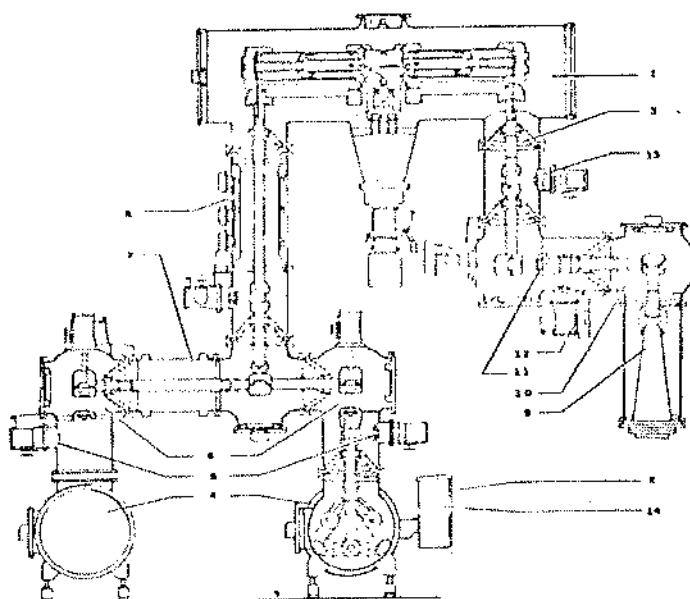
única.

Uma outra grande vantagem da subestação isolada a  $SF_6$  é a de que esses compartimentos são independentes. Se por uma eventualidade qualquer se dê um problema na seccionadora, este fica restrito no seu compartimento, não colocando em risco o restante do conjunto. Na figura 2.1 pode-se ver discos isoladores indicados com o nº 10 (buchas à prova de arco). Entre seccionadores, entre seccionador e barramento principal, nas extremidades de disjuntor, etc., devem existir estas buchas. Assim, trocar uma peça defeituosa é uma tarefa relativamente simples.

O material de blindagem é uma liga especial de alumínio. Existem também casos em que se usam o aço inox. Em ambos os casos, deve-se empregar materiais não magnéticos, pois as perdas por indução seriam grandes. Os defensores da blindagem a aço afirmam que com o alumínio teriam perdas de gás, porque não apresenta alta estanqueidade. Por outro lado, os fabricantes de blindagem em alumínio dão garantia de menos de 1% de perdas por ano de gás  $SF_6$ , ou seja, uma garantia de 10 anos de funcionamento, sem necessidade de complementação do gás. A espessura e característica do alumínio e do aço nestes casos são dimensionadas para suportarem os efeitos dinâmicos e térmicos provenientes de um curto-circuito.

Com o objetivo de ilustrar as subestações, com barramentos trifásico e monofásico, respectivamente dispostos dentro do correspondente compartimento, será mostrado a seguir as partes destas Subestações com alguns detalhes que visam a familiariza

ção com os diversos equipamentos. Como um exemplo de uma subestação blindada isolada a  $\text{SF}_6$  com barramento trifásico, a figura 2.3 mostra a disposição das barras que constituem um dos barramentos dentro de seu compartimento para uma tensão máxima de 300 kV. Ilustra ainda outros componentes como chave seccionadora, disjuntor, transformador de corrente, etc. A figura 2.4. mostra o diagrama unifilar da referida subestação.



- |                                        |                                                     |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1 - Polo do disjuntor                  | 10 - Acessórios terminais barra/cabo                |
| 2 - Unidade de Controle do Disjuntor   | 11 - Isolação do cabo através da seccionadora       |
| 3 - Bucha                              | 12 - Chave de aterramento à prova de curto-circuito |
| 4 - Barramento trifásico               | 13 - Chave de aterramento para manutenção           |
| 5 - Chave de aterramento do barramento | 14 - Painel de monitorização.                       |
| 6 - Chave seccionadora de barramento   |                                                     |
| 7 - Junta de expansão tipo fole        |                                                     |
| 8 - Transformador de corrente          |                                                     |
| 9 - Mufla terminal                     |                                                     |

Fig. 2.3 - Subestação blindada de barramento duplo com encapsulamento trifásico.

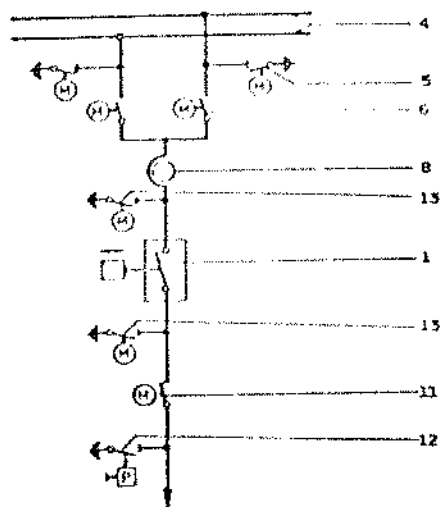


Fig. 2.4 - Diagrama Unifilar da Subestação da Fig. 2.3

Com exceção dos barramentos trifásicos dispostos em um único compartimento, os demais equipamentos como chaves, disjuntores e transformadores de corrente são dispostos de forma monofásica por compartimento.

Normalmente, em casos de encapsulamentos trifásicos os compartimentos são feitos de aço e as juntas são seladas com anéis de neoprene.

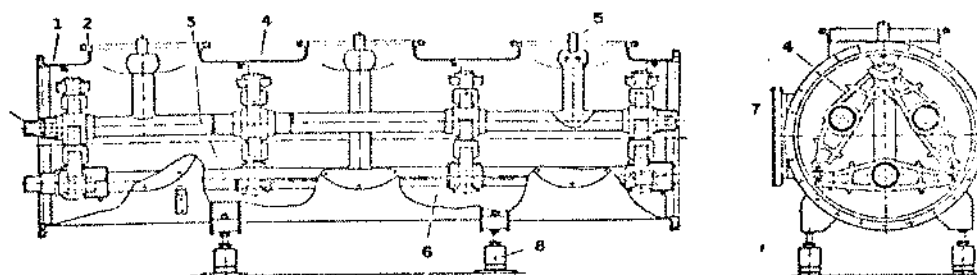
Cada compartimento que contém um equipamento é isolado dos demais através de buchas à prova de gás e de arco, evitando que qualquer ocorrência ou anormalidade em um compartimento venha comprometer os demais. Cada compartimento é ligado por tubos de gás para monitoração e abastecimento, se necessário, assim como o controle de pressão, umidade e temperatura.

O acionamento de chaves e disjuntores, intertravamentos e indicadores de defeitos são acomodados em um painel de co-

mando, controle e sinalização de fácil acesso.

## 2.2. Barramento

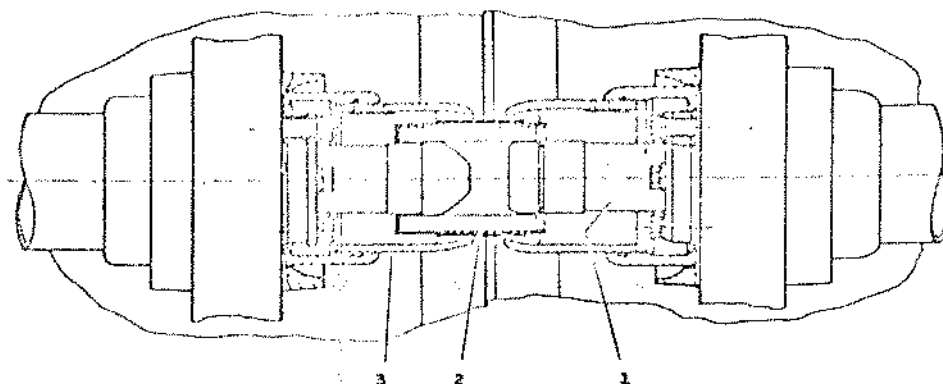
Os três condutores(3), formando o conjunto trifásico, es tão instalados em um compartimento cilíndrico(1) da figura 2.5. O compartimento tem três flanges(2) sobre as quais os isolado- res e os conectores para acoplamento(5) podem ser montados, co mo mostra a fig. 2.3. Há também três aberturas para fins de montagem(7). Cada unidade de compartimento é montada sobre su- portes(8), cujas alturas podem ser ajustadas. Dependendo do ta manho e arranjo, esses suportes são fornecidos como ancoragem no chão ou elementos armados a molas. Os condutores(3) são fei- tos de tubos de alumínio ou cobre.



- |                                 |                           |
|---------------------------------|---------------------------|
| 1 - Compartimento do barramento | 6 - Conexão de terra      |
| 2 - Flanges                     | 7 - Abertura p/manutenção |
| 3 - Barramento                  | 8 - Suporte de apoio      |
| 4 - Isolador                    | 9 - Contato para acopla-  |
| 5 - Ponto de derivação          | mento.                    |

Fig. 2.5 - Conjunto modular de barramento trifásico

A maneira de se conectar os condutores dos conjuntos adjacentes é mostrada na Fig. 2.6.

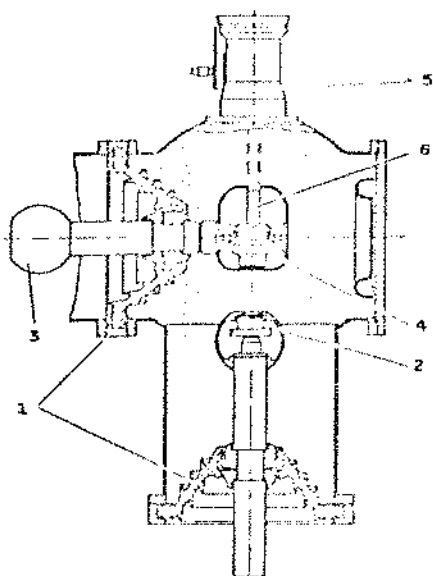


- 1 - Barramento
- 2 - Contato de acoplamento
- 3 - Aspecto da blindagem

Fig. 2.6 - Conexões de conjuntos adjacentes

### 2.3. Chave Secionadora

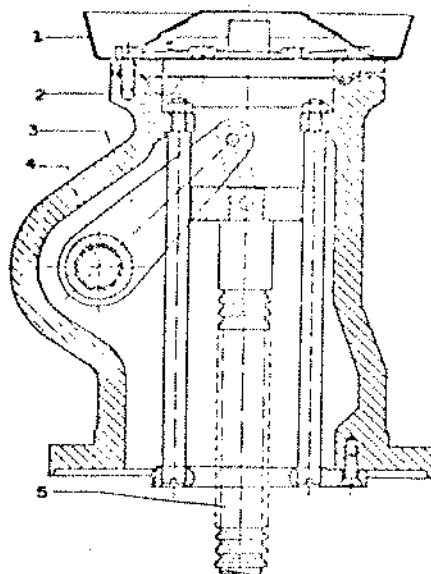
A montagem da chave seccionadora para 1600A . pode ser vista na Fig. 2.7. O mecanismo de acionamento (5) da fig. 2.7 aciona o pino de contato (6), que passa através de um guia (4), e acopla-se ao contato fixo (2).



- 1 - Bucha
- 2 - Contato fixo
- 3 - Contato de acoplamento
- 4 - Guia
- 5 - Mecanismo de acionamento
- 6 - Contato móvel

Fig. 2.7 - Chave seccionadora

Os três polos da chave seccionadora são acionados, simultaneamente, através de um motor elétrico montado em um dos polos externos. A condição de chaveamento é indicada através de sinalização mecânica local e luminosa em painel de controle.

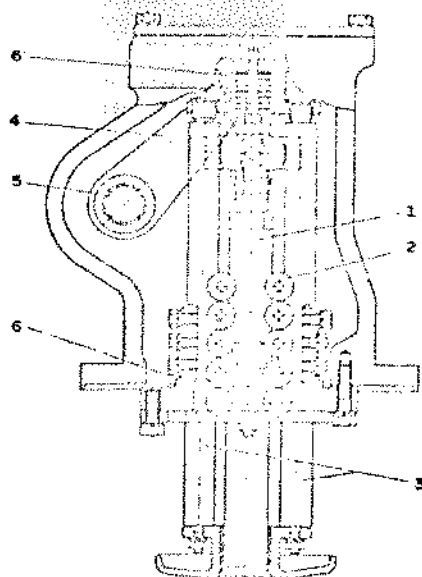


- 1 - Placa defletora de sobrepressão
- 2 - Diafragma
- 3 - Braço oscilante
- 4 - Eixo motor (transmissão)
- 5 - Barra de isolamento.

Fig. 2.8 - Mecanismo de acionamento da chave seccionadora

#### 2.4. Chave de Aterramento

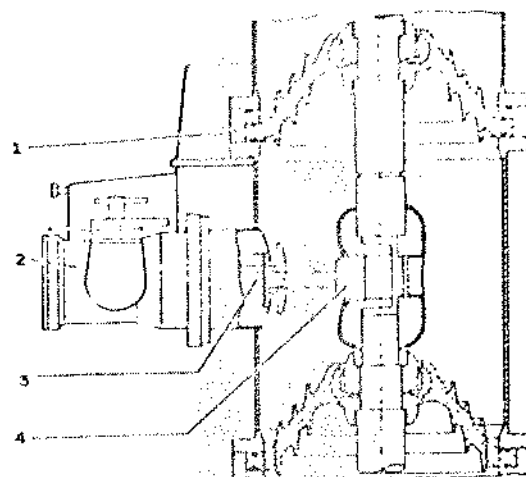
A chave da figura 2.9 se destina ao aterramento em caso de manutenção. Tem um pino de contato(1) que se destina ao fechamento. O pino é movido por eixo(5), através braço(4) e é conectado com as barras(3) através de contatos roletes(2). Na posição, fechado o contato móvel, conecta o conjunto à terra.



- 1 - Pino de contato
- 2 - Roletes
- 3 - Barras de aterramento
- 4 - Braço para acionamento
- 5 - Eixo motor
- 6 - Batentes (somente para chaves à prova de curto-circuito).

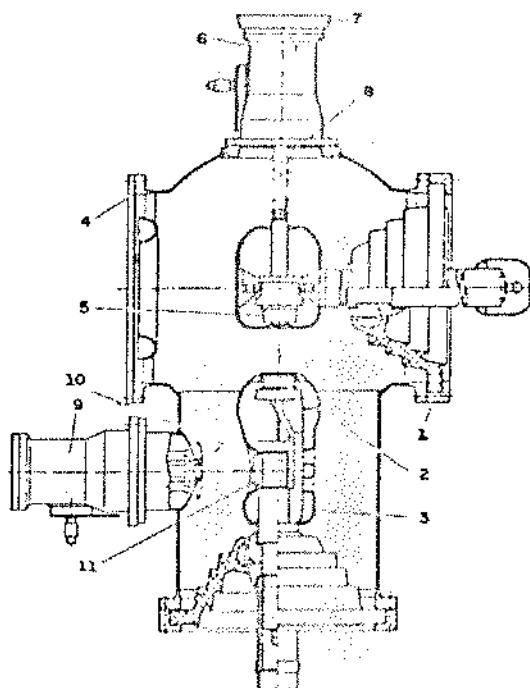
Fig. 2.9 - Mecanismo de operação de chave de aterramento para manutenção.

A chave de aterramento é encontrada como um conjunto modular (Fig. 2.10) ou acoplada com uma chave seccionadora, conforme indica a fig. 2.11.



- 1 - Bucha
- 2 - Mecanismo
- 3 - Contato Móvel
- 4 - Contato fixo.

Fig. 2.10 - Chave de aterramento para manutenção como um conjunto modular.



- 1 - Bucha
- 2 - Contato fixo
- 3 - Suporte
- 4 - Compartimento da chave seccionadora
- 5 - Guia do contato móvel
- 6 - Mecanismo de Acionamento da chave seccionadora
- 7 - Diafragma
- 8 - Pino de contato
- 9 - Mecanismo de acionamento da chave de aterramento
- 10 - Contato móvel

Fig. 2.11 - Chave de aterramento acoplada à chave seccionadora

A chave de aterramento para manutenção é acionada a motor elétrico da mesma maneira como a chave seccionadora.

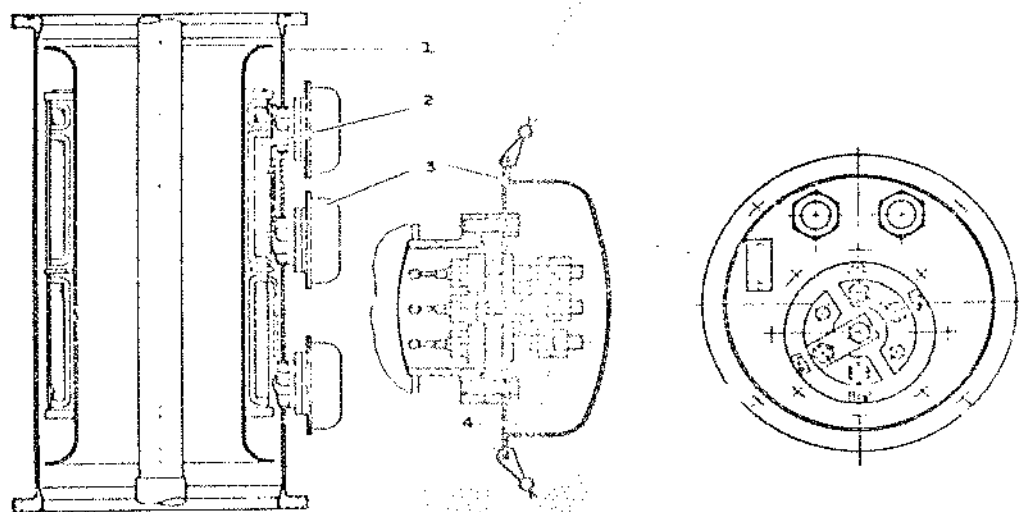
## 2.5 - Chave de Aterramento à Prova de Curto-Circuito

A chave de aterramento à prova de curto-circuito é equipada com um mecanismo de fechamento, de ação independente que permite aterrar até mesmo equipamento energizado sem sofrer da no. Ela tem um mecanismo motor para a operação tripolar que é adaptado ao polo central.

Da mesma forma que a chave de aterramento para manutenção (a vazio), tem os mesmos componentes internos, com exceção dos batentes que asseguram a correta posição do contato móvel além de funcionarem como amortecedores (Veja figura 2.9.).

## 2.6 - Transformador de Corrente

A figura 2.12 mostra um conjunto que contém três núcleos no mesmo equipamento.



- |                               |                             |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 1 - Compartimento             | 3 - Cobertura dos terminais |
| 2 - Transformador de Corrente | 4 - Terminais Externos.     |

Fig. 2.12 - Conjunto de Transformadores de Corrente

O transformador de corrente é do tipo janela, com núcleos toroidais. Os núcleos são fixados no compartimento e blindados por um tubo que é dividido axialmente e esta em contato metal-metal, com o compartimento. Os fios secundários são conectados aos condutores alojados à prova de gás na placa da bucha. Os terminais externos possuem uma capa protetora.

## 2.7 - Conexão para cabos

Um exemplo típico de mufla terminal vertical para cabos é mostrado na figura 2.13.

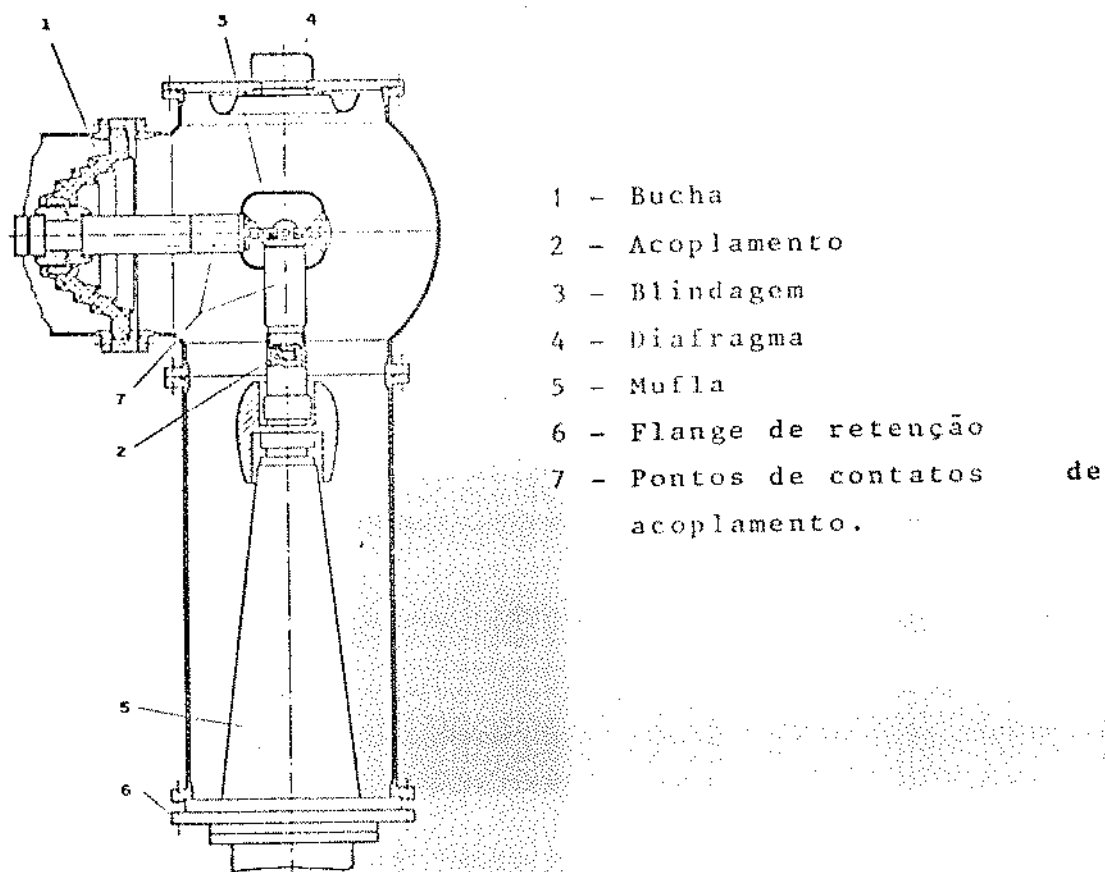


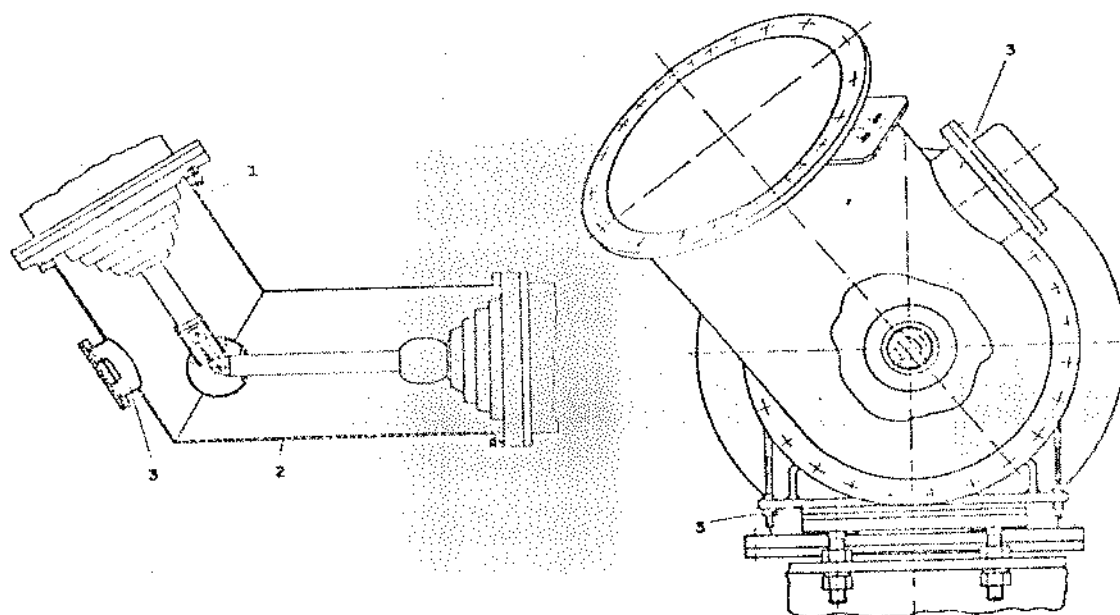
Fig. 2.13 - Mufla terminal para cabos.

A conexão de cabos com a subestação é feita por meio de contatos de acoplamento (2) e do pino de contato que é aparafusado à mufla terminal.

O condutor do compartimento adjacente, através da bucha de passagem, é interligado com pontos de contatos de acoplamento (7), que podem ser removidos pela abertura esférica do compartimento.

## 2.8 - Conexão com linha aérea

Um conjunto para conexão com linha aérea, de 1600A é mostrado na figura 2.14.



- 1 - Bucha
- 2 - Compartimento em ângulo
- 3 - Abertura para montagem.

Fig. 2.14 - Conjunto para conexão com linha aérea.

As linhas aéreas são conectadas através de buchas ou muflas isoladas a  $SF_6$  (1), que são montadas em compartimentos em ângulo para estabelecer as necessárias distâncias no ar. A conexão é feita através de tubos de extensão.

A figura 2.15 apresenta comparações físicas entre as subestações a  $SF_6$  para diversas tensões, enquanto a figura 2.16 compara duas subestações de mesma potência e classe de tensão, sendo uma convencional e outra a  $SF_6$ .

A figura 2.17 mostra uma subestação a  $SF_6$  em perspectiva, em planta e perfil, destacando os equipamentos principais.

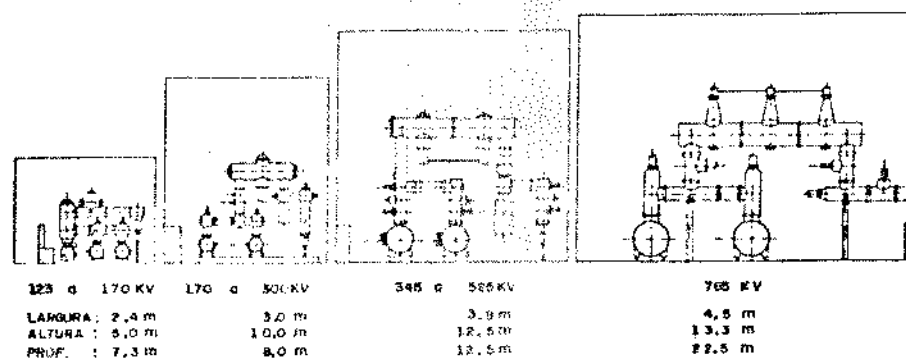


Fig. 2.15 - Comparação física entre subestações típicas para diversas tensões, com barramento duplo (encapsulamento trifásico), disjuntor e uma saída.

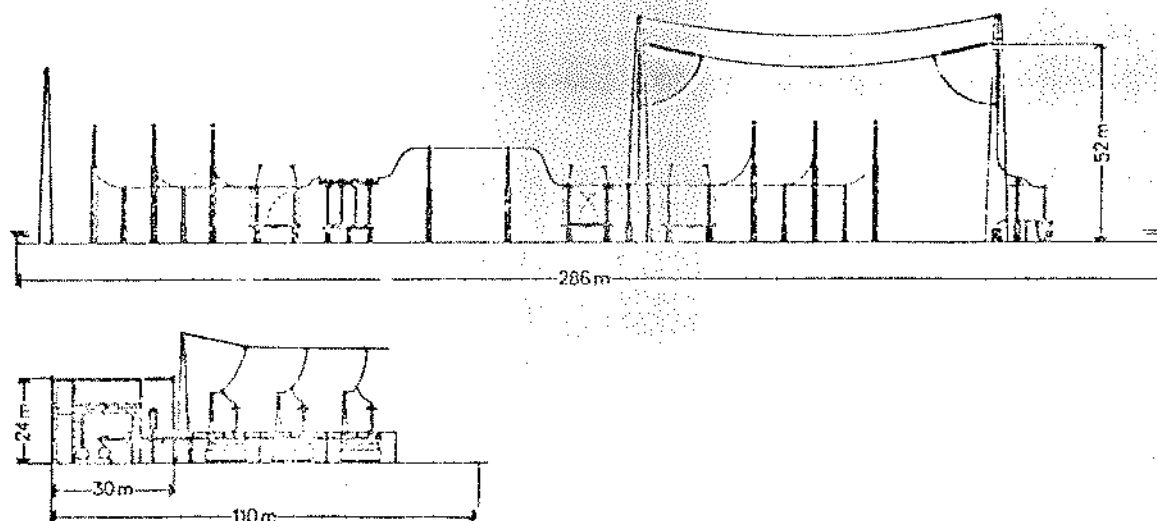


Fig. 2.16 - Comparação entre as dimensões de duas subestações de mesma potência e classe de tensão sendo uma em SF<sub>6</sub> (a menor) e a outra convencional.

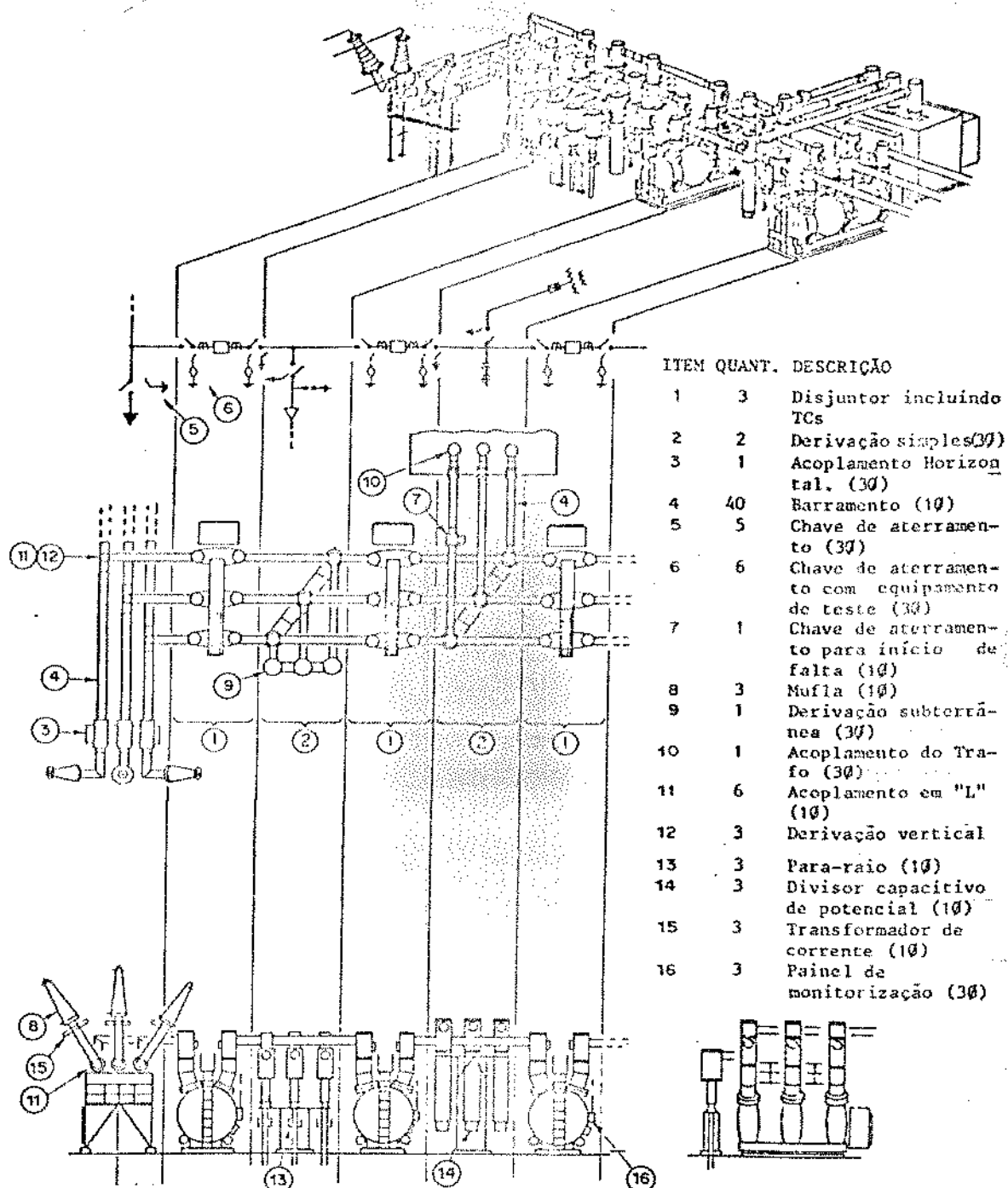


Fig. 2.17 - Subestação com os componentes já analisados, porém com o barramento encapsulado de forma monofásica.

### CAPÍTULO III

### SOBRETENSÕES

## CAPÍTULO III

## SOBRETENSÕES

## 3.1 - INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência estão sujeitos a inúmeras formas de fenômenos transitórios, variando desde as oscilações eletromecânicas, de frequência relativamente baixa, até as rápidas variações de tensão e corrente ocasionadas por súbitas mudanças dos valores de regime permanente de uma ou mais grandezas do sistema. Neste trabalho, pretende-se analisar os fenômenos elétricos que se apresentam com rápidas variações.

Embora os fenômenos transitórios em sistemas de potência tenham sido registrados desde o emprego da alta tensão para a transmissão de energia, o grande interesse pela área tem aumentado substancialmente nos últimos tempos. As razões que levam a este crescente interesse pela análise das sobretensões e sobrecorrentes desenvolvidas nos sistemas elétricos são:

- em muitos países a demanda de potência elétrica cresce mais rapidamente que o correspondente aumento de geração;
- as implicações com o meio ambiente têm restringido a construção de novas linhas, de forma que cresce a necessidade de utilização das linhas de transmissão existentes da melhor maneira possível;

- um melhor conhecimento do comportamento transitório torna possível uma redução do nível de isolamento do sistema elétrico e, em consequência, de seu custo.

Com o propósito de atingir as metas acima, o engenheiro de sistemas deve considerar os três pontos abaixo, os quais constituem o problema geral da coordenação de isolamento:

- a origem e as propriedades dos surtos de corrente e tensão;
- as características de isolamento dos equipamentos;
- os meios de limitar as sobretensões e sobrecorrentes.

No decorrer do tempo, devido à sua grande importância, e devido à sua origem mais comum, os fenômenos transitórios serão mais comumente designados por sobretensões. Embora as sobrecorrentes também existam, sob o ponto de vista de coordenação de isolamento, os surtos de tensão são mais diretamente utilizados.

As sobretensões geradas dentro de um sistema classificam-se em sobretensões temporárias, sustentadas e transitórias. Aquelas que têm a mesma frequência do sistema (ou múltiplos desta) e são fracamente amortecidas, são as denominadas temporárias. Aquelas que possuem também a mesma frequência (ou seus múltiplos) e não são amortecidas, são as chamadas sobretensões sustentadas. As sobretensões quando são fortemente amortecidas, e de curta duração, são designadas por transitórias. Neste último caso, enquadram-se os fenômenos transitórios criados por descargas atmosféricas e operações de mano-

bra. Por causa de suas origens, as sobretensões temporárias e os surtos de manobra podem ocorrer simultaneamente e o seu efeito combinado é relevante para o projeto do isolamento. Entretanto, a probabilidade de ocorrência simultânea de uma descarga atmosférica e de um surto de chaveamento é mínima, podendo desta forma a incidência simultânea das duas ser desprezada.

Os transitórios rápidos contêm componentes de altas frequências, como exemplo, tem-se oscilações da ordem de 70 kHz para o caso dos transitórios de sobretensões produzidas pela abertura de um disjuntor, eliminando uma falta a 1 Km do seu ponto de localização. Variações repentinas de tensão e correntes podem também resultar, devido a uma descarga atmosférica ou algum mal funcionamento do sistema. Ainda, os transitórios podem surgir devido a uma deliberada operação de chaveamento de uma parte do sistema. A descarga atmosférica é uma causa bastante comum de faltas e subsequentes saídas de partes de um circuito, embora as faltas possam também ocorrer devido a várias outras razões. O mal funcionamento de um sistema pode ocorrer por diferentes motivos que podem levar a uma série de consequências. Por exemplo, a abertura de uma das fases pode conduzir a um arranjo das indutâncias e capacitâncias de um circuito ressonante. Este circuito, uma vez excitado, levará a valores elevados de tensões e correntes.

As sobretensões ocasionadas por abertura ou por energização de circuitos serão de natureza transitória e, para os atuais níveis de tensão dos sistemas de transmissão, corres-

pondem aquelas que podem levar aos maiores valores de surtos.

Devido à sua importância no projeto de disjuntores, as sobretensões transitórias geradas pela abertura dos mesmos são consideradas mais importantes que aquelas causadas pela ação de fechamento. Este último fenômeno particularmente não afeta a operação do disjuntor. No passado, os níveis de sobretensões criados por fechamento de disjuntores nunca excediam o nível de isolamento do sistema, o qual, devido aos baixos valores de tensão de operação utilizados, tinham seus níveis de isolamento inteiramente governados pelos efeitos de descargas atmosféricas.

Com o decorrer dos anos, as tensões utilizadas para a transmissão de energia elétrica a longas distâncias têm aumentado continuamente, e muitos sistemas estão agora operando com 400, 500 ou 750 kV. Tensões de transmissão maiores que 1000 kV estão sob investigação. Devido ao fato que as magnitudes dos surtos oriundos de descargas atmosféricas não são muito afetadas pelo projeto de linha de transmissão, o desempenho das linhas aumentaram com o acréscimo do nível de tensão de operação. Por outro lado, as sobretensões geradas pelo próprio sistema (chaveamento) estão diretamente relacionadas com a tensão do sistema e suas magnitudes aumentam à medida que a tensão de operação cresce. Como resultado, para as tensões de operação em torno de 400 kV e acima, as tensões transitórias criadas internamente no sistema passam a exercer função determinante sobre o nível de isolamento do sistema. Neste contexto, as sobretensões causadas pela energização de li-

nhas de transmissão são particularmente significativas, uma vez que, dadas as condições necessárias, níveis de sobretensões superiores a três vezes a tensão fase-neutro são susceptíveis de ocorrência. Embora o nível de isolamento do sistema deva ser suficientemente alto para garantir a operação contínua do sistema de forma confiável e segura, ao mesmo tempo existem razões econômicas bastante fortes para conservar o nível de isolamento tão baixo quanto possível.

Como resultado disto, surge a necessidade de métodos precisos para a determinação dos níveis das sobretensões ainda durante a fase de planejamento, de forma que providências possam ser tomadas para reduzir a severidade das sobretensões e para uma minimização do nível de isolamento, tanto quanto for possível.

Para os cálculos dos transitórios de chaveamento, os elementos de um sistema de potência podem ser divididos em dois tipos:

- aqueles cujos parâmetros são essencialmente concentrados tais como: geradores, transformadores, reatores, capacitores, etc.;
- aqueles cujos parâmetros são essencialmente distribuídos, tais como: linhas aéreas e cabos subterrâneos.

Quando tais elementos de circuitos sofrem a ação de chaveamento, os mesmos ficam sujeitos a tensões e correntes que possuem larga faixa de frequência, que podem variar de 60 Hz até 200 kHz. Dentro dessa faixa de valores, os parâmetros do

sistema e do caminho por terra não são constantes, mas variam com a frequência.

De uma forma ideal, o método de cálculo usado deveria ser capaz de representar corretamente ambos os tipos de sistemas, ou seja, concentrados e distribuídos, e ainda, de proporcionar a sua representação incluindo o efeito da variação de seus valores com a frequência. Além disto, os modelos deveriam ainda permitir a representação do efeito da não-linearidade, devido à existência de pára-raios, circuitos magnéticos, corona e do arco nos disjuntores. Na prática, tal método não será facilmente obtido, e nos cálculos normais, empregam-se métodos simplificados, sendo que o compromisso dos resultados a que se chega é governado pelo método, modelos, etc. As dificuldades nos cálculos das sobretensões e sobrecorrentes não estão confinadas apenas aos métodos. O fornecimento de dados precisos também tem seus problemas, e de considerável importância, uma vez que a precisão de qualquer cálculo poderá ser comprometida pelos dados no qual os cálculos estão baseados. Para os resultados serem mais precisos, um completo conhecimento de variação dos elementos com a frequência torna-se necessário, e isto nem sempre é possível de forma imediata.

O método tradicional para a determinação de fenômenos transitórios em sistemas de potência utiliza o analisador de transitórios em redes (TNA), o qual é constituído por várias unidades de modelos reduzidos de linhas, geradores, etc. Isto possibilita a montagem em modelo reduzido de um dado sistema elétrico a ser estudado. O TNA utiliza valores concentra-

dos de indutância, capacitância e resistência. Devido ao problema da limitação física, pode-se eventualmente encontrar problemas físicos maiores que a capacidade do simulador. Nestas condições, simplificações por vezes drásticas, devem ser feitas de modo a acomodar o sistema elétrico dentro dos recursos disponíveis pelo TNA. Quanto à vantagem, o TNA apresenta a característica de se estudar fenômenos transitórios cujo exato mecanismo não é aparente, nem conhecido. Uma outra ferramenta para o estudo dos fenômenos transitórios seria o método digital. Uma combinação dos recursos analógicos e digitais é uma ferramenta extremamente potente, e os dois métodos deveriam ser considerados como complementares e não competitivos. Comparações dos resultados obtidos pelos dois processos (analógico e digital) tendem a indicar uma boa correlação global, embora, normalmente, observa-se pequenas diferenças nos detalhes mais finos das formas das ondas transitórias.

Infelizmente, os sistemas de potência são tão complexos que uma solução verdadeiramente analítica para os problemas, mesmo para os mais simples, é quase que impossível. Mesmo as soluções numéricas eram proibitivas até o advento de um computador digital potente. Com os recursos computacionais disponíveis, hoje isto já não mais constitui um fator de limitação e, através da modelagem conveniente e métodos de solução apropriados, os sistemas elétricos podem ser resolvidos de forma rápida e relativamente precisa.

Com relação aos métodos empregados para a investigação dos fenômenos transitórios, a figura 3.1 apresenta um resumo

da situação.

O analisador dinâmico de sistemas (DNA), constitui um estágio à frente do TNA. No DNA procura-se representar os diversos componentes de um sistema por circuitos eletrônicos (microprocessadores, por exemplo). Neste caso, como pode ser facilmente concluído, grandes sistemas podem ser simulados com relativa facilidade, através de extensões dos módulos existentes. O uso do computador analógico é uma forma clássica para a solução de equações diferenciais, as quais podem ser obtidas através do fenômeno e do sistema a ser estudado.

Com relação aos recursos analíticos disponíveis para os estudos dos efeitos das sobretensões, tem-se a considerar em primeiro lugar a natureza dos mesmos, ou seja, de regime permanente ou transitório. Para os primeiros, destacam-se as técnicas convencionais para estudos de regime permanente de circuitos. Para a determinação das sobretensões e sobrecorrentes transitórias tem-se a considerar:

- solução de um conjunto de equações diferenciais simultâneas. Neste caso tem-se a representação do sistema por parâmetros concentrados;
- emprego da técnica conhecida por ondas viajantes e utilização do Diagrama de Lattice ou outro.

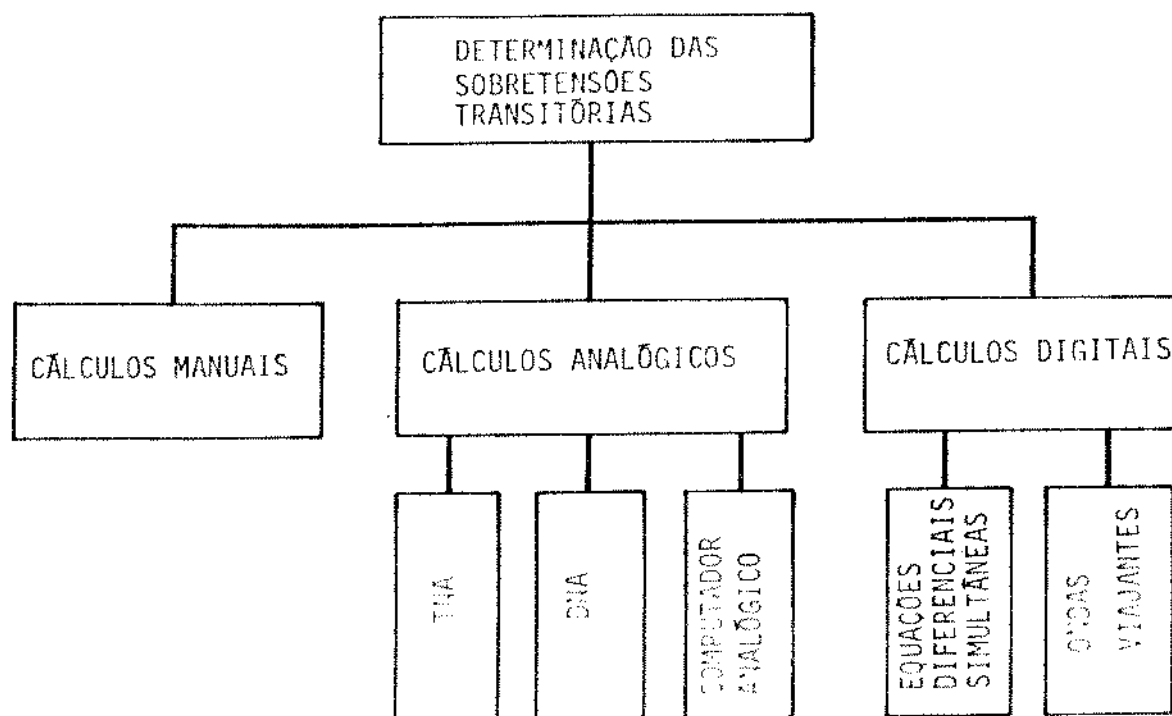


Figura 3.1 - Métodos empregados na investigação dos fenômenos transitórios em sistemas elétricos de potência.

Naturalmente, os cálculos manuais poderiam ser feitos empregando-se os métodos por equações diferenciais, ondas viajantes ou outro qualquer, porém, a sua limitação está no tipo de sistema a ser analisado.

### 3.2 - Classificação das Sobretensões

Conforme discutido na introdução geral, para o projeto e operação confiável de sistemas elétricos, é de suma importância conhecer as condições sob as quais as sobretensões perigosas podem ocorrer e também de meios para a determinação das magnitudes destes efeitos. Como foi também analisado, as sobretensões podem ocorrer por diversas razões, podendo ser classificadas em dois tipos:

- sobretensões de natureza sustentada e temporária;
- sobretensões de natureza transitória.

Os efeitos transitórios, que constituem objeto de análise deste trabalho, são aqueles que se manifestam durante um intervalo de tempo bastante curto.

As causas das sobretensões transitórias, de uma maneira bastante geral, podem ser ainda divididas em duas categorias:

- Descargas atmosféricas
- Chaveamentos.

#### 3.2.1 - Descargas Atmosféricas

A corrente de pico de uma descarga atmosférica pode estar na faixa de 1 a 220 kA, embora sua grande maioria os picos fiquem situados na região de 5 a 100 kA com um valor típico da ordem de 20 kA. A duração das correntes varia de 20 microsegundos a alguns milisegundos. De uma forma geral, as maiores correntes estão associadas às menores dura-

ções. A taxa de crescimento média da corrente é da ordem de 2 a 5 KA por microsegundo, com um máximo de 40 KA por microsegundo. Os tempos para se atingir o valor de crista está na faixa de 1 a 10 microsegundos e, para atingir-se um valor de ordem de 50% do valor de crista, decorrem normalmente na faixa de tempo de 20 a 150 microsegundos.

As descargas atmosféricas podem causar sobretensões devido a três razões:

- a - Incidência direta de uma descarga sobre um condutor fase;
- b - Incidência direta de uma descarga sobre os cabos pá-ra-raios ou torres;
- c - Por descargas indiretas.

As descargas atmosféricas possuem polaridade negativa com relação à terra (90%), e causam surtos de polaridade negativa nos condutores atingidos. Os surtos causados por indução, devido à descargas indiretas, são positivos.

Se uma descarga incide sobre um condutor, a mesma vê instantaneamente a impedância de surto da linha. A tensão resultante será portanto dada pelo produto da impedância de surto pela corrente incidente, sendo o resultado dividido por dois. A impedância de surto da linha depende da configuração da linha, porém, considera-se como valor médio 300 ohms para as linhas aéreas. Com tal impedância de surto, a incidência de uma descarga de 20 KA resultará em uma sobretensão de 6000 KA.

A incidência de uma descarga diretamente sobre um cabo para-raio ou sobre uma torre produzirá uma grande corrente que fluirá para a terra. Se a impedância deste caminho for suficientemente grande, a tensão que surge pode ser suficiente para produzir uma descarga (flashover) entre a torre e os condutores de fase.

As sobretensões devidas às descargas indiretas são causadas pela presença de nuvens carregadas e situadas nas proximidades de linhas aéreas. Com isto, cria-se uma superfície de carga (na linha), de polaridade oposta à da nuvem. Subsequen-temente, a carga da nuvem pode desaparecer através de uma descarga que não atinge a linha. A súbita descarga da nuvem libera a carga formada ao longo da linha, a qual se propaga em forma de surto.

### 3.2.2 - Sobretensões de Chaveamento

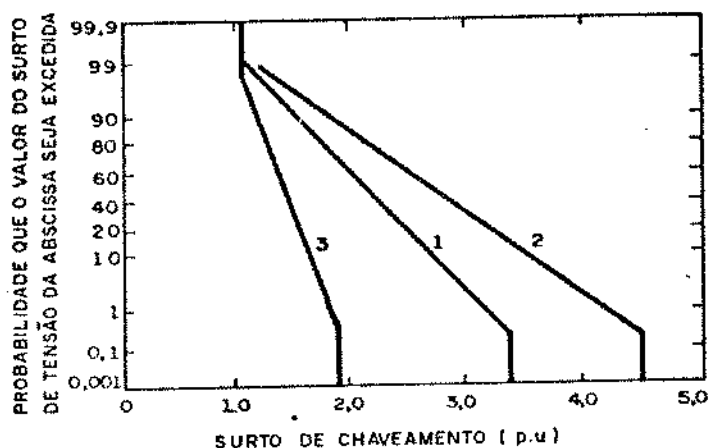
Conforme já mencionado, as sobretensões de chaveamento constituem os critérios de isolamento com os quais devem ser projetados os sistemas de EAT (Extra Alta Tensão). Isto evidencia a necessidade de seu conhecimento e necessidade de mê-todos para reduzi-las de forma a atingir-se um projeto econô-mico e operacionalmente confiável.

Surtos de chaveamento possuem uma grande variedade de formas, intensidades, durações, correspondendo a uma grande variação de eventos iniciais. Para um evento particular, seus parâmetros são determinados simultaneamente pelo sistema e pelas características do sistema de chaveamento. As formas po-

dem ser regular, oscilatória ou totalmente irregular, podendo ainda ser superpostas às tensões normais ou sobretensões temporárias.

A amplitude de uma sobretensão de chaveamento para uma dada operação depende do ponto da onda de tensão ou corrente em que ocorre o chaveamento.

Para se ter uma idéia da faixa de variação da amplitude de tensões em chaveamentos típicos, pode-se consultar as curvas de distribuição de frequências mostradas na figura 3.2.



- 1 e 2 - surtos não controlados
- 3 - surtos controlados

Fig. 3.2 - Curvas típicas de distribuição de chaveamento de surtos.

As sobretensões classificadas por "sobretensões de manobra ou de chaveamento" são caracterizadas pela curta duração em relação às sobretensões temporárias ou sustentadas, embora sendo na frequência industrial (60 Hz). Geralmente, elas ocorrem nos seguintes casos:

(a) - Energização de linhas, cabos, transformadores, reatores e barramentos

Normalmente, o equipamento é considerado desconectado por um tempo bastante longo, tal que as condições iniciais podem ser consideradas como nulas.

Em muitos casos, a corrente transitória produzirá uma tensão que poderá atingir duas vezes a tensão da fonte (típico para casos monofásicos).

Em um sistema trifásico existe acoplamento entre as fases, que pode resultar em surtos de energização maiores do que aqueles que poderiam ser esperados, baseados em estudos de sistemas monofásicos.

Tipicamente, os surtos de energização de linhas de transmissão trifásicos são da ordem de 2.5 a 3.0 (pu). Muitos disjuntores de E.A.T. usam resistência de pré-inserção no fechamento dos contatos do disjuntor, o que tende a diminuir a magnitude do surto de energização para um nível da ordem de 1.5 a 2.1 (pu).

(b) - Religamento rápido

Um transitório de religamento (provocado por religamento rápido) origina-se pela reenergização de uma linha, transformador, cabo ou barramento que estavam anteriormente energizados.

Uma linha energizada em um dos terminais absorve uma corrente capacitiva, e a interrupção desta corrente (60 Hz) re-

sulta em uma tensão remanescente igual a tensão da fonte; isto ocorre devido à carga existente na capacitância efetiva da linha.

Assim sendo, o religamento da linha pode resultar em um violento transitório se a tensão da fonte e a carga existente (tensão) têm polaridades opostas e não originarão nenhum transitório, se tiverem as mesmas polaridades e magnitudes.

Em sistemas monofásicos, o transitório resultante de um religamento pode atingir o valor de 1.0 (pu).

Em sistemas trifásicos, devido ao acoplamento entre fases, devemos esperar valores mais elevados.

Os valores trifásicos de surtos de manobras provocados por religamento estão compreendidos entre 2.5 a 4.0 (pu).

Novamente a utilização de disjuntores com resistência de preinserção (sistemas de EHV) reduz o nível para a faixa de 1.2 a 2.5 (pu).

#### (c) - Sobretensão de restabelecimento do arco voltaico

Resulta do colapso da tensão que se estabelece através dos contatos de um disjuntor quando este está abrindo.

Os disjuntores devem ser projetados segundo determinadas normas que especificam a velocidade de crescimento (proporção de crescimento) da tensão de restabelecimento, assim como a magnitude da tensão de restabelecimento.

Se a velocidade de crescimento da tensão de restabelecimento é maior que a velocidade de crescimento do poder dielê-

létrico do meio de extinção, o disjuntor irá reconduzir (teremos a abertura de um novo arco).

Se isto acontecer repentinamente, a tensão transitória pode se tornar excessiva e/ou o disjuntor ser danificado. Estas sobretensões (Re-striking Transient Voltage) têm geralmente uma magnitude de 2.0 a 3.0 (pu), mas em alguns sistemas não aterrados estes valores podem ser consideravelmente maiores.

## CAPÍTULO IV

### PROPAGAÇÃO DE ONDAS

## CAPÍTULO IV

## PROPAGAÇÃO DE ONDAS

## 4.1 - Introdução

Na teoria dos circuitos elétricos e eletromagnéticos constituídos por elementos do tipo parâmetros concentrados, admite-se que as alterações das tensões e correntes, devido a um distúrbio qualquer em alguma parte do circuito, transmite-se imediatamente a todas as outras partes do circuito. Naturalmente, esta afirmação não implica que em todas as partes do circuito elétrico estas modificações de estado acontecem instantaneamente, mas sim, que alguma alteração é iniciada no mesmo instante de aplicação da fonte do distúrbio. Nestes casos, após um pequeno período de tempo, normalmente definido pelas constantes de tempo do circuito, atinge-se o regime permanente. Esta suposição é equivalente a admitir que as distâncias entre as diversas partes do circuito, assim como de seus componentes, são bastante pequenas, a tal ponto que se pode considerar que o distúrbio move-se através do circuito com uma velocidade limite. Uma vez que esta velocidade de propagação do efeito elétrico não pode ultrapassar a velocidade da luz (de  $3 \times 10^8$  m/s), o tempo para que uma onda eletromagnética se propague ao longo de uma linha de transmissão pode ser bastante significativo, e nestes casos, a representação da linha por elementos a parâmetros concentrados, como é por exemplo o caso de um circuito equivalente  $\pi$ , é inadequada para os estudos destes rápidos

transitórios.

Nos itens que se seguem, procurar-se-á analisar o fenômeno da propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão. Inicialmente, considerar-se-á o caso mais simples, que é o da propagação monofásica, e o estudo será complementado para os casos mais complexos. Além disto, será inicialmente considerado o caso da propagação ideal, para que posteriormente, sejam considerados os efeitos da atenuação e da distorção.

#### 4.2 - Propagação de Ondas em Sistemas Monofásicos

A fim de melhor compreender o efeito da propagação de ondas eletromagnéticas em sistemas de potência trifásicos, analisar-se-á inicialmente a propagação em um sistema constituído de um condutor e um plano de terra infinito. As equações obtidas para este caso simples serão posteriormente estendidas para modelos mais complexos.

O arranjo de um condutor em presença de um plano de terra infinito, é mostrado na figura 4.1, que apresenta apenas um comprimento infinitesimal.

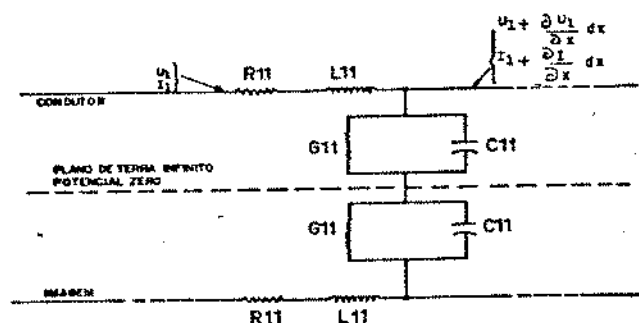


Fig. 4.1 - Representação de um elemento infinitesimal de Linha Monofásica.

Na figura 4.1:

- $R_{11}$  - Resistência em mho por unidade de comprimento  
 $L_{11}$  - Indutância em henries por unidade de comprimento  
 $G_{11}$  - Condutância em ohms por unidade de comprimento  
 $C_{11}$  - Capacitância em farads por unidade de comprimento  
 $U_1$  - tensão num dado ponto da linha e a terra; portanto,  $U_1$  representa a tensão fase terra em função de "x" (comprimento) e "t" (tempo).  
 $I_1$  - corrente num dado ponto da linha, que é uma função de "x" e "t".

As equações diferenciais que relacionam as grandezas elétricas da figura 4.1., são:

$$\frac{\partial U_1(x,t)}{\partial x} = -L_{11} \frac{\partial I_1(x,t)}{\partial t} - R_{11} I_1(x,t) \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial I_1(x,t)}{\partial x} = -C_{11} \frac{\partial U_1(x,t)}{\partial t} - G_{11} U_1(x,t) \quad (4.2)$$

Para se obter as soluções das equações diferenciais (4.1) e (4.2), estas são transformadas para domínio de frequência, aplicando-se a Transformada de Fourier. Antes, porém, é conveniente ressaltar alguns conceitos básicos relacionados a esta transformação:

- (i) - A Transformada de Fourier  $F(x,\omega)$  de uma função  $f(x,t)$  permite passar do domínio do tempo "t" para o domínio da frequência angular " $\omega = 2 \pi f$ ".

A transformação é processada através da equação:

$$F(x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.3)$$

(ii) - A transformada inversa, ou seja, a passagem do domínio da frequência para o domínio do tempo é dada por:

$$f(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, \omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.4)$$

(iii) - A condição suficiente para existência de  $F(x, \omega)$  é comumente dada por:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(x, t)| dt < \infty \quad (4.5)$$

(iv) - A Transformada de Fourier ( $\Gamma$ ) da função derivada  $\frac{\partial f}{\partial t}$ , onde  $f$  é contínua e  $\lim_{t \rightarrow \pm \infty} f = 0$ , é dada por

$$\Gamma \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right) = j\omega F(x, \omega) \quad (4.6)$$

Aplicando a Transformada de Fourier para as equações (4.1) e (4.2), vem:

$$\frac{dU_1(x, \omega)}{dx} = -Z_{11}(\omega) \cdot I_1(x, \omega) \quad (4.7)$$

onde:  $Z_{11}(\omega) = R_{11} + j\omega L_{11}$

$$\frac{dI_1(x, \omega)}{dx} = -Y_{11}(\omega) U_1(x, \omega) \quad (4.8)$$

onde:  $Y_{11}(\omega) = G_{11} + j\omega C_{11}$

As equações diferenciais e derivadas parciais (4.1) e (4.2), transformaram-se desta forma nas equações diferenciais ordinárias (4.7) e (4.8), válidas para uma dada frequência angular  $\omega$ .

As equações (4.7) e (4.8) no domínio da frequência são facilmente resolvidas. Derivando-as em relação a "x", vem:

$$\frac{d^2 U_1}{dx^2} = Z_{11} \frac{dI_1}{dx} \quad (4.9)$$

$$\frac{d^2 I_1}{dx^2} = -Y_{11} \frac{dU_1}{dx} \quad (4.10)$$

De onde:

$$\frac{d^2 U_1}{dx^2} = Z_{11} Y_{11} U_1 = \gamma_1^2 U_1 \quad (4.11)$$

$$\frac{d^2 I_1}{dx^2} = Y_{11} Z_{11} I_1 = \gamma_1^2 I_1 \quad (4.12)$$

Resolvendo para  $U_1$ , vem:

$$U_1 = A_1 e^{-\gamma_1 x} + B_1 e^{\gamma_1 x} \quad (4.13)$$

Onde:

$A_1$  e  $B_1$  são constantes arbitrárias

$$\gamma_1 = \gamma_1' = \sqrt{Z_{11} Y_{11}}$$

De acordo com a teoria clássica das linhas de transmissão, as constantes  $A_1$  e  $B_1$  são constantes arbitrárias, que uma vez determinadas correspondem a fatores para uma dada tensão senoidal com frequência definida aplicada à linha. Estas constantes são determinadas com base nas condições de contorno para cada linha. O coeficiente  $\gamma_1$  é definido como sendo a constante de propagação e, conforme apresentado anteriormente, é dado por  $\sqrt{Z_{11} Y_{11}}$ . Substituindo  $Z_{11}$  e  $Y_{11}$  pelas expressões correspondentes, tem-se:

$$\gamma_1 = \sqrt{(R_{11} + j\omega L_{11})(G_{11} + j\omega C_{11})} = \alpha_1 + j\beta_1 \quad (4.14)$$

A parte real " $\alpha_1$ " expressa a atenuação da onda que se propaga ao longo da linha. A parte imaginária " $\beta_1$ " dá a variação do ângulo da fase da onda ao longo da linha.

A expressão para a corrente pode ser obtida a partir de (4.7) e (4.13), como:

$$I_1 = -\frac{1}{Z_{11}} \frac{dU_1}{dx}$$

Donde:

$$I_1 = \frac{\gamma_1}{Z_{11}} (A_1 e^{-\gamma_1 x} - B_1 e^{\gamma_1 x}) \quad (4.15)$$

Fazendo:

$$Z_{11}^0 = \frac{Z_{11}}{\gamma_1} = \sqrt{\frac{Z_{11}}{Y_{11}}} \quad (4.16)$$

tem-se:

$$I_1 = \frac{A_1}{Z_{11}^0} e^{-\gamma_1 x} - \frac{B_1}{Z_{11}^0} e^{+\gamma_1 x} \quad (4.17)$$

Tomando a expressão (3.13) é interessante observar que o termo  $A_1 e^{-\gamma_1 x}$  representa uma onda que se propaga no sentido direto e o termo  $B_1 e^{+\gamma_1 x}$  uma onda que se propaga no sentido inverso. Para cada uma destas ondas de tensão, existe sempre uma correspondente onda de corrente. Estas ondas de corrente que se propagam no sentido direto e inverso tem por amplitude o valor correspondente da relação de tensão pela impedância de surto da linha ( $Z_{11}^0$ ). Na verdade, o termo impedância de surto somente deve ser usado se  $R_{11} = G_{11} = 0$ , isto é, linhas sem perdas. No caso mais geral, quando então as perdas são incluídas, o usual é denominar  $Z_{11}^0$  por impedância característica; porém, tal diferença em nomenclatura não é normalmente levada em conta. Deve-se ainda observar que a onda direta de tensão é acompanhada de uma correspondente corrente de mesma polaridade, porém, de acordo com os sinais mostrados nas equações (4.13) e (4.17) o mesmo não ocorre para as ondas inversas.

No caso da propagação de uma onda em uma linha ideal (sem perdas) tem-se:

$$\gamma_1 = j\beta_1 \quad (\text{somente defasamento})$$

$$Z_{11} = \sqrt{\frac{L_{11}}{C_{11}}}$$

As expressões (4.13) e (4.17) representam, pois, as equações gerais das ondas viajantes, em sistemas formados por um condutor e um plano de terra infinito, no domínio da frequência. Caso se queira as correspondentes ondas no domínio do tempo, deve-se obter a transformada inversa, conforme determina a equação (4.4). No domínio do tempo é usual representar as tensões e correntes por:

$$U_1(x,t) = U_1(x - ut) + U_1(x + ut) \quad (4.18)$$

$$I_1(x,t) = I_1(x - ut) - I_1(x + ut) \quad (4.19)$$

#### 4.3 - Interpretação física da Propagação Monofásica

Se uma tensão com a forma indicada na figura 4.1 é aplicada numa linha ideal em um ponto  $x = 0$  num instante  $t = 0$ , então, após um tempo  $t_1$ , a mesma onda terá movido uma distância  $x_3$  ao longo da linha. Assim, as tensões em posições intermediárias entre  $x = 0$  e  $x = x_3$  assumirão instantaneamente (em  $t = t_1$ ) a distribuição ilustrada na figura 4.2. Desde que está se considerando apenas a propagação numa linha ideal, a tensão em algum ponto intermediário  $x_1$  estará em seu valor máximo. Em tempo  $t_2 > t_1$ , quando a frente de onda atingiu  $x_4$  e o pico atingiu  $x_2$  tem-se que  $U_1(x_1 - ut_1) = U_1(x_2 - ut_2)$ , o que implica que houve um deslocamento da onda no mesmo sentido (+) convencionalizado para a distância. Esta onda de tensão tem, portanto, um significado de uma onda direta.

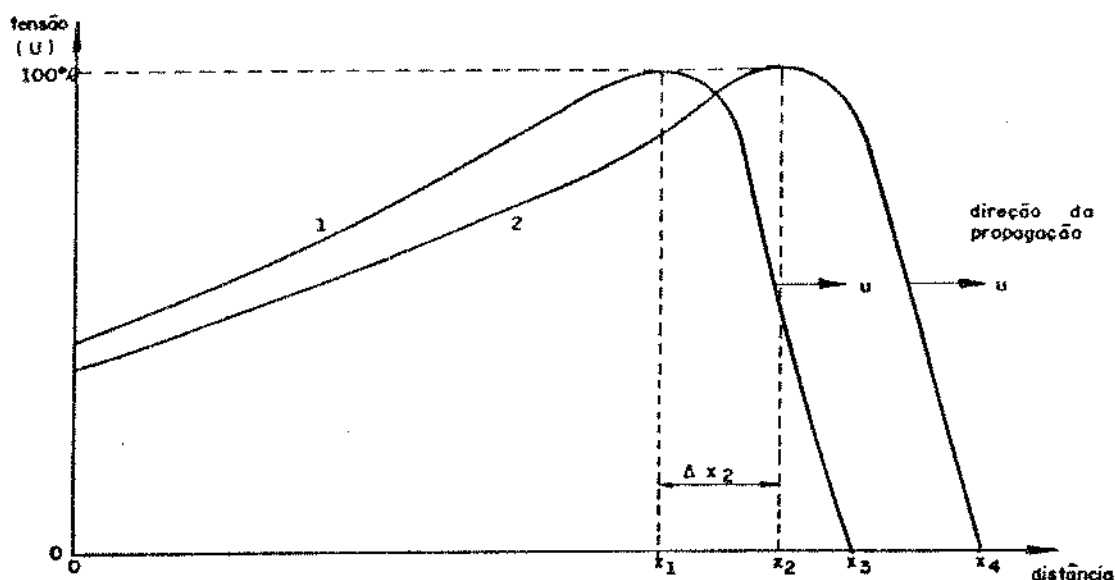


Fig. 4.2 - Distribuição da tensão ao longo da linha - onda direta.

A figura 4.3 ilustra, num instante qualquer, as ondas de tensão e corrente que se propagam sobre uma linha.

Embora as análises que se processam sobre uma linha ideal tenham sido utilizadas em tempos passados, tal tratamento mostrou-se inadequado para o desenvolvimento mais preciso de estudos de sobretensões em sistemas elétricos. Devido a isto, formas mais realísticas de representação foram desenvolvidas e serão discutidas neste trabalho.

#### 4.4 - Propagação de Ondas em Sistemas Bifásicos

##### 4.4.1 - Método clássico

Com o propósito de obter uma formulação capaz de representar a propagação de onda em sistemas polifásicos, analisar-se-á a propagação em uma linha constituída de dois condutores e um plano de terra infinito. A figura 4.4 mostra uma seção infinitesimal desta linha.

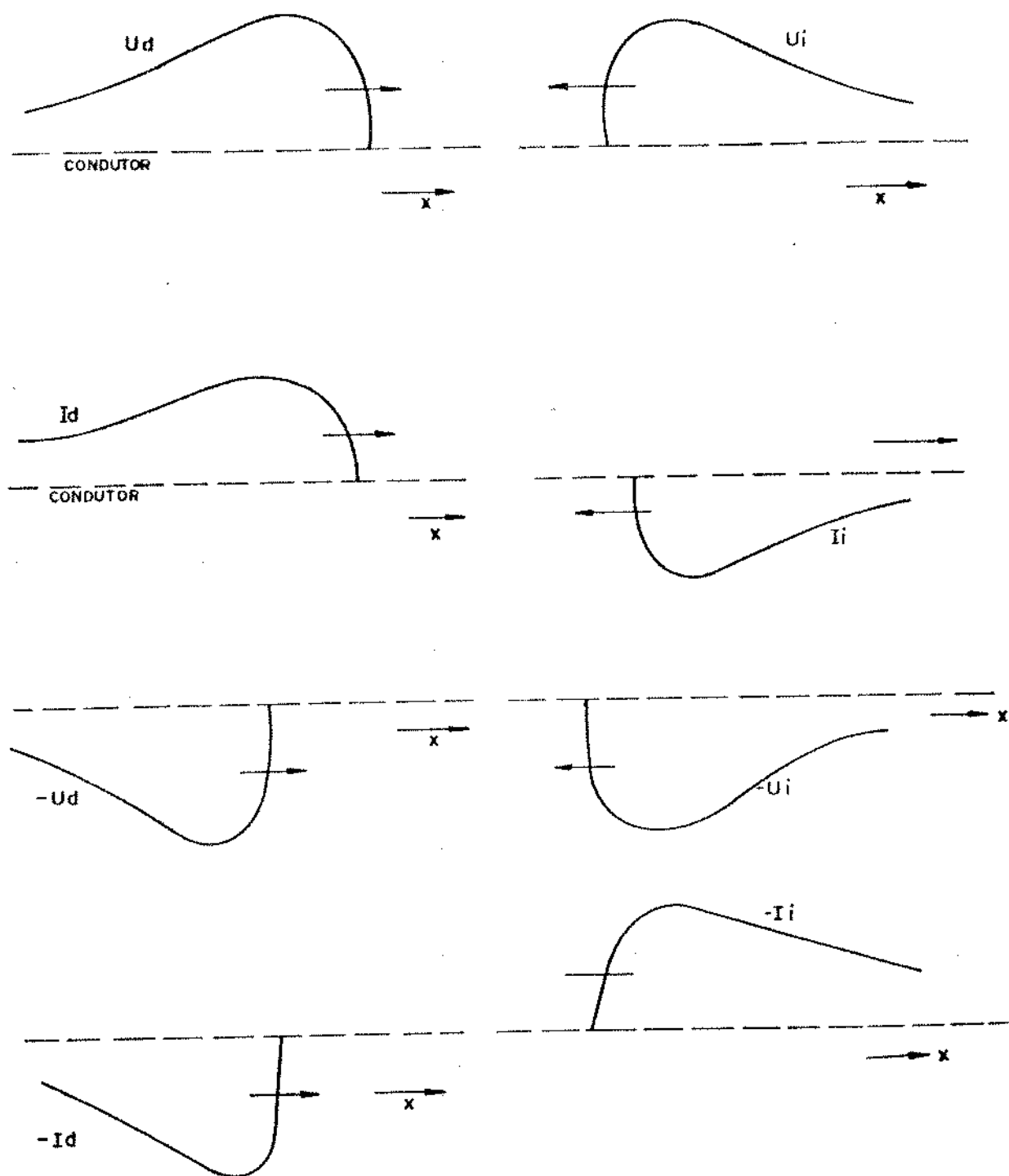


Fig. 4.3 - Sentido e polaridade das ondas de tensão e corrente direta inversa.

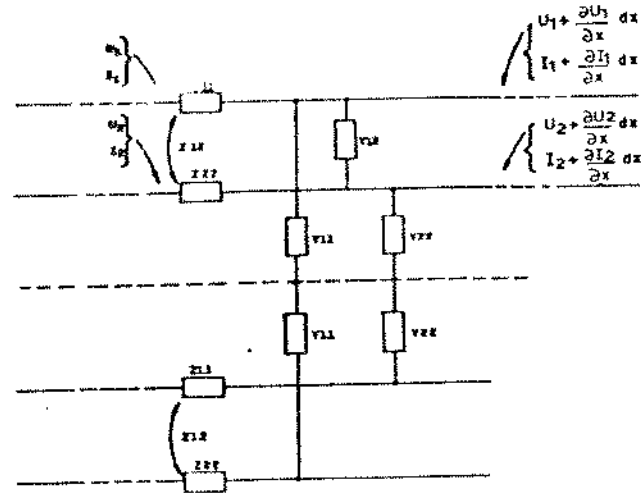


Fig. 4.4 - Representação de um Elemento Infinitesimal de Linha Bifásica.

Da figura 4.4, tem-se:

$$Z_{ii} = (R_{ii} + j\omega L_{ii})$$

impedância própria do condutor  $i$  por unidade de comprimento.

$$Z_{ij} = (R_{ij} + j\omega L_{ij})$$

impedância mútua entre os condutores  $i$  e  $j$  por unidade de comprimento.

$$Y_{ii} = (G_{ii} + j\omega C_{ii})$$

admitância própria do condutor  $i$  por unidade de comprimento.

$$Y_{ij} = (G_{ij} + j\omega C_{ij})$$

admitância mútua entre os condutores  $i$  e  $j$  por unidade de comprimento.

As equações diferenciais ordinárias, já no domínio da frequência, relacionando tensões e correntes em cada condutor, são:

$$\frac{dU_1}{dx} = -Z_{11} I_1 - Z_{12} I_2 \quad (4.20)$$

$$\frac{dU_2}{dx} = -Z_{12} I_1 - Z_{22} I_2 \quad (4.21)$$

$$\frac{dI_1}{dx} = -Y_{11} U_1 - Y_{12} U_2 \quad (4.22)$$

$$\frac{dI_2}{dx} = -Y_{12} U_1 - Y_{22} U_2 \quad (4.23)$$

Derivando as equações acima e a seguir por um processo de substituição, obtém-se as seguintes equações:

$$\frac{d^2 U_1}{dx^2} = P_{11} U_1 + P_{12} U_2 \quad (4.24)$$

$$\frac{d^2 U_2}{dx^2} = P_{21} U_1 + P_{22} U_2 \quad (4.25)$$

$$\frac{d^2 I_1}{dx^2} = P_{11} I_1 + P_{21} I_2 \quad (4.26)$$

$$\frac{d^2 I_2}{dx^2} = P_{12} I_1 + P_{22} I_2 \quad (4.27)$$

Onde:

$$P_{11} = (Z_{11} Y_{11} - Z_{12} Y_{12}) \quad (4.28)$$

$$P_{12} = - (Z_{11} Y_{12} - Z_{12} Y_{22}) \quad (4.29)$$

$$P_{21} = (Z_{12} Y_{11} - Z_{22} Y_{12}) \quad (4.30)$$

$$P_{22} = - (Z_{12} Y_{12} - Z_{22} Y_{22})$$

As equações para as tensões nos condutores, são então obtidas a partir de (4.24) e (4.25). Apresentar-se-ã aqui apenas as equações finais das tensões, haja visto a grande quantidade de manipulações matemáticas envolvidas, então:

$$U_1 = S_{11} (U_{1D}^C e^{-\gamma_1 x} + U_{1R}^C e^{\gamma_1 x}) + S_{12} (U_{2D}^C e^{-\gamma_2 x} + U_{2R}^C e^{\gamma_2 x}) \quad (4.32)$$

$$U_2 = S_{21} (U_{1D}^C e^{-\gamma_1 x} + U_{1R}^C e^{\gamma_1 x}) + S_{22} (U_{2D}^C e^{-\gamma_2 x} + U_{2R}^C e^{\gamma_2 x}) \quad (4.33)$$

Ou:

$$U_1 = S_{11} U_1^C + S_{12} U_2^C \quad (4.34)$$

$$U_2 = S_{21} U_1^C + S_{22} U_2^C$$

Onde:

$$U_1^C = U_{1D}^C e^{-\gamma_1 x} + U_{1R}^C e^{\gamma_1 x} \quad (4.36)$$

$$U_2^C = U_{2D}^C e^{-\gamma_2 x} + U_{2R}^C e^{\gamma_2 x} \quad (4.37)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} \{ (P_{11} + P_{22}) + \sqrt{(P_{11} - P_{22})^2 + 4P_{12}P_{21}} \} \quad (4.38)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{2} \{ (P_{11} + P_{22}) - \sqrt{(P_{11} - P_{22})^2 + 4P_{12}P_{21}} \} \quad (4.39)$$

$$\frac{S_{12}}{S_{22}} = \frac{1}{2P_{12}} \{ (P_{11} - P_{22}) - \sqrt{(P_{11} - P_{22})^2 + 4P_{12}P_{21}} \} \quad (4.40)$$

$$\frac{S_{21}}{S_{11}} = \frac{1}{2P_{21}} \{ (P_{11} - P_{22}) + \sqrt{(P_{11} - P_{22})^2 + 4P_{12}P_{21}} \} \quad (4.41)$$

As expressões para a corrente, são:

$$I_1 = \frac{1}{D} \{ \gamma_1 S_{11} Z_{22} - S_{21} Z_{12} U_1^C + \gamma_2 S_{12} Z_{22} - S_{22} Z_{12} U_2^C \} \quad (4.42)$$

$$I_2 = \frac{1}{D} \{ \gamma_1 S_{21} Z_{11} - S_{11} Z_{12} U_1^C + \gamma_2 S_{22} Z_{11} - S_{12} Z_{12} U_2^C \} \quad (4.43)$$

Onde:

$$U_1^C = U_{1D}^C e^{-\gamma_1 x} - U_{1R}^C e^{\gamma_1 x} \quad (4.44)$$

$$U_2^C = U_{2D}^C e^{-\gamma_2 x} - U_{2R}^C e^{\gamma_2 x} \quad (4.45)$$

$$D = Z_{11} Z_{22} - Z_{12}^2 \quad (4.46)$$

Em relação às equações de tensões e correntes apresentadas anteriormente, faz-se a seguir alguns comentários:

- Para cada tensão ou corrente de fase existem dois coeficientes de propagação ( $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ ), sendo que cada um está relacionado com um par de ondas viajantes, compostos de uma componente de tensão que se propaga no sentido direto e outra componente que se propaga no sentido inverso ou reverso.
- Cada tipo de onda viajante aparece em ambas as fases, em uma relação determinada por parâmetros do sistema, porém a relação entre ondas viajantes de diferentes tipos é arbitrária.
- Cada onda viajante de tensão é acompanhada pela sua correspondente onda de corrente. A relação entre tensão e corrente para cada componente é uma constante, que por sua vez é função dos parâmetros do sistema. Estas constantes têm as mesmas características das impedân-

cias de surto do caso monofásico e seus valores para cada componente em cada fase, são:

$$Z_{11}^C = \frac{D}{\gamma_1 (Z_{22} - S_{21} Z_{12}/S_{11})} \quad (4.47)$$

$$Z_{12}^C = \frac{D}{\gamma_2 (S_{12} Z_{22}/S_{22} - Z_{12})} \quad (4.48)$$

$$Z_{21}^C = \frac{D}{\gamma_2 (S_{12} Z_{22}/S_{22} - Z_{12})} \quad (4.49)$$

$$Z_{22}^C = \frac{D}{\gamma_1 (Z_{11} - S_{12} Z_{12}/S_{22})} \quad (4.50)$$

Estas relações são determinadas através das equações (4.42) e (4.43), onde as constantes arbitrárias são eliminadas, conhecendo-se as tensões e correntes em cada terminal de linha, tal como no caso monofásico.

A solução clássica apresentada anteriormente, mesmo para o caso de apenas dois condutores é bastante trabalhosa. A análise de casos mais complexos seguindo esta mesma metodologia é bastante desestimulante, no entanto, a sistemática e mesmo a própria notação usada sugere o tratamento do problema de forma matricial, o que certamente reduzirá em muito o trabalho, chama-se mais uma vez, a atenção para o fato de que as tensões e correntes de fase são determinadas em termos de componentes, de maneira análoga às componentes simétricas usadas em sistemas trifásicos.

#### 4.4.2 - Método Matricial

As dificuldades em encontrar ou mesmo trabalhar com as equações de propagação em sistemas bifásicos, e mais tarde em sistemas polifásicos, reside no fato de que as equações de tensão e corrente em cada fase dependem das demais fases, isto é, dependem do acoplamento mútuo entre as fases.

De uma forma mais geral, as equações anteriores podem ser escritas sob a forma matricial a seguir:

$$\left[\frac{dU}{dx}\right] = -[Z] [I] \quad (4.51)$$

$$\left[\frac{dI}{dx}\right] = -[Y] [U] \quad (4.52)$$

Onde U, Z, Y e I são grandezas complexas, variando ao longo da grandeza escalar X.

E:

$$\left[\frac{d^2U}{dx^2}\right] = [Z] [Y] [U] = [P_t] [U] \quad (4.53)$$

$$\left[\frac{d^2I}{dx^2}\right] = [Y] [Z] [I] = [P] [I] \quad (4.54)$$

Para simplificar a representação, é usual encontrar as expressões (4.51) e (4.52) sem os colchetes, porém, mesmo nestes casos U e I são vetores colunas correspondentes às tensões e correntes de fase, enquanto Z e Y são matrizes quadradas, onde os elementos da diagonal são, respectivamente, as impedâncias

e admitâncias próprias de cada fase e os elementos fora da diagonal representam, respectivamente, as impedâncias e admitâncias mútuas, entre fases. Deve-se notar que ambas as matrizes são simétricas, quando se trata de elementos passivos, assim:

$$Z_t = Z \text{ e } Y_t = Y.$$

A matriz "P" é quadrada, sendo utilizada com o intuito de simplificar a análise, e definida como produto de Z por Y.

Para se obter as equações das tensões e correntes, far-se-á uma transformação linear de tal modo que as equações diferenciais de segunda ordem de tensão e corrente envolvam matrizes diagonais. Desta forma, será eliminado o efeito do acoplamento mútuo, e a solução é feita componente por componente.

Seja portanto U um vetor de componentes de tensão, definido como:

$$[U] = [S] [U^C] \quad (4.55)$$

Substituindo na equação (4.53), vem:

$$\left[ \frac{d^2 U^C}{dx^2} \right] = [S^{-1}] [P] [S] [U^C] = [\gamma^2] [U^C] \quad (4.56)$$

Onde:

$$[\gamma^2] = [S^{-1}] [P] [S] \quad (4.57)$$

A matriz de transformação [S] é tomada de tal forma que  $(\gamma^2)$  seja uma matriz diagonal, da forma:

$$[\gamma^2] = \begin{bmatrix} \gamma_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \gamma_n^2 \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

Para o caso de um sistema bifásico, a equação matricial (4.56) pode ser desmembrada em duas equações diferenciais simples, conforme abaixo. Isto é equivalente desacoplar o sistema bifásico primitivo em dois monofásicos, onde as propagações processam-se independentemente.

$$\frac{d^2 U_1^C}{dx^2} = \gamma_1^2 U_1^C \quad (4.59)$$

$$\frac{d^2 U_2^C}{dx^2} = \gamma_2^2 U_2^C \quad (4.60)$$

Estas equações são da forma das equações do caso monofásico e tem uma solução simples, dada por:

$$U_1^C = U_{1D}^C e^{-\gamma_1 x} + U_{1R}^C e^{\gamma_1 x} \quad (4.61)$$

$$U_2^C = U_{2D}^C e^{-\gamma_2 x} + U_{2R}^C e^{\gamma_2 x} \quad (4.62)$$

Onde  $U_{1D}^C$ ,  $U_{1R}^C$ ,  $U_{2D}^C$ ,  $U_{2R}^C$  são constantes arbitrárias. A matriz S é determinada de tal modo que  $S^{-1}PS$  seja uma matriz diagonal. Desta forma, é possível resolver diretamente as equações anteriores, resolvendo uma componente de cada vez.

#### 4.5 - Aplicação do Método Matricial em Sistemas Polifásicos

A solução das equações de propagação de ondas em sistemas polifásicos, pelo método matricial é bastante simples, uma vez que o método transforma um sistema de  $n$  condutores mutuamente acoplado em  $n$  sistemas monofásicos, desacoplados entre si.

Conforme visto anteriormente, as equações diferenciais matriciais de segunda ordem da tensão e corrente, no domínio da frequência, são dadas por:

$$\left[ \frac{d^2 U}{dx^2} \right] = [P] [U] \quad (4.63)$$

$$\left[ \frac{d^2 I}{dx^2} \right] = [P_t] [I] \quad (4.64)$$

Através de uma transformação linear da tensão e corrente definida como:

$$[U] = [S] [U^C] \quad (4.65)$$

$$[I] = [Q] [I^C] \quad (4.66)$$

Tem-se

$$\left[ \frac{d^2 U^C}{dx^2} \right] = [S^{-1}] [P] [S] [U^C] = [\gamma^2] [U^C] \quad (4.67)$$

$$\left[ \frac{d^2 I^C}{dx^2} \right] [Q^{-1}] [P_t] [Q] [I^C] = [\gamma^2] [I^C] \quad (4.68)$$

O método está baseado na escolha conveniente das matrizes de transformação S e Q, de tal forma que  $\gamma^2$  e  $\gamma'^2$  tornam-se matrizes diagonais. Como pode ser observado em (4.67) e (4.68) as matrizes  $\gamma^2$  e  $\gamma'^2$  são dadas por:

$$[\gamma^2] = [S^{-1}] [P] [S] \quad (4.69)$$

$$[\gamma'^2] = [Q^{-1}] [P_t] [Q] \quad (4.70)$$

Isto significa que estas equações, devido ao fato de  $\gamma^2$  e  $\gamma'^2$  serem matrizes diagonais, formam um sistema de equações diferenciais simples, onde o efeito mútuo foi eliminado. Desta forma, o conjunto de equações diferenciais tem o aspecto a seguir. É importante observar que as equações são agora simples equações diferenciais, pois não mais existe a interferência de uma fase sobre a outra.

$$\frac{d^2 U_1^C}{dx^2} = \gamma_1^2 U_1^C \quad (4.71)$$

$$\frac{d^2 U_i^C}{dx^2} = \gamma_i^2 U_i^C \quad (4.72)$$

$$\frac{d^2 U_n^C}{dx^2} = \gamma_n^2 U_n^C \quad (4.73)$$

Cada uma das equações acima tem uma solução, que tal como no caso monofásico é dada por:

$$U_i^C = U_{iD}^C e^{-\gamma_i x} + U_{iR}^C e^{\gamma_i x} \quad (4.74)$$

As equações para a corrente podem ser determinadas de maneira semelhante. A matriz  $Z^C$  relacionando as componentes de tensão e corrente seria então obtida como:

$$U^C = Z^C I^C \quad (4.75)$$

Onde:

$$Z^C = \gamma^{-1} S^{-1} Z Q \quad (4.76)$$

$$U^C = U_D^C e^{-\gamma x} - U_R^C e^{\gamma x} \quad (4.77)$$

Neste ponto é importante ressaltar que a matriz  $Z^C$  é diagonal. Para que as matrizes  $S$  e  $Q$  tornem  $\gamma^2$  e  $\gamma'^2$  diagonais, deve-se ter:

$$\det(P - \gamma_i^2) = 0 \quad (4.78)$$

As colunas da matriz  $S$  são obtidas pela solução de um sistema de equações linearmente dependentes, dado por:

$$(P - \gamma_i^2) S_i = 0 \quad (4.79)$$

Onde  $S_i$  é a  $i$ -ésima coluna da matriz  $S$ , na qual um dos seus elementos deve ser arbitrado para que o sistema tenha solução.

A matriz  $S$  assim obtida nada mais é do que a matriz modal da matriz "P", ou seja, a matriz cujas colunas são os auto

vetores de "P" e " $\gamma_i^2$ " são seus autovalores.

Em virtude disto, passar-se-á a chamar os componentes de tensão obtidos pela transformação, através de S, de componentes modais ou simplesmente modos de tensão.

Um raciocínio semelhante deveria ser feito para a matriz "Q"; no entanto, uma vez obtida a matriz "S", far-se-á uso da propriedade de que os autovalores de uma matriz e os autovalores da sua matriz transposta são iguais, portanto:

$$\gamma'^2 = \gamma^2 = S^{-1}PS = Q^{-1}P_tQ \quad (4.80)$$

Como  $\gamma'$  é diagonal, vem:

$$\gamma^2 = (S^{-1}PS)^t = S_t P_t S_t^{-1} = Q^{-1}P_tQ \quad (4.81)$$

logo:

$$Q = S_t^{-1} \quad (4.82)$$

$$Q^{-1} = S_t$$

#### 4.6 - Atenuação e Distorção

Quando uma onda se propaga ao longo de uma linha de transmissão, ela sofre gradativamente mudanças na sua forma e amplitude. Em geral, três causas são apontadas para este fato:

- Corrente de fuga nas superfícies dos isoladores;
- Efeito corona;
- Perdas devido a resistência e a variação dos parâmetros da linha com a frequência.

Em casos práticos, a condutância dos isoladores é desprezada e o efeito corona tem uma pequena influência nas ondas que possuem frente bastante longa. Todavia, mesmo assim, o efeito corona se faz sentir apenas acima de determinado nível de tensão, podendo também ser desprezado.

A atenuação de uma onda senoidal de frequência angular  $\omega$ , ao se propagar através de uma distância " $x$ " da linha de transmissão, pode ser encontrada em valores modais, pela equação (4.74), da qual se toma apenas a componente que viaja no sentido positivo.

$$U_i^C(x, \omega) = U_i^C(x = 0, \omega) e^{-\gamma_i x} \quad (4.83)$$

Onde:

$U_i^C(x, \omega)$  - é a tensão do modo " $i$ " em um ponto " $x$ " da linha.

$U_i^C(x = 0, \omega)$  - é a tensão do modo " $i$ " injetada no início da linha.

$\gamma_i$  - é a constante de propagação do modo " $i$ ".

Em geral, as ondas envolvidas nos fenômenos transitórios não são senoides, e mesmo quando as são, torna-se mais conveniente representá-las por uma superposição de degraus, igualmente espaçados de um intervalo de tempo " $\theta$ ". Esta representação é muito difundida e tem um interesse todo especial quando se trabalha com ondas viajantes.

A figura 4.5 ilustra melhor a representação.

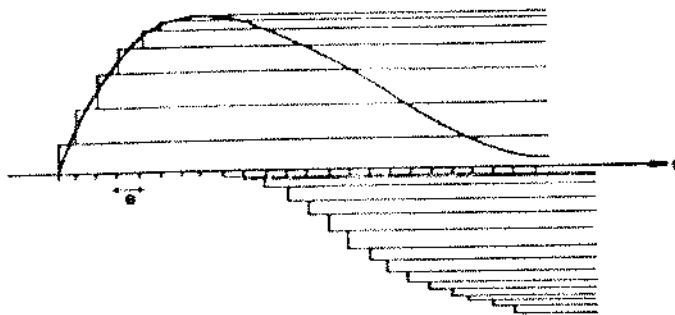


Fig. 4.5 - Representação simbólica de uma onda por superposição de degraus.

Considerando então a aplicação de um degrau no início de uma linha de transmissão, deve-se proceder ao cálculo de sua resposta (forma e amplitude) em um ponto situado a uma distância "x" do terminal onde foi aplicado.

A Transformada de Fourier para um degrau unitário é  $[\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega}]$  e levando-se tal valor na equação (4,83), tem-se a Transformada de Fourier da onda num ponto x, como:

$$U_1^C(x, \omega) = [\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega}] e^{-\gamma_1 x} \quad (4.84)$$

A resposta ao degrau no domínio do tempo pode ser encontrada fazendo a transformada inversa de Fourier da equação (4.84). Antes, porém, é conveniente fazer uma análise do espectro da frequência da Transformada de Fourier do degrau, o qual se encontra plotado na figura 4.6.

Nota-se da figura 4.6 que as componentes de mais alta frequência possuem menor amplitude, e à medida que a frequência tende para infinito, a amplitude dos componentes tendem para zero.

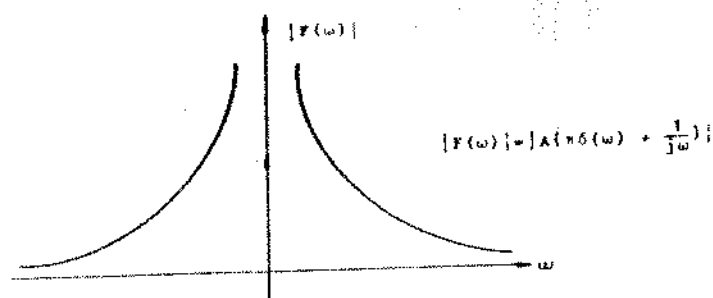


Fig. 4.6 - Espectro de frequência da Transformada de Fourier de um degrau.

A transformada inversa de Fourier é então obtida levando a equação (4.84) em (4.4):

$$\begin{aligned} U_i^C(x, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_i^C(x, \omega) e^{j\omega t} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega}] e^{-\gamma x} e^{j\omega t} d\omega \end{aligned} \quad (4.85)$$

Segundo Hyllén-Cavallius e Gjerlov[53], a forma mais conveniente da equação (4.85) para uso em computação digital, é:

$$U_i^C(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} -\text{Imag } U_i^C(x, \omega) \sin(\omega t) d\omega \quad (4.86)$$

A integração é feita numericamente pelo método trapezoidal. O passo de integração deve ser pequeno, normalmente de

2 a 5 Hz, os valores de  $\gamma_i$  são calculados para dez ou mesmo para vinte frequências, e os valores intermediários são obtidos por interpolação linear com o logaritmo da frequência.

Como o passo de integração é pequeno, não é possível realizar a integração para um espectro de frequência infinito, devido ao esforço computacional exigido, tanto de tempo de computação quanto de área na memória.

O fato de truncar o espectro em uma frequência angular " $\Omega$ ", faz com que na resposta temporal apareçam oscilações, também conhecidas como oscilações de Gibbs[57].

Utilizando o método anterior, e conhecendo a resposta da linha à cada frequência complexa, pode-se obter a resposta da linha à injeção de um degrau unitário. Conforme ilustra a figura 4.7, a onda final sofreu a ação da distorção e atenuação. Este método de inclusão dos efeitos da atenuação e distorção permitiram a elaboração do método de simulação usado neste trabalho.

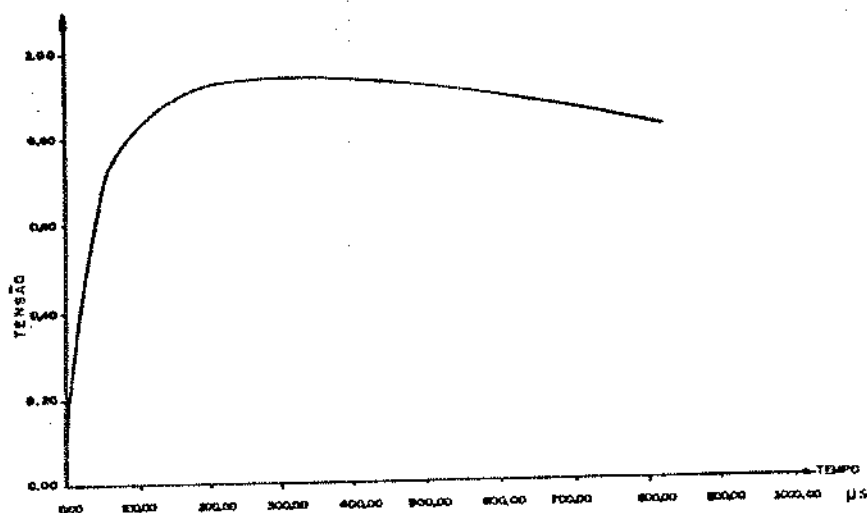


Fig. 4.7 - Resposta a um degrau unitário aplicado à uma linha trifásica de 230 kV com 100 KM tensão do modo - 1 x tempo em microsegundo. Faixa de frequência 9kHz (10 em 10 Hz).

#### 4.7 - Descontinuidade

A figura 4.8 indica a terminação de uma linha em um ponto de descontinuidade ( $x = r$ ). No tratamento que segue, procurar-se-á analisar o que ocorre com uma onda que incide sobre tal ponto.

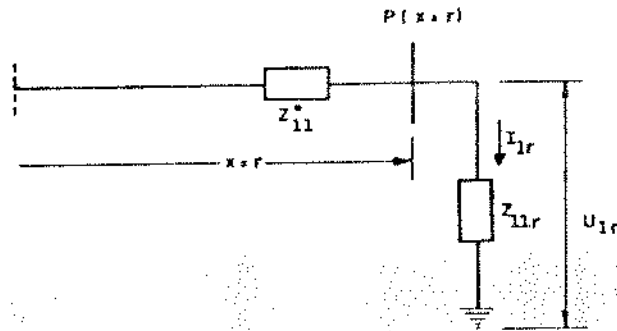


Fig. 4.8 - Diagrama Esquemático de uma Terminação da Linha

A tensão no ponto P ( $x = r$ ) é dada por:

$$U_{1r} = z_{11r} I_{1r} \quad (4.87)$$

Em  $x = r$ , tem-se a mesma tensão  $U_{1r}$  e corrente  $I_r$ . Podem também ser dadas por:

$$U_{1r} = A_1 e^{-\gamma_1 r} + B_1 e^{\gamma_1 r} \quad (4.88)$$

$$I_{1r} = \frac{A_1}{z_{11}^0} e^{-\gamma_1 r} - \frac{B_1}{z_{11}^0} e^{\gamma_1 r} \quad (4.89)$$

Substituindo (4.89) em (4.87) e igualando o resultado a (4.88), vem:

$$\frac{A_1}{z_{11}^0} e^{-\gamma_1 r} - \frac{B_1}{z_{11}^0} e^{\gamma_1 r} = \frac{A_1}{z_{11r}} e^{-\gamma_1 r} + \frac{B_1}{z_{11r}} e^{\gamma_1 r}$$

$$\left( \frac{A_1}{z_{11}^0} - \frac{A_1}{z_{11r}} \right) e^{-\gamma_1 r} = \left( \frac{B_1}{z_{11}^0} + \frac{B_1}{z_{11r}} \right) e^{\gamma_1 r}$$

$$B_1 e^{\gamma_1 r} = (K-1) A_1 e^{-\gamma_1 r} \quad (4.90)$$

Onde:

$$(K-1) = \frac{Z_{11r} - Z_{11}^0}{Z_{11r} + Z_{11}^0} \quad (4.91)$$

O fator  $(K-1)$  é conhecido como coeficiente de reflexão, uma vez que expressa a parcela da onda incidente onde é refletida e propaga no sentido reverso. Como pode ser observado, o coeficiente de reflexão  $(K-1)$  é expresso em (4.91), tem seu valor sempre menor ou igual a unidade.

A partir do coeficiente de reflexão, pode-se obter algumas conclusões importantes a respeito das terminações. Para tal, far-se-á aqui a análise de algumas terminações típicas:

- Terminação em curto-circuito: neste tipo de terminação

$Z_{11r} = 0$ , logo, o coeficiente de reflexão será:

$$(K-1) = \frac{0 - Z_{11}^0}{0 + Z_{11}^0} = -1$$

Isto significa que uma onda viajando em uma linha de impedância característica  $Z_{11}^0$  ao encontrar uma terminação em curto-circuito será totalmente refletida em sinal oposto.

Sendo a tensão terminal a soma das ondas incidentes e refletida, tem-se nesta situação uma tensão terminal nula, o que era de se esperar fisicamente.

- Terminação em uma impedância igual a impedância característica da linha:

Neste caso  $Z_{11r} = Z_{11}^0$ ; portanto:

$$(K-1) = \frac{Z_{11}^0 - Z_{11}^0}{Z_{11}^0 + Z_{11}^0} = 0$$

Logo, não haverá onda refletida.

Este resultado também era esperado, uma vez que não houve mudanças características do circuito no ponto de descontinuidade. A tensão terminal será igual à tensão da onda incidente.

- Terminação em circuito aberto:

Neste tipo de terminação,  $Z_{11r} = \infty$ , assim:

$$(K-1) = \frac{Z_{11r} - Z_{11}^C}{Z_{11r} + Z_{11}^C} = \frac{Z_{11r} (1 - Z_{11}^C/Z_{11r})}{Z_{11r} (1 + Z_{11}^C/Z_{11r})} =$$

$$= \frac{1 - Z_{11}^C/Z_{11r}}{1 + Z_{11}^C/Z_{11r}} \quad \text{para } Z_{11r} = \infty$$

$$(K-1) = \frac{1 - 0}{1 + 0} = 1$$

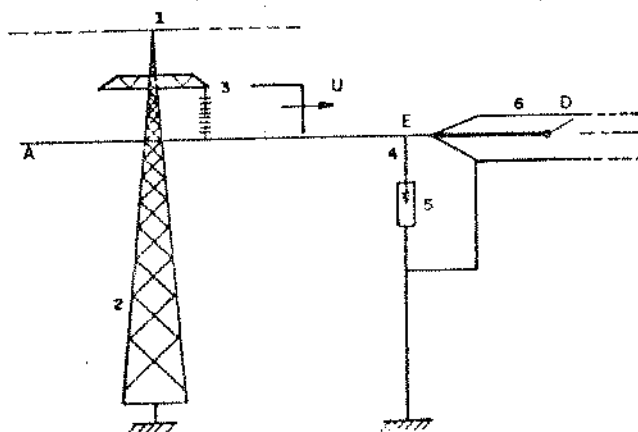
Portanto, a onda refletida terá mesma amplitude e mesmo sinal incidente. Assim, a tensão terminal será o dobro da tensão incidente.

Conceitos semelhantes podem ser aplicados para a propagação polifásica.

O fator K é conhecido como coeficiente de transmissão.

#### 4.8 - Desenvolvimento das Sobretensões num Barramento Isolado a $SF_6$ [1,13,16,45,53,63]

Com a finalidade de explicar o desenvolvimento de uma sobretensão típica em um barramento isolado a  $SF_6$  ligado a uma linha de transmissão aérea, considerar-se-á o sistema mostrado na figura 4.9, a seguir:



- 1 - Cabo pára-raios
- 2 - Torre
- 3 - Cadeia de Isoladores
- 4 - Ligação do pára-raios à fase
- 5 - Pára-raios
- 6 - Barramento isolado a  $SF_6$

Fig. 4.9 - Linha Aérea ligada a um Barramento Isolado a  $SF_6$

A tensão (U) proveniente da linha (A) chega, após um tempo de viagem  $T_1$ , até a entrada do barramento isolado a  $SF_6$  (ponto E). Neste ponto encontra-se uma impedância de surto consideravelmente menor, reduzindo a amplitude do surto. Uma tensão de menor valor (KU) é transmitida para dentro do barramento isolado a  $SF_6$ .

Admitir-se-á, para efeito de simplificação, que a onda de sobretensão que chega ao barramento isolado a  $SF_6$ , pela linha, é um degrau de tensão (de valor  $U$ ). A impedância de surto da linha aérea (cerca de 300 ohms) é consideravelmente maior que a impedância de surto do barramento isolado a  $SF_6$  (cerca de 60 ohms). Então, ocorrerá uma reflexão de onda na entrada do barramento isolado a  $SF_6$ . Com base nestas impedâncias, tem-se que o coeficiente de transmissão ( $K$ ) é de  $1/3$  e o de reflexão ( $K-1$ ) de  $-2/3$ .

O desenvolvimento das tensões no barramento isolado a  $SF_6$  está ilustrado nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12.

A tensão na entrada do barramento ( $U_E$ ) e na chave aberta ( $U_D$ ) aumenta com o número de reflexão nestes respectivos pontos ( $n$ ), como descrito pelas equações mostradas a seguir:

$$\frac{U_E}{U} = K + K (2 - K) \sum_{m=2}^n (1 - K)^{m-2} \quad (4.92)$$

$$\frac{U_D}{U} = 2 K \sum_{m=1}^n (1 - K)^{m-1} \quad (4.93)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{U_E}{U} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{U_D}{U} \right) = 2,0 \quad (4.94)$$

As equações (4.92) e (4.93) são válidas apenas para o caso em que não ocorre o disparo de pára-raios. O diagrama de Lattice correspondente é mostrado na figura 4.11.

Da equação (4.93) e também da figura 4.12 pode ser visto que a tensão na chave aberta é duas vezes a tensão transmitida ( $2KU$ ).

Assim, o pior caso ocorre se a onda transmitida  $KU$  é suficiente para disparar o pára-raios. Neste caso a tensão na chave aberta será então duas vezes a tensão de disparo do pára-raios (isto é, a tensão na chave aberta é duas vezes o nível de proteção do pára-raios).

Por outro lado, se o pára-raios dispara por causa do crescimento da tensão (no ponto E) devido à primeira onda de tensão refletida no ponto D, a máxima tensão no ponto D excederá o nível de proteção do pára-raios pelo fator M:

$$M = \frac{2(2 - K)}{3 - K} \quad (4.95)$$

No nosso caso,  $M = 1,25$ .

Considerar-se-á que a tensão da barra após o disparo do pára-raios, se mantenha constante e igual ao seu valor de disparo. Esta forma de se analisar o efeito da operação dos pára-raios facilita o entendimento e é usada normalmente no estudo da teoria de sobretensões, conforme pode ser visto em [53,63].

Também com a finalidade de entender o desenvolvimento das tensões numa subestação isolada a  $SF_6$ , comparar-se-á os conceitos descritos anteriormente, onde se imaginou que a onda de tensão que chega pela linha tem inclinação infinita (ou seja, é um degrau), com uma outra situação onde, agora, a onda chega à subestação a  $SF_6$ , que é uma rampa com o tempo de

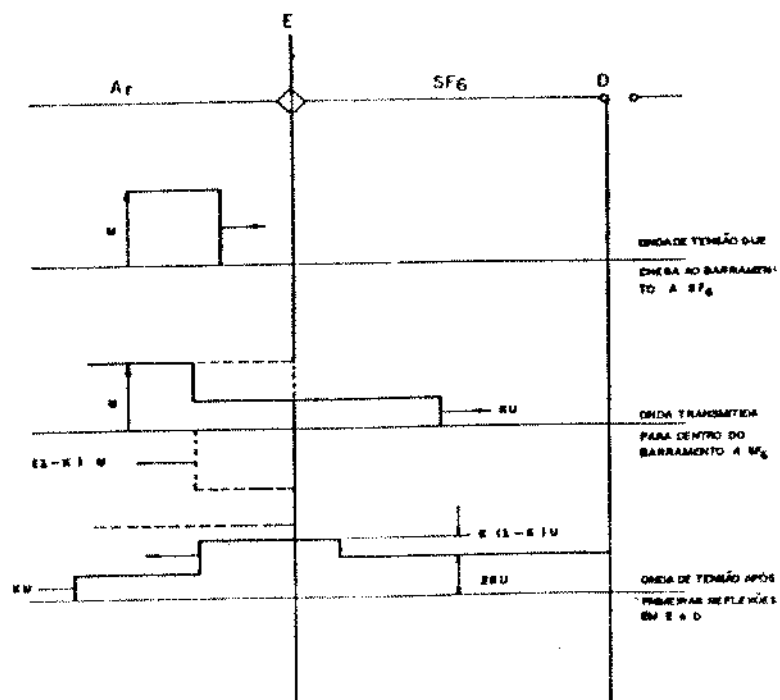


Fig. 4.10 - Desenvolvimento das Tensões  
ao longo do Barramento Isolado a  $SF_6$ .

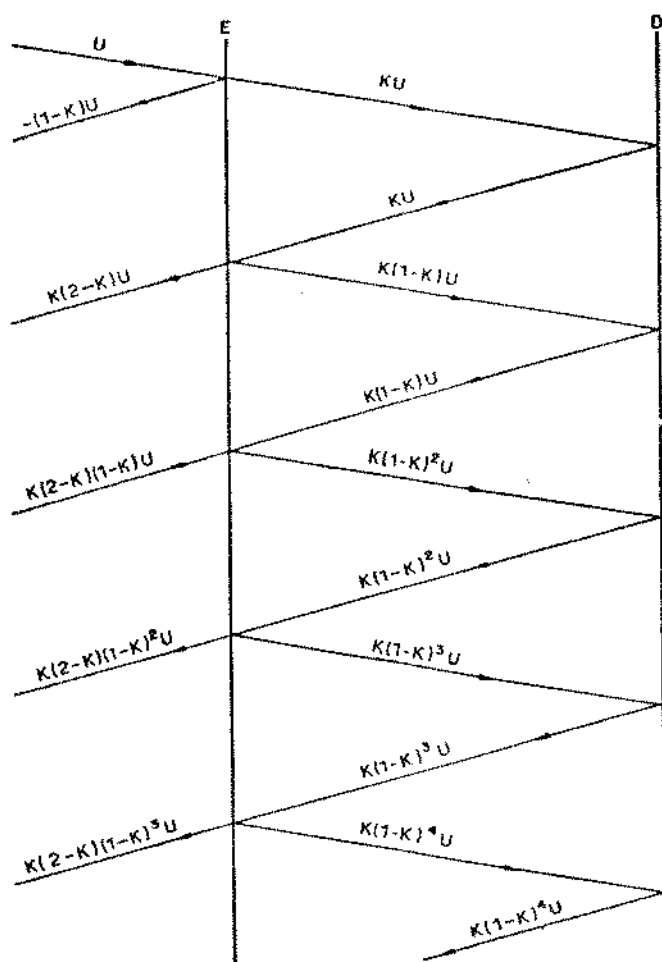


Fig. 4.11 - Diagrama de Lattice mostrando como se desenvolvem as tensões ao longo do Barramento Isolado a  $\text{SF}_6$ .

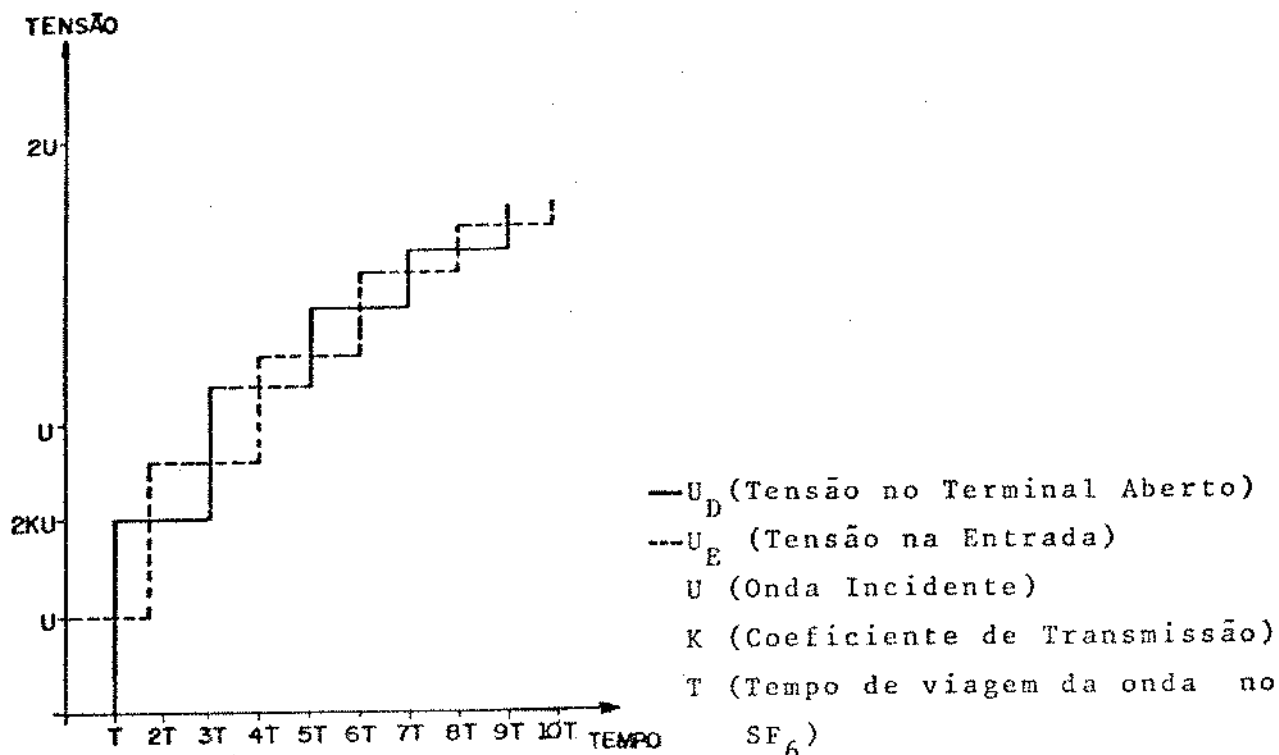


Figura 4.12 - Tensões na Entrada ( $U_E$ ) e no Final ( $U_D$ ) do Barramento Isolado a  $SF_6$ .

subida superior a  $2T$ , onde  $T$  é o tempo de viagem da onda pelo barramento isolado a  $SF_6$  que se está considerando como exemplo. Esta segunda situação é mais próxima da realidade. A formação teórica das tensões é ilustrada na figura 4.13 para o caso de uma taxa constante ( $S$ ) de crescimento da onda incidente. As tensões mostradas na figura 4.13 são expressas também pelas equações (4.96), (4.97) e (4.98) abaixo. Antes da primeira reflexão ( $0 \leq t \leq 2T$ ) a tensão ( $U_E$ ) na entrada do barramento isolado a  $SF_6$  é:

$$U_E = K S \cdot t \quad (4.96)$$

A um tempo  $t$ , após  $n$  reflexões na entrada, a tensão  $U_E$  é:

$$2(n-1) \leq \frac{t}{T} < 2n$$

$$U_E = KS \left[ t + \sum_{m=2}^n (1-K)^{m-2} (2-K) [t - 2(m-1)T] \right] \quad (4.97)$$

A um tempo  $t$ , após  $n$  reflexões no lado da chave aberta, a tensão  $U_D$  é:

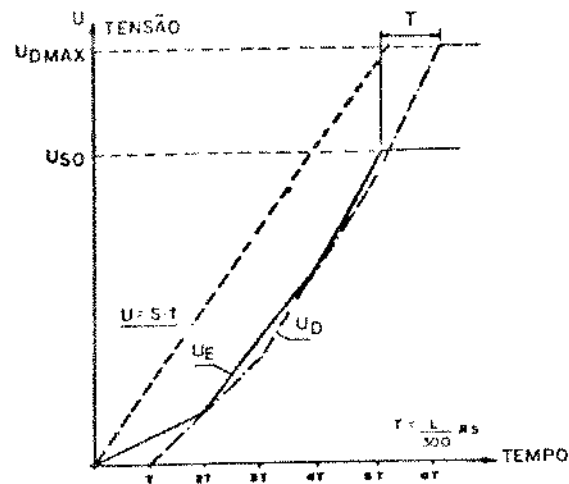
$$(2n-1) \leq \frac{t}{T} < (2n+1)$$

$$U_D = 2KS \sum_{m=1}^n (1-K)^{m-1} [t - (2m-1)T] \quad (4.98)$$

Pode ser visto das equações anteriores que as tensões no barramento isolado a SF<sub>6</sub> que se está usando como exemplo, são dependentes dos seguintes parâmetros:

- inclinação (S) da onda de tensão que chega pela linha;
- relação das impedâncias de surto, ou seja, o coeficiente de transmissão K;
- comprimento do barramento isolado a SF<sub>6</sub>, ou do tempo correspondente T de viagem da onda através deste mesmo barramento.

A Figura 4.13 a seguir, mostra que o crescimento da tensão é constante entre cada duas reflexões no interior do barramento isolado a SF<sub>6</sub> e que este crescimento atingirá um máximo de 2S após infinitas reflexões.



$U_E$  - Tensão na entrada do  $SF_6$

$U_{s0}$  - Tensão de disparo do pára-raios

$U_D$  - Tensão no terminal aberto

$U$  - Onda de tensão incidente (rampa)

$L$  - Comprimento do barramento isolado a  $SF_6$  em metros

$S$  - Inclinação da onda incidente

Fig. 4.13 - Tensões na entrada  $U_E$  e no final ( $U_D$ ) do Barramento Isolado a  $SF_6$  - Onda Incidente ( $U$ ) sob a forma de rampa.

Já após um certo número de reflexões dentro do compartimento isolado a  $SF_6$ , a inclinação das tensões no seu interior é maior que a inclinação da onda incidente.

A figura 4.13 mostra, também, que o pára-raios ao disparar, mantém a sua tensão constante e igual ao valor da tensão de disparo, conforme já explicado anteriormente neste mesmo item.

Observa-se que o efeito do disparo do pára-raios atinge a chave aberta em um intervalo de tempo de viagem correspondente a  $T$ , mais tarde. Durante este tempo a tensão no terminal aberto cresceu de valor igual à sua inclinação naquele período vezes  $T$ . Desta forma, entende-se porque quanto mais longo o barramento isolado a  $SF_6$  maior será a diferença das tensões no terminal aberto e na entrada.

Deve ficar entendido que, em resumo, o objetivo do exposto aqui é apenas dar uma idéia de como as tensões se desenvolvem no interior de um barramento isolado a  $SF_6$ . Numa subestação real este cálculo se torna mais complicado e somente poderá ser feito com o auxílio de um programa de transitórios, conforme mostrado na Parte 2 deste trabalho.

## CAPÍTULO V

### LIMITAÇÃO DE SOBRETENSÕES

## CAPÍTULO V

## LIMITAÇÃO DE SOBRETENSÕES

## 5.1 - Introdução

Os dispositivos de proteção contra sobretensões utilizados em subestações são pára-raios convencionais, pára-raios de óxido de zinco, ambos aéreos ou encapsulados, e os centelhadores. Estes equipamentos se destinam à proteção quando da chegada da sobretensão pela linha de transmissão. Para proteção contra incidência direta de raios são utilizados blindagem através de cabos ou pára-raios tipo Franklin.

Os níveis de isolamento (para impulsos de manobra, ou impulsos atmosféricos) são padronizados (ABNT, ANSI, IEC) e não deverão ser atingidos pelas máximas sobretensões que poderão ocorrer no interior das subestações. Deverá existir uma faixa de segurança entre as máximas sobretensões encontradas no interior da subestação e os níveis de isolamento da mesma. Este fator de segurança deverá cobrir situações, tais como envelhecimento de isolamentos, possíveis imprecisões nas condições de sobretensões impostas à subestação e o efeito da não consideração da tensão à frequência industrial ao se calcular as sobretensões, etc.

## 5.2 - Descargas Atmosféricas - Valores Padrão

As sobretensões atmosféricas que atingem uma subestação poderão ser provenientes de uma descarga direta, ou de uma

descarga indireta, isto é, aquelas que atingem o cabo pára-raios da linha e, posteriormente, provocam uma descarga do isolador do condutor de fase devido à elevação de tensão na torre em relação à tensão na fase [40,41,63].

O valor da corrente mais elevada que atinge um cabo fase de uma linha de transmissão pode ser calculado através do modelo eletrogeométrico [15,16] da linha, desde que se conheça a geometria de uma torre típica da linha que se liga à subestação. Por outro lado, a literatura disponível sobre o assunto [13,45,75] apresenta uma tabela recomendando valores, previamente definidos, de ondas de tensão que devem ser utilizados nos estudos de coordenação de isolamento para diferentes níveis das subestações.

Os pesquisadores envolvidos com os estudos de coordenação de isolamento de subestações, de origem européia e, principalmente, congregados em torno da CIGRÉ [13,45,73] apresentam uma tabela (reproduzida a seguir na Tabela 5.1) com os valores de ondas incidentes que se deve utilizar nos estudos. A apresentação destes valores não é acompanhada com a descrição da maneira como foram obtidos. A outra forma de se obter as ondas incidentes que se apresenta a seguir, obtidas pelo modelo eletrogeométrico, parece ser mais adequada.

| TENSÃO MAIS<br>ALTA DO SISTEMA<br>(kV) | ONDA INCIDENTE                          |                   |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|
|                                        | TAXA DE<br>CRESCIMENTO<br>(kV/ $\mu$ s) | AMPLITUDE<br>(kV) |
| 800                                    | 1200                                    | 3000              |
| 550                                    | 1200                                    | 2500              |
| 420                                    | 1200                                    | 1800              |
| 362                                    | 1200                                    | 1500              |
| 245                                    | 1000                                    | 1200              |

Tabela 5.1 - Valores de Onda Incidente Recomendados para serem utilizados nos Estudos de Coordenação de Isolamento de Subestação Isoladas [13,45,75].

### 5.3 - Limitação das sobretensões por cabos pára-raios e aterramento das linhas conectadas à subestação

Uma proteção mais efetiva, por meio de cabos pára-raios, das linhas ligadas às subestações, até uma distância de 1 a 2 km, e uma melhoria proposital do aterramento das torres colocadas dentro desta distância constitui um método mais eficiente para se reduzir as sobretensões atmosféricas que atingem a subestação.

A proteção mais efetiva a que se refere é conseguida colocando-se torres especiais (ou pelo menos diferentes das que se utiliza na maior parte da linha), de forma a se dar uma maior proteção aos cabos fase da linha de transmissão. Estas

"torres especiais" poderiam ter, por exemplo, um número maior de cabos pára-raios em relação aos cabos fase.

Com a melhoria do aterramento das torres, tem-se menor probabilidade de que as descargas que atingem os cabos pára-raios sejam causadoras de descargas dos isoladores das linhas[63]. Com isso, não haverá a condução de ondas de sobretensão através dos cabos fase, por descargas indiretas.

Este tipo de limitação das sobretensões que incidem na subestação diminui o valor das máximas sobretensões que se desenvolvem no seu interior. A utilização deste método de limitação deve ser avaliado para cada projeto, em particular.

#### 5.4 - Cálculo da Sobretensão e Sobrecorrente de Descargas Atmosféricas através do Modelo Eletrogeométrico

Um método simplificado de se calcular as máximas correntes de descargas atmosféricas que podem atingir o condutor fa se leva em conta o modelo eletrogeométrico da linha. Inúmeros pesquisadores estudaram a falha de blindagem das linhas de transmissão[4,6,14,15 e 16].

O método que será descrito a seguir foi apresentado por Gordon W. Brown[15] e por E.R. Whitehead & Gordon W. Brown[16].

Este método permite o cálculo das máximas correntes de descargas atmosféricas que atingem o cabo fase com bastante precisão e já foi, inclusive, comprovado em cerca de 120.000 km x ano de linhas de transmissão, segundo pesquisa publicada pelo CIGRÉ, em 1974.

A falha de blindagem de linhas de transmissão é função da máxima distância de incidência que é governada pela configuração geométrica da linha de transmissão (ver figuras 5.1 e 5.2).

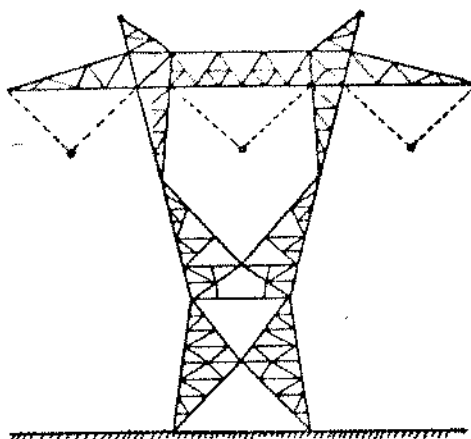


Fig. 5.1 - Torre típica de uma linha de transmissão de 500 kV, ligada à subestação, com a qual se mostra o cálculo da máxima corrente de incidência pelo Modelo Eletrogeométrico.

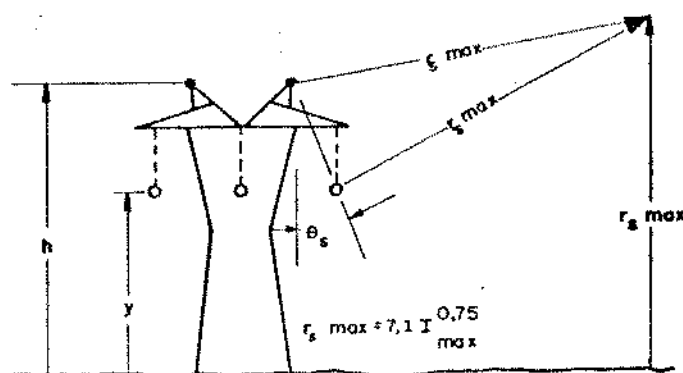


Fig. 5.2 - Geometria da Torre, mostrando-se os parâmetros para cálculo da falha de blindagem.

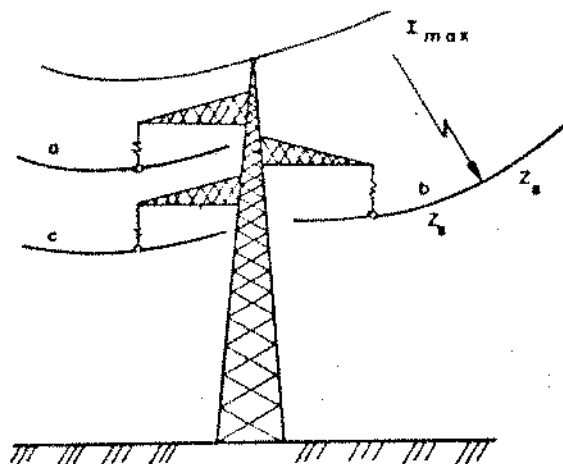


Fig. 5.3 - Descarga Atmosférica no condutor fase (Descarga Direta)

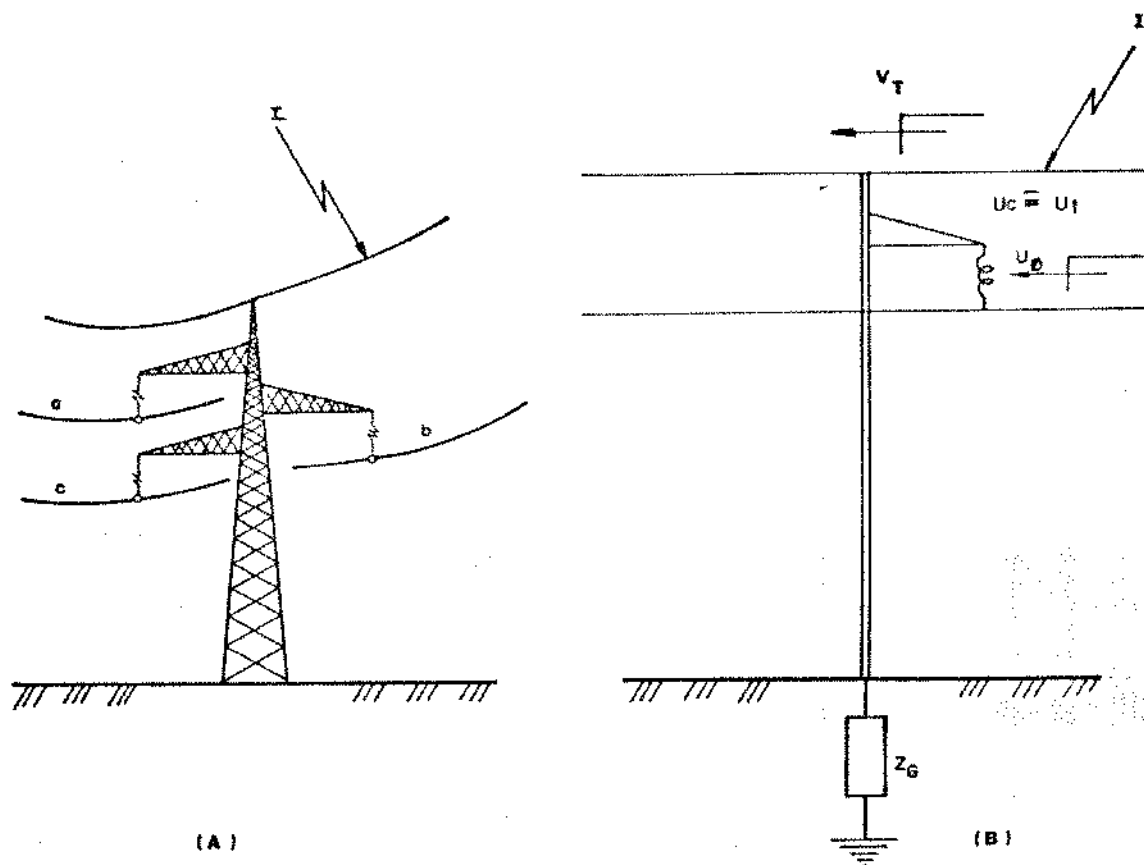


Fig. 5.4 - Descarga Atmosférica no Cabo Guarda (Descarga Indireta)

#### 5.4.1 - Descargas Diretas

A falha da blindagem diz respeito às descargas atmosféricas que passam pelos cabos pára-raios e atingem os cabos fase. Estas falhas de blindagem podem ou não provocar o desligamento das linhas.

O método apresentado mostra que a falha de blindagem é uma função apenas da máxima distância de incidência.

Vários cálculos foram feitos para torres com altura até 50 m, ângulos de cobertura até 45° e uma grande variedade de alturas dos condutores até o solo.

A máxima distância de incidência ( $r_{\max}$ ) pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$r_{\max} = \frac{h + y}{2 (1 - \sin \theta_s)} \quad (5.1)$$

Onde:

$r_{\max}$  = distância máxima de incidência (metros)

$h$  = altura do cabo pára-raios (metros)

$y$  = altura do cabo fase (metros)

$\theta_s$  = ângulo de proteção

A figura 5.2 mostra as grandezas envolvidas na equação 5.1.

Da mesma forma, a máxima corrente que atinge o cabo fase, conforme já referido anteriormente, é uma função da máxi-

ma distância de incidência. Estas duas grandezas são relacionadas pela fórmula abaixo:

$$r_{\max} = 7,1 \cdot I_{\max}^{0,75} \quad (5.2)$$

Onde:

$r_{\max}$  = distância máxima de incidência em metros  
 $I_{\max}$  = corrente máxima que incide no condutor fase em kA

Conhecendo-se a geometria da torre (parâmetros  $h$ ,  $y$ ,  $\theta_s$ ) calcula-se, através da fórmula (5.1) a máxima distância de incidência ( $r_{\max}$ ). Posteriormente, conhecida a máxima distância de incidência, calcula-se, através da fórmula (5.2) a máxima corrente que incide sobre o condutor fase ( $I_{\max}$ ).

Para exemplificar o que foi exposto, considere-se o caso em que:

$h = 40$  metros

$y = 25$  metros

$\theta_s = 21^\circ$

De (5.1):  $r_{\max} = 50,65$  metros

De (5.2):  $I_{\max} = 13,64$  kA.

Uma vez calculada a máxima corrente de incidência ( $I_{\max}$ ) e conhecendo-se a impedância de surto do condutor fase ( $Z_s$ ), pode-se calcular a máxima sobretensão, que se propagará sobre a linha e incidirá na subestação, provocada por uma queda direta, conforme ilustração da fórmula 5.3.

$$U_{\max} = I_{\max} \cdot \frac{Z_s}{2} \quad (5.3)$$

Onde:

$U_{\max}$  = máxima sobretensão que incidirá na subestação - em kV

$I_{\max}$  = máxima corrente de incidência - em kA

$Z_s$  = impedância de surto da linha - em  $\Omega$ .

Conhecendo-se a geometria da linha, pode-se calcular a impedância característica da mesma, através da fórmula abaixo, que é encontrada em inúmeras referências[83]:

$$Z_s = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot H}{R} \quad (5.4)$$

Onde:

$H$  = altura média do condutor fase da linha - em metros

$R$  = raio do condutor fase equivalente - em metros

A altura média do condutor fase na linha pode ser calculado pela fórmula abaixo[28]:

$$H = y - \frac{2}{3} (y - y') \quad (5.5)$$

Onde:

$y$  = altura do condutor fase na torre, em metros

$y'$  = altura do condutor fase no meio do vão, em metros

$H$  = altura média do condutor fase na linha, em metros.

Para exemplificar, considere-se o caso a seguir, onde:

$$I_{\max} = 13,64 \text{ kA (calculado anteriormente)}$$

$$y = 25 \text{ metros}$$

$$y' = 22 \text{ metros}$$

$$R = 21,6 \text{ cm}$$

$$\text{De (5.5): } H = 23 \text{ metros}$$

$$\text{De (5.4): } Z_s = 320 \text{ ohms}$$

$$\text{De (5.3): } U_{\max} = 2182 \text{ kV}$$

O valor da sobretensão máxima incidente devido a uma descarga direta terá um limite superior, que é o valor do nível básico de isolamento da linha (BIL), isto é, não se terá ondas incidentes na subestação maiores que o BIL da linha.

Pode-se calcular, para efeito de comparação, a máxima corrente de descarga atmosférica ( $I_{\text{BIL}}$ ) que provoca descarga nos isoladores:

$$I_{\text{BIL}} = \frac{2 \cdot \text{BIL}}{Z_s} \quad (5.6)$$

$$\text{BIL} = \text{CFO} (1 + 3\tau) \quad (5.7)$$

Onde:

BIL = nível básico de isolamento da linha

$I_{\text{BIL}}$  = corrente máxima de descarga que provoca danos nos isoladores

CFO = tensão crítica de descarga disruptiva

$Z_s$  = impedância de surto da linha

$\tau$  = desvio padrão da suportabilidade para impulsos atmosféricos = 3%

Supondo que para a linha anteriormente citada, de tensão nominal 500 kV, tem-se:

$$CFO = 2100 \text{ kV}$$

$$Z_s = 320 \text{ ohms}$$

$$r = 0,03$$

$$\text{De (5.6) e (5.7): } I_{BIL} = 14,30 \text{ kA}$$

No exemplo que se apresentou:

$$I_{BIL} > I_{max}$$

Assim podemos observar que o sistema admite a descarga direta, caso ocorra, sem causar danos nos isoladores.

#### 5.4.2 - Descargas Indiretas [9,36,40,41,63]

Uma vez calculado, através do modelo eletrogeométrico da linha, o valor da maior corrente que pode incidir no cabo fase, as descargas atmosféricas de maior valor que vierem atingir a linha incidirão sempre no cabo guarda, no meio de um vão ou no topo da própria torre.

Os estudos devem utilizar o maior valor de corrente possível de acontecer. Utilizando-se das estatísticas apresentadas na Tabela 5.2, será considerado na Parte 2 um valor de 200 kA. As referências [13,62] utilizaram 150 kA, para linhas de tensão nominal 500 kV. Como o isolamento das subestações a  $SF_6$  não é auto-regenerativo [32], será considerado nos estudos da Parte 2 um valor mais conservativo que pode, perfeitamente, ser reavaliado.

| AMPLITUDE DE<br>CORRENTE (kA) | PROBABILIDADE DA DESCARGA<br>EXCEDER O VALOR AO LADO (%) |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 140                           | 3                                                        |
| 150                           | 2,5                                                      |
| 160                           | 2,0                                                      |
| 180                           | 1,5                                                      |
| 200                           | 1,0                                                      |
| 225                           | 0,7                                                      |
| 250                           | 0,5                                                      |

Tabela 5.2 - Valores de Correntes de Descargas Atmosféricas e probabilidades de se exceder a este valor [21]

Como ilustração é mostrado, a seguir, como se processa a incidência das ondas de sobretensão, na subestação isolada a SF<sub>6</sub>, partindo-se de descargas indiretas.

Ao acontecer uma descarga indireta, o potencial no topo da torre ( $U$ ) é computado. De um modo geral, a tensão no braço da torre  $U_c$  seria um pouco menor que  $U_t$ , mas considera-se  $U_c = U_t$ .

Devido ao campo elétrico do acoplamento entre o cabo guarda e o cabo fase, haverá uma tensão ( $U_\phi$ ) induzida neste último (ver Figura 5.4).

A tensão entre a cadeia de isoladores será dada por:

$$U_i = U_c - U_\phi = U_t - U_\phi = U_t - c \cdot U_t = U_t (1 - c) \quad (5.8)$$

Onde  $c$  é o fator de acoplamento entre o cabo pára-raios

e o condutor da fase. Um valor típico deste fator é 0,25.

Assim:

$$U_i = 0,75 U_t \quad (5.9)$$

Se a tensão  $U_i$  que se tem nos terminais dos isoladores for maior que a sua tensão crítica disruptiva (CFO), haverá descarga disruptiva através dos mesmos.

Entre os fatores que influenciam  $U_i$ , podemos citar:

- impedância de surto da torre;
- resistência de aterramento;
- fator de acoplamento em cabo guarda e fase;
- taxa de crescimento da corrente da descarga atmosférica;
- amplitude da corrente da descarga atmosférica.

Para fins ilustrativos, mostra-se na figura 5.5, a seguir, a variação da tensão nos terminais da cadeia de isoladores como função da resistência de pé de torre, para uma corrente de 100 kA de pico e com tempo de crista variável, conforme estudo apresentado na referência[21].

51961 BC

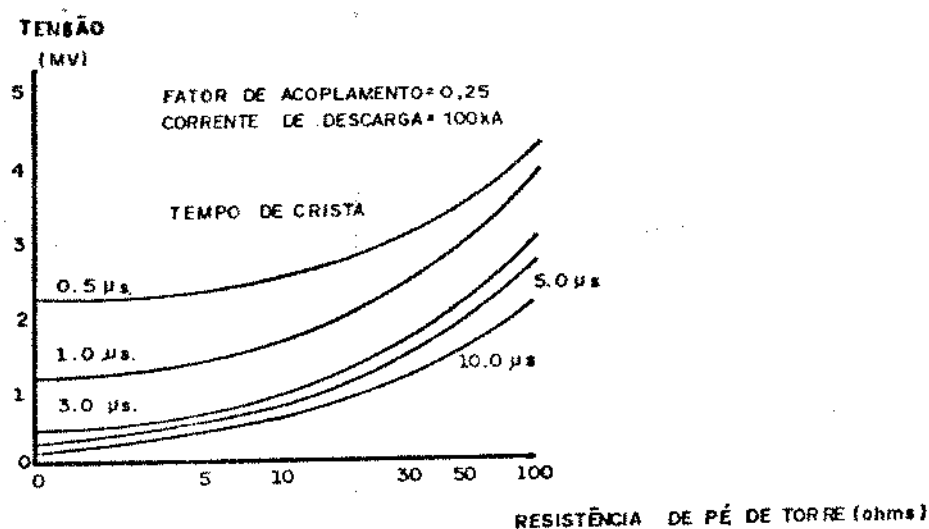


Fig. 5.5 - Tensão através da Cadeia de Isoladores em função da resistência de Pé de Torre[21].

Os surtos de tensão que se desenvolvem nas linhas, devido às descargas atmosféricas, são funções complexas da própria descarga, da forma e magnitude da corrente, das dimensões e altura dos vários componentes da linha, da exposição da linha ou da blindagem por árvores ou outros métodos, da isolamento da linha e da resistência de aterramento das estruturas.

Fatores que não foram considerados aqui, são os efeitos de indução na linha devido à própria descarga, os efeitos da corrente de pré-descarga que pode se desenvolver entre condutores paralelos antes do "Flashover" e que alteram a indução eletrostática e efeito não lineares como o crescimento das dimensões efetivas do condutor devido ao efeito corona, quando eles estão a um potencial elevado.

### 5.5 - Limitação das Sobreensões por Centelhadores

Não é prática comum, no Brasil, utilizar-se de centelhadores para proteção de subestações, mesmo convencionais. O centelhador é, de certa forma, o estágio inicial (precursor) dos para-raios e se constitui de um "gap" que possui tensões de disparo, isto é, tensões acima das quais passará a haver uma condução de corrente através do mesmo. Assim como nos para-raios, os centelhadores possuem tensão de disparo para surtos de manobra e surtos atmosféricos.

A diferença para os para-raios vem do fato de que o centelhador é constituído apenas do "gap", isto é, não possui em série com o mesmo nenhuma resistência não linear.

Não é recomendável que a proteção de subestações isoladas a  $SF_6$  seja feita por centelhadores. Isto é explicável pelo fato de que a tensão de disparo dos centelhadores cresce muito quando a frente da onda de tensão (que ele deve cortar) diminui. Em outras palavras, não se consegue manter sempre a mesma margem de proteção entre as máximas sobreensões que se terá dentro do compartimento do barramento isolado a  $SF_6$  (protegido por centelhadores) e os níveis de isolamento do próprio equipamento protegido, na medida em que a forma da tensão no ponto onde está instalado o centelhador varia.

Apesar destes conceitos, já é adotada no Japão[28] a proteção de subestações isoladas a  $SF_6$  com centelhadores, sob a alegação de que os mesmos são mais econômicos que os para-raios.

Estes centelhadores aplicados pelos japoneses (colocados na entrada da subestação) são do tipo especial, colocados dentro do próprio compartimento do barramento isolado a  $SF_6$ .

Entretanto, outros pesquisadores consideram que a adoção de centelhadores, ao invés de pára-raios, para proteção das subestações isoladas a  $SF_6$ , é questionável.

Pode ser visto na referência[62] que o nível de isolamento das subestações japonesas protegidas por centelhadores é de 1800 kV (superior aos padronizados para sistema de 500 kV) e, naturalmente, a adoção de um maior nível de isolamento para surtos atmosféricos (no caso japonês de 1800 kV, ao invés dos 1425 kV, da IEC, e dos 1550, da ANSI) representa um custo adicional que não se acredita compensar a utilização de centelhadores ao invés de pára-raios. Esta posição sobre o assunto pode ser vista na referência[13].

Um outro importante problema que aparece na utilização de centelhadores para proteção de subestações isoladas a  $SF_6$  são as sobretensões oscilatórias de alta frequência que aparecem na subestação quando os centelhadores disparam.

É necessário examinar se os equipamentos isolados a  $SF_6$  e os demais a eles conectados (Divisor Capacitivo de Potencial - DCP, transformadores de potência, etc.) suportam este tipo de tensão.

A disposição dos elétrodos dos centelhadores da figura 5.6 - centelhadores de "pontas" - destina-se a provocar um alongamento do arco, da zona de menor distância entre eletro-

dos, para a zona das pontas, permitindo a extinção do arco, no caso de correntes de arco pouco intensas. O poder de "corte" da corrente subsequente à descarga, para esta configuração é, em média tensão, da ordem, de 50A (valor eficaz), possibilitando a extinção natural da corrente, para interrupção entre uma fase e a terra, em redes de média tensão pouco extensas e com neutro isolado, com neutro aterrado por reatância, ou por impedância elevada.

A disposição da figura 5.6.c. com um eletrodo intermediário, tem por finalidade provocar que, no caso da passagem de insetos ou aves na zona entre eletrodos, os dois eletrodos principais sejam "curto-circuitados", podendo ser curto-circuitada uma das metades da zona entre eletrodos e sendo a outra metade adequada para suportar a tensão normal de serviço à frequência industrial.

As características de proteção dos centelhadores são, normalmente, baseadas em ensaios quanto ao seu comportamento para diversos tipos de sobretensão, a seco e sob chuva (para centelhadores de montagem exterior).

Na figura 5.7 indica-se uma forma de centelhador usada por vezes em terminais de linhas aéreas de tensão elevada, de 230 kV, 330 kV, 400 kV, 500 kV, para limitar as sobretensões atmosféricas e de manobra muito elevadas transmitidas pela linha às subestações terminais.

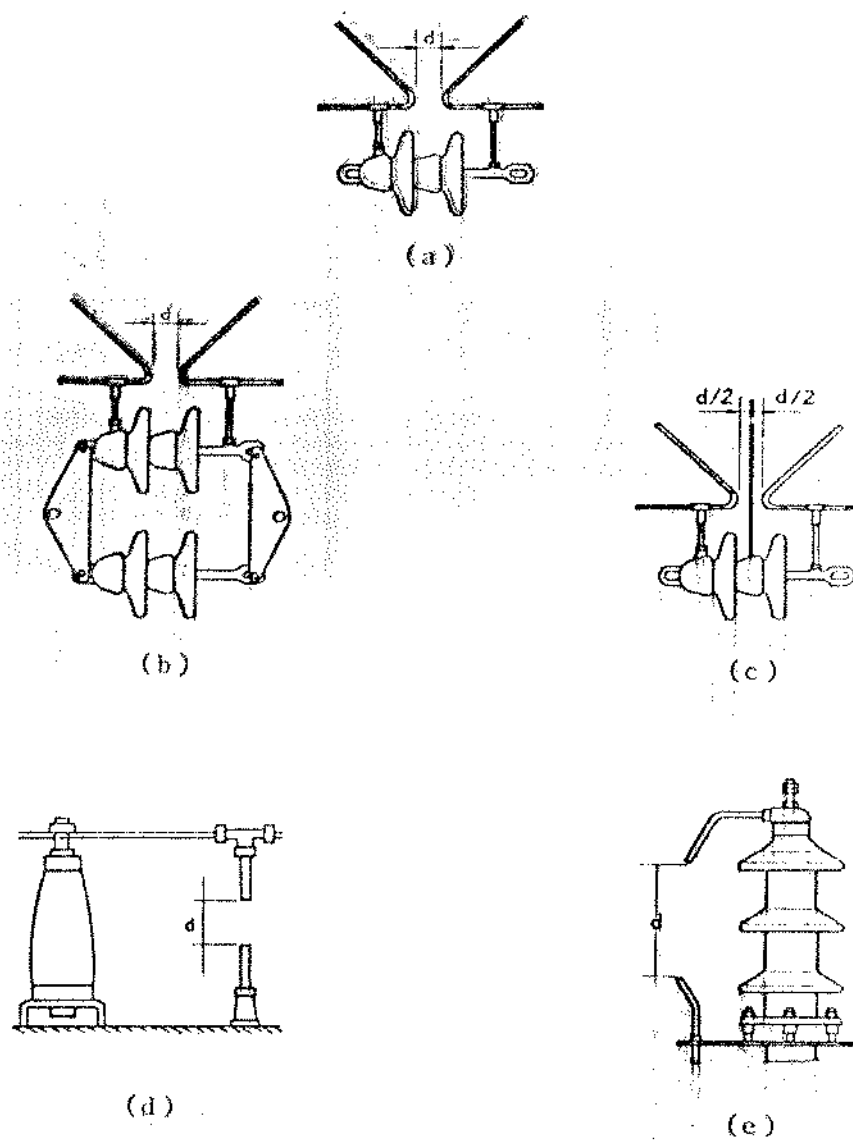


Fig. 5.6 - Tipos de Centelhadores Comumente utilizados em média tensão.

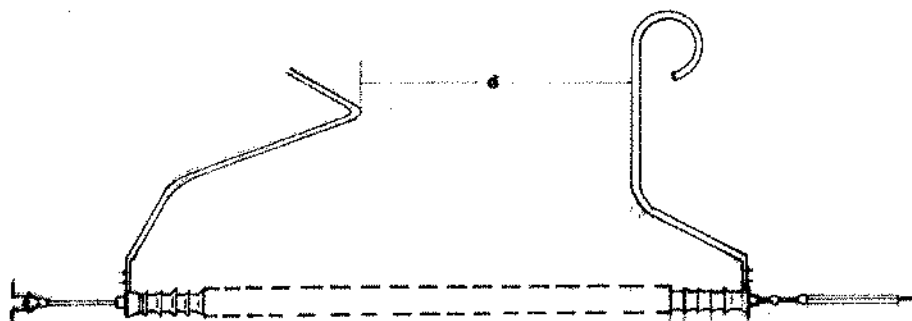


Fig. 5.7 - Centelhador usado em Alta Tensão

#### 5.6 - Pára-Raios como Limitador de Sobretensões

Os pára-raios convencionais "cortam" as sobretensões que penetram na subestação, de acordo com a sua tensão de disparo e as controlam de acordo com a sua curva de descarga (tensão x corrente).

Apenas com efeito ilustrativo, como é feito em inúmeras referências que tratam do assunto, mostrar-se-á o efeito da atuação dos pára-raios num sistema.

Um pára-raio pode ser imaginado, na sua forma mais simples como sendo um centelhador ("Air-Gap") em série com uma resistência não linear, cuja função é de limitar a corrente.

Na realidade, o "Gap" é constituído por uma série de "Gaps" com um gradiente controlado tal que os gaps conduzirão à uma mesma tensão pré-determinada.

Após a descarga "sparkover" a corrente através do pára-raio será limitada pela resistência não linear do pára-raio e

pela tensão "Gap" (queda de tensão no Gap), assim como qualquer corrente fluindo através de uma impedância.

A corrente é conduzida através de uma série de Gaps e quando a corrente passa por zero, o arco pode ser extinto pelo pára-raio e cessará de conduzir.

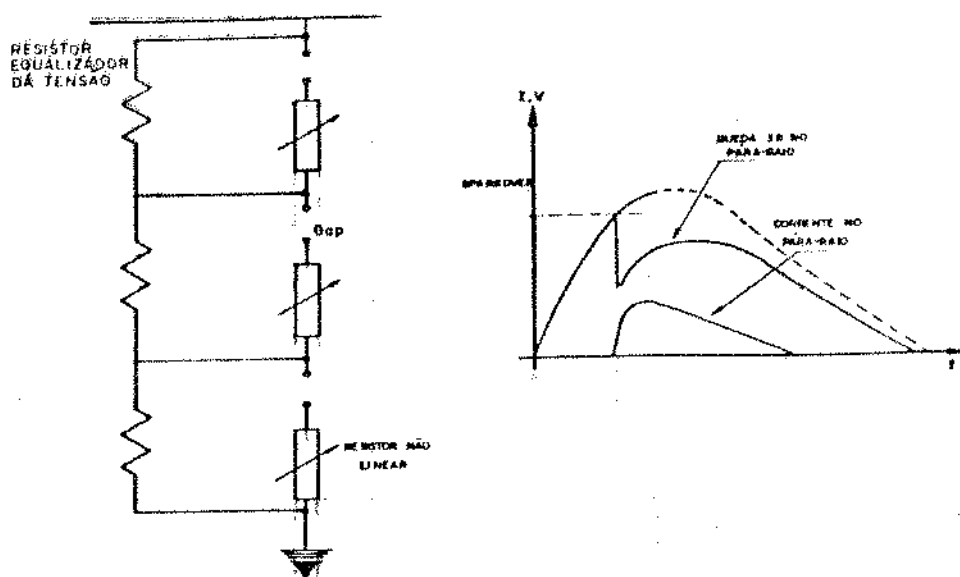
Normalmente em transformadores de alta tensão, os pára-raios são montados diretamente nos terminais. Este procedimento garante, essencialmente, perfeita proteção até o ponto em que o pára-raio estiver em perfeitas condições.

Em alguns equipamentos de baixa tensão ou no caso de equipamentos de menor importância, tal como um transformador de potencial, um pára-raio pode ser usado para proteger mais do que um componente. Quando isto é feito, é importante poder avaliar o "alcance de proteção" do pára-raio.

Qualquer surto entrando na subestação mostrada na figura 5.9 encontrará em primeiro plano o pára-raio.

O pára-raio irá descarregar e conduzir a corrente, o que manterá o nível de surto abaixo de um determinado valor.

Poder-se-ia julgar que o nível do surto no transformador não seria maior que a tensão no ponto de aplicação do pára-raio, no entanto, sob o ponto de vista de uma onda viajante deveríamos esperar o dobro da tensão no transformador.



a - Diagrama esquemático b - Diagrama de tensões e correntes no pára-raios

Fig. 5.8 - Representação do Pára-Raios

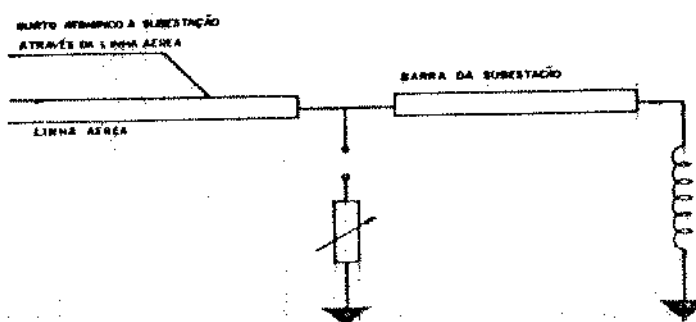


Fig. 5.9 - Posição típica do Pára-Raios e o equipamento protegido.

### 5.6.1 - Localização dos pára-raios

A localização dos pára-raios é um dos mais importantes parâmetros: A distância que o pára-raios é colocado do barramento que está se protegendo influencia diretamente no valor das sobretensões que se encontra (mais próximas do barramento menores serão as sobretensões). Os barramentos isolados a  $SF_6$  apresentam a vantagem de poderem receber os pára-raios chamados de blindados (ou encapsulados) que são colocados dentro do próprio compartimento que contém  $SF_6$ . Com estes equipamentos, a redução das sobretensões a níveis compatíveis com as classes de isolamento normalizadas, será quase sempre conseguida na Coordenação de Isolamento.

Na figura 5.10 apresentam-se diferentes localizações dos pára-raios.

### 5.6.2 - Comprimento das ligações dos pára-raios às fases

Outro parâmetro que influencia bastante o valor das sobretensões que se desenvolvem no interior do compartimento isolado a  $SF_6$  (e, por isso, pode ser utilizado no controle das sobretensões) são as ligações dos pára-raios propriamente ditos com a fase (ver distância  $d_2$  na figura 5.10.A).

Quanto maior o comprimento destas ligações, maiores serão as sobretensões no interior do  $SF_6$ . Desta forma, é importante



que se tenha as mesmas com os menores comprimentos possíveis dentro do permitido pelo arranjo físico da subestação. Novamente, quanto a estas ligações, a utilização dos pára-raios blindados (ou encapsulados) fica favorecida, pois os mesmos são ligados bem próximos às fases (veja figura 5.10.C).

#### 5.7 - Proteção contra sobretensão de manobra

Geralmente, espera-se que os pára-raios protejam o sistema contra sobretensões, isto é, qualquer surto de manobra com um elevado pico de tensão poderia resultar na operação do pára-raios, tendo como consequência a proteção do sistema.

É necessário que o pára-raios seja capaz de dissipar a energia armazenada no surto.

Nos sistemas de EAT, a proteção contra sobretensões de manobra tem sido conseguida pela modificação dos disjuntores, minimizando, consequentemente, os surtos.

Isto é conseguido através de resistor de pré-inserção em série com o disjuntor quando o sistema é energizado (por tempo de ordem de ciclos), após o que o resistor é curto-circuitado pelo fechamento dos contatos principais.

Desta forma, geramos dois surtos, um quando o resistor é inserido, e outro quando o resistor é curto-circuitado.

O efeito total destes dois transitórios, deve ser menor do que aquele originado por um único fechamento sem resistor de pré-inserção.

## CAPÍTULO VI

### COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

## CAPÍTULO VI

## COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

## 6.1 - Introdução

Entende-se por coordenação de isolamento o conjunto de métodos que conduz à especificação do material e equipamentos de um sistema elétrico, estabelecido, por um lado, as características obtidas em projeto e/ou ensaio e, por outro lado, a definição em termos de previsão do comportamento do sistema sob o ponto de vista de danos nos materiais, equipamentos e/ou interrupções associadas a falhas de isolamento.

A coordenação de isolamento deve conduzir a uma otimização técnico-econômica, associando aspectos com o estabelecimento, em função de condições de operação do sistema e das características do equipamento e do isolamento dos vários materiais às solicitações individuais sob o ponto de vista da tensão. Deve relacionar a possibilidade de falha de isolamento e suas consequências quanto à qualidade de serviço e custos de reparo e operação.

Mesmo para um sistema, com todos os seus materiais e equipamentos conhecidos, e com os critérios de operação completamente definidos, as solicitações de tensão tem caráter estatístico, dependendo de condições meteorológicas; de operações ou atuações de elementos de manobra, após perturbações e/ou avarias de materiais e equipamentos; dos equipamentos limitadores de sobretensão; das descargas superficiais e de deterio-

ração de materiais isolantes, só caracterizáveis estatisticamente e de parâmetros estatísticos não conhecidos exatamente.

As características dos materiais e equipamentos, mesmo que tratados estatisticamente, não são conhecidas exatamente. O isolamento de um equipamento é praticamente definido por satisfazer à determinados ensaios, que não definem exatamente o comportamento do equipamento para os tipos de solicitações, uma vez que as características de isolamento sofrem redução ao longo do tempo.

Estes fatos introduzem imprecisões no conhecimento das características estatísticas das solicitações a que o equipamento é submetido. Assim, ao se definir as características do equipamento tem-se que admitir uma tolerância. Consequentemente, as solicitações reais são menores do que os parâmetros especificados.

Como não é viável, para cada caso, a análise completa para determinação da margem de segurança, é conveniente tê-la em conta de forma aproximada, utilizando critérios advindos de estudos paramétricos, de sistemas semelhantes, aplicáveis ao sistema em estudo, fazendo eventualmente algumas simplificações, cujas considerações diminuam muito o volume de simulações ou análise sem acrescentar erros significativos.

Para uma subestação de extra alta-tensão, a influência do nível de isolamento no custo do equipamento é muito importante.

Por outro lado, a relação entre as sobretensões origina-  
das por descargas atmosféricas e as tensões à frequência in-  
dustrial é bem reduzida. Ainda as condições topológicas des-  
tas redes implicam, de um modo geral, no surgimento de sobre-  
tensões de manobra de valor relativamente alto. Consequente-  
mente, uma boa coordenação de isolamento, sob os pontos de  
vista de sobretensões a frequência industrial e de origem  
atmosférica não garante uma boa coordenação sob o ponto de  
vista de manobra. Nestes sistemas, as sobretensões de manobra  
constituem um aspecto fundamental, devendo ser analisadas com  
detalhes.

## 6.2 - Características das Sobretensões Aplicadas a Subestações

As subestações isoladas a gás  $\text{SF}_6$  estão sujeitas aos  
mesmos tipos de sobretensões que as convencionais. De um modo  
geral, as sobretensões temporárias, de manobra e atmosférica,  
num sistema elétrico projetado conforme padrões habituais, po-  
derão atingir os níveis da figura 6.1[19].

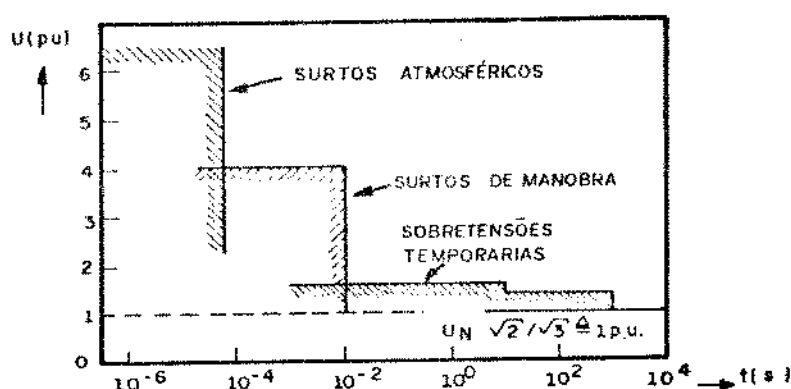


Fig. 6.1 - Valores Típicos das diferentes Sobretensões  
em um Sistema E.A.T.[19].

As figuras 6.2 e 6.3 indicam a tensão em função do tempo, para isolamentos a ar e a  $SF_6$ , respectivamente.

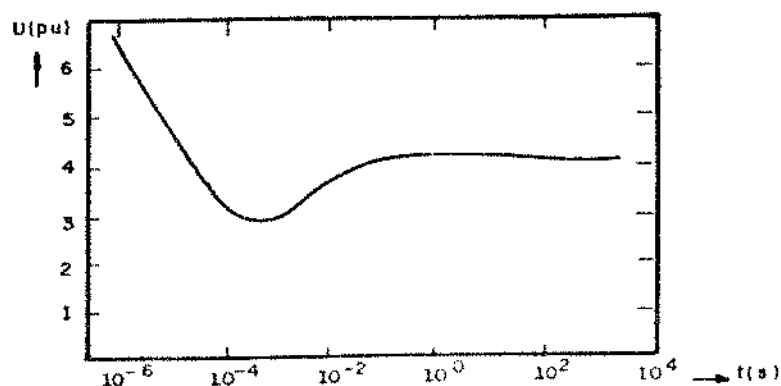


Fig. 6.2 - Característica típica tensão x tempo, de um Isolamento a Ar[13].

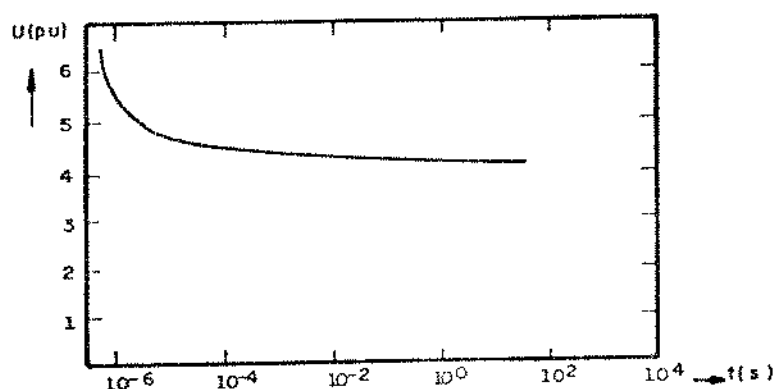


Fig. 6.3 - Característica típica tensão x tempo, de um Isolamento a  $SF_6$ [19].

Nas figuras 6.4 e 6.5 representam-se as curvas tensão em função do tempo (ar e  $SF_6$ ) superpostas ao diagrama das sobretensões que se espera obter no sistema, calculadas através de padrões habituais (Ítem 5.3). Pode-se observar que para as subestações convencionais (isolamento a ar) a característica tensão x tempo poderá ser superada tanto na região

das sobretensões atmosféricas quanto nas sobretensões de manobra. Isto explica porque da necessidade de se levar em conta estas sobretensões quando da coordenação de isolamento de subestações convencionais.

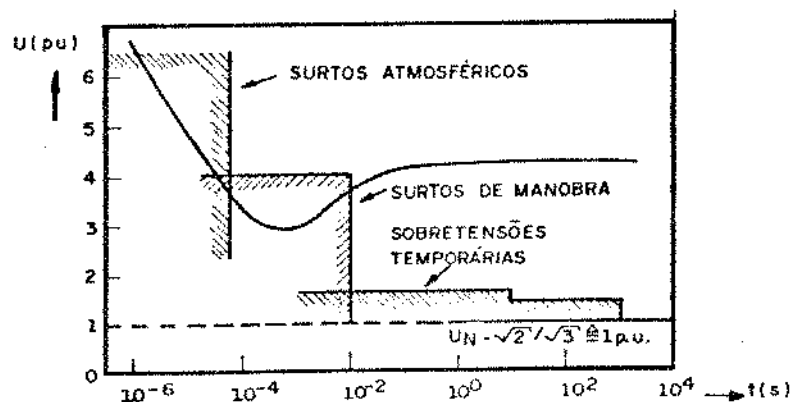


Fig. 6.4 - Superposição da Característica Tensão x Tempo, de um Isolamento a Ar, com o Diagrama Geral de Sobretensões[13].

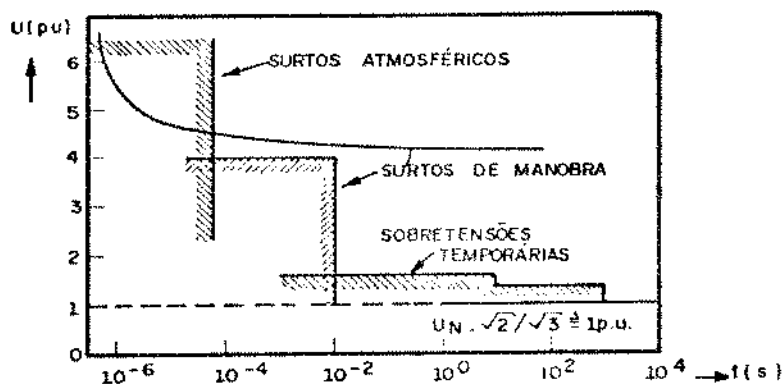


Fig. 6.5 - Superposição da característica Tensão x Tempo, de um Isolamento a  $\text{SF}_6$ , com o Diagrama Geral de Sobretensões[13].

Para as subestações isoladas a gás  $\text{SF}_6$ , observa-se que a curva tensão em função do tempo somente intercepta a região de sobretensão atmosférica. Assim, deve-se entender que para subestações isoladas a  $\text{SF}_6$  o estudo para coordenação de isolamento considera as sobretensões de origem atmosférica muito mais influentes. Entretanto, para tensões nominais bem mais elevadas, da ordem de 1000 kV, as sobretensões de manobra pas sam a ter tanta importância quanto as sobretensões de origem atmosférica.

### 6.3 - Níveis de isolamento

O nível de isolamento para impulsos provocados por des cargas atmosféricas e o nível de isolamento para impulsos provocados por manobras das subestações, estão padronizados pela IEC (norma IEC 517) e pela ANSI (Grupo 70.1 do IEEE).

| Tensão nominal de isolamento - U <sub>m</sub> (kV, valor eficaz) | Tensões de ensaio fase-terra                       |                                             |                                               | Entre terminais de terminais adjacentes de uma mesma fase |                                          |                                            |                                               |           |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------|
|                                                                  | A frequência industrial - 1 min (kV, valor eficaz) | De impulso 1,2µs/50µs (kV, valor de crista) | De manobra 250µs/2500µs (kV, valor de crista) | A frequência industrial, 1 min (kV, valor eficaz)         | Impulso 1,2µs/50µs (kV, valor de crista) | Manobra 250µs/2500µs (kV, valor de crista) | De manobra 250µs/2500µs (kV, valor de crista) | Misto (*) |
| 300                                                              | 380                                                | 950<br>1050                                 | 750<br>850                                    | 435                                                       | 490<br>1050                              | 170<br>170                                 | 100<br>143                                    | 143       |
| 362                                                              | 450 IEC<br>500 ANSI                                | 1050 ANSI<br>1175 IEC                       | 850 ANSI<br>950 IEC                           | 520                                                       | 1050<br>1175                             | 205<br>235                                 | 200<br>245                                    | 245       |
| 420                                                              | 520 IEC                                            | 1300 IEC<br>1425 ANSI                       | 950 ANSI<br>1050 IEC                          | 610                                                       | 1300<br>1425                             | 240<br>240                                 | 400<br>445                                    | 445       |
| 525                                                              | 620 IEC<br>615 ANSI                                | 1425 IEC<br>1550 ANSI                       | 1050<br>1175 IEC                              | 760                                                       | 1425<br>1550                             | 300<br>370                                 | 400<br>445                                    | 445       |
| 765                                                              | 830 IEC<br>860 ANSI                                | 1800 IEC<br>2100                            | 1300<br>1425                                  | 1100                                                      | 1800<br>2100                             | 430<br>435                                 | 1100<br>1245                                  | 1245      |

\* Nestes ensaios, é aplicada uma onda 1,2µs/50µs (nos ensaios de "impulso") ou 250µs/2500µs (nos ensaios de manobra), entre um dos terminais e a terra. Entre o outro terminal (da mesma fase) e a terra, é aplicada uma tensão de frequência industrial, tendo, no instante de aplicação da onda, o valor indicado e polaridade oposta à da onda aplicada ao primeiro terminal.

Tabela 6.1 - Tensões de ensaio, segundo IEC e ANSI para equipamentos de tensão nominal de 300 a 765 kV.

Para a determinação dos níveis de isolamento que deverão ser especificados, deve-se efetuar os cálculos das sobretensões nos barramentos de forma a se determinar as sobretensões máximas possíveis de ocorrerem. Para isso deverão ser simuladas diferentes situações, adotando-se a onda de tensão que atinge a subestação e seguindo os critérios estudados no Capítulo III. Conforme a literatura sobre o assunto [13,76], os critérios que devem ser usados para especificar os níveis de isolamento, após as simulações que fornecerão as máximas sobretensões são:

- Para surtos de manobra

$$\text{Nível de Isolamento} = \text{Máxima Sobretensão encontrada} \times 1,15$$

- Para surtos atmosféricos

$$\text{Nível de isolamento} = \text{Máxima Sobretensão encontrada} \times 1,20$$

De acordo com o que foi abordado no Capítulo III, a taxa de crescimento dos surtos de manobra é bastante lenta, de forma que se terá a mesma sobretensão ao longo de toda a subestação. Esta tensão será igual ao valor do nível de proteção dos pára-raios para surtos de manobras. Quanto aos valores máximos provenientes de surtos atmosféricos, deverão ser determinados através das simulações digitais, as quais são função da configuração da subestação, forma de onda de tensão incidente, característica e localização dos pára-raios, etc.

As sobretensões que se desenvolvem no interior das subestações são, naturalmente, dependentes das ondas de tensão e/ou corrente que incidam na subestação, através das linhas a elas

ligadas e, também, dependente dos tipos de limitadores que se empregam para redução das mesmas.

Além destes elementos, outros parâmetros do sistema e da subestação protegida influenciam as sobretensões que se desenvolvem.

#### 6.4 - Amplitude e Taxa de crescimento das Ondas de Tensão que incidem na Subestação

Uma maior amplitude da onda de sobretensão que incide sobre a subestação será responsável, de uma maneira geral, por maiores sobretensões no interior do compartimento isolado a  $SF_6$ , isto porque maiores serão as ondas refletidas e transmitidas. Entretanto, como existe um limitador de sobretensões na entrada da subestação, este elemento protetor estará disparando no mesmo valor da tensão para qualquer valor de amplitude da onda incidente, desde que se atinja o seu valor de disparo.

Quanto à taxa de crescimento da onda incidente, as sobretensões desenvolvidas no interior do compartimento a  $SF_6$  serão maiores na medida em que se aumente, também, a taxa de crescimento[63].

A referência[21] cita que a taxa de crescimento da onda de tensão que incide sobre a subestação é um parâmetro mais influente que a amplitude desta mesma onda, do ponto de vista de variação das sobretensões desenvolvidas no interior do  $SF_6$ .

#### 6.5 - Capacitor de acoplamento de Carrier localizado na entrada do compartimento do barramento isolado a $SF_6$

Estes componentes em outros como os divisores capacitivos de potencial são representados por uma capacitância de surto.

A presença de capacitores encontrados dentro da subestação tem o efeito de reduzir o crescimento (taxa de crescimento) das sobretensões e de suavizar quaisquer mudanças bruscas na tensão[36,63].

Poderá haver tanto uma redução quanto um aumento do valor das sobretensões dentro do compartimento do barramento isolado a  $SF_6$ , embora esta variação não seja muito sensível, e, às vezes, não aconteça.

As referências[13,75] citam casos práticos de que a aplicação de capacitores de 4 nanofarads na representação de um divisor capacitivo de potencial na entrada da subestação, provocou a redução das sobretensões no interior da subestação em apenas 2%. Isto em relação aos casos em que o mesmo divisor capacitivo de potencial foi representado como um circuito aberto.

Deste parâmetro, pode-se dizer, entretanto, que pequenas variações do mesmo não influem significativamente nos valores das sobretensões encontradas.

#### 6.6 - Capacitância de surto do Transformador de Potência

A capacitância de surto, através da qual se representa o transformador de potência nos estudos de Coordenação de Iso-

lamento, tem uma influência muito pequena no valor das sobretensões máximas que se encontram no interior do barramento. A referência[13] cita que quando se diminui o valor da capacitância de surto que representa o transformador de potência, pode-se ter um aumento ou uma diminuição do valor das sobretensões máximas que se desenvolvem no interior da subestação.

Também a referência[13] cita um exemplo prático onde o emprego de uma capacitância de surto no valor de 4000 pF comparada com uma de 0 pF causou uma diminuição de 4% no valor das sobretensões máximas encontradas.

#### 6.7 - Tensão à frequência industrial do sistema, no instante de incidência da descarga atmosférica

Normalmente, ao se fazer os estudos de coordenação de isolamento de uma subestação a  $SF_6$ , não se leva em conta a tensão nominal de frequência industrial do sistema, isto é, assume-se que o surto penetra na subestação num instante em que a tensão à frequência industrial é zero[1,21,43,44 e 67].

A não consideração da tensão à frequência industrial é coberta pelas margens de segurança que se adota em relação às máximas sobretensões calculadas ao se escolher os níveis de isolamento.

A tensão à frequência industrial afeta a onda que incide sobre a subestação em dois aspectos: a tensão de partida do surto atmosférico que atinge a linha e, naturalmente, a sua magnitude. Entretanto, o efeito destes dois aspectos na forma-

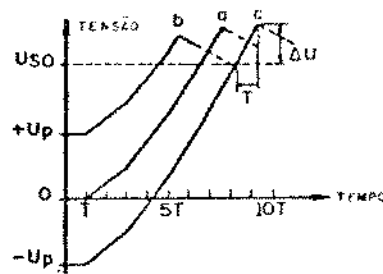
ção da tensão ao longo da subestação depende de vários parâmetros:

- comprimento da subestação
- tensão de disparo do pára-raios
- parte transmitida de onda incidente para o interior da subestação.

Na figura 6.6 apresentada na referência[67], mostra-se que o efeito da consideração da tensão à frequência industrial não é muito significativo e variações em torno de 5% deverão ser esperadas. Nesta figura, três casos foram considerados:

- a) Tensão à frequência industrial igual a zero;
- b) Tensão à frequência industrial no máximo positivo;
- c) Tensão à frequência industrial no máximo negativo.

Em um outro estudo prático[30], o efeito da tensão a 60 Hz foi considerado, para verificação, e se confirmou que as sobretensões encontradas não variariam mais que 5%, conforme previsto na referência[67]. Outros aspectos práticos não consideraram[26,69], seguindo o estabelecido, em maioria, pela literatura.



$U_{so}$  - tensão de disparo do pára-raios para surtos atmosféricos;

$U_p$  - valor de pico da tensão à frequência industrial

$T$  - tempo de tráfego no  $SF_6$ .

Fig. 6.6 - Sobretensões encontradas no Terminal Aberto de uma Subestação Isolada a  $SF_6$ , para Diferentes Valores da Tensão à Frequência Industrial[67].

#### 6.8 - Arranjo físico da Subestação Isolada a $SF_6$ e Características das Linhas de Transmissão a ela Conectadas

Como a formação das sobretensões ao longo da subestação isolada a  $SF_6$  é um fenômeno puramente de ondas viajantes, as considerações exatas do arranjo físico da subestação estudada e das características, também exatas, das linhas de transmissão a ela conectadas são os parâmetros decisivos no cálculo destas sobretensões.

Desta forma, deve-se conhecer todas as distâncias físicas entre os diferentes pontos de conexão das linhas, e dos equipamentos existentes.

Os exemplos práticos a serem analisados posteriormente evidenciarão a importância destes parâmetros.

## 6.9 - Recomendações para Coordenação de Isolamento

Numa subestação convencional, a coordenação de isolamento é, normalmente, efetuada através da instalação de pára-raios próximos aos equipamentos importantes, tais como transformadores, reatores, etc. Limitadores adicionais são instalados, algumas vezes, na entrada da subestação. No Brasil, em sistemas de A.T., sempre se tem pára-raios na entrada da subestação, mas na Europa, Canadá e Estados Unidos, nem sempre.

Em subestações a  $SF_6$ , os limitadores são primeiramente instalados na entrada de linha e como proteção suplementar em pontos estratégicos da subestação como, por exemplo, nas proximidades de transformadores.

Isto é motivado pelo fato de que uma descarga no interior de um compartimento isolado a  $SF_6$  é mais problemática do que numa convencional. Devido ao fato de ser a impedância de surto consideravelmente menor no  $SF_6$ , os pára-raios protegem uma distância maior, se comparados com subestações convencionais.

A solução mais econômica é aquela em que se adota pára-raios externos do tipo convencional, localizados na entrada da subestação. Um estudo de sobretensões atmosféricas irá determinar se esta solução mais econômica protege convenientemente o barramento a  $SF_6$ , assim como os demais equipamentos, ou se pára-raios blindados, ou encapsulados, serão necessários ou, na pior hipótese, se um aumento de isolamento teria que ser adotado.

As vantagens técnicas de um pára-raios do tipo blindado, ou encapsulado, seria:

- Liberdade de se localizar os pára-raios no melhor ponto dentro do compartimento a  $SF_6$ , do ponto de vista de proteção;
- Não existem "leads" de conexão entre o pára-raios e a terra e os condutores;
- Os pára-raios blindados, ou encapsulados, possuem melhores condições ambiente que os pára-raios convencionais, que poderão ser afetados pela poluição (as tensões de disparo se alteram com a poluição).

Conforme já mencionado, anteriormente, a primeira e mais simples solução a ser adotada é a utilização de pára-raios do tipo convencional ou óxido de zinco externos ao compartimento isolado a  $SF_6$ , na entrada da subestação (localização 1, da figura 6.7).

Esta solução deverá ser adequada na maioria dos casos. Em algumas situações, especialmente em sistema E.A.T., não será possível proteger todos os compartimentos a  $SF_6$  com pára-raios somente na entrada da subestação, uma vez que o comprimento da subestação (distância entre a bucha de entrada e o ponto de reflexão mais distante) seja muito longo, de forma que ocorram valores elevados de sobretensões. Então, quando a posição "1" for insuficiente, o próximo passo é utilizar pára-raios blindados (ou encapsulados) no ponto "2". Haverá uma certa distância entre a bucha de entrada e a primeira chave se

cionadora. Algumas vezes poderá ser conveniente colocar o pára-raios na posição "3" ao invés da posição "2", desde que esta última posição reduza as sobretensões a valores adequados.

Será sempre necessário ter pára-raios em "1", "2" ou "3" para proteção da entrada da subestação quando a chave seccionadora estiver aberta. Para subestações muito longas (em E.A.T), será necessário instalar-se outro pára-raios, usualmente em "4" ou "5". Com respeito à proteção do transformador, a posição "5" é, a princípio, a melhor escolha, embora a posição "4" possa também ser utilizada. O pára-raios da posição "5" poderá ser do tipo convencional desde que a ligação entre o compartimento a  $SF_6$  e o transformador seja aérea. Somente em casos muito raros, com compartimentos de barramentos a  $SF_6$  muito longas e ligações entre este barramento e o transformador também muito longas, será necessário se ter os pára-raios nas posições "4" e "5", simultaneamente.

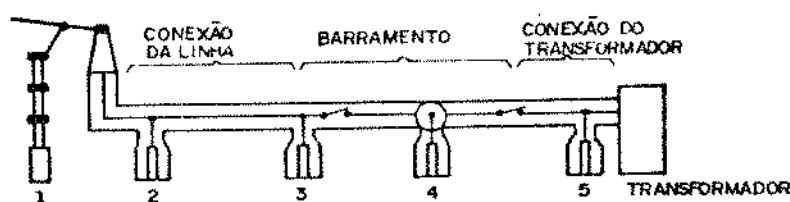
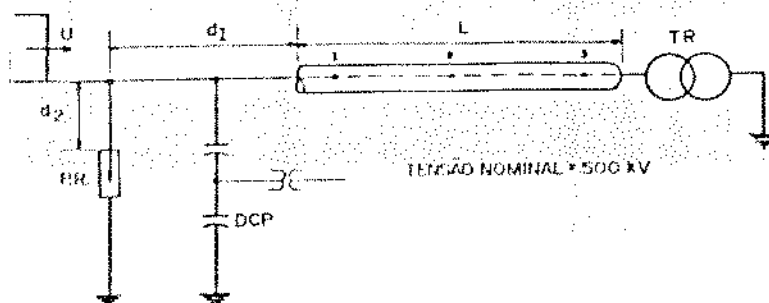


Fig. 6.7 - Possíveis localizações dos pára-raios para proteção de barramentos isolados a  $SF_6$  [19].

Pode-se citar aqui simulações para o pequeno sistema mostrado na figura 6.8, considerando os pára-raios como sendo de óxido de zinco ou, então, convencionais, apresentados na referência [19].

O resultado de ambas situações está mostrado nas Tabelas 6.2 a 6.5., nas quais pode-se notar que os pára-raios de óxido



PR. - Pára-raios

TR. - Transformador de força

DCP - Divisor Capacitivo de Potencial

L - Comprimento do compartimento isolado a  $SF_6$

$d_1$  - distância dos pára-raios ao  $SF_6$

$d_2$  - distância dos pára-raios à fase (conexão)

1,2,3- Pontos internos ao  $SF_6$

U - Onda incidente na subestação através da linha.

Fig. 6.8 - Sistema reduzido (utilizado para mostrar a atuação dos pára-raios).

de zinco ( $ZnO$ ) apresentam limitações mais favoráveis, principalmente se colocados mais próximos das fases ( $d_2$ ) e mais próximos do compartimento isolado a  $SF_6$  ( $d_1$ ).

| Caso | Pára-raios utilizados | Amplitude (kV) | Taxa de crescimento (kV/ $\mu$ s) | VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS NO SF <sub>6</sub> (kV) |                                    |                                    |                                    |                    |
|------|-----------------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|
|      |                       |                |                                   | Entrada da Linha no SF <sub>6</sub>                           | Interna ao SF <sub>6</sub> Ponto 1 | Interna ao SF <sub>6</sub> Ponto 2 | Interna ao SF <sub>6</sub> Ponto 3 | Terminais do trafo |
| 1    | Convencional          | 2500           | 1200                              | 1315                                                          | 1343                               | 1379                               | 1421                               | 1438               |
| 2    | Óxido de zinco        | 2500           | 1200                              | 1215                                                          | 1257                               | 1302                               | 1340                               | 1376               |
| 3    | Convencional          | 1500           | 1200                              | 1172                                                          | 1184                               | 1194                               | 1201                               | 1206               |
| 4    | Óxido de zinco        | 1500           | 1200                              | 1055                                                          | 1077                               | 1091                               | 1109                               | 1132               |
| 5    | Convencional          | 2500           | 600                               | 1233                                                          | 1239                               | 1252                               | 1269                               | 1259               |
| 6    | Óxido de zinco        | 2500           | 600                               | 1105                                                          | 1127                               | 1145                               | 1161                               | 1174               |

Tabela 6.2 - Valores de sobretensões máximas encontradas ao longo do barramento isolado a SF<sub>6</sub>, variando-se a amplitude e taxas de crescimento das ondas que incidem na subestação[19]

| Caso | Limitador das<br>Sobretensões  | VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS NO BARRAMENTO A SF <sub>6</sub> (kV) |                                       |                                       |                                       |                       |
|------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
|      |                                | Entrada da<br>Linha no SF <sub>6</sub>                                     | Interna ao<br>SF <sub>6</sub> Ponto 1 | Interna ao<br>SF <sub>6</sub> Ponto 2 | Interna ao<br>SF <sub>6</sub> Ponto 3 | Terminais<br>do Trafo |
| 1    | Sem limitador                  | 4923                                                                       | 4921                                  | 4918                                  | 4925                                  | 4920                  |
| 2    | Pára-raios -<br>convencional   | 1315                                                                       | 1343                                  | 1379                                  | 1421                                  | 1438                  |
| 3    | Pára-raios -<br>Óxido de zinco | 1213                                                                       | 1257                                  | 1302                                  | 1240                                  | 1376                  |
| 4    | Centelhador                    | 1320                                                                       | 1317                                  | 1620                                  | 1622                                  | 1688                  |

Tabela 6.3 - Valores de sobretensões máximas encontradas ao longo do barramento isolado a SF<sub>6</sub> com a aplicação de diferentes tipos de limitadores à entrada da subestação (onda incidente definida: Amplitude = 2500 kV; Taxa de crescimento = 1200 kV/μs)[19].

| Caso | Pára-Raios Utilizados   | Distância do PR. à entrada do $SF_6$ ( $d_1$ ) (m) | Distância do PR. à fase $d_2$ (m) | VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS NO $SF_6$ (kV) |                           |                           |                           |                    |
|------|-------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|
|      |                         |                                                    |                                   | Entrada da Linha no $SF_6$                           | Interna ao $SF_6$ Ponto 1 | Interna ao $SF_6$ Ponto 2 | Interna ao $SF_6$ Ponto 3 | Terminais do Trafo |
| 1    | Convencional Externo    | 10                                                 | 5                                 | 1315                                                 | 1343                      | 1379                      | 1421                      | 1438               |
| 2    | Óxido de Zinco Externo  | 10                                                 | 5                                 | 1213                                                 | 1257                      | 1302                      | 1340                      | 1376               |
| 3    | Convencional Externo    | 5                                                  | 5                                 | 1304                                                 | 1332                      | 1339                      | 1346                      | 1322               |
| 4    | Óxido de Zinco Externo  | 5                                                  | 5                                 | 1152                                                 | 1187                      | 1221                      | 1250                      | 1272               |
| 5    | Convencional Blindado   | 15                                                 | 0                                 | 1214                                                 | 1120                      | 1185                      | 1194                      | 1175               |
| 6    | Óxido de Zinco Blindado | 15                                                 | 0                                 | 1047                                                 | 1008                      | 1011                      | 1031                      | 1054               |

Tabela 6.4 - Valores de sobretensões máximas encontradas ao longo do barramento isolado a  $SF_6$  variando-se a localização dos pára-raios[19] (Distância  $d_1$ ) - Onda incidente de amplitude 2500 kV e taxa de crescimento 1200 kV/ $\mu$ s.

| Caso | Para-Raios Utilizados   | Distância do P.R. à entrada do $SF_6$ ( $d_1$ ) (m) | Distância do P.R. à fase $d_2$ ) (m) | VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO ENCONTRADOS NO $SF_6$ (kV) |                           |                           |                           |                    |
|------|-------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|
|      |                         |                                                     |                                      | Entrada da Linha no $SF_6$                           | Interna ao $SF_6$ Ponto 1 | Interna ao $SF_6$ Ponto 2 | Interna ao $SF_6$ Ponto 3 | Terminais do Trafo |
| 1    | Convencional Externo    | 10                                                  | 5                                    | 1315                                                 | 1343                      | 1379                      | 1421                      | 1438               |
| 2    | Óxido de Zinco Externo  | 10                                                  | 5                                    | 1213                                                 | 1257                      | 1302                      | 1340                      | 1376               |
| 3    | Convencional Externo    | 5                                                   | 5                                    | 1304                                                 | 1332                      | 1339                      | 1346                      | 1322               |
| 4    | Óxido de Zinco Externo  | 5                                                   | 5                                    | 1152                                                 | 1187                      | 1221                      | 1250                      | 1272               |
| 5    | Convencional Blindado   | 15                                                  | 0                                    | 1214                                                 | 1120                      | 1185                      | 1194                      | 1175               |
| 6    | Óxido de Zinco Blindado | 15                                                  | 0                                    | 1047                                                 | 1008                      | 1011                      | 1031                      | 1054               |

Tabela 6.5 - Valores de sobretensões máximas encontradas ao longo do barramento isolado a  $SF_6$ , variando-se as ligações dos para-raios às fases [19] (Distância  $d_2$ ) - Onda incidente de amplitude de 2500 kV e taxa de crescimento de 1200 kV/ $\mu$ s.

CAPÍTULO VII

REPRESENTAÇÃO DE ELEMENTOS PARA ESTUDOS  
DE FENÔMENOS TRANSITÓRIOS

CAPÍTULO VII  
REPRESENTAÇÃO DE ELEMENTOS PARA ESTUDOS  
DE FENÔMENOS TRANSITÓRIOS

7.1 - Introdução

Os estudos de sobretensões, conforme discutido anteriormente, baseiam-se no fenômeno da propagação de ondas eletromagnéticas nos sistemas elétricos e seus componentes básicos. Esta técnica de estudos é, entretanto, particularmente útil quando da representação de componentes do tipo linhas, cabos, etc., cujos comportamentos são essencialmente do tipo a parâmetros distribuídos.

Quando, porém, da consideração de elementos físicos do tipo banco de capacitores, reatores, etc., que são do tipo a parâmetros concentrados, existe um impasse a ser resolvido. A preocupação está no fato de existir uma composição de elementos cujos comportamentos transitórios são fundamentalmente diferentes.

Uma solução clássica para tal, consiste em tratar separadamente cada um destes elementos e analisar seus comportamentos segundo o método que melhor se aplica ao caso. Isto consiste, pois, em tratar as linhas por parâmetros distribuídos e, por exemplo, os capacitores por parâmetros concentrados.

Esta forma de análise, porém, envolve dois métodos de análise que, embora forneça resultados precisos, cria proble-

mas computacionais mais sérios que a metodologia a ser discutida. A proposição, conforme se verá posteriormente, consiste em representar todos os componentes do sistema por elementos a parâmetros distribuídos.

## 7.2 - Tratamento Clássico

Até aqui discutiu-se o fenômeno da propagação das ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão. Analisou-se, também, o efeito dos pontos de descontinuidade, sem contudo levar em consideração a natureza dos elementos terminais, conforme referido atrás. Quanto a este ponto, vale lembrar que os elementos de um sistema elétrico são normalmente classificados em dois tipos. Primeiramente, pode-se citar aqueles cujos parâmetros são de natureza distribuída. Neste caso, requer-se uma fração de tempo considerável para a propagação das ondas eletromagnéticas desde o seu início até o final. Em segundo lugar, pode-se destacar os elementos cujos parâmetros são de natureza concentrada. Nestes o tempo de propagação das ondas eletromagnéticas, no elemento, é desprezível.

Para se determinar o efeito de uma onda ao incidir em um elemento terminal representado por um parâmetro concentrado, far-se-á também uso do coeficiente de reflexão, dado por:

$$(K-1) = \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} \quad (7.1)$$

Na equação acima, considera-se que uma onda que se propaga em uma linha, de impedância característica  $Z_A$ , atinge

um equipamento terminal de impedância operacional  $Z_B$ . A impedância  $Z_A$  é tratada como uma resistência independente da frequência angular.

Suponha agora que o equipamento terminal seja um capacitor de capacitância  $C$ , então:

$$Z_B(\omega) = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{pC} \quad (7.2)$$

onde,

$$p = j\omega \quad (7.3)$$

O coeficiente de reflexão pode então ser obtido como:

$$(K-1) = \frac{1/pC - Z_A}{1/pC + Z_A} \quad (7.4)$$

Tomando a onda incidente como um degrau de amplitude  $U_D$  sua transformada será:

$$\frac{U_D}{p} \quad (7.5)$$

A onda refletida (no domínio da frequência) será expressa por:

$$U_R(p) = (K-1) \cdot \frac{U_D}{p}$$

substituindo  $(K-1)$ , de 7.4

$$U_R(p) = \frac{U_D}{p} \frac{(1/CZ_A - p)}{(1/CZ_A + p)} \quad (7.6)$$

Lembrando que  $Z_A$  tem dimensão de resistência, então  $CZ_A$  é interceptada como uma constante de tempo, portanto fazendo:

$$\tau = \frac{1}{CZ_A} \quad (7.7)$$

Levando esta última expressão em (7.6) e resolvendo:

$$u_R(t) = u_D (1 - 2e^{-\tau t}) \quad (7.8)$$

Esta é a equação da onda que irá retornar pela linha (onda refletida), e se superpor à onda incidente para estabelecer a tensão ao longo da linha, que será dada por:

$$u(t) = u_D(t) + u_R(t)$$

$$u(t) = u_D + u_D (1 - 2e^{-\tau t}) \text{ ou}$$

$$u(t) = 2u_D (1 - e^{-\tau t}) \quad (7.9)$$

Na figura 7.1 pode-se visualizar melhor o fenômeno, para o caso de uma terminação em capacitor.

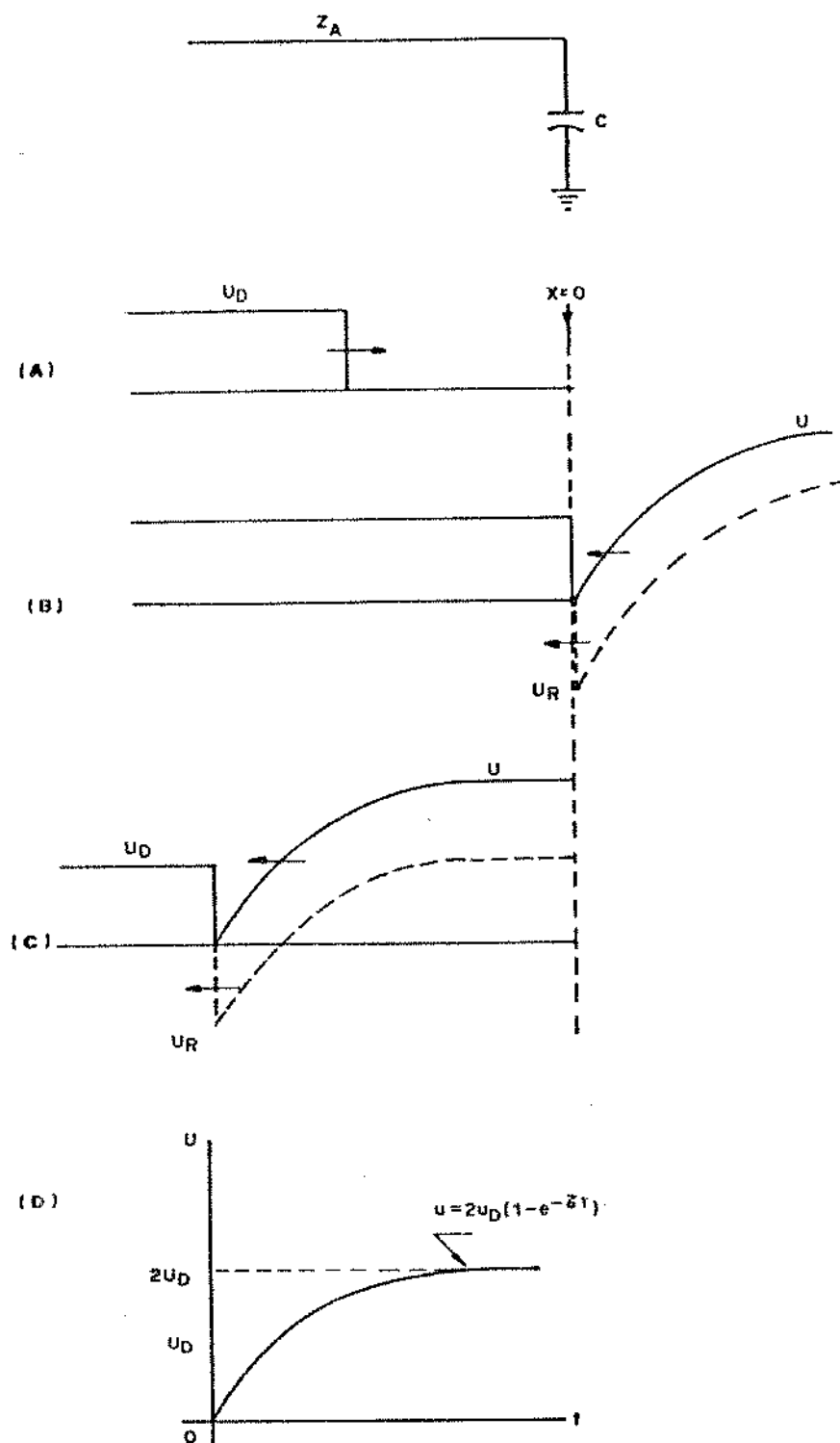


Fig. 7.1 - Propagação de uma onda em linha de transmissão, com um capacitor na ponta.

Na figura 7.1(a) vê-se que a tensão terminal é inicialmente zero e cresce assintoticamente para  $u_D$ , com uma constante de tempo  $\tau = Z_A C$ . Este resultado está de acordo com o ponto de vista físico, uma vez que a onda de tensão ao incidir no terminal não pode mudar instantaneamente o valor da tensão no capacitor. Assim, o capacitor comporta-se inicialmente como uma terminação em curto-circuito e após decorrido um certo tempo como um circuito aberto, não permitindo a circulação da corrente contínua.

A terminação em um indutor é um dual da terminação em um capacitor, uma vez que nela é a corrente que não pode crescer instantaneamente. Isto implica que a indutância se comporta inicialmente como uma terminação em circuito aberto, e após algum tempo como um curto-circuito. O desenvolvimento matemático para o indutor obedece a mesma sistemática anterior e será omitido aqui. O resultado é representado pela equação (7.10) e figura 7.2.

$$u(t) = 2 u_D e^{-\tau t} \quad (7.10)$$

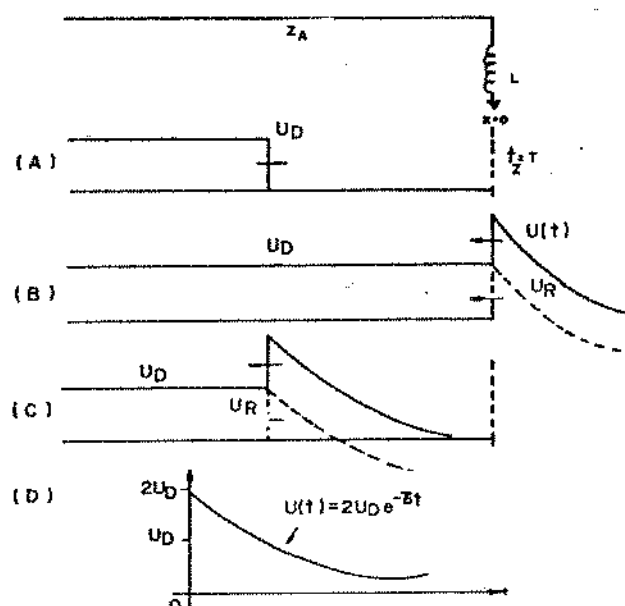


Fig. 7.2 - Propagação de uma onda em uma linha de transmissão, com um indutor na ponta.

### 7.3 - Aproximação de elementos a parâmetros concentrados por secções de linhas (*Stub line*)

A representação de elementos a parâmetros concentrados tal como na secção anterior, apresenta uma série de inconvenientes. Isto é especialmente verdadeiro quando se analisa um sistema de potência onde várias terminações estão envolvidas e a cada instante incide nestes terminais ondas do tipo degrau, resultante da decomposição de formas de ondas mais complexas. O ideal nestes casos é representar os elementos a parâmetros con

centrados por elementos a parâmetros distribuídos, ou seja, por pequenas secções de linhas também conhecidas como *stub line*. Assim, os elementos passam a ser representados por uma impedância característica  $z^0$  e um tempo de propagação correspondente a  $\theta$ , definidos por:

$$z^0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7.11)$$

$$\theta = \sqrt{L \cdot C} \quad (7.12)$$

Onde L e C representam a indutância e a capacitância da secção de linha. O valor do tempo de propagação (dada por  $\theta$ ), será analisado posteriormente.

Para se representar um indutor, a indutância "L" da secção de linha é tomada como sendo a própria indutância do indutor. Neste caso, substituindo-se "C" de (7.12) em (7.11), tem-se:

$$z^0 = \frac{L}{\theta} \quad (7.13)$$

E a capacitância da secção é então dada por:

$$C = \frac{\theta}{z^0} \quad (7.14)$$

Para se representar um capacitor, a capacitância "C" da secção de linha é tomada como sendo a própria capacitância do capacitor, logo, a impedância de surto é dada por:

$$z^0 = \frac{\theta}{C} \quad (7.15)$$

E a indutância associada à secção de linha, será então:

$$L = .0Z^0 \quad (7.16)$$

Para que a representação seja precisa, o valor de  $\theta$  deve ser bastante pequeno. Em geral,  $\theta$  é tomado de tal forma que as impedâncias de surto da secção de linha para elementos indutivos e capacitivos sejam respectivamente dez vezes e um décimo da impedância de surto equivalente a todos os outros elementos conectados à barra.

Esta condição, em muitos casos é obtida reduzindo o intervalo de tempo básico, usado nos cálculos, o que aumenta o tempo de computação. Em alguns desses casos é possível trocar o fator 10 por 6 sem grandes perdas na precisão [19,58].

O indutor "Shunt" é simulado aterrando o terminal remoto da secção de linha que o representa. Para o caso de um capacitor "Shunt", a terminação da secção é mantida aberta. O indutor série é representado de maneira similar, mas como ele está ligando dois elementos em série, seus terminais são conectados aos terminais destes elementos, tal como dispostos fisicamente.

O capacitor série apresenta certa dificuldade para sua representação, haja visto que na terminação deve ser em circuito aberto.

A validade da aproximação de elementos a parâmetros concentrados por secções de linhas pode ser comprovada comparando os resultados obtidos pelos métodos exato (clássico) e pela

substituição por secções de linhas. O assunto já foi amplamente analisado em outros trabalhos [46,58] e não será repetido aqui.

Conforme mencionado acima, a precisão da representação está diretamente relacionada com o tempo de propagação da onda na secção. Quanto menor o tempo mais precisa é a representação. Como todo programa digital para estudos de transitórios tem um intervalo de tempo básico ( $\Delta t$ ), definido internamente ou a ser definido pelo usuário, então a menor secção de linha capaz de ser representada é correspondente a este intervalo de tempo.

Assim sendo, a escolha deste tempo torna-se muito importante na precisão dos estudos. A escolha deste tempo deve levar em consideração três critérios básicos, a saber:

- O tempo de propagação de cada linha de transmissão é definido em termos de um intervalo de tempo básico e o ideal seria que cada linha tivesse um número inteiro de intervalos de tempo básico. Na prática isto é muito difícil de acontecer, e alguma aproximação deve ser admitida. Por outro lado, nenhuma linha deve possuir tempo de propagação menor que o intervalo de tempo básico.
- O intervalo de tempo básico deve ser adotado de tal forma que qualquer onda de tensão aplicada seja adequadamente representada.
- A constante de tempo associada com a impedância de surto das linhas de transmissão e a indutância ou ca-

pacitância de elementos representados por parâmetros concentrados deve satisfazer a relação:

$$\theta = \tau/3 \quad (7.17)$$

onde  $\tau$  é a constante de tempo definida na tabela 7.1, sendo  $\tau = n\theta$ , onde  $n$  é o número de intervalos de tempo básico, e  $T$  é o tempo de propagação.

| ELEMENTO        | IMPEDÂNCIA DE SURTO | CONSTANTE DE TEMPO |
|-----------------|---------------------|--------------------|
| INDUTOR SHUNT   | $L/\theta$          | $L/Z_e$            |
| INDUTOR SÉRIE   | $L/\theta$          | $L/(Z_A + Z_B)$    |
| CAPACITOR SHUNT | $\theta/C$          | $R_e C$            |
| CAPACITOR SÉRIE | $\theta/C$          | $R_e C$            |

Tabela 7.1 - Constante de Tempo ( $\tau$ ) associada com a impedância de surto e a indutância ou capacitância dos elementos.

Este último critério garante a precisão da representação de elementos a parâmetros concentrados por secções de linhas.

Em resumo, os elementos a parâmetros concentrados são representados da seguinte forma:

- Indutor Shunt: é representado por uma secção de linha com tempo de propagação igual ao tempo básico, então:

$$T = \theta \quad (7.18)$$

$$Z^0 = L/\theta \quad (7.19)$$

$$\tau = L/Z_e \quad (7.20)$$

Onde  $Z_e$  é a impedância de surto equivalente de todas as linhas conectadas à barra do indutor. O indutor Shunt é representado conectando um dos terminais da secção de linhas à barra e o outro à referência (terra).

- Indutor Série: é representado por uma secção de linha com tempo de propagação igual ao tempo básico, portanto:

$$T = \theta \quad (7.21)$$

$$Z^0 = L/\theta \quad (7.22)$$

$$\tau = L/(Z_A + Z_B) \quad (7.23)$$

Onde  $Z_A$  e  $Z_B$  são as impedâncias de surto equivalentes dos barramentos aos quais o indutor está conectado. A representação é feita conectando os terminais da secção de linha aos respectivos barramentos, tal como dispostos fisicamente.

- Capacitor Shunt e capacitância de fuga: por uma secção de linha com tempo de propagação igual ao tempo básico, portanto:

$$T = \theta \quad (7.24)$$

$$Z = \theta/C \quad (7.25)$$

$$\tau = Z_e C \quad (7.26)$$

Um dos terminais da secção é conectado ao barramento e o outro permanece em circuito aberto.

- Resistor Shunt: é representado por uma linha de transmissão de comprimento zero e impedância igual à

resistência. Seu valor tem influência apenas na impedância equivalente da barra, sendo representado tal como disposto fisicamente.

#### 7.4 - Representação dos Componentes de uma Subestação

Apresenta-se a seguir a forma como cada um dos componentes existentes no sistema deve ser representado para simulações de sobretensões.

##### 7.4.1 - Componentes dentro dos compartimentos isolados a SF<sub>6</sub>

###### (a) - Barramento

O barramento isolado a SF<sub>6</sub> é representado por sua impedância de surto. O seu valor pode ser calculado, para o caso dos barramentos que contêm uma fase por compartimento isolado a SF<sub>6</sub>, figura 7.3.a., pela expressão (7.27). Este tipo de barramento é o que se utiliza em escala comercial.

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \theta = \sqrt{L \cdot C}$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{r_2}{r_1} \text{ ohms} \quad (7.27)$$

$$v = \sqrt{L \cdot C} = \sqrt{\mu \cdot \epsilon}$$

Onde:

$Z$  = impedância de surto do barramento a SF<sub>6</sub>

$2r_1$  = diâmetro externo do condutor

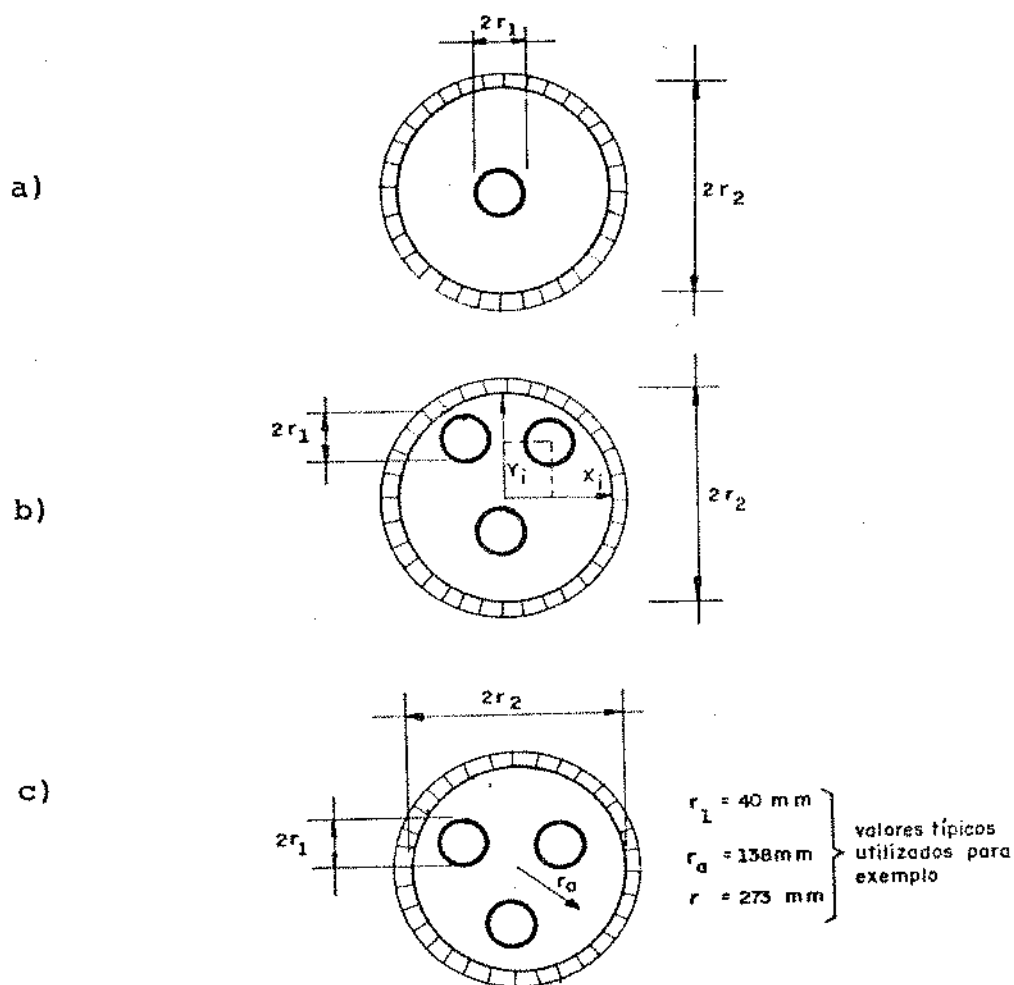
$2r_2$  = diâmetro interno do duto SF<sub>6</sub>

$$\epsilon = 8,855 \times 10^{-12} \frac{A_s}{V_m} \text{ permissividade do vácuo e do SF}_6$$

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{V_s}{A_m} \text{ permeabilidade do vácuo e do SF}_6$$

Substituindo-se valores de  $\epsilon$  e  $\mu$  em (7.27), tem-se:

$$Z = 60 \ln r_2/r_1 \text{ ohms} \quad (7.28)$$



- a) Uma fase por invólucro (mais utilizado comercialmente)
- b) Três fases por invólucros (arranjo assimétrico)
- c) Três fases por invólucros (arranjo simétrico).

Fig. 7.3 - Tipos de barramentos isolados a SF<sub>6</sub>

A velocidade de propagação da onda no  $SF_6$  é:

$v = \sqrt{1/LC} = \sqrt{1/\mu\epsilon} = 300 \text{ m}/\mu\text{seg}$ , que é igual à velocidade da luz.

O valor de  $r_2/r_1$  considerado ótimo[72] para o projeto de um barramento isolado a  $SF_6$  é quando se tem  $r_2/r_1 = 2,72$ , para  $Z = 60 \text{ ohms}$ [19]. Devido a pequenas variações de dimensões, em torno do valor ótimo, uma faixa de 55 a 100 ohms é encontrada para todas as classes de tensões.

Mostra-se, a seguir, como calcular as impedâncias de surto para o barramento que possui as três fases dentro de um mesmo compartimento isolado a  $SF_6$ . As figuras 7.3.b e 7.3.c ilustram estes casos.

Para este tipo de barramento, tem-se uma matriz de impedâncias, pois agora, estando as fases dentro de um único compartimento, aparecerão impedâncias de surto mútuas entre as mesmas. Esta matriz tem a forma:

$$(Z_2) = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix}$$

onde os elementos da matriz podem ser calculados pelas seguintes equações:

$$Z_{ii} = 60 \ln \left( \frac{r_2^2 - x_i^2 - y_i^2}{r_2 \cdot r_1} \right) \text{ ohms} \quad (7.28)$$

$$Z_{ik} = 60 \ln \sqrt{\frac{(r_2^2 - x_i x_k - y_i y_k)^2 + (x_i y_k - y_i x_k)^2}{r_2^2 [(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2]}} \quad (7.29)$$

Se a disposição dos condutores dentro do compartimento for simétrica, ter-se-á apenas uma única impedância de surto próprio e uma única impedância de surto mútua.

$$(Z_2) = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \quad (7.30)$$

Para o arranjo simétrico, mostrado na figura 8.1.c, a matriz  $(Z_2)$  foi calculada, e apresentada na referência[11], com os seguintes resultados exatos:

$$(Z_2) = \begin{bmatrix} 95 & 15 & 15 \\ 15 & 95 & 15 \\ 15 & 15 & 95 \end{bmatrix}$$

Para o arranjo assimétrico, mostrado na figura 8.1.b, a matriz  $(Z_2)$  foi calculada de acordo com as dimensões utilizadas por um fabricante[19,52], e apresentou os seguintes resultados exatos:

$$(Z_2) = \begin{bmatrix} 94 & 19 & 11 \\ 19 & 94 & 19 \\ 11 & 19 & 94 \end{bmatrix}$$

Normalmente, são encontrados valores dentro das seguintes faixas:

$$Z_m = 10 - 30 \text{ ohms}$$

$$Z_s = 90 - 130 \text{ ohms}$$

## (b) - Disjuntores

Os disjuntores podem ser representados, a princípio, por sua impedância de surto  $Z_c$  e seu comprimento  $\ell_c$ . Os disjuntores incluem muitos dispositivos de chaveamento e de extinção de arco, e portanto possuem um diâmetro um pouco maior que o barramento. Consequentemente, a impedância de surto  $Z_c$  é um pouco menor que a do próprio barramento isolado a  $SF_6$ . A impedância de surto do disjuntor pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$Z_c = \frac{\ell_c}{C_c \cdot v} \text{ ohms} \quad (7.31)$$

$$\theta = \sqrt{LC} \text{ como } Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{LC}{C^2}} = \frac{\sqrt{LC}}{C}$$

Onde:

$$\theta = Z_c \cdot C \quad (7.32)$$

$\ell_c$  = comprimento (em mm)

$C_c$  = capacitância interna do disjuntor

$v$  = velocidade de propagação da onda

( $v = 300 \text{ m}/\mu\text{seg}$ )

| TENSÃO NOMINAL<br>(kV) | COMPRIMENTO<br>$\ell_c$ (mm) | CAPACITÂNCIA<br>INTERNA<br>$C_c$ (pF) | IMPEDÂNCIA<br>DE SURTO<br>$Z_c$ (ohms) |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
| 66 - 72,5              | 1200 - 2000                  | 200                                   | 20 - 33                                |
| 123 - 170              | 1300 - 3300                  | 150 - 300                             | 26 - 79                                |
| 245 - 300              | 1600 - 4000                  | 160 - 400                             | 33 - 79                                |
| 362 - 550              | 2400 - 8000                  | 210 - 800                             | 33 - 86                                |
| 800                    | 4800                         | 300                                   | 53                                     |

Tabela 7.2 - Dados de disjuntores em compartimentos isolados a  $SF_6$  [19].

Normalmente, em estudos práticos considera-se que a impedância de surto do disjuntor é a mesma que a do restante do barramento [11,13].

(c) - Buchas

A conexão entre o barramento isolado a  $SF_6$  e as linhas aéreas (ou cabos, se for o caso) é feita através de buchas especialmente construídas para este fim.

Normalmente, estas buchas são isoladas a  $SF_6$ ,  $SF_6$ -óleo, óleo - papel ou resina-epoxi-papel impregnado.

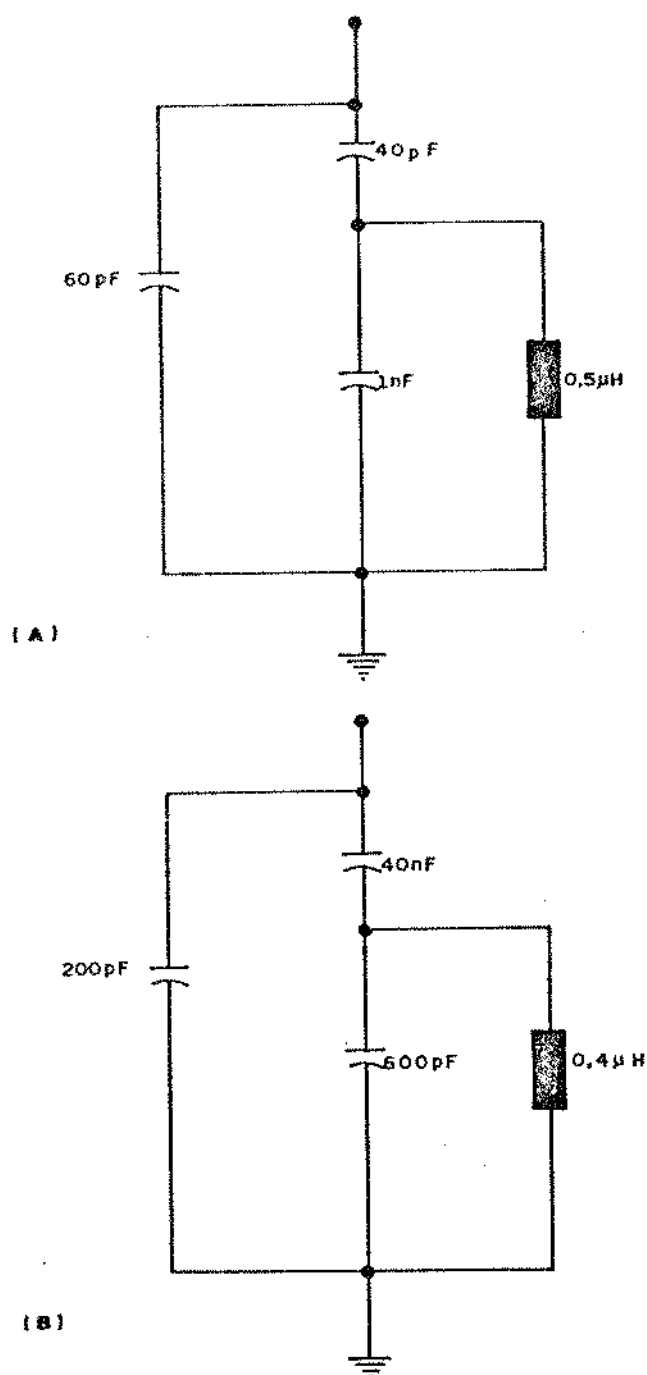
Nos estudos encontrados, as buchas são representadas por capacitâncias concentradas com os seguintes valores:

- buchas isoladas a  $SF_6$  :  $C = 25 - 150 \text{ pF}$
- buchas isoladas a óleo-papel:  $C = 100 - 1000 \text{ pF}$
- buchas isoladas a resina-papel:  $C = 100 - 1000 \text{ pF}$
- buchas isoladas a  $SF_6$  - óleo:  $C = 190 - 550 \text{ pF}$

Os valores mais elevados são representativos para tensões mais elevadas.

(d) - Transformadores de Potencial

O circuito equivalente para representação destes equipamentos é mostrado na Figura 7.3. Às vezes, uma simples capacitância de  $100 \text{ pF}$  é utilizada [5,14] para esta representação.



A) Isolamento a  $\text{SF}_6$  - Tensão Nominal  $> 145$  kV

B) Isolamento de resina epoxi - Tensão Nominal  $< 145$  kV

Fig. 7.3 - Circuito equivalente para representação de um transformador de potencial indutivo[19].

## (e) - Divisor Capacitivo de Potencial

São representados por uma capacitância concentrada, de acordo com a Tabela 7.3 abaixo:

| TENSÃO NOMINAL<br>(kV) | CAPACITÂNCIA<br>$C_{DCP}$ (nF) |
|------------------------|--------------------------------|
| 145                    | 16                             |
| 245                    | 8 - 11                         |
| 362                    | 8                              |
| 420                    | 4 - 7                          |
| 550                    | 5                              |
| 800                    | 2 - 3,5                        |

Tabela 7.3 - Capacitância de surto dos transformadores de potencial capacitivos[19].

## (f) - Demais elementos

A influência dos demais elementos isolados a  $SF_6$ , tais como seccionadoras em posição fechada e transformadores de corrente é desprezada devido aos seus pequenos comprimentos [11, 26,30,67,69,75].

#### 7.4.2 - Elementos fora dos compartimentos isolados a $SF_6$

##### (a) - Linha de Transmissão

A linha de transmissão que serve de veículo para as ondas que atingem a subestação, é representada por suas impedâncias de surto. O cálculo das impedâncias de surto da linha é feito facilmente na medida em que se conheça o condutor utilizado e a geometria da mesma.

##### (b) - Transformador de Potência

Os transformadores de potência são representados por capacitâncias de surtos.

Na Tabela 7.4, a seguir, são apresentados dados típicos que poderão ser utilizados nesta representação, de acordo com a literatura disponível sobre o assunto[43,44].

Estas capacitâncias variam numa faixa de 2 a 10 nF, dependendo do projeto do transformador. Este parâmetro, entretanto, não é crítico para o cálculo das sobretensões, e valores aproximados poderão ser utilizados[19].

| TENSÃO NOMINAL<br>(kV) | CAPACITÂNCIA<br>$C_T$ (nF) |
|------------------------|----------------------------|
| 362                    | 1,5 - 4,0                  |
| 420                    | 1,5 - 4,0                  |
| 425                    | 1,5 - 4,0                  |
| 765                    | 1,5 - 4,0                  |

Tabela 7.4 - Capacitâncias de surto típicas para serem utilizadas na representação dos transformadores de potência[19].

(c) - Transformador de Potencial

Estes equipamentos poderão ser representados por uma capacitância de surto concentrada, apresentada na Tabela 7.5.

| TENSÃO NOMINAL<br>(kV) | CAPACITÂNCIA<br>$C_T$ (nF) |
|------------------------|----------------------------|
| 138                    | 0,595                      |
| 230                    | 0,705                      |
| 345                    | 0,920                      |
| 500                    | 1,105                      |
| 765                    | 1,325                      |

Tabela 7.5 - Capacitâncias de surto para serem utilizadas para representação dos transformadores de potencial[5,24].

## (d) - Divisor Capacitivo de Potencial

Da mesma forma que quando colocados dentro do compartimento isolado a  $SF_6$ , estes equipamentos poderão ser representados nos estudos sob a forma de capacitores de surto. Na Tabela 7.6 abaixo, são apresentados valores, segundo informações divulgadas por fabricantes.

| TENSÃO NOMINAL<br>(kV) | CAPACITÂNCIA<br>$C_{DCP}$ (nF) |
|------------------------|--------------------------------|
| 138                    | 2,0 - 5,0                      |
| 230                    | 2,0 - 5,0                      |
| 345                    | 2,0 - 5,0                      |
| 500                    | 2,0 - 5,0                      |
| 765                    | 4,0                            |

Tabela 7.6 - Capacitâncias de surto típicas que poderão ser utilizadas na representação de divisores capacitivos de potencial [5,24,26,30].

(e) - Dados dos pára-raios (convencionais) que serão utilizados na 2ª parte deste trabalho (para um sistema de 500 kV) [19,34].

- . tensão nominal - 444 kV (rms)
- . tensão de disparo  
para surtos de manobra - 940 kV (pico)
- . tensão de disparo  
para surtos atmosféricos - 1055 kV (pico)

| TENSÃO DE DESCARGA<br>(kV) | CORRENTE DE DESCARGA<br>(kA) |
|----------------------------|------------------------------|
| 670                        | 1,5                          |
| 866                        | 5,0                          |
| 965                        | 10,0                         |
| 1043                       | 15,0                         |
| 1112                       | 20,0                         |
| 1354                       | 40,0                         |

Tabela 7.7 - Característica de descarga dos pára-raios convencionais, Tipo *Allugard 11* (G.E.) [19,35]

- (f) - Dados dos pára-raios  $Z_nO$  (óxido de zinco) para um sistema de tensão nominal 500 kV [19,35]:

- . tensão nominal - 420 kV (rms)
- . tensão de disparo para surtos - zero kV

| TENSÃO DE DESCARGA<br>(kV) | CORRENTE DE DESCARGA<br>(kA) |
|----------------------------|------------------------------|
| 670                        | 0,001                        |
| 740                        | 0,100                        |
| 780                        | 0,500                        |
| 804                        | 1,000                        |
| 829                        | 1,500                        |
| 867                        | 3,000                        |
| 899                        | 5,000                        |
| 950                        | 10,000                       |
| 985                        | 15,000                       |
| 1012                       | 20,000                       |
| 1118                       | 40,000                       |

Tabela 7.8 - Característica de descarga dos pára-raios de óxido de zinco, Tipo *Tranquell* (G.E.) [19,35].

(g) - Pára-raios blindados ou encapsulados [11,13,45,67,75]

Os dois tipos de pára-raios referidos anteriormente (convencional ou óxido de zinco) são dos tipos usados também nas subestações convencionais (aéreas). Para as subestações isoladas a  $SF_6$  pode-se ter, também, além destes, um outro tipo de pára-raios, denominado de pára-raios encapsulado ou blindado, que na verdade é um pára-raios do mesmo tipo dos anteriores. A diferença é que estes são blindados e integrados ao próprio compartimento isolado a  $SF_6$ .

Para a representação deste tipo de pára-raios necessita-se das mesmas informações que para os pára-raios convencionais e/ou óxido de zinco, isto é, tensão de disparo e curva de descarga (tensão x corrente).

Da mesma forma que os anteriores, estes dados são disponíveis com os fabricantes que, neste caso, deverão ser os mesmos da própria subestação isolada a  $SF_6$ .

(h) - Centelhadores

Os centelhadores são representados por um "gap" que possui uma tensão de disparo (conseguida junto aos fabricantes). Não possuem curva de descarga (tensão x corrente), isto é, após o disparo transforma-se num curto-circuito.

(i) - Torre de Transmissão

Nos estudos de sobretensão efetuados para se fazer a Coordenação de Isolamento, as torres das linhas de transmissão

deverão ser representadas por uma impedância de surto equivalente, geralmente típica[11,13,26,30,63,69,75].

$$Z_T = 60 \cdot \frac{2h}{R_T} \ln \sqrt{2} \quad (7.33)$$

$R_T$  - raio da torre cilíndrica

$h$  - altura

A Tabela 7.9, a seguir, mostra os valores de impedância de surto e alturas, geralmente utilizados, para representação das torres.

| CLASSE DE TENSÃO<br>(kV) | ALTURA DA TORRE<br>(m) | IMPEDÂNCIA DE SURTO<br>(ohms) |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------|
| 66                       | 21                     | 100                           |
| 154                      | 42                     | 100                           |
| 275                      | 63                     | 100                           |
| 500                      | 63                     | 100                           |

Tabela 7.9 - Valores típicos de alturas e impedâncias de surtos utilizados para representação de torres de transmissão[19,13].

(j) - Resistência de Aterramento das Torres

A resistência de pé de torre (resistência de aterramento) deve ser medida no campo. Caso a linha não esteja ainda construída, situação em que não se poderia fazer a medida, sugere-se que sejam utilizados valores esperados a nível de projeto ou então, valores de resistência de aterramento conseguidos pela companhia concessionária, em linhas da mesma classe

de tensão. De preferência, estas linhas usadas como referência deverão estar numa região próxima ao local onde se situa a subestação. Tipicamente, o valor da resistência está compreendido entre 1 e 50 $\Omega$ [19].

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

PARTE I

## CAPÍTULO VIII

## CONCLUSÕES

## PARTE I

A coordenação de isolamento de subestações isoladas a  $SF_6$  deverá ser feita com um estudo detalhado das sobretensões atmosféricas. As sobretensões do tipo temporário terão definido as características nominais dos pára-raios, em estudos anteriores. Quanto menor a classe de tensão do sistema, a subestação a  $SF_6$  estará bem protegida contra as sobretensões de manobra, desde que protegida adequadamente contra as de origem atmosférica, devido às características do  $SF_6$ . Para as subestações convencionais devemos verificar também a coordenação de isolamento para sobretensões de manobra.

O estudo do desempenho das subestações deverá ser feito por simulações em computadores digitais. O recurso básico para este tipo de estudo é utilizar programas de transitórios que permitem representar os elementos do sistema, conforme descrição feita no Capítulo VII.

Todas as possíveis situações, nas quais a subestação que se está estudando vier a funcionar, deverão ser analisadas de forma a se caracterizar, realmente, as maiores sobretensões que poderão ocorrer no seu interior, e, desta forma, se fazer a escolha adequada do seu isolamento.

Ao se efetuar os estudos de coordenação de isolamento, alguns parâmetros influenciam de forma decisiva nos resultados que se obterão. Desta forma, atenção especial deverá ser dada

à localização dos pára-raios, comprimento das ligações dos pára-raios às fases, amplitude e taxa de crescimento das ondas de tensão que incidem na subestação, arranjo físico da subestação e características das linhas de transmissão a ela conectadas. A representação dos divisores capacitivos de potencial e transformadores de potência, na forma de capacitores de surto, não mostra ter uma influência considerável sobre os resultados, mas de qualquer forma, deve ser seguida a orientação dada no Capítulo VII. A tensão à frequência industrial do sistema no instante da incidência não é fator decisivo nos resultados encontrados e pode, de uma maneira geral, ser desprezada.

Os estudos deverão ser feitos a partir da fase de anteprojeto do sistema, isto é, quando já se terá conhecido as características da subestação e das linhas de transmissão ligadas à subestação, de forma a se ter em detalhes os elementos que devem ser representados no estudo.

A solução inicial a ser adotada para se fazer a coordenação de isolamento é a aplicação de pára-raios externos com prioridade, do tipo convencional e, em segundo lugar, do tipo óxido de zinco. Caso esta solução mais econômica não seja adequada, a aplicação dos pára-raios blindados, ou encapsulados, deverá ser tentada.

As normas têm padronizado os níveis de isolamento para cada classe de tensão. Estes níveis de isolamento deverão ser alcançados, pois serão, ao se adquirir o equipamento, os mais econômicos. Caso não se consiga a sua adoção pela aplicação

conveniente dos limitadores de sobretensões (pára-raios), deve  
rão ser escolhidos níveis de isolamento mais elevados.

PARTE II

SIMULAÇÃO DIGITAL, ESTUDOS E COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO  
DE SUBESTAÇÕES CONVENCIONAIS E ISOLADAS A SF<sub>6</sub>  
COM RELAÇÃO A SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS

CAPÍTULO IX

INTRODUÇÃO DA PARTE II

### 9.1. INTRODUÇÃO

A etapa que será desenvolvida a seguir baseia-se nos conceitos apresentados na 1ª parte deste trabalho. Utilizar-se-á como recurso para a simulação digital um programa para Cálculo de Sobretensões Transitórias em Sistema de Potência[58], que será comentado e descrito, uma vez que a intenção é de usá-lo como ferramenta.

Para o desenvolvimento a que se propõe nesta segunda parte do trabalho, utilizar-se-á dados obtidos de concessionárias de energia elétrica que deram origem às duas subestações com a mesma configuração e classe de tensão, uma convencional e outra isolada a SF<sub>6</sub>. Com as dimensões físicas e elétricas foram elaborados os diagramas de impedâncias que serão utilizados na simulação digital.

Face aos motivos apresentados na parte I, pretende-se apenas simular sobretensões que entrariam na subestação. Com a simulação poder-se-á verificar o desempenho dos pára-raios para diversas posições e distâncias, assim como os valores de tensão que se desenvolverá em vários pontos da subestação.

Aplicando-se a mesma sistemática para as duas subestações tirar-se-á conclusões importantes com relação aos níveis de tensão, muito úteis para uma boa coordenação de isolamento.

## CAPÍTULO X

### DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA DIGITAL

### 10.1. INTRODUÇÃO

Os princípios fundamentais do programa para computador digital, tais como superposição, geração de ondas viajantes, propagação de ondas em sistemas polifásicos, efeitos de distorção e atenuação, reflexões, representação de elementos não lineares por circuitos equivalentes e outros, foram desenvolvidos na parte I deste trabalho. Teve-se também o cuidado de ilustrar a origem dos fenômenos transitórios e como representá-los. Por outro lado, é sempre bom lembrar a utilidade de um programa deste gênero, ou em outras palavras a necessidade de se conhecer os fenômenos transitórios.

Como se sabe, os níveis de tensões alcançados durante os fenômenos transitórios são bastante elevados e estão associados a frequências que podem chegar à faixa de 100 kHz. É evidente que tais tensões têm grande influência no desempenho dos isolamentos dos equipamentos, que devem estar dimensionados para suportá-las ou protegidos contra elas. Assim os resultados obtidos do programa são usados para dimensionamento do nível de isolamento dos equipamentos, bem como pára-raios e outros elementos capazes de reduzir os surtos de tensões transitórias relacionados às operações de chaveamento e descargas atmosféricas.

As figuras 10.1 a 10.6 mostram as dimensões e diagramas de impedâncias de surto das subestações convencional e a SF<sub>6</sub>, utilizadas no programa digital.

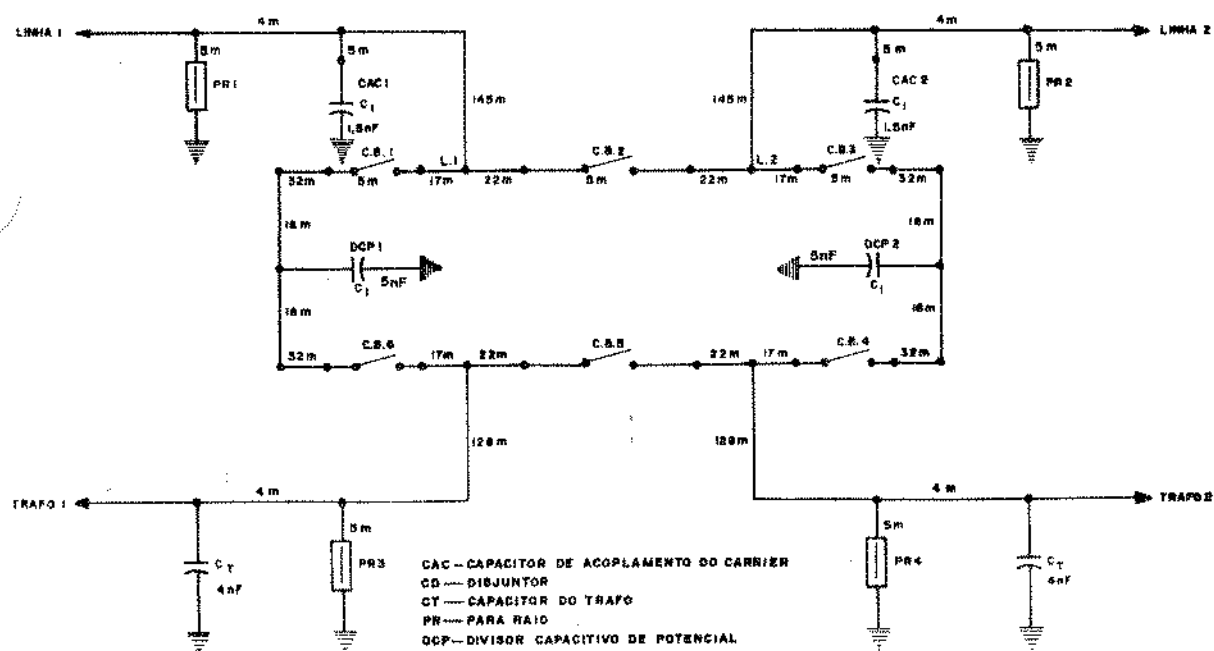


Fig. 10.1 - Representação da Subestação Convencional implantada no programa de transitórios

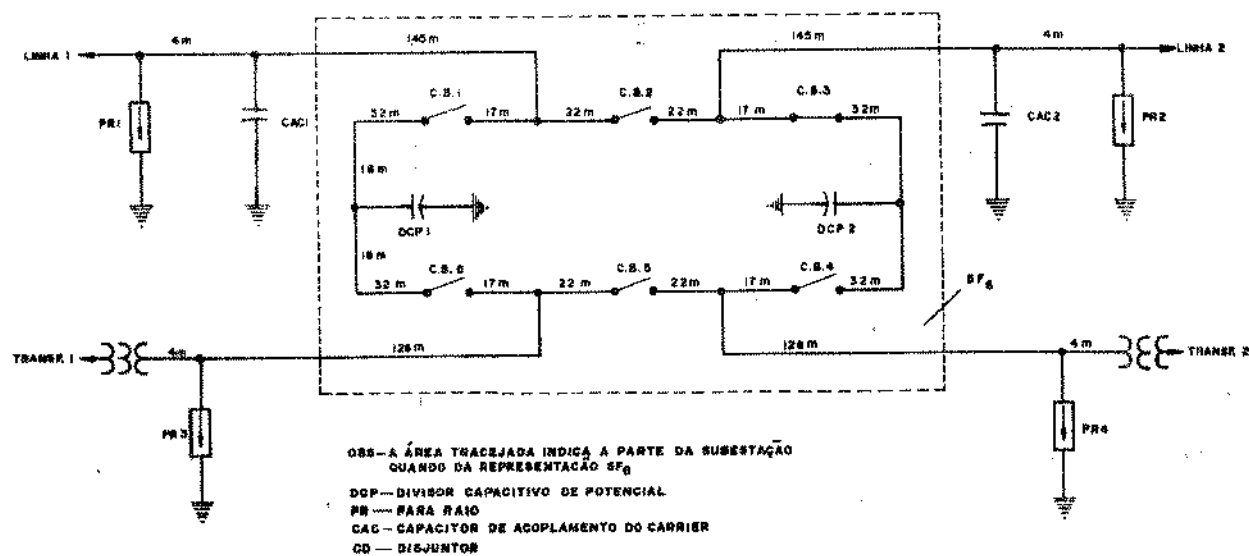


Fig. 10.2 - Representação da Subestação Convencional tensão 500 kV - disjuntor e meio

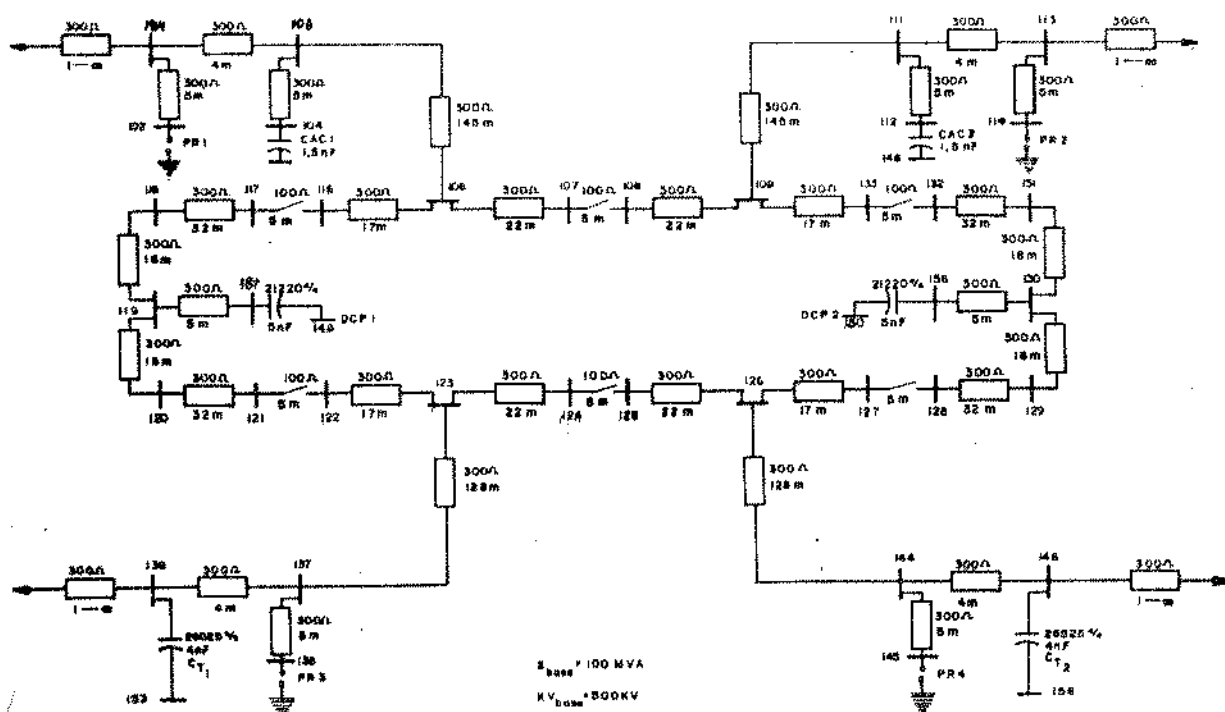


Fig. 10.3 - Representação da Subestação Convencional implantada no programa de transitórios

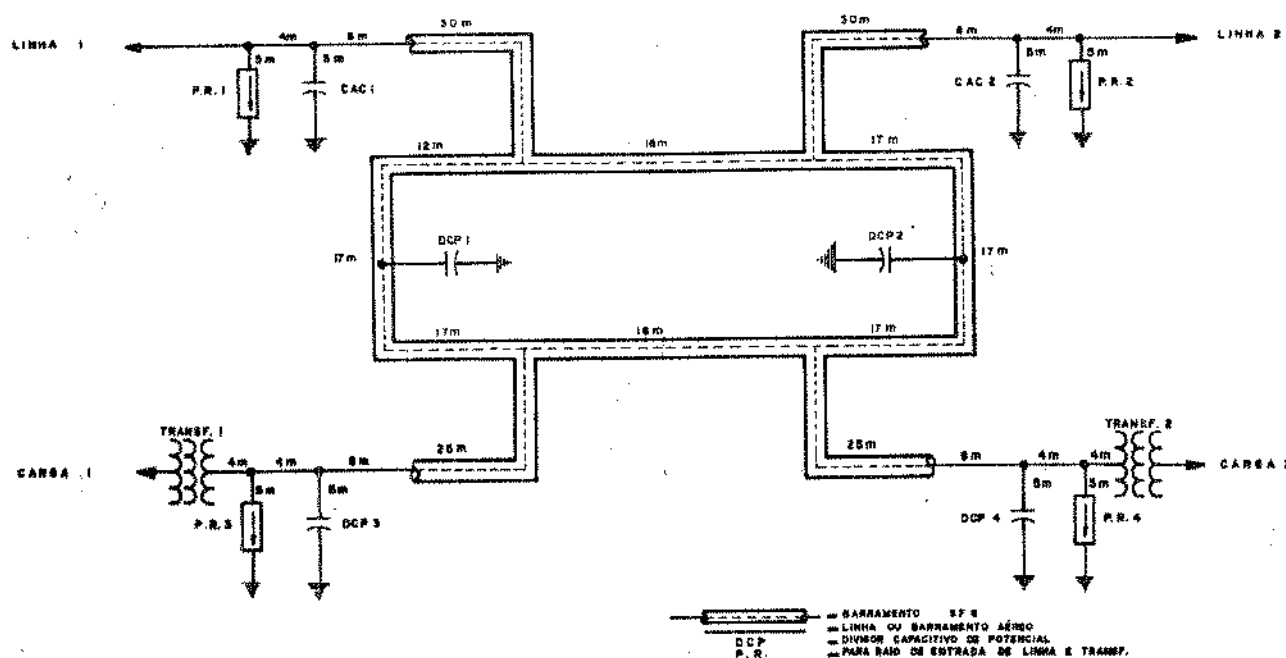
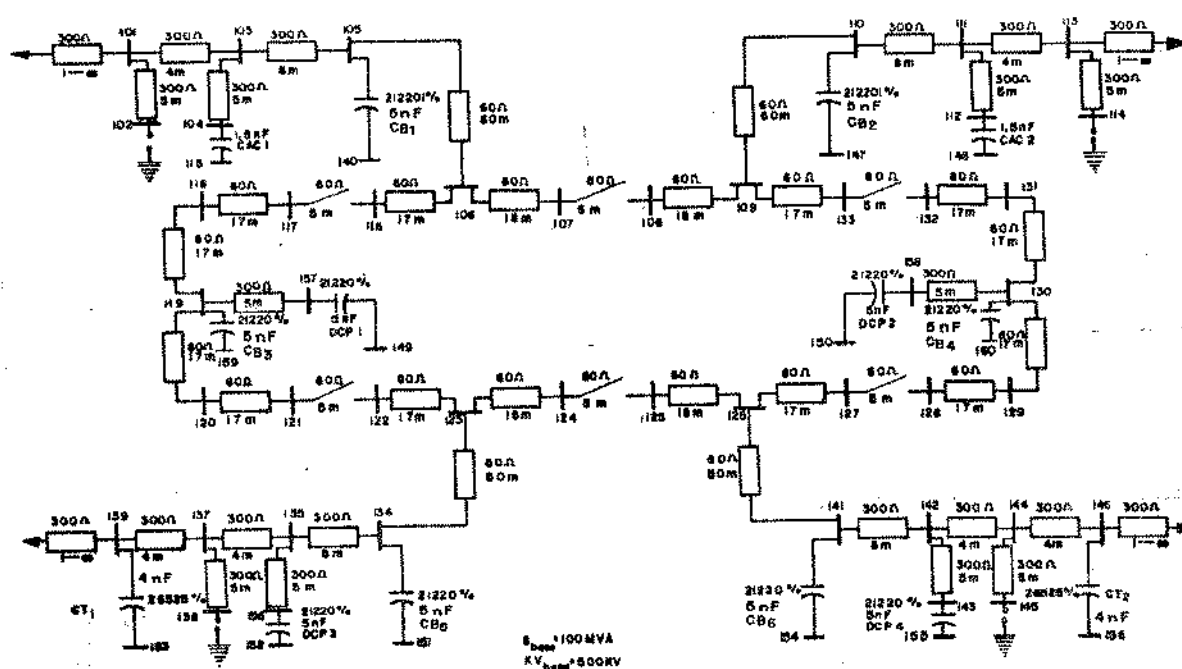
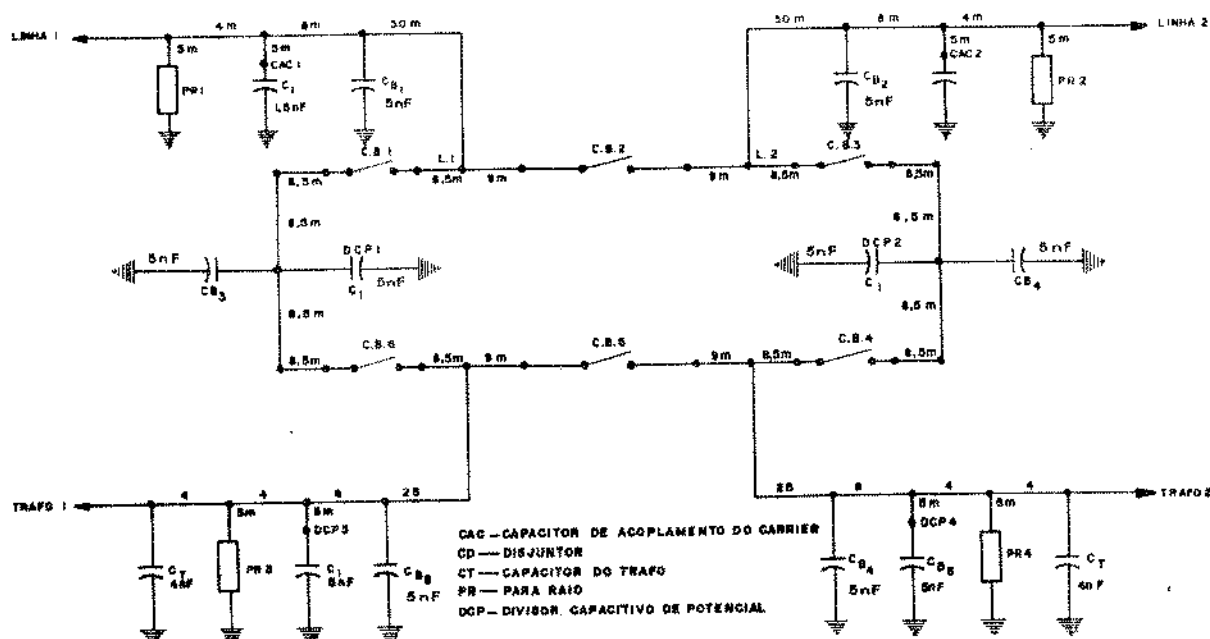


Fig. 10.4 - Configuração da Subestação isolada a SF<sub>6</sub> Tensão 500 kV (disjuntor e meio) - para-raios externos



O programa utilizado[58] foi desenvolvido para simular um sistema elétrico de potência com qualquer número de fases. As variáveis do programa estão dimensionadas apenas para sistemas com até três fases. O número de elementos que o programa aceita também está limitado, entretanto, atende às necessidades do sistema a ser simulado.

Estruturalmente, o programa pode ser dividido em quatro partes distintas, ou seja:

- leitura e impressão de dados
- preparação dos dados e condições iniciais
- cálculo do fenômeno transitório
- impressão de resultados.

A divisão do programa em blocos tem mais caráter didático do que prático, embora ela se faça sentir dentro do próprio programa. A sequência natural do programa se encontra na figura a seguir.

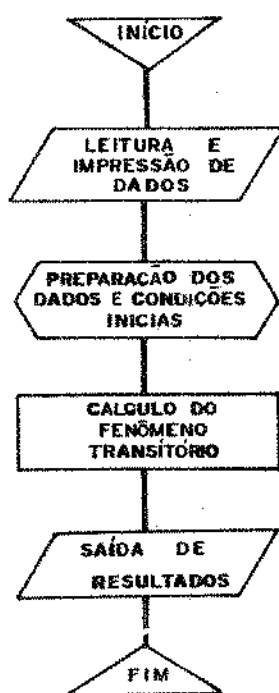


Fig. 10.7 - Estrutura básica do programa

## 10.2 - IDENTIFICAÇÃO DO PROGRAMA

NOME: PROGRAMA PARA CÁLCULO DE SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA[58]

## 10.3 - DIMENSIONAMENTO DO PROGRAMA

- . 10 matrizes de transformação modal
- . 90 barras
- . 10 fontes
- . 80 linhas
- . 09 elementos não lineares
- . 30 coeficientes de transferência
- . 70 elementos a parâmetros concentrados
- . 10 disjuntores.

## 10.4 - ARQUIVO DE DADOS

Os dados entram para o programa em forma de blocos. Cada bloco de dados é identificado por um cartão "código" que inicia o bloco e por um cartão "flag" que o encerra. Um dado arquivo é por sua vez identificado por quatro cartões que abrem o arquivo e por um cartão código que o encerra.

## 10.5 - CARTÕES DE IDENTIFICAÇÃO DO ARQUIVO

São quatro os cartões de identificação do arquivo de dados, os quais iniciam o arquivo. Eles devem ser perfurados obedecendo os seguintes critérios:

- Primeiro cartão do arquivo:

a) Coluna 1: número de fases do sistema a ser estudado;

(se o campo for nulo então NF = 3);

b) Colunas 3 a 4: número inteiro que indica para o programa, de quantos em quantos intervalos de tempo o programa deve imprimir os resultados (se o campo for nulo então NIT = 1);

c) Colunas 10 a 17: valor do intervalo de tempo básico a ser adotado pelo programa. Quando não especificados o programa assume como 1 unidade de tempo. Formato F8.1;

d) Colunas 20 a 27: incremento de tempo. Se for deixado nulo adota-se  $10^{-1}$ . Formato F8.1;

e) Colunas 30 a 37: valor da unidade de tempo em segundos, ou seja:

microsegundos: 1.E-6

milisegundos : 1.E-3

Quando não especificado o programa assume a unidade de tempo como sendo em microsegundos. Formato F8.1;

f) Colunas 40 a 43: frequência de 60 Hz  
Formato F3.0;

g) Coluna 45: Se o campo for diferente de zero, imprime dados de entrada.

h) Coluna 60: número de pontos a serem calculados (número de iterações). Se o campo for deixado em branco adota-se 500 pontos. Formato I3;

i) Coluna 70: De quantas em quantas iterações devem ser

plotados os resultados. Se o campo for deixado em branco adota-se formato I2.

- Segundo, terceiro e quarto cartões de arquivo:

Colunas 1 a 72: título.

## 10.6 - CARTÕES CÓDIGOS

Identificam os blocos de dados, ou seja, indicam para o programa o tipo de dados que vem a seguir. O código de identificação é um número inteiro que varia de 1 a 9 e deve ser gravado na primeira coluna do cartão.

### 10.6.1 - Código 1

Função: Leitura de matrizes modais

Opção: Opcional

Descrição: Este cartão indica que os cartões a seguir contém matrizes que transformam tensões modais em tensões de fases. A leitura prossegue até que se encontre um cartão "flag" com 9999 perfurado a partir da coluna 1. Cada matriz de transformação é fornecida através de um único cartão obedecendo o seguinte critério de perfuração:

- a) Coluna 2 - número de 1 a 9 que identifica a matriz de transformação.
- b) Colunas de 6 a 11, 13 a 18, 20 a 25, 27 a 32, 34 a 39, 41 a 46, 48 a 53, 55 a 60, 62 a 67 - Elementos da matriz, fornecidos por coluna.

Assim, se a matriz for 3 x 3, a primeira coluna ocupa os campos de 6 a 11, 13 a 18, 20 a 25; a segunda coluna ocupa os campos 27 a 32, 34 a 39 e 41 a 46, e a terceira coluna ocupa os campos de 48 a 53, 55 a 60, 62 a 67. A décima matriz de transformação é interna ao programa, ela é a matriz de transformação de Clark, dada por:

$$S_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

Quanto aos estudos de sistemas trifásicos completamente equilibrados ou sistemas monofásicos, não é necessário especificar matrizes de transformação.

#### 10.6.2 - Código 2

Função: Leitura de dados de barras

Opção : Obrigatório

Descrição: Este cartão indica que os cartões a seguir contém dados referentes às barras do sistema. A leitura prossegue até que se encontre um cartão "flag" com 9999 perfurado a partir da coluna 1. Os dados de barras do sistema são fornecidos em um único cartão por barra, obedecendo o seguinte critério:

- a) Colunas 1 a 4 - número inteiro diferente de 0000 ou 9999 que identifica a barra. Este número deve ser único, isto é, duas barras não podem conter o mesmo número. A barra de número 0000 é interna ao programa e representa a referência (terra).
- b) Colunas 6 a 13 - nome da barra, pode ser um número alfanumérico qualquer e serve somente como referência para o usuário, podendo portanto ser repetido.
- c) Coluna 15 - número que identifica o possível elemento não linear conectado à barra, isto é, se algum elemento não linear estiver conectado à barra o seu número de identificação, que varia de 1 a 9, deve ser colocado nesta coluna. Em cada barra só é permitido colocar 1 (um) elemento não linear.
- d) Coluna 17 - número inteiro que indica o tipo de tensão existente na barra no instante anterior ao fenômeno transitório, obedecendo o seguinte:
  - Número 1: tensão constante
  - Número 3: tensão senoidal
  - Número 5: tensão senoidal e a tensão na barra durante o transitório aparece na listagem de saída.

Número 6: a tensão constante e a tensão na barra durante o transitório aparecem na listagem de saída.

e) Colunas 19 a 24 e 26 a 31: tensão e ângulo (no caso senoidal) na fase A para o instante imediatamente anterior ao transitório.

f) Colunas 34 a 39 e 41 a 46: tensão e ângulo para a fase "B".

g) Colunas 48 a 52 e 54 a 59: tensão e ângulo para a fase "C".

#### 10.6.3 - Código 3

Função: Leitura de dados de fontes

Opção: Opcional

Descrição: Este cartão indica que os cartões a seguir contêm dados referentes às fontes de corrente ou de tensão.

Os dados de cada fonte especificada são perfurados em um único cartão obedecendo o seguinte critério:

a) Colunas 1 a 4: número da barra à qual está conectada a fonte.

b) Coluna 6: número inteiro que indica o tipo da fonte dado por:

1 - fonte constante, tipo degrau

2 - fonte do tipo rampa

3 - fonte do tipo senoidal.

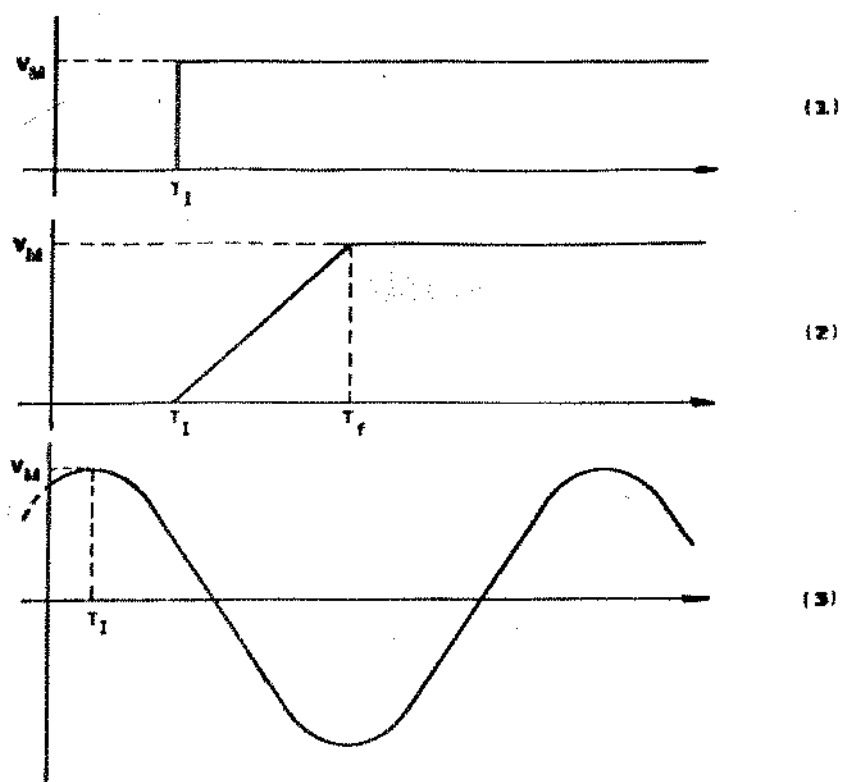


Fig. 10.8 - Ilustração de formas de ondas

- c) Colunas 8 a 13, 29 a 34 e 50 a 55: valores de pico ( $V_f$ ) nas fases A, B e C, respectivamente.
- d) Colunas 15 a 20, 36 a 41 e 57 a 62: instante de tempo em que a fonte é conectada à barra, na unidade de tempo especificada no primeiro cartão do arquivo, por exemplo, se uma fonte numa dada barra tem início em  $TI = 5 \times 10^{-6}$  segundos e a unidade de tempo for microsegundo, deve-se perfurar apenas 5.0.
- e) Colunas 23 a 27, 43 a 48 e 64 a 69: se a fonte for do tipo rampa especifica-se nestes campos

o instante em que a rampa para de crescer ( $T_F$ ) em unidades de tempo, para as fases A, B e C, respectivamente. Se a fonte for do tipo senoidal, especifica-se nestes campos os ângulos de fase em graus, da tensão ou corrente nas fases A, B e C, respectivamente.

#### 10.6.4 - Código 4

Função: Leitura dos dados de linhas

Opção: Opcional

Descrição: Este cartão indica que os cartões a seguir contêm dados referentes às linhas. Os dados de cada linha são perfurados em dois cartões, obedecendo os seguintes critérios:

- Primeiro cartão

- a) Colunas 1 a 4: número da barra emissora
- b) Colunas 6 a 9: número da barra receptora
- c) Colunas 11 a 16, 32 a 37 e 53 a 58: velocidade de propagação dos modos de propagação 1, 2 e 3, respectivamente, em  $10^3$  Km/s. Se a velocidade de propagação for a velocidade da luz não há necessidade de se especificar.
- d) Colunas 18 a 23, 39 a 44, 60 a 65: coeficiente de atenuação para os modos 1, 2 e 3, respectivamente (ou valor máximo da resposta ao degrau unitário).

e) Colunas 23 a 40, 46 a 51 e 67 a 72: constante de tempo da resposta ao degrau unitário, dos modos 1, 2 e 3, respectivamente.

- Segundo cartão:

a) Coluna 2: número inteiro de 1 a 9 que identifica a matriz de transformação modal relacionada à linha em questão. Este campo, quando deixado em branco, significa que a matriz de transformação é a matriz de Clarke, para linhas simétricas (completamente transpostas).

b) Colunas 6 a 9: extensão da linha em Km.

c) Colunas 11 a 16, 18 a 23, 25 a 30, 32 a 37, 39 a 44, 46 a 51, 53 a 58, 60 a 65 e 67 a 72: matriz de admitâncias de surto, fornecida por colunas. Assim, no caso trifásico a primeira coluna da matriz de admitância ocupa os demais campos, seguindo os mesmos critérios.

Um cartão perfurado com 9999 a partir da coluna 1 encerra a leitura dos dados das linhas.

#### 10.6.5 - Código 5

Função: Leitura dos dados de elementos não lineares

Opção: Opcional

Descrição: Este cartão indica que os cartões a seguir contêm dados dos diversos tipos de elementos não lineares conectados às

barras do sistema. A leitura prossegue até que se encontre um cartão "flag" com 9999 perfurado a partir da coluna 1. Os dados de cada tipo de elemento não linear são perfurados em um único cartão, obedecendo os seguintes critérios:

- a) Coluna 1: número inteiro de 1 a 9 que identifica o elemento não linear. Assim é possível especificar até 9 elementos não lineares.
- b) Colunas 6 a 10: tensão disruptiva, no caso do elemento não linear ser um pára-raio. No caso da saturação magnética o campo deve ser deixado em branco.
- c) Colunas 11 a 16 e 18 a 22: tensão e corrente de um ponto da curva característica do elemento não linear.
- d) Colunas 24 a 28 e 30 a 34: tensão e corrente de um ponto da curva característica do elemento não linear.

#### 10.6.6 - Código 6

Função: Leitura de matrizes de coeficientes de transferência

Opção: Opcional

Descrição: Este cartão indica que os cartões a

seguir contém matrizes de transferência de tensão entre duas barras, duas matrizes de transferência devem ser especificadas. Uma que transfere as tensões da barra emissora para a barra receptora e outra da barra receptora para a barra emissora. Estas matrizes são perfuradas em dois cartões, obedecendo os seguintes critérios:

- a) Colunas 1 a 4: número da barra emissora
- b) Colunas 6 a 9: número da barra receptora
- c) Colunas 11 a 16, 18 a 23, 25 a 30, 32 a 37, 39 a 44, 46 a 51, 53 a 58, 60 a 65 e 67 a 72: matriz de coeficientes de transferência da barra emissora para a barra receptora, fornecida por colunas. Assim, se a matriz for  $3 \times 3$  a primeira coluna ocupa os campos 11 a 16, 18 a 23 e 25 a 30, para as demais colunas da matriz segue-se o mesmo critério.

- Segundo cartão

- a) Colunas 11 a 16, 18 a 23, 25 a 30, 32 a 37, 39 a 44, 46 a 51, 53 a 58, 60 a 65 e 67 a 72: matriz de coeficientes de transferência da barra receptora para a barra emissora, fornecida por colunas.

Um cartão perfurado com "9999" a partir da co

luna "1" encerra os dados referentes a este cartão código.

#### 10.6.7 - Código 7

Função: Leitura de dados de parâmetros concentrados

Opção: Opcional

Descrição: Este cartão indica que os cartões a seguir contém dados de parâmetros concentrados. Cada parâmetro concentrado é especificado em um único cartão, perfurado de acordo com o seguinte critério:

- a) Colunas de 1 a 4: número da barra emissora
- b) Colunas de 6 a 9: número da barra receptora
- c) Coluna 10: número inteiro de 1 a 9 que identifica a matriz de transformação modal relacionada ao parâmetro em questão. Este campo quando deixado em branco, significa que a matriz de transformação é a matriz de Clarke (interna ao programa).
- d) Colunas 12 a 19: impedância do parâmetro em valor percentual. Este valor é positivo para elemento indutivo, e negativo para elemento capacitivo.
- e) Colunas 21 a 26: tensão base a que está referida o valor de impedância do elemento, em kV.

f) Colunas 28 a 33: potência base a que está referida o valor da impedância do elemento em MVA.

g) Coluna 35: quando deixada em branco ou perfurada com zero significa que o elemento está conectado em estrêla aterrada, quando perfurado com um número qualquer diferente de zero significa que o elemento está conectado em delta e neste caso ele não pode ser o único elemento conectado à barra.

Um cartão com "9999" perfurado a partir da coluna 1, encerra a leitura dos dados.

#### 10.6.8 - Código 8

Função: Leitura de dados de disjuntores

Opção : Opcional

Descrição: Este cartão indica que os cartões a seguir contêm dados de disjuntores. Os dados de cada disjuntor são perfurados em dois cartões, obedecendo os seguintes critérios:

- Primeiro cartão:

- a) Colunas 1 a 4: número da barra emissora
- b) Colunas 6 a 9: número da barra receptora
- c) Colunas 16 a 37 e 58: número inteiro que in-

dica o estado do disjuntor e o tipo de operação, para as fases "A", "B" e "C", respectivamente. Este número deve ser escolhido de acordo com o critério abaixo:

- Operação de fechamento

- 1 - A referida fase do disjuntor está aberta e fecha no instante especificado.
- 2 - O disjuntor se encontra com o resistor de chaveamento já inserido, portanto com um polo da fase já fechado. O segundo polo da fase que curto-circuita o resistor é fechado no instante especificado.
- 3 - A fase do disjuntor já se encontra completamente fechada e nenhuma operação é realizada.

- Operação de abertura

- 5 - A referida fase está fechada e abre a partir do momento especificado.
- 6 - O disjuntor já se encontra com um dos polos da fase em questão abertos, isto é, com o resistor já inserido. A abertura completa tem início a partir do instante especificado.
- 7 - A fase do disjuntor já se encontra completamente aberta.

- d) Colunas 18 a 23 e 25 a 30: valor de pico da corrente (kA) e ângulo (em graus) que flui pelo disjuntor no instante da abertura para a fase "A".
- e) Colunas 34 a 39 e 46 a 51: valor de pico da corrente (kA) e ângulo (em graus) que flui pelo disjuntor no instante da abertura para a fase "B".
- f) Colunas 60 a 65 e 67 a 72: valor de pico da corrente (kA) e ângulo (em graus) que flui pelo disjuntor no instante da abertura, para a fase "C".

- Segundo cartão

- a) Colunas 4 a 9: valor máximo de corrente para a qual o disjuntor interrompe o arco. Quando deixado em branco o programa assume 0,002.
- b) Colunas 11 a 16, 32 a 37 e 53 a 58: valor ohmico do resistor de chaveamento, quando existir, para as fases A, B e C, respectivamente.
- c) Colunas 18 a 23, 39 a 44 e 60 a 65: instante de tempo, na unidade de tempo considerada, em que o disjuntor deve iniciar a operação de abertura ou fechamento nas fases A, B e C, respectivamente.

- d) Colunas 25 a 30, 46 a 51 e 67 a 72: instante de tempo que o disjuntor deve completar a operação de chaveamento, ou seja, instante a partir do qual o resistor de chaveamento, se existir, deve ser retirado do circuito.

Um cartão com "9999" perfurado a partir da coluna 1 encerra os dados de disjuntores.

#### 10.6.9 - Código 9

Função: Encerra o arquivo de dados

Opção: Obrigatório

Descrição: Este cartão indica para o programa que não há mais nenhum bloco para ser lido.

CAPÍTULO XI

CASOS SIMULADOS

## 11.1 - DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

A disposição ou localização dos pára-raios nas subestações, que fornecem uma adequada coordenação de isolamento pode se apresentar de diversas maneiras. Entretanto, existirão soluções mais econômicas e estas evidentemente deverão ser preferidas. Assim, serão descritos os casos que serão simulados para se chegar às características de isolamento adequadas para os dois tipos de subestações em estudo. Os resultados obtidos nas simulações efetuadas serão representados em uma tabela.

Vale lembrar que a coordenação de isolamento é feita através do estudo do desempenho da subestação às descargas atmosféricas diretas ou indiretas.

O roteiro inicial a ser seguido admite que os pára-raios são do tipo externo e convencional, podendo ser adotado posteriormente, caso se queira, pára-raios do tipo óxido de zinco. A aproximação dos pára-raios na entrada da subestação é um recurso também adotado, caso a configuração inicial não se mostre adequada.

A colocação inicial dos pára-raios de linha (PR.1 e PR.2) é externa e são os primeiros equipamentos na chegada da subestação, para sobretensões que entram pela linha. A seguir, aos pára-raios de linha, encontram-se os capacitores de acoplamento de Carrier (CAC1 e CAC2). Os transformadores também estão protegidos por pára-raios externos (PR.3 e PR.4) e possuem em seus "bays" (circuitos), divisores capacitivos de potencial (DCP3 e DCP4). Além disso, a subestação possui dois divisores capacitivos

vos de potencial (DCP1 e DCP2) ligados ao barramento.

Uma vez encontrada a configuração ideal dos pára-raios que irá proteger a subestação (tipo e localização), a proteção deverá ser obtida em todas as possibilidades em que a subestação vier a operar na sua vida útil.

Diante de condições normais de operação (disjuntores fechados), o surto proveniente de uma linha poderá atingir todos os equipamentos da subestação.

Adotar-se-á neste trabalho as simulações por fase, ficando portanto em aberto as outras alternativas caso existam interesses.

Para efeito de ordem proceder-se-á da seguinte forma:

1 - Considerar-se-á sobretensões (rampa), provenientes de descargas atmosféricas, direta ou indireta, aplicadas na entrada das subestações pela linha 1, com todas as chaves fechadas e com as subestações desenergizadas. As tensões serão oscilografadas e tabuladas para diversas situações, seguidas de comentários para as comparações feitas sobre os casos simulados.

2 - Idem, porém com as subestações energizadas.

3 - Idem, porém com uma chave (K4) aberta e as subestações desenergizadas.

4 - Idem, porém com uma chave (K4) aberta e as subestações energizadas.

Como se pode observar, todos os casos foram simulados com uma descarga atmosférica de 2000 kV, com tempo de subida de  $1,2\mu s$  injetada sobre o barramento 101 à velocidade de propagação de

300.000 km/s. Não foi considerada a atenuação devido o estudo se ater a pequenas distâncias, ou seja, dentro da subestação.

A seguir, tem-se a tabela 11.1 que indica as máximas tensões para os diversos casos, em várias barras numeradas conforme as figuras 10.3 e 10.6 para as subestações convencionais e a SF<sub>6</sub>, respectivamente.

Tabela 11.1. - Casos simulados com tensão de 2000 kV,  
1,2  $\mu$ s (rampa) na linha 1.

| CASO |                                                                                                 | 101     | 111      | 119     | 124     | 139     | 146     |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| 1    | Subestação SF <sub>6</sub> com Para Raio/Com Tensão Inicial/5m-Conexão/4m-distância             | 2.391,3 | 1.156,2  | 1.908,9 | 1.742,5 | 1.314,4 | 1.361,9 |
| 2    | Subestação SF <sub>6</sub> com Para Raio/Com Tensão Inicial/8m conexão / 4m distância           | 2.391,3 | 1.211,0  | 2.004,4 | 1.854,3 | 1.310,3 | 1.338,3 |
| 3    | Subestação SF <sub>6</sub> com Para Raio/Com tensão/inicial/8m-Conexão/8m-Distância.            | 2.391,3 | 1.434,0  | 2.004,4 | 1.538,2 | 1.122,2 | 1.148,7 |
| 4    | Subestação Convencional com Para Raio/Com Tensão Inicial/ 5m-Conexão/4m - Distância             | 2.391,3 | 1.073,7  | 2.268,3 | 1.728,2 | 967,4   | 1.071,3 |
| 5    | Subestação convencional com Para Raio/Com tensão Inicial/ 8 m Conexão /8 m                      | 2.391,3 | 1.454,75 | 1.904,7 | 1.617,9 | 975,5   | 972,6   |
| 6    | Subestação SF <sub>6</sub> Com Para Raio/ com tensão inicial 5m -Conexão/4m - Distância/K4 OFF. | 2.391,3 | 1.144,2  | 1.985,4 | 1.928,9 | 1.262,4 | 1.255,3 |
| 7    | Subestação Convencional com Para Raio/Com Tensão Inicial/ 5 m e Conexão/ 4m-Dist./ k4 OFF.      | 2.391,3 | 1.123,3  | 2.611,1 | 1.984,1 | 929,8   | 923,0   |
| 8    | Subestação Convencional sem Para Raio/Sem Tensão Inicial.                                       | 1.983,3 | 2.304,2  | 2.266,9 | 2.366,9 | 2.365,9 | 2.366,2 |
| 9    | Subestação SF <sub>6</sub> Sem Para Raio/ Sem Tensão Inicial                                    | 1.983,3 | 3.299,3  | 3.336,7 | 3.420,2 | 3.456,6 | 3.507,7 |

Continuação da Tabela 11.1

| CASO |                                                                                                      | 101     | 111      | 119     | 124     | 139     | 146      |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|
| 10   | Subestação SF <sub>6</sub> Sem Para Raio/ Com Tensão Inicial.                                        | 2.391,3 | 3.707,3  | 3.744,7 | 3.828,2 | 3.864,6 | 3.915,7  |
| 11   | Subestação Convencional Sem Para Raio/Com Tensão Inicial                                             | 2.391,3 | 2.712,2  | 2.674,9 | 2.774,9 | 2.773,9 | 2.774,2  |
| 12   | Subestação SF <sub>6</sub> Com Para Raio/Sem Tensão Inicial 8m- Conexão/ 8m - Distância              | 1.983,3 | 1.325,0  | 2.352,5 | 2.810,9 | 1.030,5 | -1.138,2 |
| 13   | Subestação convencional com Para Raio/Sem Tensão Inicial 8 m - Conexão/8m -Distância                 | 1.983,3 | -1.483,4 | 1.488,9 | 1.779,2 | 982,7   | 936,9    |
| 14   | Subestação convencional com Para Raios / Sem Tensão Inicial 8m Conexão/ 4m -Distância                | 1.983,3 | -1.075,8 | 2.194,5 | 1.747,9 | 1.107,4 | 1.012,4  |
| 15   | Subestação em SF <sub>6</sub> Com Para Raios/Sem Tensão Inicial 8 m - Conexão 4m -Distância          | 1.983,3 | 1.118,8  | 1.570,2 | 1.603,4 | 1.316,5 | 1.337,5  |
| 16   | Subestação em SF <sub>6</sub> K 4 OFF com Para Raios / Sem Tensão Inicial 5 m-Conexão/ 4m-Distância. | 1.983,3 | 1.093,2  | 1.694,4 | 1.603,5 | 1.160,1 | 1.338,9  |
| 17   | Subestação em SF <sub>6</sub> com Para Raios/Sem Tensão Inicial 5 m- Conexão 4 m - distância         | 1.983,3 | 1.136,9  | 1.551,8 | 1.547,3 | 1.248,8 | 1.241,7  |
| 18   | Subestação convencional com Para Raios/ sem tensão Inicial 5 m - Conexão/ 4m-distância/ K 4 OFF      | 1.983,3 | 1.089,3  | 3.604,3 | 3.090,1 | 1.015,7 | 1.011,8  |
| 19   | Subestação Convencional com Para Raios / Sem Tensão Inicial 5m conexão /4m -Distância                | 1.983,3 | 1.030,5  | 2.390,0 | 1.803,7 | 1.033,5 | 985,4    |

## CAPÍTULO XII

### COMPARAÇÕES E COMENTÁRIOS SOBRE OS CASOS SIMULADOS



ESTUDO PRORRAGAÇÃO NA SUBESTAÇÃO COMVENIÊNCIA - TESTE - W.M. DIB  
 COM PARA APOL/SEM TENSÃO INICIAL/5 M. CONEXÃO/4 M. DISTÂNCIA/2  
 RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 101 BARRA 101 FASE A

| TEMPO EM | TENSÃO NA BARRA - [EM KV] |         |         |          |          |
|----------|---------------------------|---------|---------|----------|----------|
| 1.00-00  | 0.0                       | 595.663 | 793.326 | 1189.989 | 1586.652 |
| SEGUINDO |                           |         |         |          | 1983.316 |
| 0.0      |                           |         |         |          |          |
| 2.000    |                           |         |         |          |          |
| 4.000    |                           |         |         |          |          |
| 6.000    |                           |         |         |          |          |
| 8.000    |                           |         |         |          |          |
| 10.000   |                           |         |         |          |          |
| 12.000   |                           |         |         |          |          |
| 14.000   |                           |         |         |          |          |
| 16.000   |                           |         |         |          |          |
| 18.000   |                           |         |         |          |          |
| 20.000   |                           |         |         |          |          |
| 22.000   |                           |         |         |          |          |
| 24.000   |                           |         |         |          |          |
| 26.000   |                           |         |         |          |          |
| 28.000   |                           |         |         |          |          |
| 30.000   |                           |         |         |          |          |
| 32.000   |                           |         |         |          |          |
| 34.000   |                           |         |         |          |          |
| 36.000   |                           |         |         |          |          |
| 38.000   |                           |         |         |          |          |
| 40.000   |                           |         |         |          |          |
| 42.000   |                           |         |         |          |          |
| 44.000   |                           |         |         |          |          |
| 46.000   |                           |         |         |          |          |
| 48.000   |                           |         |         |          |          |
| 50.000   |                           |         |         |          |          |
| 52.000   |                           |         |         |          |          |
| 54.000   |                           |         |         |          |          |
| 56.000   |                           |         |         |          |          |
| 58.000   |                           |         |         |          |          |
| 60.000   |                           |         |         |          |          |
| 62.000   |                           |         |         |          |          |
| 64.000   |                           |         |         |          |          |
| 66.000   |                           |         |         |          |          |
| 68.000   |                           |         |         |          |          |
| 70.000   |                           |         |         |          |          |
| 72.000   |                           |         |         |          |          |
| 74.000   |                           |         |         |          |          |
| 76.000   |                           |         |         |          |          |
| 78.000   |                           |         |         |          |          |
| 80.000   |                           |         |         |          |          |
| 82.000   |                           |         |         |          |          |
| 84.000   |                           |         |         |          |          |
| 86.000   |                           |         |         |          |          |
| 88.000   |                           |         |         |          |          |
| 90.000   |                           |         |         |          |          |
| 92.000   |                           |         |         |          |          |
| 94.000   |                           |         |         |          |          |
| 96.000   |                           |         |         |          |          |
| 98.000   |                           |         |         |          |          |

R.D.  
 1983.297  
 1983.248  
 1983.199  
 1983.150  
 1983.101  
 1983.052  
 1983.004  
 1982.955  
 1982.906  
 1982.858  
 1982.809  
 1982.760  
 1982.711  
 1982.663  
 1982.614  
 1982.566  
 1982.517  
 1982.469  
 1982.420  
 1982.371  
 1982.322  
 1982.274  
 1982.225  
 1982.177  
 1982.128  
 1982.079  
 1982.031  
 1981.983  
 1981.934  
 1981.886  
 1981.837  
 1981.789  
 1981.740  
 1981.691  
 1981.642  
 1981.593  
 1981.545  
 1981.496  
 1981.448  
 1981.399  
 1981.351  
 1981.302  
 1981.253  
 1981.205  
 1981.156  
 1981.108  
 1981.059  
 1981.010  
 1980.962

Caso 19

ESTUDO PRORRAGAÇÃO NA SUBESTAÇÃO EM SF6 - TESTE - W.M. DIB  
 COM PARA APOL/SEM TENSÃO INICIAL/5 M. CONEXÃO/4 M. DISTÂNCIA/2  
 RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 101 BARRA 101 FASE A

| TEMPO EM | TENSÃO NA BARRA - [EM KV] |         |         |          |          |
|----------|---------------------------|---------|---------|----------|----------|
| 1.00-00  | 0.0                       | 595.663 | 793.326 | 1189.989 | 1586.652 |
| SEGUINDO |                           |         |         |          | 1983.316 |
| 0.0      |                           |         |         |          |          |
| 2.000    |                           |         |         |          |          |
| 4.000    |                           |         |         |          |          |
| 6.000    |                           |         |         |          |          |
| 8.000    |                           |         |         |          |          |
| 10.000   |                           |         |         |          |          |
| 12.000   |                           |         |         |          |          |
| 14.000   |                           |         |         |          |          |
| 16.000   |                           |         |         |          |          |
| 18.000   |                           |         |         |          |          |
| 20.000   |                           |         |         |          |          |
| 22.000   |                           |         |         |          |          |
| 24.000   |                           |         |         |          |          |
| 26.000   |                           |         |         |          |          |
| 28.000   |                           |         |         |          |          |
| 30.000   |                           |         |         |          |          |
| 32.000   |                           |         |         |          |          |
| 34.000   |                           |         |         |          |          |
| 36.000   |                           |         |         |          |          |
| 38.000   |                           |         |         |          |          |
| 40.000   |                           |         |         |          |          |
| 42.000   |                           |         |         |          |          |
| 44.000   |                           |         |         |          |          |
| 46.000   |                           |         |         |          |          |
| 48.000   |                           |         |         |          |          |
| 50.000   |                           |         |         |          |          |
| 52.000   |                           |         |         |          |          |
| 54.000   |                           |         |         |          |          |
| 56.000   |                           |         |         |          |          |
| 58.000   |                           |         |         |          |          |
| 60.000   |                           |         |         |          |          |
| 62.000   |                           |         |         |          |          |
| 64.000   |                           |         |         |          |          |
| 66.000   |                           |         |         |          |          |
| 68.000   |                           |         |         |          |          |
| 70.000   |                           |         |         |          |          |
| 72.000   |                           |         |         |          |          |
| 74.000   |                           |         |         |          |          |
| 76.000   |                           |         |         |          |          |
| 78.000   |                           |         |         |          |          |
| 80.000   |                           |         |         |          |          |
| 82.000   |                           |         |         |          |          |
| 84.000   |                           |         |         |          |          |
| 86.000   |                           |         |         |          |          |
| 88.000   |                           |         |         |          |          |
| 90.000   |                           |         |         |          |          |
| 92.000   |                           |         |         |          |          |
| 94.000   |                           |         |         |          |          |
| 96.000   |                           |         |         |          |          |
| 98.000   |                           |         |         |          |          |

D.C.  
 1983.297  
 1983.248  
 1983.199  
 1983.150  
 1983.101  
 1983.052  
 1983.004  
 1982.955  
 1982.906  
 1982.858  
 1982.809  
 1982.760  
 1982.711  
 1982.663  
 1982.614  
 1982.566  
 1982.517  
 1982.469  
 1982.420  
 1982.371  
 1982.322  
 1982.274  
 1982.225  
 1982.177  
 1982.128  
 1982.079  
 1982.031  
 1981.983  
 1981.934  
 1981.886  
 1981.837  
 1981.789  
 1981.740  
 1981.691  
 1981.642  
 1981.593  
 1981.545  
 1981.496  
 1981.448  
 1981.399  
 1981.351  
 1981.302  
 1981.253  
 1981.205  
 1981.156  
 1981.108  
 1981.059  
 1981.010  
 1980.962

Caso 17

ESTUDO PROPAGAÇÃO NA SUBESTAÇÃO COMUTADORA - TENSE - W.M. DIR  
SEM PARA-BRISOS//COM TENSÃO INICIAL DE 408 KV//DESCARGA DE 2000 KV//

RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 101 BARRA 101 FASE A

| TEMPO EM | TENSÃO NA BARRA - (EM KV) |         |          |          |          |
|----------|---------------------------|---------|----------|----------|----------|
| 1.01-04  | 408.000                   | 804.663 | 1201.326 | 1597.989 | 1994.652 |
| SECONDO  |                           |         |          |          | 2391.316 |
| 0.0      |                           |         |          |          | 408.000  |
| 2.000    |                           |         |          |          | 2391.316 |
| 4.000    |                           |         |          |          | 2391.316 |
| 6.000    |                           |         |          |          | 2391.315 |
| 8.000    |                           |         |          |          | 2391.314 |
| 10.000   |                           |         |          |          | 2391.313 |
| 12.000   |                           |         |          |          | 2391.312 |
| 14.000   |                           |         |          |          | 2391.311 |
| 16.000   |                           |         |          |          | 2391.309 |
| 18.000   |                           |         |          |          | 2391.307 |
| 20.000   |                           |         |          |          | 2391.305 |
| 22.000   |                           |         |          |          | 2391.302 |
| 24.000   |                           |         |          |          | 2391.300 |
| 26.000   |                           |         |          |          | 2391.297 |
| 28.000   |                           |         |          |          | 2391.293 |
| 30.000   |                           |         |          |          | 2391.289 |
| 32.000   |                           |         |          |          | 2391.287 |
| 34.000   |                           |         |          |          | 2391.283 |
| 36.000   |                           |         |          |          | 2391.279 |
| 38.000   |                           |         |          |          | 2391.274 |
| 40.000   |                           |         |          |          | 2391.270 |
| 42.000   |                           |         |          |          | 2391.265 |
| 44.000   |                           |         |          |          | 2391.260 |
| 46.000   |                           |         |          |          | 2391.255 |
| 48.000   |                           |         |          |          | 2391.250 |
| 50.000   |                           |         |          |          | 2391.244 |
| 52.000   |                           |         |          |          | 2391.238 |
| 54.000   |                           |         |          |          | 2391.232 |
| 56.000   |                           |         |          |          | 2391.225 |
| 58.000   |                           |         |          |          | 2391.219 |
| 60.000   |                           |         |          |          | 2391.212 |
| 62.000   |                           |         |          |          | 2391.205 |
| 64.000   |                           |         |          |          | 2391.198 |
| 66.000   |                           |         |          |          | 2391.190 |
| 68.000   |                           |         |          |          | 2391.182 |
| 70.000   |                           |         |          |          | 2391.174 |
| 72.000   |                           |         |          |          | 2391.166 |
| 74.000   |                           |         |          |          | 2391.157 |
| 76.000   |                           |         |          |          | 2391.148 |
| 78.000   |                           |         |          |          | 2391.140 |
| 80.000   |                           |         |          |          | 2391.131 |
| 82.000   |                           |         |          |          | 2391.121 |
| 84.000   |                           |         |          |          | 2391.112 |
| 86.000   |                           |         |          |          | 2391.102 |
| 88.000   |                           |         |          |          | 2391.092 |
| 90.000   |                           |         |          |          | 2391.082 |
| 92.000   |                           |         |          |          | 2391.071 |
| 94.000   |                           |         |          |          | 2391.060 |
| 96.000   |                           |         |          |          | 2391.049 |
| 98.000   |                           |         |          |          | 2391.038 |

Caso 11

ESTUDO PROPAGAÇÃO NA SUBESTAÇÃO EM 3 FASES - W.M. DIR  
SEM PARA-BRISOS//COM TENSÃO INICIAL DE 408 KV//DESCARGA DE 2000 KV//

RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 101 BARRA 101 FASE A

| TEMPO EM | TENSÃO NA BARRA - 1 EM KV |         |          |          |          |
|----------|---------------------------|---------|----------|----------|----------|
| 1.01-04  | 408.000                   | 804.663 | 1201.326 | 1597.989 | 1994.652 |
| SECONDO  |                           |         |          |          | 2391.316 |
| 0.0      |                           |         |          |          | 408.000  |
| 2.000    |                           |         |          |          | 2391.316 |
| 4.000    |                           |         |          |          | 2391.316 |
| 6.000    |                           |         |          |          | 2391.315 |
| 8.000    |                           |         |          |          | 2391.314 |
| 10.000   |                           |         |          |          | 2391.313 |
| 12.000   |                           |         |          |          | 2391.312 |
| 14.000   |                           |         |          |          | 2391.311 |
| 16.000   |                           |         |          |          | 2391.309 |
| 18.000   |                           |         |          |          | 2391.307 |
| 20.000   |                           |         |          |          | 2391.305 |
| 22.000   |                           |         |          |          | 2391.302 |
| 24.000   |                           |         |          |          | 2391.300 |
| 26.000   |                           |         |          |          | 2391.297 |
| 28.000   |                           |         |          |          | 2391.293 |
| 30.000   |                           |         |          |          | 2391.289 |
| 32.000   |                           |         |          |          | 2391.287 |
| 34.000   |                           |         |          |          | 2391.283 |
| 36.000   |                           |         |          |          | 2391.279 |
| 38.000   |                           |         |          |          | 2391.274 |
| 40.000   |                           |         |          |          | 2391.270 |
| 42.000   |                           |         |          |          | 2391.265 |
| 44.000   |                           |         |          |          | 2391.260 |
| 46.000   |                           |         |          |          | 2391.255 |
| 48.000   |                           |         |          |          | 2391.250 |
| 50.000   |                           |         |          |          | 2391.244 |
| 52.000   |                           |         |          |          | 2391.238 |
| 54.000   |                           |         |          |          | 2391.232 |
| 56.000   |                           |         |          |          | 2391.225 |
| 58.000   |                           |         |          |          | 2391.219 |
| 60.000   |                           |         |          |          | 2391.212 |
| 62.000   |                           |         |          |          | 2391.205 |
| 64.000   |                           |         |          |          | 2391.198 |
| 66.000   |                           |         |          |          | 2391.190 |
| 68.000   |                           |         |          |          | 2391.182 |
| 70.000   |                           |         |          |          | 2391.174 |
| 72.000   |                           |         |          |          | 2391.166 |
| 74.000   |                           |         |          |          | 2391.157 |
| 76.000   |                           |         |          |          | 2391.148 |
| 78.000   |                           |         |          |          | 2391.140 |
| 80.000   |                           |         |          |          | 2391.131 |
| 82.000   |                           |         |          |          | 2391.121 |
| 84.000   |                           |         |          |          | 2391.112 |
| 86.000   |                           |         |          |          | 2391.102 |
| 88.000   |                           |         |          |          | 2391.092 |
| 90.000   |                           |         |          |          | 2391.082 |
| 92.000   |                           |         |          |          | 2391.071 |
| 94.000   |                           |         |          |          | 2391.060 |
| 96.000   |                           |         |          |          | 2391.049 |
| 98.000   |                           |         |          |          | 2391.038 |

Caso 10

ESTUDO FARMACOLÓGICO NA SUBESTACÃO (CONVENÇÃO) - TISE - W. H. 010  
COM PARA-RAIOS, COM TENSÃO INICIAL/VS M. LUNTA/ALZ. M. DISTÂNCIA/VS

RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - TDI BARRA TDI FASE A

| TEMPO EM<br>1.0E-04<br>SEGUNDOS | 408.000 | 804.663 | 1201.326 | 1597.989 | 1994.652 | 2391.316 |
|---------------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
| 0.0                             |         |         |          |          |          |          |
| 2.000                           |         |         |          |          |          |          |
| 4.000                           |         |         |          |          |          |          |
| 6.000                           |         |         |          |          |          |          |
| 8.000                           |         |         |          |          |          |          |
| 10.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 12.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 14.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 16.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 18.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 20.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 22.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 24.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 26.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 28.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 30.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 32.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 34.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 36.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 38.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 40.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 42.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 44.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 46.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 48.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 50.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 52.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 54.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 56.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 58.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 60.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 62.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 64.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 66.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 68.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 70.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 72.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 74.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 76.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 78.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 80.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 82.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 84.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 86.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 88.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 90.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 92.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 94.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 96.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 98.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 100.000                         |         |         |          |          |          |          |

Caso 4

ESTUDO FARMACOLÓGICO NA SUBESTACÃO (CONVENÇÃO) - TISE - W. H. 010  
COM PARA-RAIOS, COM TENSÃO INICIAL/VS M. LUNTA/ALZ. M. DISTÂNCIA/VS

RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - TDI BARRA TDI FASE A

| TEMPO EM<br>1.0E-04<br>SEGUNDOS | 408.000 | 804.663 | 1201.326 | 1597.989 | 1994.652 | 2391.316 |
|---------------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
| 0.0                             |         |         |          |          |          |          |
| 2.000                           |         |         |          |          |          |          |
| 4.000                           |         |         |          |          |          |          |
| 6.000                           |         |         |          |          |          |          |
| 8.000                           |         |         |          |          |          |          |
| 10.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 12.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 14.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 16.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 18.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 20.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 22.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 24.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 26.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 28.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 30.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 32.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 34.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 36.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 38.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 40.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 42.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 44.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 46.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 48.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 50.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 52.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 54.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 56.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 58.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 60.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 62.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 64.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 66.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 68.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 70.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 72.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 74.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 76.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 78.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 80.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 82.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 84.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 86.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 88.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 90.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 92.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 94.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 96.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 98.000                          |         |         |          |          |          |          |
| 100.000                         |         |         |          |          |          |          |

Caso 6

## COMENTÁRIOS:—

Pode-se observar nestas comparações, o tempo de subida de tensão (rampa), com  $1,2\mu s$ , conforme intenção inicial.

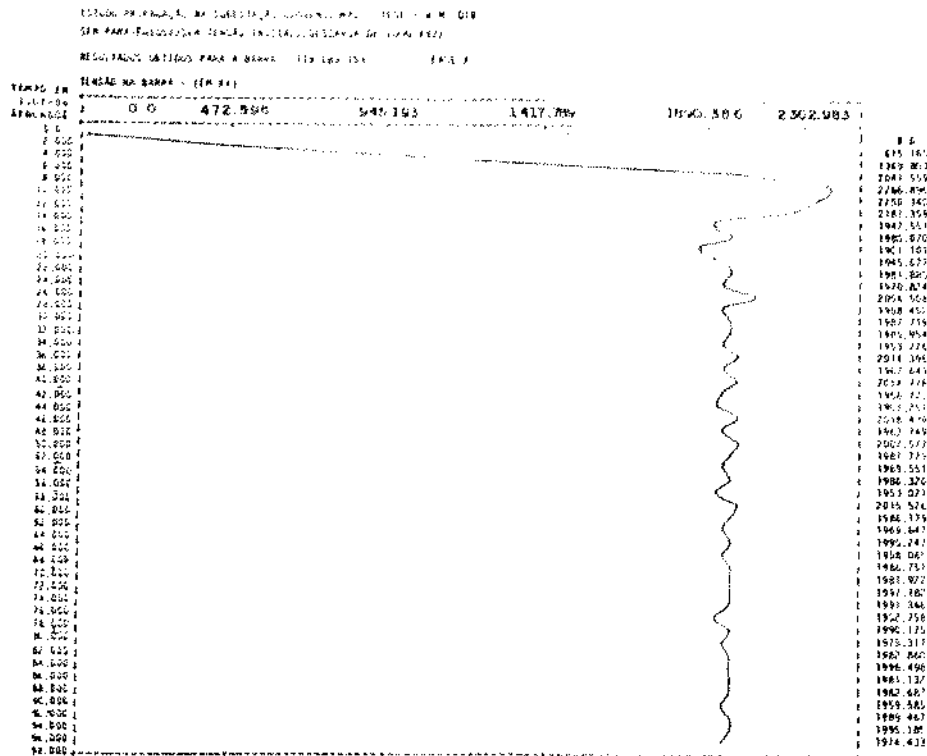
Com as subestações desenergizadas, independentemente de ser convencional ou  $SF_6$ , estar com pára-raios ou não, para a barra 101, a tensão atingida foi de 1983,3 kV. Esta situação era de se esperar, visto que a barra 101 está na entrada.

Para a situação simulada com as subestações energizadas a única diferença foi o acréscimo da tensão nominal à sobretensão incidente, totalizando 2391,3 kV.

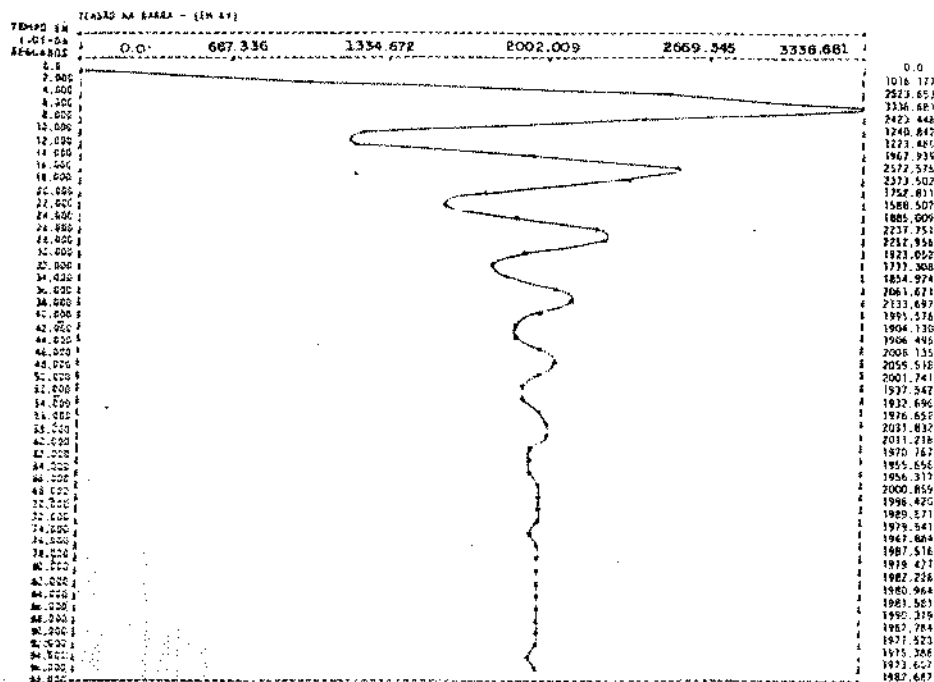
## 12.2 - COMPARAÇÃO Nº 2 (Caso 8 x Caso 9)

Característica: Subestações sem pára-raios/ e sem tensão inicial/ todas as chaves fechadas.

Barramentos oscilografados: 119/124/139/146.

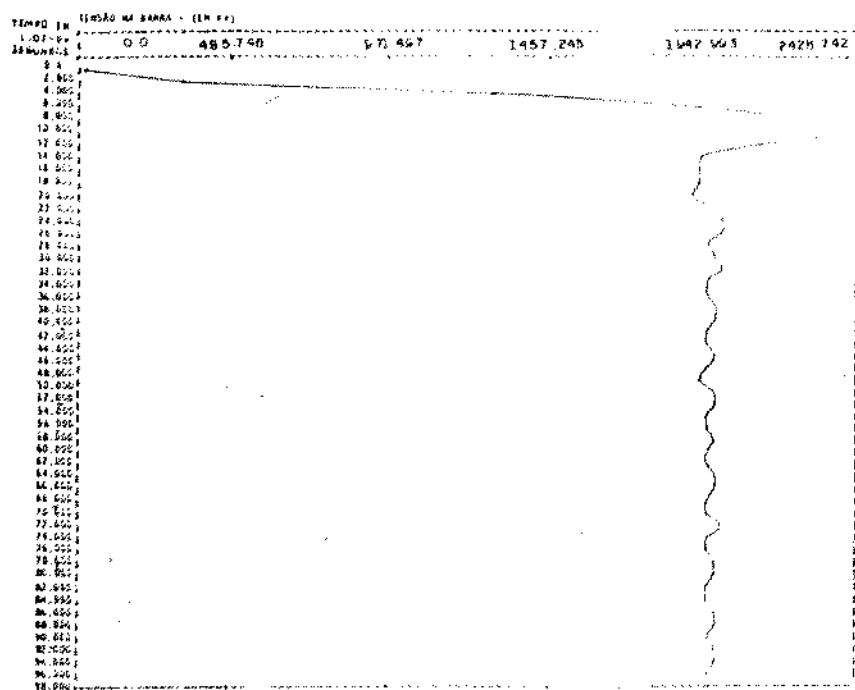


Caso 8



Caso 9

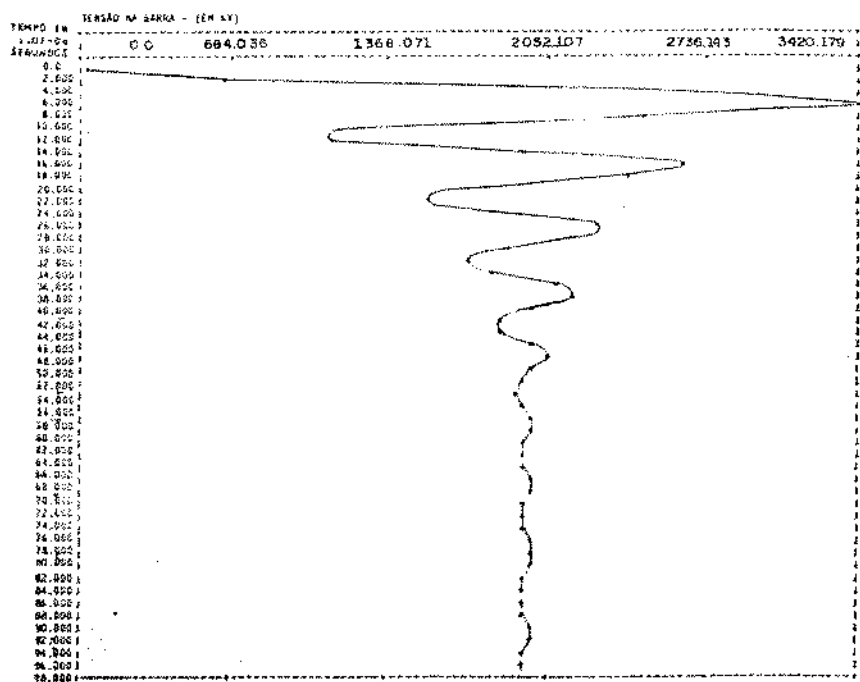
ESTUDO PRIMAVERA NA SUBSTACAO COMERCIAL - FASE - W. N. DIE  
SEM PARA-RAIOS//SEM TENSÃO INICIAL//DISCHARGA DE 2000 KV//  
RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 124 KEV-125 FASE A



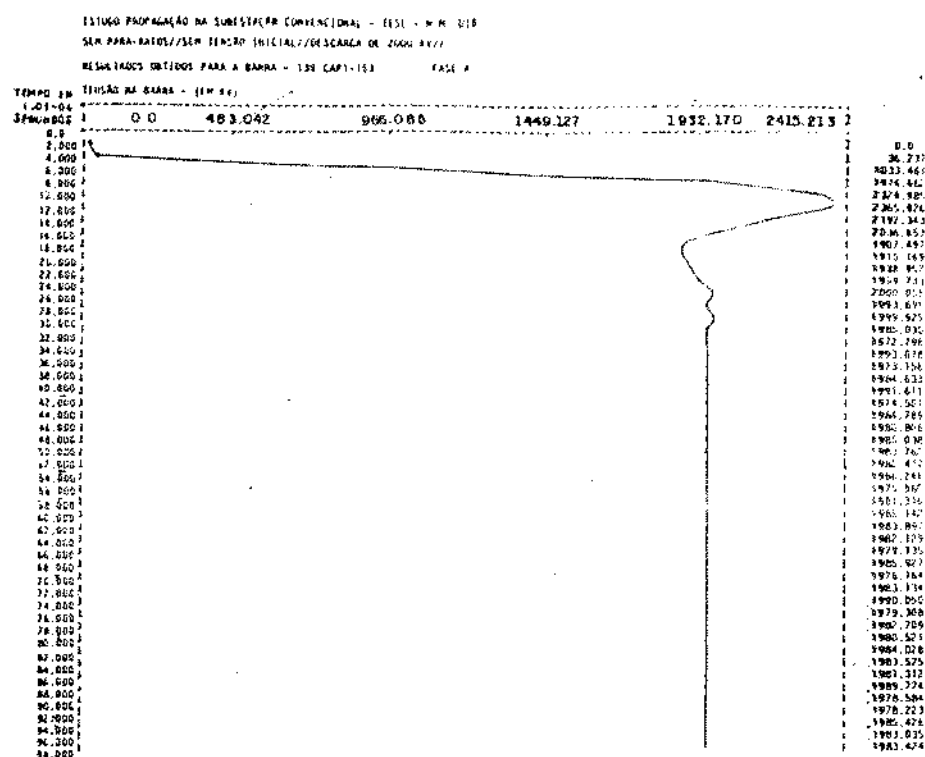
Caso 8

ESTUDO PRIMAVERA NA SUBSTACAO EM 516 - FASE - W. N. DIE  
SEM PARA-RAIOS//SEM TENSÃO INICIAL//DISCHARGA DE 2000 KV//

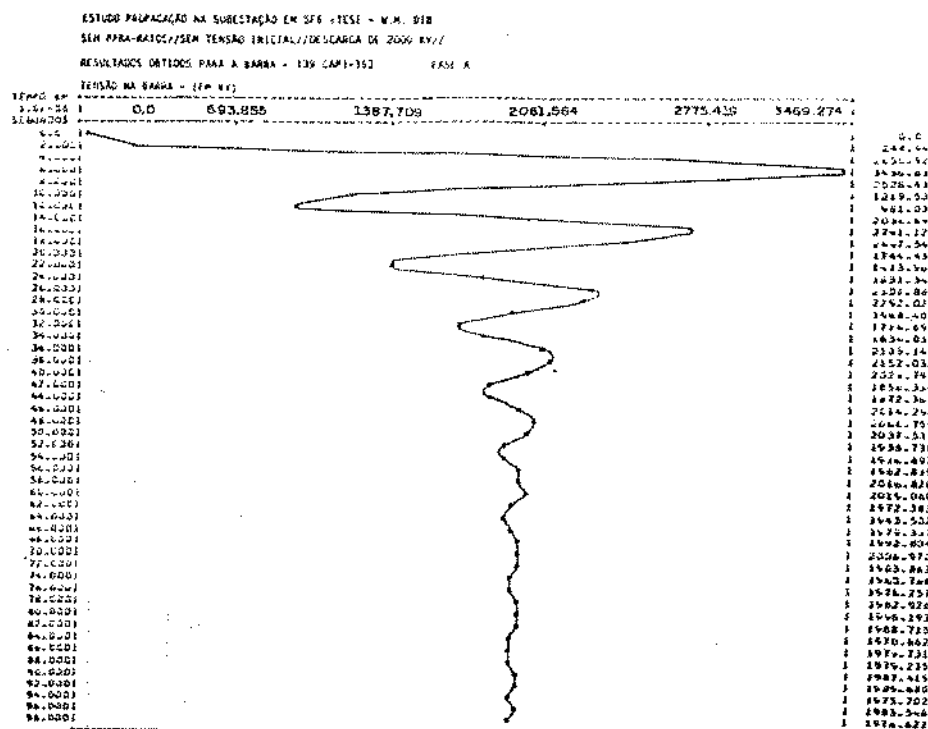
RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 124 KEV-125 FASE A



Caso 9



Caso 8

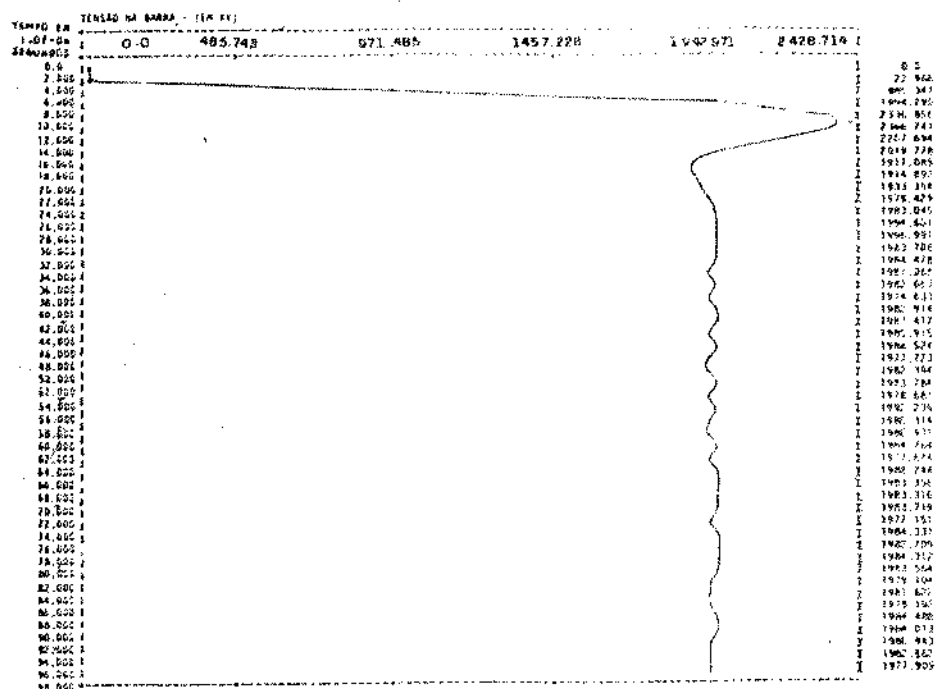


Caso 9

ESTUDO PROPAGAÇÃO NA SURESTAÇÃO EM SFA - TESTE - M.M. DIN  
SEM PARA-RAIOS///SEM TENSÃO INICIAL///DESCARGA DE 2000 KV//

RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 146 CAPP-15A

PAGE 4

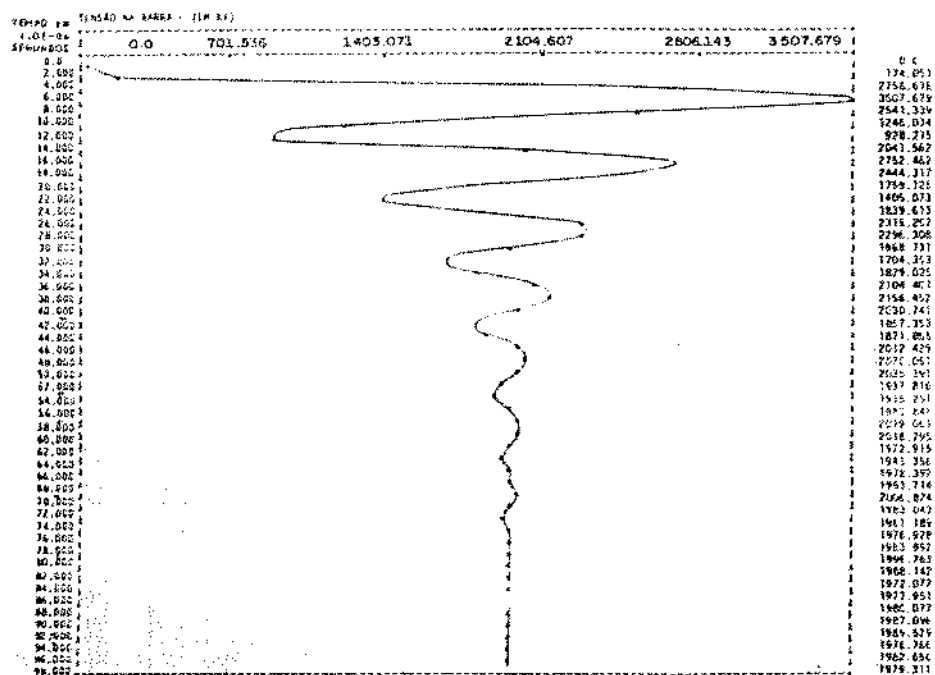


Caso 8

ESTUDO PROPAGAÇÃO NA SURESTAÇÃO EM SFA - TESTE - M.M. DIN  
SEM PARA-RAIOS///SEM TENSÃO INICIAL///DESCARGA DE 2000 KV//

RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 146 CAPP-15A

PAGE 4



Caso 9

## COMENTÁRIOS:-

Comparou-se aqui as subestações SF<sub>6</sub> e convencional, sem pára-raio e sem tensão inicial nas barras 119, onde está localizado o D.C.P. (Divisor Capacitivo de Potencial), 124, onde está localizado um disjuntor (CB-5) e nas saídas para os transformadores, ou seja, nas barras 139 e 146.

Estes casos foram escolhidos exatamente para se observar que níveis de tensão atingiríamos estes pontos importantes caso não existissem os pára-raios.

Pode-se observar que na comparação entre as subestações convencionais e SF<sub>6</sub> os oscilogramas apresentam-se com diferenças acentuadas, mantendo estes comportamentos em todas as barras onde foram feitas as simulações.

Observa-se também que o pico alcançado na SF<sub>6</sub> é bem maior do que na convencional (3.336,8 contra 2.266,9 kV), embora na SF<sub>6</sub> o valor estável da sobretensão após as oscilações iniciais se apresenta da mesma ordem de grandeza do valor estável da convencional.

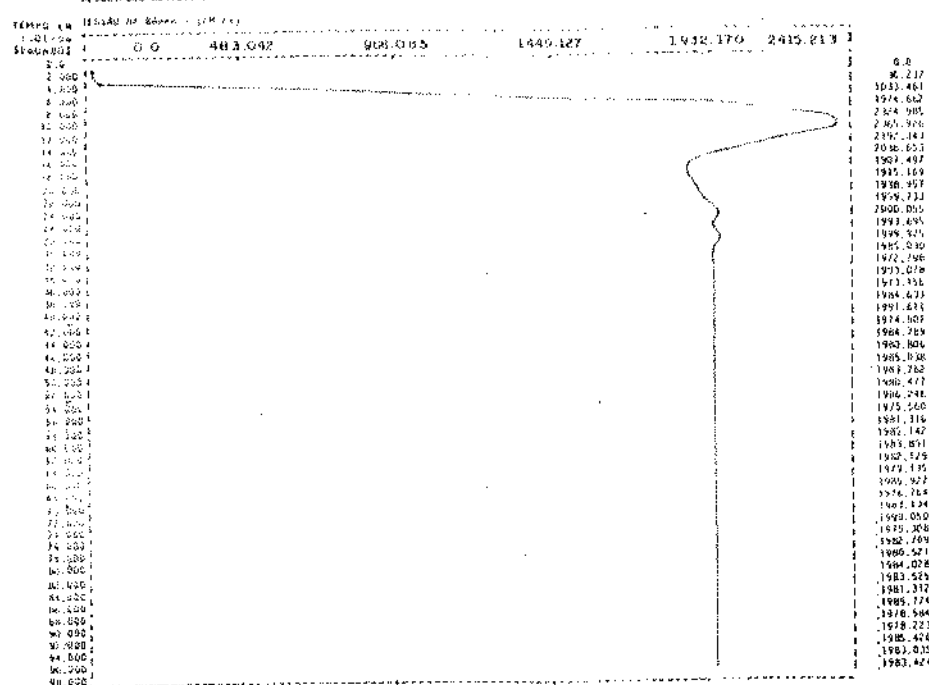
Observa-se também para as barras 139 e 146 que existe um retardo de 0,6µs para as convencionais contra 0,4µs da SF<sub>6</sub>, devido à propagação da sobretensão. Esta diferença, embora pequena, era de se esperar, devido às dimensões da SF<sub>6</sub> serem menores do que as da convencional.

## 12.3 - COMPARAÇÃO Nº 3 (Caso 8 x Caso 11)

Característica: Subestação Convencional sem para-raios /  
com e sem tensão inicial/ todas as cha-  
ves fechadas).

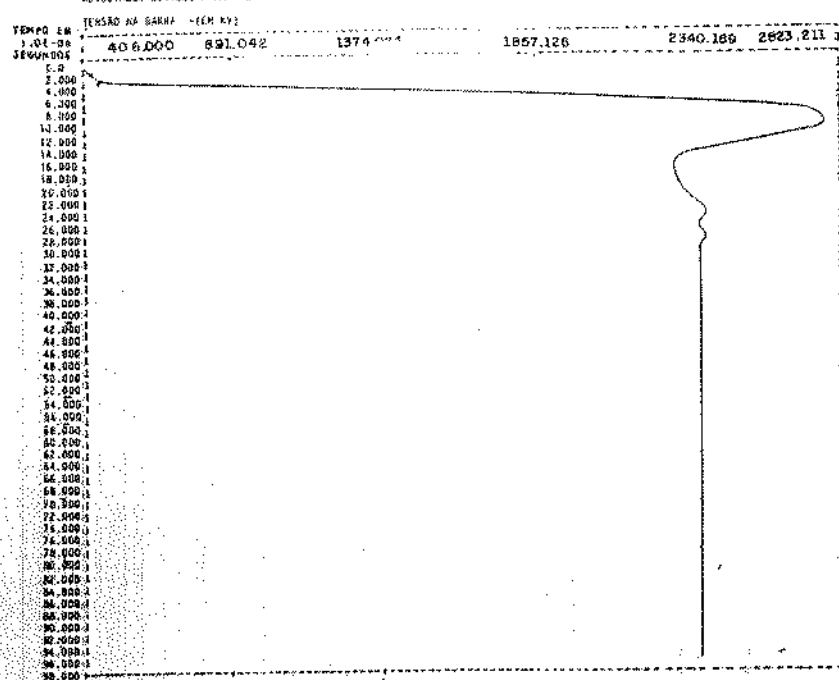
Barramento oscilografado: 139

ESTUDO PROPAGAÇÃO NA SUBESTAÇÃO CONVENCIONAL - TESE - U.F.M. D.F.O.  
SEM PARA-RAIOS/COM TENSÃO INICIAL/DESCARGA DE 2000 KVA  
RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 139 CAPS=153 FASE A



Caso 8

ESTUDO PROPAGAÇÃO NA SUBESTAÇÃO CONVENCIONAL - TESE - U.F.M. D.F.O.  
SEM PARA-RAIOS/COM TENSÃO INICIAL/DESCARGA DE 2000 KVA  
RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 139 CAPS=153 FASE A



Caso 11

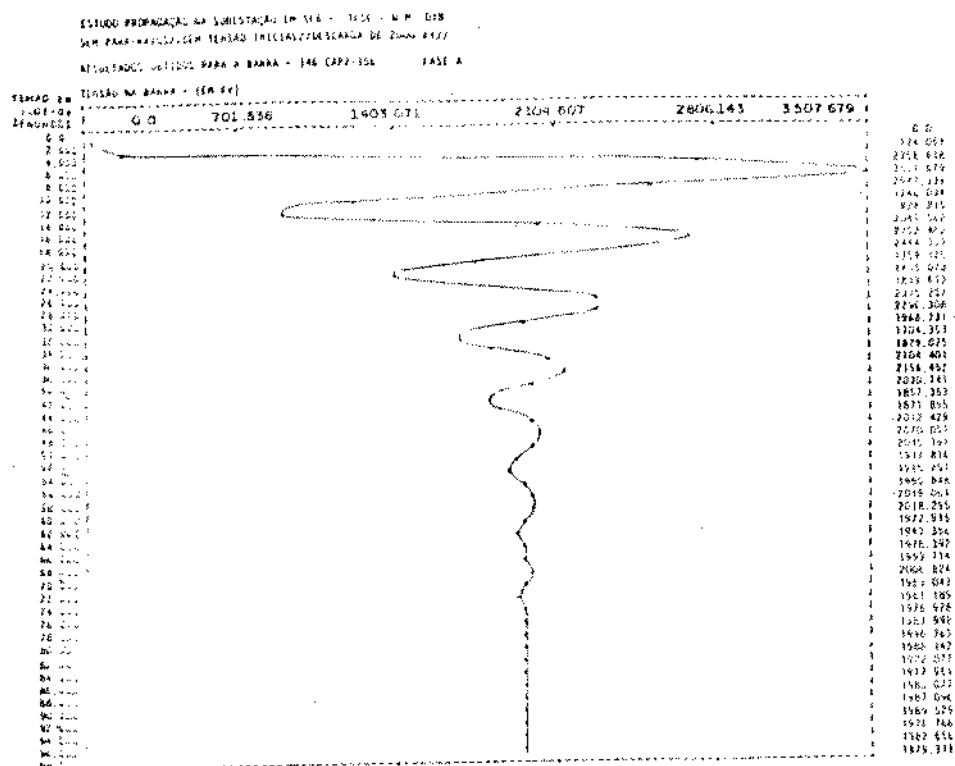
## COMENTÁRIOS:-

Nesta comparação a preocupação foi de verificar, para a mesma subestação, a influência da tensão inicial. Pode-se verificar que os oscilogramas mantêm o mesmo comportamento apresentando apenas o acréscimo da tensão nominal do sistema para as subestações energizadas. Em ambos os casos, houve um retardo, também esperado, de propagação de aproximadamente  $0,6\mu s$  para a barra simulada (139).

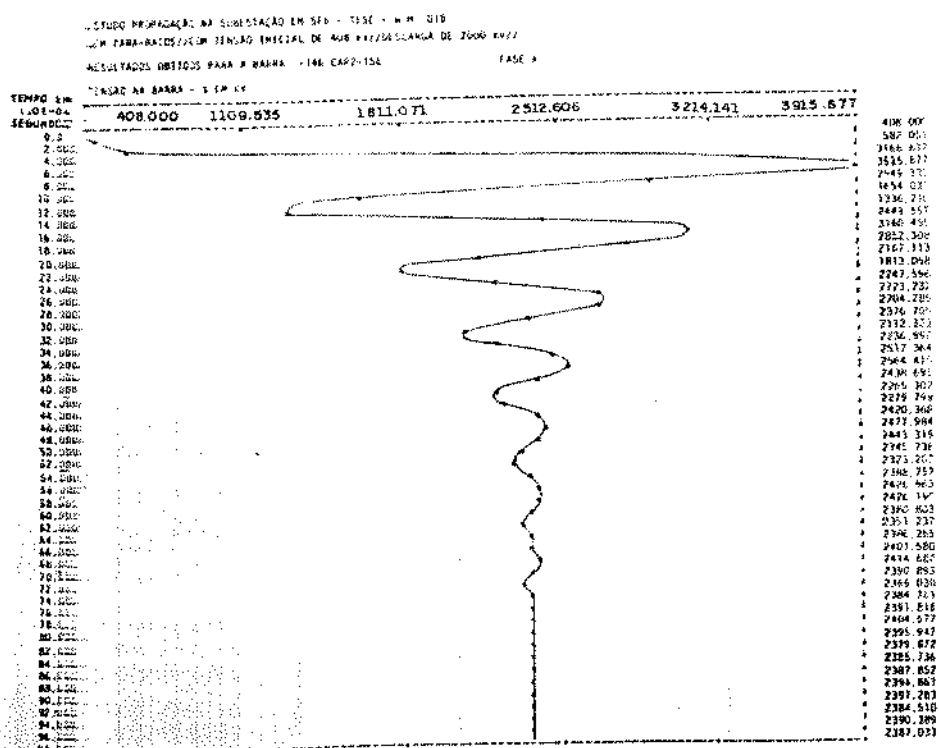
## 12.3.1. COMPARAÇÃO Nº 3 (Caso 9 x Caso 10)

Características: Subestação SF<sub>6</sub> sem pára-raios com e  
sem tensão inicial/ todas as chaves  
fechadas.

Barramento oscilografado: 146



Caso 9



Caso 10

## COMENTÁRIOS:-

Esta comparação é semelhante à anterior, porém para as subestações SF<sub>6</sub> com e sem tensão inicial. Entretanto, foi feita a comparação para a barra 146. Pode-se observar o acréscimo da tensão nominal do sistema como no caso anterior; oscilogramas com o mesmo comportamento e um discreto tempo de propagação de 0,4μs.

Embora seja uma barra das mais afastadas da entrada este retardo discreto é perfeitamente justificável devido às dimensões da SF<sub>6</sub> serem menores.

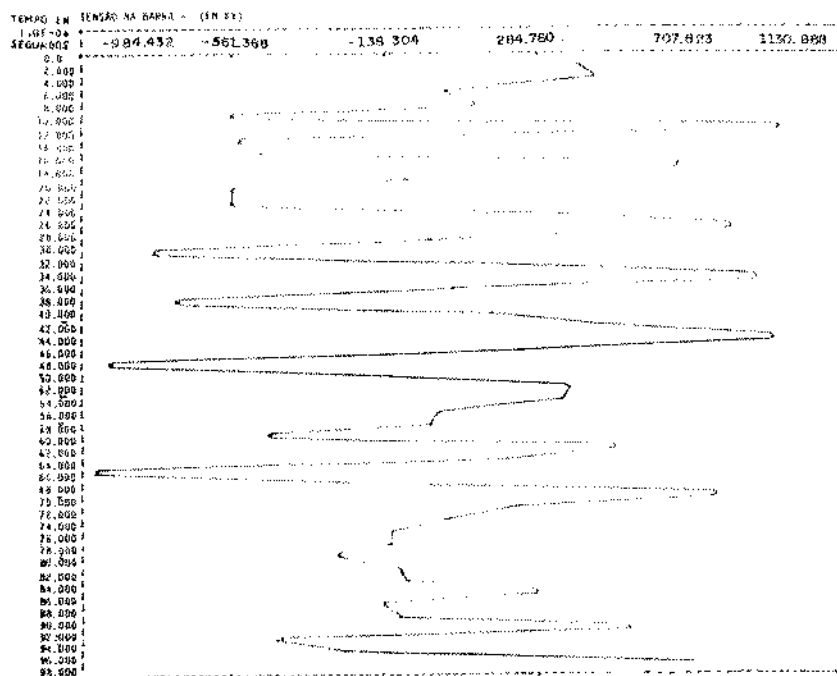
Observa-se também que sem pára-raios a tensão na barra 146 é aproximadamente o dobro da tensão aplicada na barra 101.

## 12.4 - COMPARAÇÃO Nº 4 (Caso 1 x Caso 4) e (Caso 3 x Caso 5)

Características: Subestações SF<sub>6</sub> e convencional, com tensão inicial, e com conexão e distâncias variadas dos para-raios.

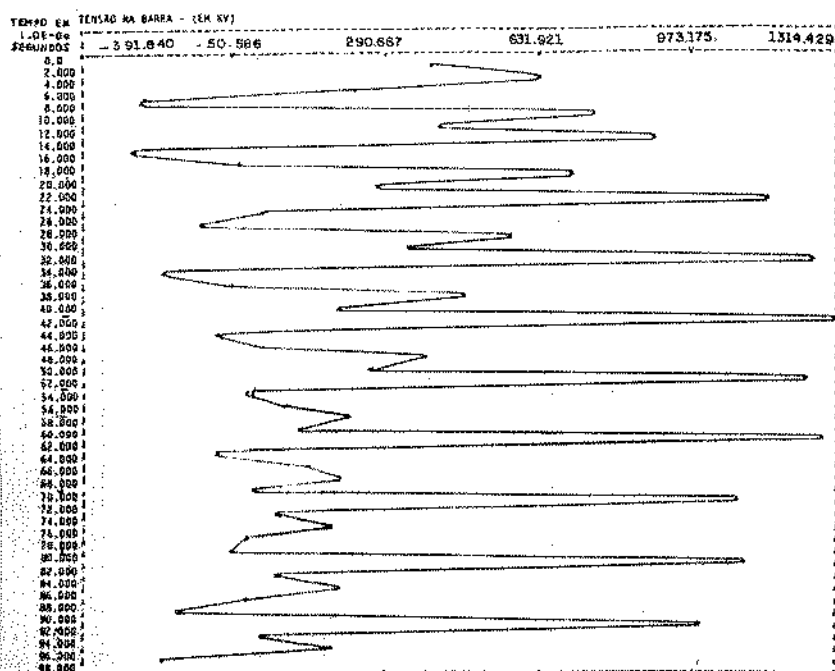
Barramento oscilografado: 139

ESTUDO PROPAGADO NA SUBESTAÇÃO CONVENCIONAL - RESE - M.M. UEN  
COM PARA-RAIOS//COM TENSÃO INICIAL//S N. CONEXÃO//A M. DISTÂNCIA//  
RESULTADOS UNIDOS PARA A BARRA - 139 CAP1-153 FASE A



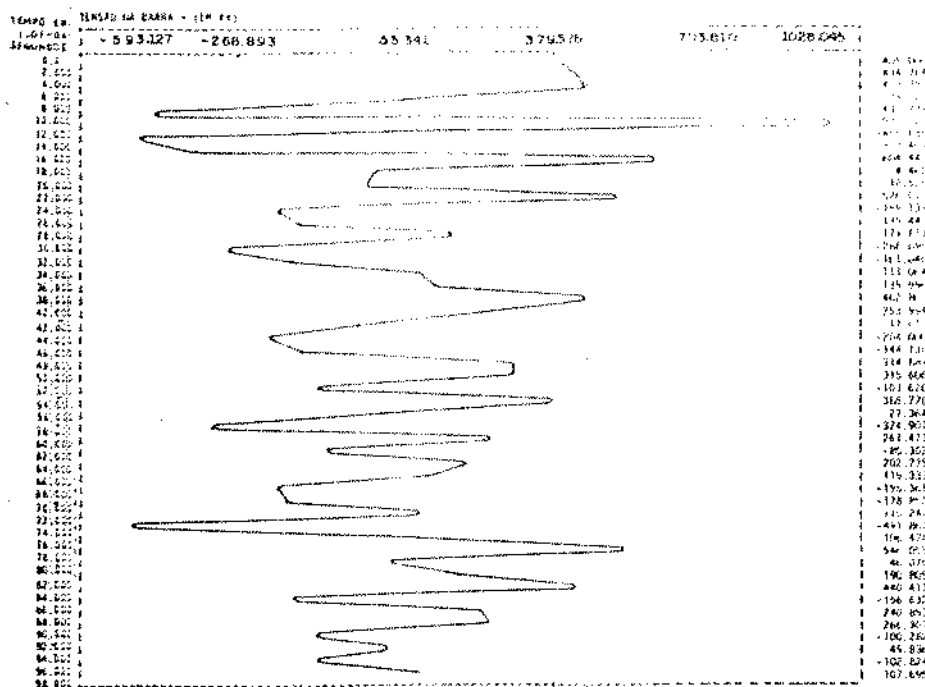
Caso 4

ESTUDO PROPAGADO NA SUBESTAÇÃO EM SF<sub>6</sub> - RESE - M.M. UEN  
COM PARA-RAIOS//COM TENSÃO INICIAL//S N. CONEXÃO//A M. DISTÂNCIA//  
RESULTADOS UNIDOS PARA A BARRA - 139 CAP1-153 FASE A



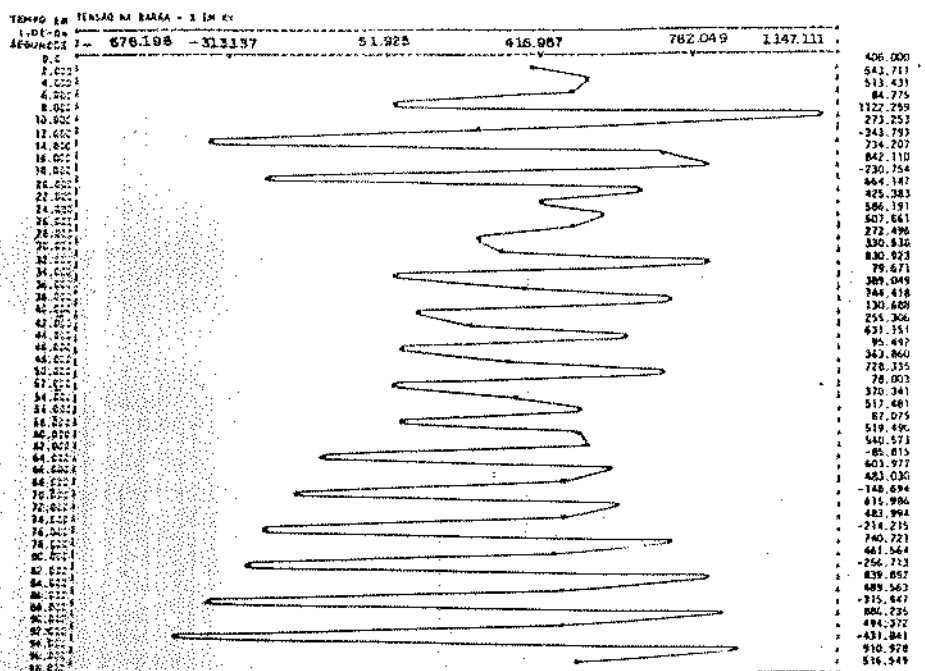
Caso 1

ESTUDO PROPAGACAO NA SUBSTACAO CONVENCIONAL - TENS - N.M. DIF  
COM PARA-RAIOS//COM TENSÃO INICIAL//B.M. DISTÂNCIA//  
RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 129 CAPI-103 FASE A



Caso 5

ESTUDO PROPAGACAO NA SUBSTACAO EM SFA - TENS - N.M. DIF  
COM PARA-RAIOS//COM TENSÃO INICIAL//B.M. DISTÂNCIA//  
RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 129 CAPI-103 FASE A



Caso 3

## COMENTÁRIOS:-

Comparando neste caso primeiramente as subestações convencionais com as a  $SF_6$ , com tensão nominal e com pára-raios dispostos com as mesmas distâncias, observa-se uma limitação de pico de 967,4 kV da convencional contra 1314,4 kV da  $SF_6$ , com o mesmo pára-raio.

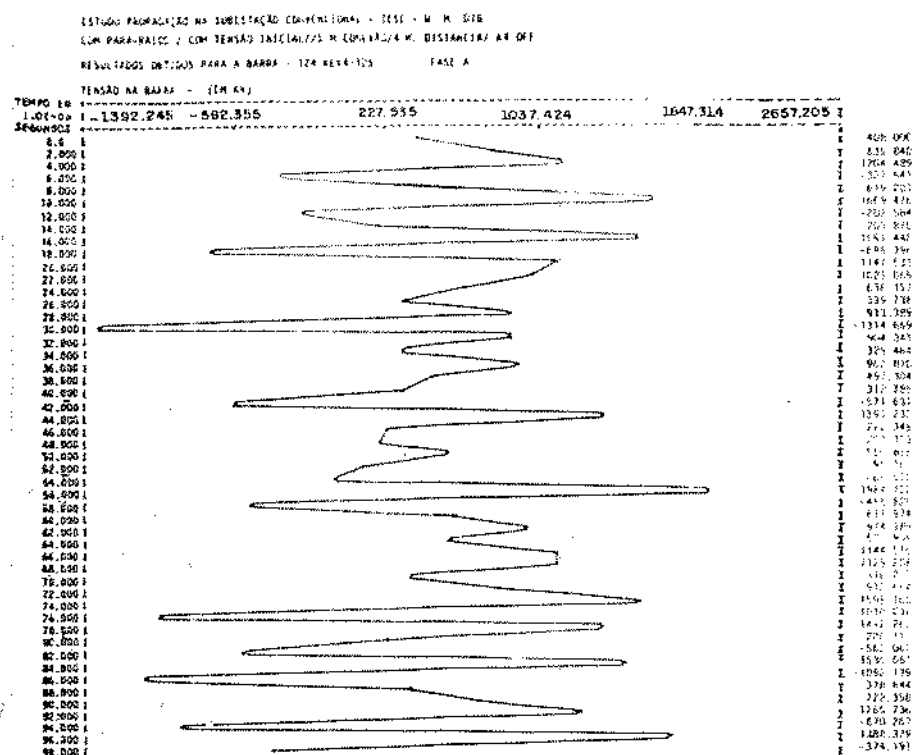
Observa-se também que a frequência de oscilação na  $SF_6$  é bem maior (170 kHz) do que a apresentada no oscilograma da convencional (110 kHz).

Para as simulações, aumentando as distâncias do pára-raios e da conexão para 8 m, observa-se que para as subestações convencionais ocorre uma elevação discreta na tensão 976 kV contra 967 kV do caso anterior. Para as subestações a  $SF_6$  houve uma redução de 1314,4 kV para 1122,2 kV para o maior pico.

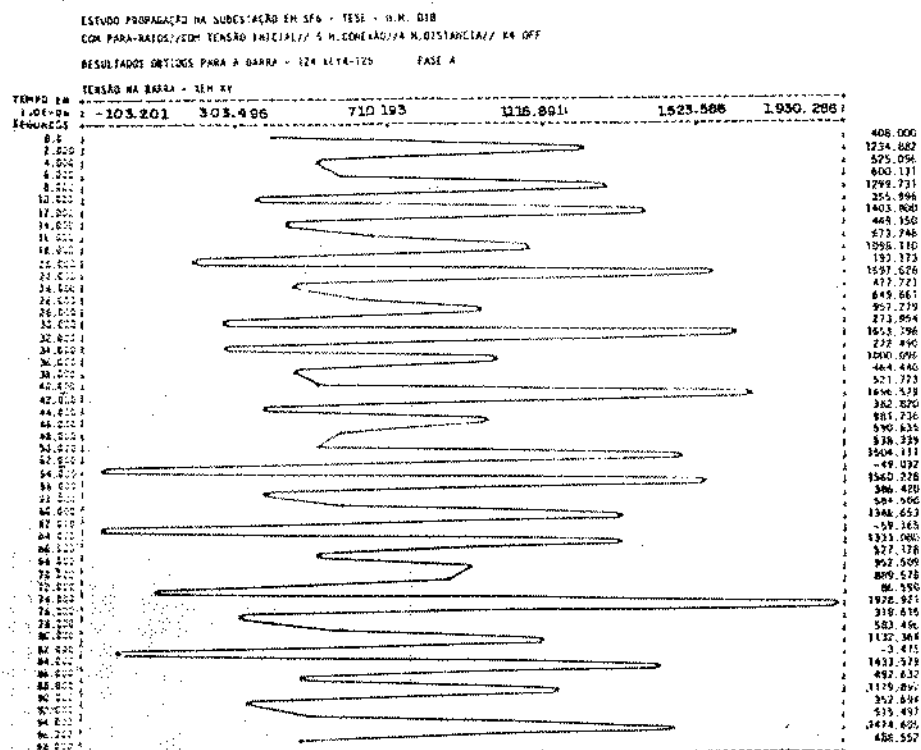
## 12.5 - COMPARAÇÃO Nº 5 (Caso 6 x Caso 7)

Características: Subestações convencional e SF<sub>6</sub> com tensão inicial e com pára-raios com 5 m de conexão e 4 m de distância, com a chave K4 "OFF" (aberta)

Barramentos oscilografados: 124/139/146.



Caso 7



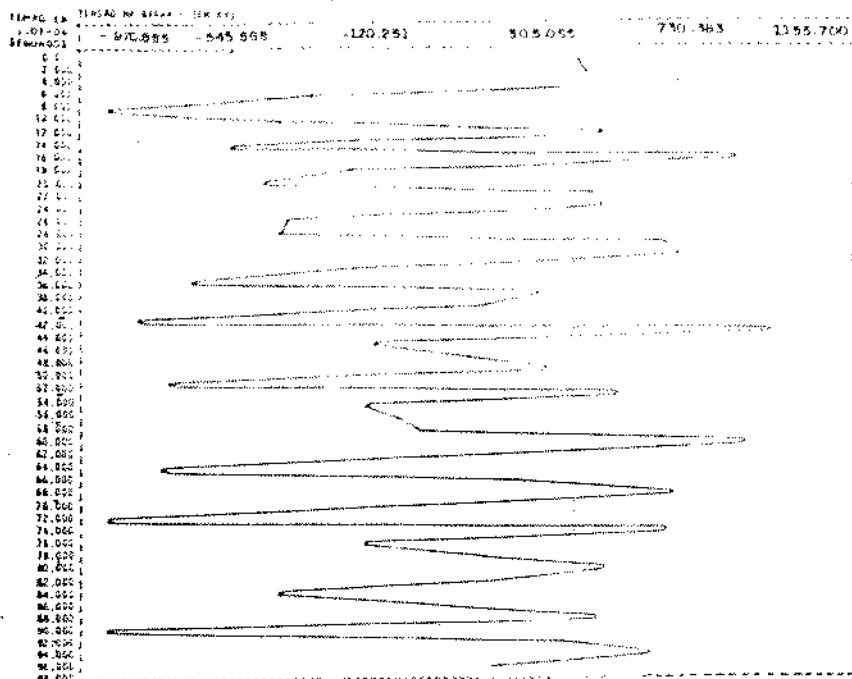
Caso 6



ESTUDO PROPAGACAO NA SUBSTACAO EM 564 - TESTE - N.M. DIA  
COM PARA-RAIOS COM TENSÃO INICIAL/5 M. CONEXÃO/9 M. DISTÂNCIA/RA OFF

RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 146 CAPZ-156

FASE A



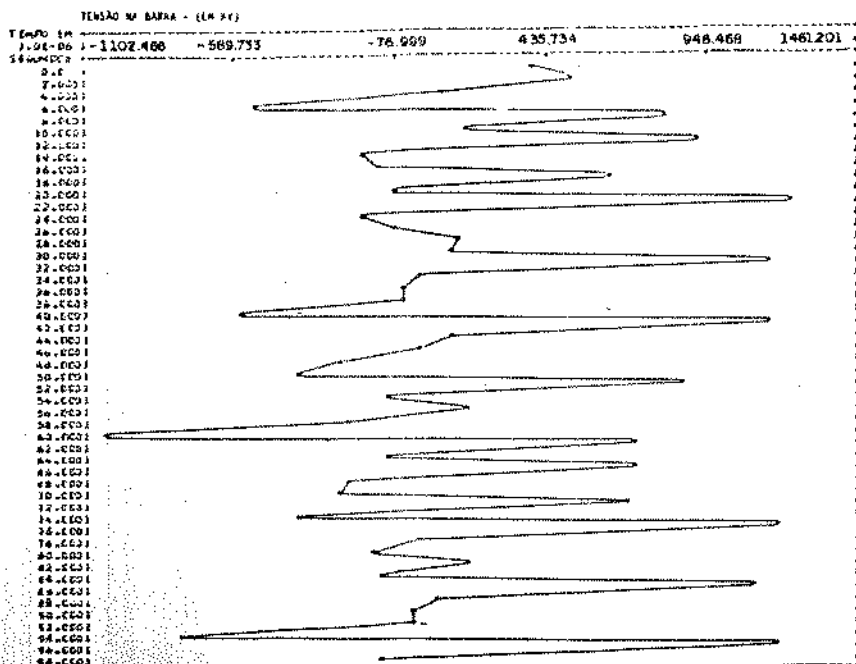
454.000  
529.352  
542.275  
512.008  
541.512  
549.134  
588.165  
584.546  
512.406  
410.658  
540.133  
5255.319  
524.340  
511.529  
452.964  
508.470  
5150.001  
7.579  
54.039  
54.764  
501.607  
543.152  
412.310  
20.000  
503.128  
505.566  
501.943  
505.921  
518.164  
517.180  
504.178  
525.220  
543.300  
511.007  
510.006  
500.109  
512.148  
500.000  
524.211  
50.000  
554.773  
515.266  
505.953  
522.760  
55.000  
55.472  
5.000  
564.546  
5205.113  
518.087

Caso 7

ESTUDO PROPAGACAO NA SUBSTACAO EM 564 - TESTE - N.M. DIA  
COM PARA-RAIOS COM TENSÃO INICIAL/5 M. CONEXÃO/9 M. DISTÂNCIA/RA OFF

RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 146 CAPZ-156

FASE A



454.000  
529.352  
542.275  
512.008  
541.512  
549.134  
588.165  
584.546  
512.406  
410.658  
540.133  
5255.319  
524.340  
511.529  
452.964  
508.470  
5150.001  
7.579  
54.039  
54.764  
501.607  
543.152  
412.310  
20.000  
503.128  
505.566  
501.943  
505.921  
518.164  
517.180  
504.178  
525.220  
543.300  
511.007  
510.006  
500.109  
512.148  
500.000  
524.211  
50.000  
554.773  
515.266  
505.953  
522.760  
55.000  
55.472  
5.000  
564.546  
5205.113  
518.087

Caso 6

## COMENTÁRIOS:--

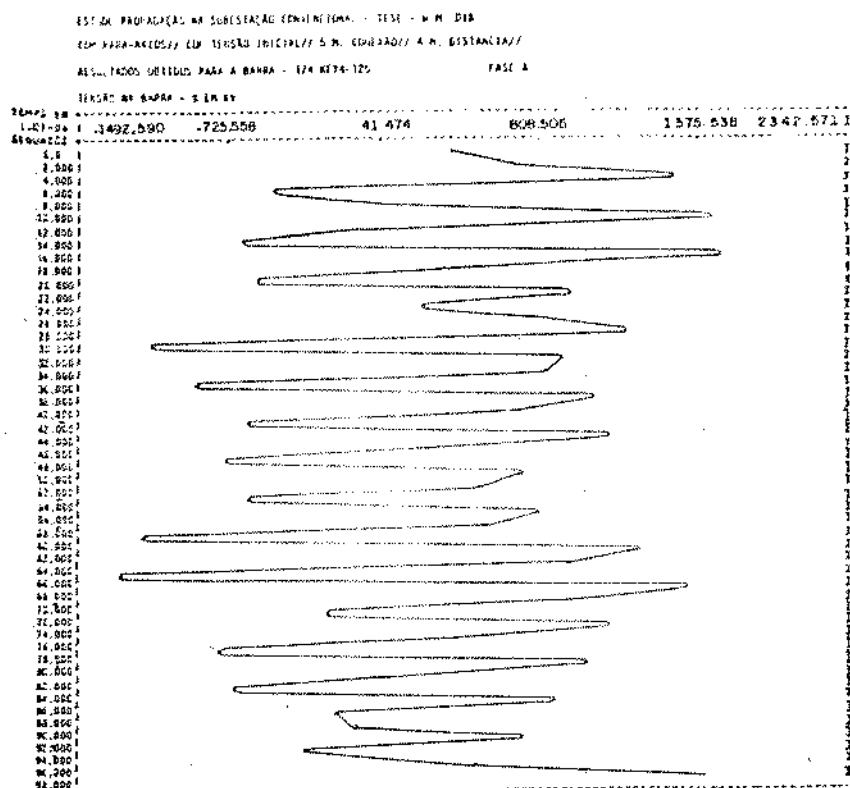
Neste caso, fez-se a simulação nas subestações convencionais e a SF<sub>6</sub> com a chave K4 "OFF" (disjuntor barra 124).

Observou-se o mesmo comportamento nos três casos, barras 124, 139 e 146, ou seja, a frequência de oscilação continua maior em SF<sub>6</sub> e os picos foram também maiores em SF<sub>6</sub> com exceção da barra 124, exatamente onde a chave K4 está localizada, apresentou valor de pico maior para o caso, na subestação convencional.

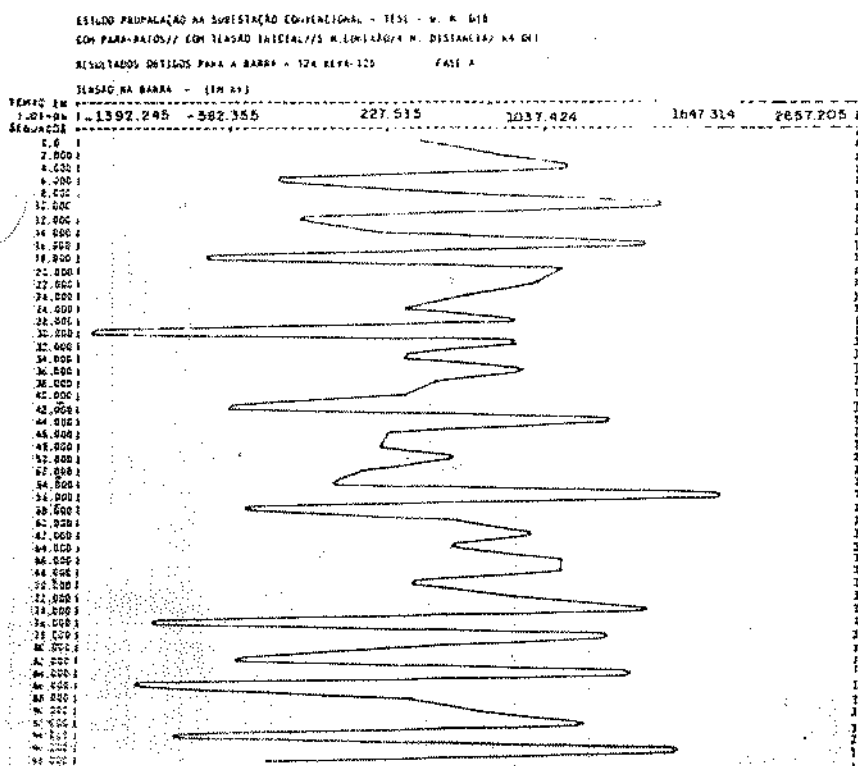
## 12.6 - COMPARAÇÃO Nº 6 (Caso 4 x Caso 7) e (Caso 1 x Caso 6)

Características: Subestações convencional e SF<sub>6</sub>, com tensão inicial, pára-raio com mesma conexão e distância, K4 fechada ou aberta.

Barramentos oscilografados: 124/139.

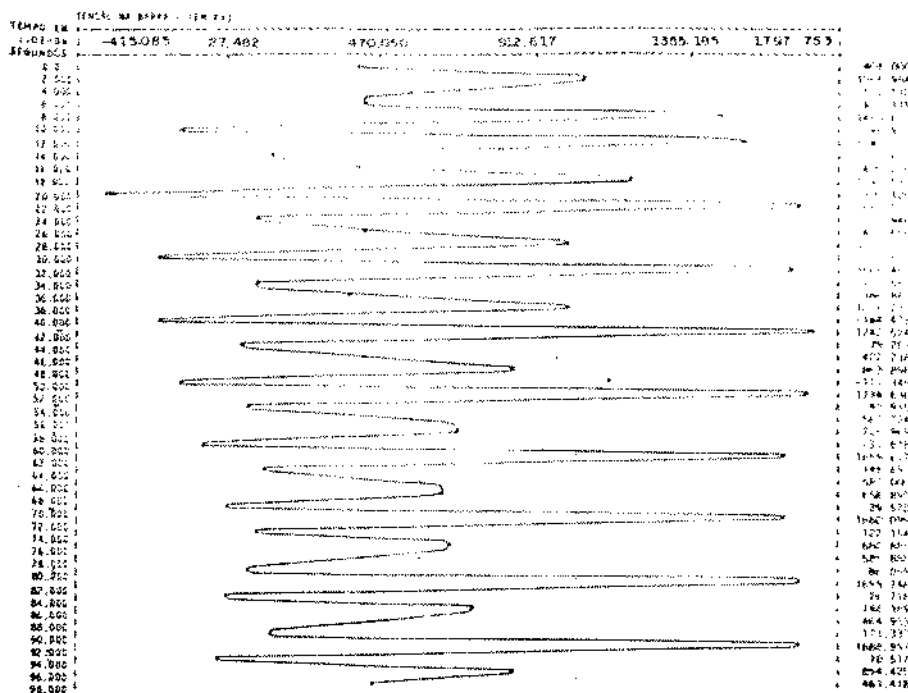


Caso 4



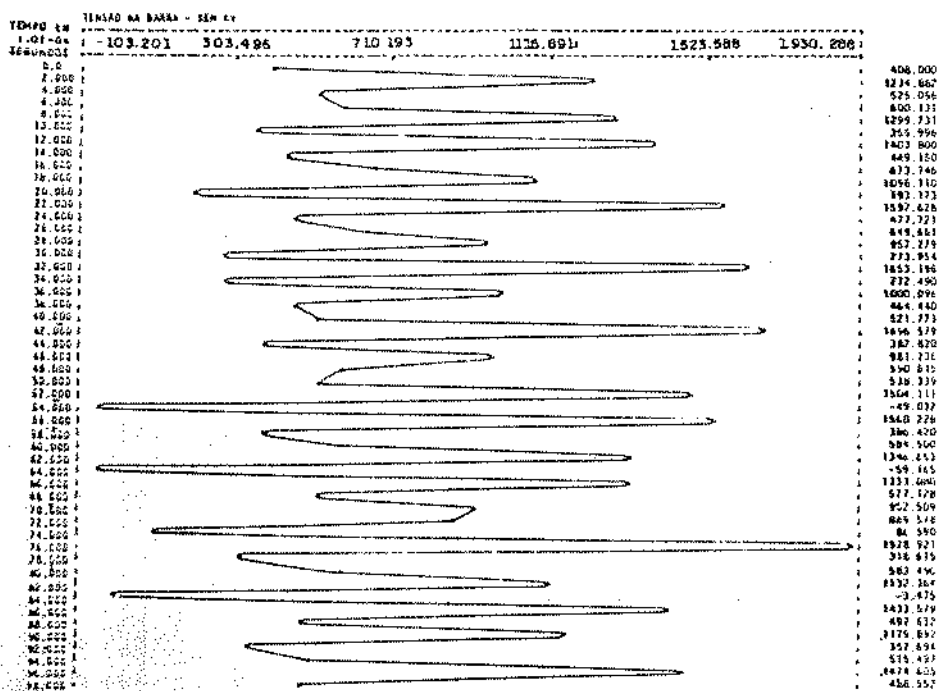
Caso 7

ESTUDO PROPAGACÃO NA SITUAÇÃO EM DPA - 1030 - 1030  
COM PARA-BAISOS COM TENSÃO INICIAL/25 M (TENSÃO) A M DISTÂNCIA/25 M (DPA)  
RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 124 1234-1234 1234 1234



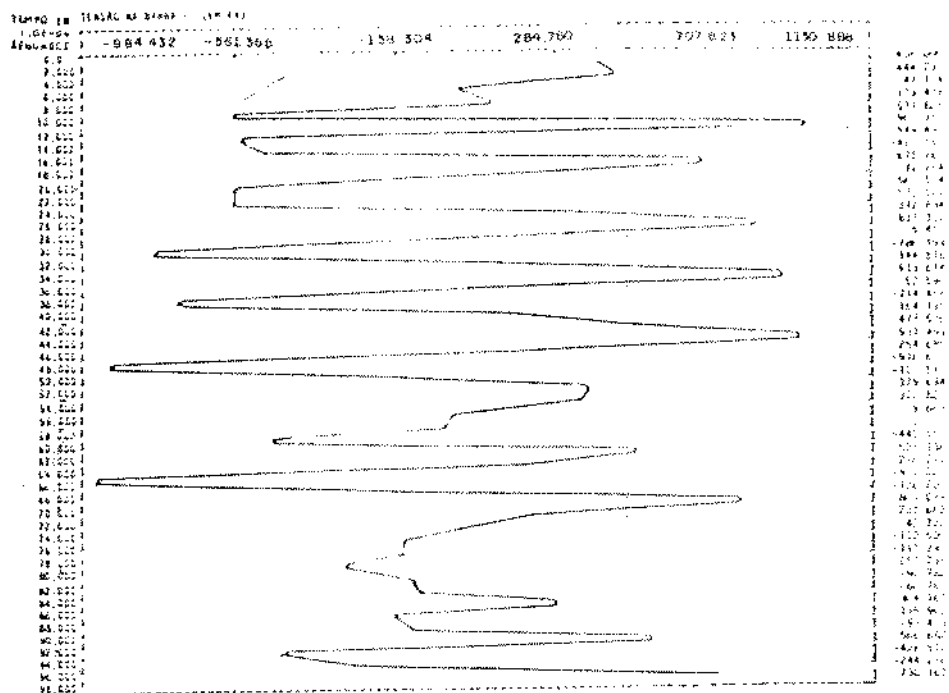
Caso 1

ESTUDO PROPAGACÃO NA SITUAÇÃO EM DPA - 1030 - 1030  
COM PARA-BAISOS COM TENSÃO INICIAL/25 M (TENSÃO) A M DISTÂNCIA/25 M (DPA)  
RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 124 1234-1234 1234 1234



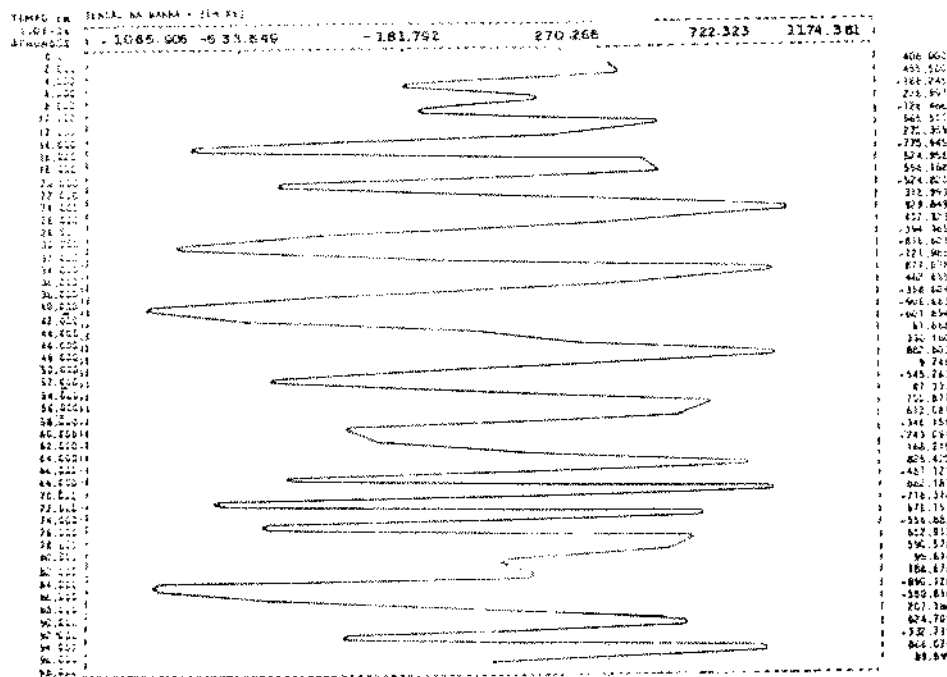
Caso 6

ESTUDO PROJEÇÃO NA SUBESTAÇÃO CONVENCIONAL - TESTE - N.º 008  
COM PARÂMETROS COM TENSÃO INICIALIZADA M. CONEADO 4 M DISTÂNCIA/AN 047  
RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 129 CAPT-112 1978 A

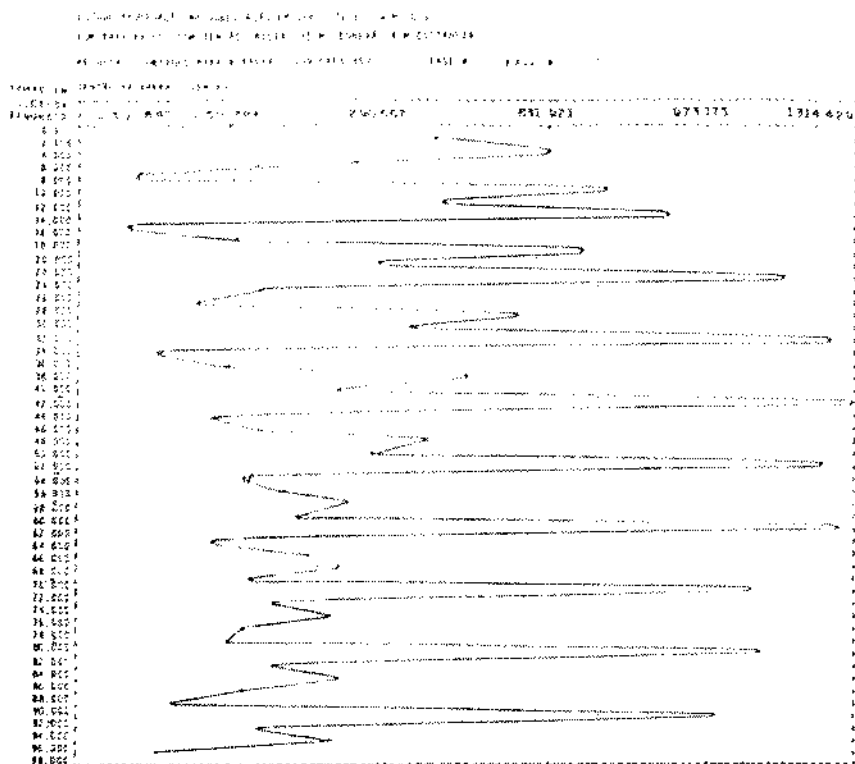


Caso 4

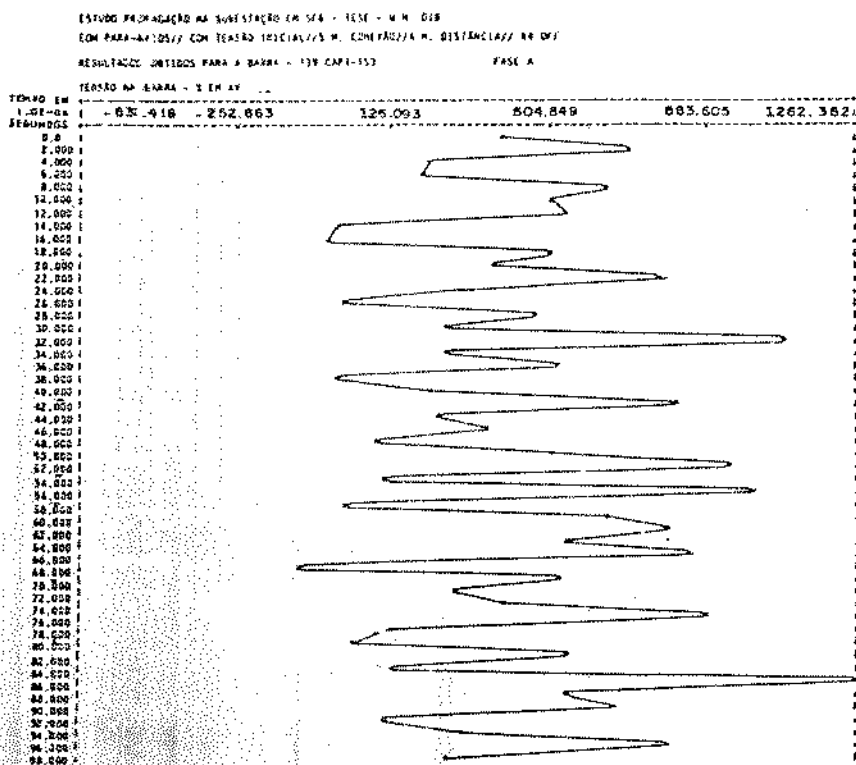
ESTUDO PROJEÇÃO NA SUBESTAÇÃO CONVENCIONAL - TESTE - N.º 008  
COM PARÂMETROS COM TENSÃO INICIALIZADA M. CONEADO 4 M DISTÂNCIA/AN 047  
RESULTADOS OBTIDOS PARA A BARRA - 129 CAPT-112 FASE A



Caso 7



Caso 1



Caso 6

## COMENTÁRIOS:--

Neste caso, comparou-se primeiramente as subestações convencionais com a chave aberta ou fechada, verificando-se que com a chave aberta apresenta-se uma tensão mais elevada na barra onde se encontra a chave aberta, passando de 1728 kV para 1984 kV com K4 "OFF".

O mesmo aconteceu no caso da subestação SF<sub>6</sub>, 1928 kV com K4 "OFF" contra 1742,5 kV com K4 "ON" (fechada).

Para a barra 139 onde se encontra o divisor capacitivo de potencial, houve redução da tensão quando a chave K4 estava aberta. De 937 kV para 929 kV na convencional e de 1314 kV para 1262 kV na SF<sub>6</sub>.

## CAPÍTULO XIII

### CONCLUSÕES

## CONCLUSÃO

Conforme destacado, nos estudos processados na segunda parte do trabalho, procurou-se analisar o comportamento de subestações do tipo convencional e a SF<sub>6</sub>, quanto ao aspecto dos níveis de sobretensões desenvolvidas. Uma vez obtidos os equivalentes para estudos de sobretensões, foram utilizadas ondas incidentes correspondentes àquelas criadas por descargas atmosféricas, pois, conforme observado na primeira parte, são estas as que levam aos maiores níveis de sobretensões geradas, principalmente nas subestações a SF<sub>6</sub>. Os valores utilizados para o valor de crista, bem como dos tempos de subida, seguiram o recomendado pela literatura.

Naturalmente, para cada arranjo e configuração operacional, uma onda incidente proporcionará diferentes níveis de tensões. Assim, a combinação de casos que poderiam ser analisados seria extremamente grande sem que todos pudessem ser relatados aqui. Assim, optou-se por alguns casos, que conforme descrito anteriormente, proporcionaram uma boa medida para a avaliação da diferença entre os comportamentos dos dois tipos de subestações.

Como diferença marcante entre os comportamentos das duas subestações, destaca-se o fato que, na isolada a SF<sub>6</sub>, além das sobretensões se apresentarem com níveis mais acentuados, também estas tensões oscilam com frequências e amplitudes maiores que nas subestações convencionais. Esta diferença entre as frequências pode ser facilmente justificada pelas dimensões mais

reduzidas entre os seus diversos componentes, que resultam num aumento do número de ondas refletidas e transmitidas num mesmo intervalo de tempo.

Um destaque relevante, e talvez, dentro do que se conhece, uma das contribuições deste trabalho, foi de concluir que a simples adoção dos limites de sobretensões apresentadas na literatura, sem uma preocupação maior quanto ao seu meio isolante, pode levar a níveis de segurança (no que se refere a isolamento) menores para as subestações a SF<sub>6</sub>.

Também, estudos efetuados com dispositivos de chaveamento na situação "aberto", mostraram que as sobretensões em seus terminais são acentuadamente aumentadas, quando comparadas às tensões originadas nos mesmos pontos com as chaves fechadas. Isto confirma uma outra recomendação já clássica no campo da coordenação de isolamento que estabelece a necessidade de se processar estudos com situações operacionais (reais) com disjuntores ou seccionadoras na condição aberta. Um dos casos estudados, correspondente àquele com a chave K4 aberta, ilustrou claramente este fato.

Em suma, este trabalho também destaca a grande importância do uso de computadores digitais em estudos de sobretensões aplicadas às subestações, pois com as simulações podem-se ter valores que confirmam ou não as afirmações teóricas, motivam estudos mais profundos e com grande velocidade, precisão e versatilidade, permitindo-se chegar às conclusões importantes que antes eram quase que impossíveis de serem constatadas.

## CAPÍTULO XIV

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ANDERL, Helfried W., WAGNER, Charles L. and DODDS, Thomas H. - "Insulation Coordination for Gas - Insulated Substations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-92, September/October-1973, pp 1622-1630.
- 2 - ANDERSEN, Dag Lange and ULRIKSEN, T. - "Lightning Overvoltages in SF<sub>6</sub> Insulated Switchgear", Norwegian Water Resources and Electricity Board (NVE), Norway.
- 3 - ANDERSEN, Dag Lange and SPAEREN, Per - "Insulations Coordination and Experience with Meta-enclosed SF<sub>6</sub> Substation in Norway", Norwegian Water Resources and Electricity Board (VVE). Norway.
- 4 - ANDERSON, R.B. and ERICKSON, A.J. - "Lightning Parameters for Engineering Application", CIGRE 33, Colloquium and Study Committee Meeting Suceava, Roumania, 25-29, June, 1979.
- 5 - Application Guide for Transient Recovery for A.C. High-Voltage Circuit-Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis - ANSI C37.0721, 1971.
- 6 - ARMSTRONG, H.R. and WHITEHEAD, Edwin R. - "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, Nº 1, January 1968, pp 270-281.

- 7 - BARTHOLD, L.O., e CARTER, G.K. (1961): Digital Traveling - Wave Solutions:  
I - Single-phase Equivalentes, TRANS AIEE III, 80, p.812.
- 8 - BERGER, K., ANDERSON, R.B. and KRONINGER, H. - "Parameters of Lightning Flashes", CIGRE, ELECTRA Nº 41, pp. 23-37.
- 9 - BEWLEY, L.V. - "Traveling Waves on Transmission Systems", Dover Publication, Inc., New York, 1963.
- 10- BICKFORD, J.P., MULLINEAUX, N. e REED, J.R. - "Computation of Power Systems Transients", Peter Peregrinus Ltd., IEE Monograph Series 18, 1980.
- 11- BOECK, W. and PETERSON, K. - "Fundamentals and Specific Data of Metal - Enclosed Substations for the Insulation Coordination", CIGRE 23.03, International Conference on Large High Voltage Electric-Systems, 1978 Session, August 30 - September 7.
- 12- BROWN Boveri - "500 kV SF<sub>6</sub> GIS Grajau - Insulation Failure of April 6, 1979".
- 13- BROWN Boveri - "Surges in High-Voltage Networks", Plenum Press, New York, 1980.
- 14- BROWN, Gordon W. and THUNANDER, Steven - "Frequency of Distribution Arrester Discharge Currentes Due to Direct Strokes", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, Nº 5, September/October 1976, pp 1571-1578.

- 15- BROWN, Gordon W. - "Lightning Performance - I - Shielding Failures Simplified" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, Nº 1, January - February 1978, pp 33-38.
- 16- BROWN, Gordon W. and WHITERHEAD, Edwin R. - "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding Part II", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88 Nº 5, May 1969, pp 617-626.
- 17- CARRARA, Guido - "General Report of Group 33 - Overvoltages and Insulation Coordination", CIGRE, ELECTRA Nº 49, December, 1976, pp 117-123.
- 18- CARVALHO, Francisco M. Salgado e NORA DIAS, Luis Eduardo - "Sobretensões provocadas pela Operação de Chaves Seccionadas no Interior da Blindada de 500 kV, a SF<sub>6</sub>, na Subestação de Grajau", Nova Técnica DSE. L.0032.81, FURNAS - Centrais Elétricas S.A.
- 19- CARVALHO, Francisco M. Salgado - "Coordenação de Isolamento de Subestações Isoladas a SF<sub>6</sub>" Tese Mestrado EFEI - Itajubá - MG. - 1980.
- 20- CHIPMAN, Robert A. - "Teoria e Problemas de Linhas de Transmissão", McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1972.
- 21- CRONIN, J.C., COLCLASER, R.G. and LEHMAN, R.F. - "Transient Lightning Protection Requirements for a 500 kV Gas Insulated Substation", IEEE Paper Nº 77 197-7,

- 22- CUK, N., NISHIKAWARA, K.K., McGRAE, G.G. and ADAMS, P.T.B.-  
"Specification and Application of SF<sub>6</sub> Gas - Insulated  
Switchgear - A Utility's Point of View", IEEE Transactions  
on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, Nº 6 Nov./  
Dec. 1980, pp 2241-2250.
- 23- DAY S.J., MULLNEAUX, N. e REED, J.R. (1965): Developments In  
Obtaining Transient Response Using Fourier Transforms.  
Part I: Ginn's Phenomena and Fourier Integrals, INT. J.  
ELECTR. EDU., 3, p. 501.
- 24- DEEQ.L (Divisão de Estudos de Equipamentos) - Informações  
conseguidas junto a fabricantes e já utilizadas em estu-  
dos internos de FURNAS - Centrais Elétricas S.A.
- 25- DIESENDORF, W. - "Insulation Coordination in High Voltage  
Electric Power Systems", Butterworths, London, 1974.
- 26- EDLINGER, A. - "500 kV SF<sub>6</sub> Switchgear Installation Grajau  
Determination of Overvoltages under Adjacent Lightnin  
Conditions", BROWN Boveri, Report Nº AGS-S 79/225, October  
4, 1979.
- 27- Eletromagnetic Transients Program - EMTP user's Manual.
- 28- EPRI . - "Transmission Line Reference Book - 345 kV and  
Above", Palo Alto, Califórnia, 1975.
- 29- ERIKSSON, Roland and HOLMBORN, Hakan - "Insulation Coordination  
of Gas Insulated Substations", International Symposium on  
Gaseous Dielectrics, Knoxville, Tennessee, U.S.A., March  
6-8, 1978.

- 30- ESMERALDO, Paulo Cesar V. - "Análise de Sobreensões Causadas por Descargas Atmosféricas nas Subestações a SF<sub>6</sub> de Grajau" - Parte I", Nota técnica DSE. L. 0034.81, FURNAS-Centraís Elétricas S.A.
- 31- GALLOWAY, R.N., SHORROCKS, W.B., e WEDEPOHL, L.M, - (1964), Calculation of Electrical Parameters For Short And Long Polyphase Transmission Lines, IEEE PROC. Vol. 111, (12), p. 2054.
- 32- GANGER, B. and VIGREUX, J. - "May the GIS SF<sub>6</sub> be Considered as Selfrestoring?", CIGRE, ELECTRA Nº 75, March 1981, pp 31-39.
- 33- GARY, C., DRAGAN, G. and CRITESCU, D. - "Attenuation of Travelling Waves Caused by Corona", CIGRE 33-13, International Conference on Large High Voltage Systems, 1978 Session - August 30 - September 7.
- 34- GENERAL ELECTRIC - "Tranquell Station Surge Arrester Application Guide".
- 35- GENERAL ELECTRIC - "Allugard II Station Arrester Second Generation of Allugard Protection 2, 4 kVto 765 kV Application Guide".
- 36- GREENWOOD, Allan - "Electrical Transients in Power Systems", Willey Interscience, 1971.
- 37- GUIMARÃES, Ademir C. e OLIVEIRA, José Carlos de - "Sobreensões nos Sistemas Elétricos", CESE/80 - Apostila do

Curso de Engenharia de Sistemas Elétricos, Convênio ELETROBRÁS/  
EFEI, 1980.

- 38- HEDMAN, D.E. (1965) : Propagation On Overhead Transmissions:  
Part I Theory of Modal Analysis, II-Earth Conduction Effects  
and Practical Results; IEE TRANS., PAS 84, p. 200.
- 39- HEDMAN, D.E. (1973) : Distortion of Traveling Waves on Three -  
Phase Transmission Lines, IEEE, CONFERENCE PAPER C 73409-0 .
- 40- HEDMAN, D.E. - "Teoria das Linhas de Transmissão I e II",  
Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência -  
Série P.T.I., Universidade Federal de Santa Maria, 1978.
- 41- HEDMAN, D.E. - "Coordenação de Isolamento", Curso de Enge-  
nharia em Sistemas Elétricos de Potência - Série P.T.I.  
Universidade Federal de Santa Maria, 1979.
- 42- HILLEMANN, Andrew R., GUYKER, Willian C., POWELL, Ralph W.,  
RICHTER, Willian A. and DESALVO, Joseph M. - "Insulation  
Coordenation in APS 500 kV Stations", IEEE Transactions on  
Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, Nº 6, June 1967,  
pp 655-665.
- 43- HILLEMANN, Andrew R. - "Lightning Protection of Stations",  
CIGRE SC 33 Krakow, Poland, 17-22 - September 1973.
- 44- HILLEMANN, Andrew R. - "Lightning Protection of Stations",  
CIGRE SC 33, Montreal, Canada, June 16-18, 1975.
- 45- HOLBORN, H. - "Cooordenação de Isolamento e Arranjos dos  
Pára-raios das Subestações a SF<sub>6</sub>, ASEA:

- 46- HOLMDAHL, G., and LUNDIN, R. (1966): Digital Solution of Travelling Wave Problems in Three - Phase Systems, PROC. PSCC, PT 3, REPT. 5.12.
- 47- HYILTEN, CAVALLIUS N., and GJERLOW, P. (1959): Distortion of Travelling Waves in High-Voltage Power Lines, ASEA RES. 2, p. 147.
- 48- IEC Publication 517 - "High-Voltage Metal - Enclosed Switchgear for Rated Voltage of 72,5 kV above, First Edition, 1975.
- 49- IEEE p 468-1/D2 - "Gas - Insulated Substations Standards Recomendated Practices and Guides", Prepared by Working Group 70.1. of the Substations Committee of IEEE, 1977.
- 50- IEEE Tutorial Course - "Digital Simulation of Electrical Transient Phenomena", Course Text 81 EH0173 - 5 PWR.
- 51- IEEE Tutorial Course - "Surge Protection in Power Systems", Course Text 79 EH0144-6 PWR.
- 52- KASTRUP, Oscar, SILVA, Rulemar P. e COSENTINO, Aldo - "Subestações de 500 kV da ELETROSUL - Coordenação de Isolamento", VI SNPTEE, Rio de Janeiro, Brasil.
- 53- KNABLE, Alvin H. - "Electrical Power Systems Engineering problems and solutions", McGraw-Hill Book Company, 1974.
- 54- KNORR, W., MOLLER, K. and DIEDERICH, K.J. - "Voltage Timer Characteristics of Slightly Nonuniform Arrangements in SF<sub>6</sub> Using Linerly Rising and Oscillating Lightning Impulse

Voltages", CIGRE 15.05, International Conference on Large High-Voltage Electric Systems, 1980 - Session, August 26 - September 4.

- 55- KOEPFINGER, J.L., BACVAROV, D.C. and ROCAMORA, R.G. - "The Surge Protection of an SF<sub>6</sub> Gas-Insulated Substation Supplied by Pip-Type Cables", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, Nº 6, Nov./Dec. 1978, pp 2282-2290.
- 56- MATSUMURA, Susumu and NITTA, Tohei - "Surge Propagation in Gas-Insulation Substation", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, Nº 6, June 1981, pp 3047-3054.
- 57- MCELROY, A.J., and PORTER, R.M. (1963) : Digital Calculation of Transients in Electric Networks; IEEE Trans., PAS-82, p. 88.
- 58- MACHADO, Sérgio Gomes (1982) - "Cálculo Digital de Fenômenos Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência: Tese de Mestrado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá-MG.
- 59- MORII, K. MATSUMURA, S., OKADA, T., USHIOT, T., TOMINAGA, S. and INAMURA, S. - "Field Experiences and Future Trends of 500 kV Gas-Insulated Metal Clad Substations", CIGRE 23-02, International Conference on Large High-Voltage Electric Systems, 1978 Session, August 30 - September 7.
- 60- "Níveis básicos de Isolamento (BIL) dos Equipamentos e localização de Pára-raios nas Subestações de 800 kV do Sis

tema em Corrente Alternada, de Itaipu" - Grupo de Estudos  
MONASA - THEMAG - PTEL.

- 61- Notas de Aula do Curso "Power Systems Analysis Using the  
Electromagnetic Transients Program", na Universidade de  
Wisconsin, 1979.
- 62- OH-HARA, J., OH-HASHI, N., MURAKAMI, Y. KOJIMA, S. and  
MANJU, S. - "Line Entrance Protection of 500 kv Gas-  
Insulated Substations by SF<sub>6</sub> Spark Gaps", IEEE Transactions  
on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, Nº 6, Nov./  
Dec. 1978, pp 2425-2433.
- 63- OLIVEIRA, José Carlos de, e GUIMARÃES, Ademir C. - "Sobre-  
tensões em Sistemas Elétricos", Curso de Pós-Graduação em  
Sistemas Elétricos - EFEI, 1980.
- 64- OLSEN, K., LANGE-ANDERSEN, D., ULRIKSEN, Th., HUSE, J. and  
SCHEI, A. - "Lightning Overvoltages in SF<sub>6</sub> - Installations  
Risk of Failure Analysis", CIGRE 33.01, International  
Conference on Large High-Voltage Electric Systems, 1978  
Session, August 30 - September 7.
- 65- "Overvoltages and Insulation Coordination" - CIGRE, Group  
33 Colloquium, Trondheim, Norway, 1980.
- 66- PEREIRA, Marco Polo e GUIMARÃES, Eduardo Bueno - "Programa  
Digital de Transitórios Eletromagnéticos da BPA (EMTP),  
Subcomitê de Engenharia de Sistemas Elétricos, CIER.
- 67- PETTERSON, K., HOLMBORN, H., OLSSON, P. and LINDBERG, L. -  
"Overvoltages Protection of Metal-Enclosed SF<sub>6</sub> Substations

Considering Steep Surges", CIGRE 33.05, International Conference on Large High-Voltage Electric Systems, 1978 Session, August 25 - September 2.

68- PHELPS, James D.M., PUGH, P.S. and BEEHLER, James E. - "765 kV Station Insulation Coordination", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, Nº 9, September 1969, pp 1377-1382.

69- PINHEIRO, Ricardo Pinto, NETO, João da Costa Patrão, e TANNURI, José Galib - "Coordenação de Isolamento de Subestações em SF<sub>6</sub> da UHE de Tucuruí", V SNPTEE, Recife, Brasil.

70- POPOLANSKY, F. - "Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents", CIGRE, ELECTRA Nº 22, pp 139-147.

71- SIEMENS S.A. - Manuais.

72- SARGENT, Michael A. - "The Frequency Distribution of Current Magnitudes of Lightning Strokes to Tall Structures" T72 216-5, IEEE Winter Meeting, New York, N.Y., 1972.

73- SARGENT, Michael A. and DARVENIZA, Mat - "Tower Surge Impedance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, Nº 5, May 1969, pp 680-687.

74- THÖREN, H.B. and CARLSSON, K.L. (1970): A Digital Computer Program for the Calculation of Switching and Lightning Surges on Power Systems; IEEE Trans. PAS-89, Nº 2, p 212.

- 75- USA and IEEE Standard for Lightning Arrester for Alternating-  
Current Power Circuits - ANSI C62. 1/IEEE N° 28, 1967.
- 76- WAHLSTROM, B., HOLMBORN, D. and SCHEI, A. - "Overvoltage  
Protection of Metal-Enclosed - Substations-Insulation  
Coordinations Philosophy and Surge Arrester Characteristics"  
CIGRE 33.03, International Conference on Large High Voltage  
Electric Systems, 1976 Session, August 25 - September 2.
- 77- WEDEPOHL, L.M. (1963) : Application of Matriz Methods to  
The solution of Travelling - Wave Phenomena in Polyphase  
Systems, IEEE PROC., Vol. 110, (12) p. 2200.