

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - CAMPUS II  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ELEVAÇÃO DO POTENCIAL DA CARGAÇA  
DE UMA SUBESTAÇÃO ISOLADA À GÁS  
SF6 DEVIDO A UMA OPERAÇÃO DE  
CHAVEAMENTO - SIMULAÇÃO DIGITAL

ORIENTADOR: Prof. Dr. S. R. Naidu

WALMAR FREITAS PORTO

CAMPINA GRANDE - MARÇO DE 1992



P839e Porto, Walmar Freitas  
Elevacao do potencial da carcaca a de uma subestacao isolada a gas SF6 devido a uma operacao de chaveamento : simulacao digital / Walmar Freitas Porto. - Campina Grande, 1992.  
105 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

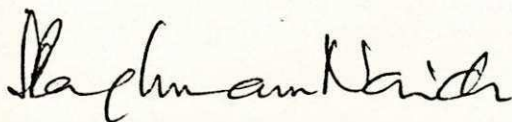
1. Engenharia Eletrica 2. Subestacao Isolada a Gas 3. Carcaca - 4. Operacao de Chaveamento - 5. Linguagem FORTRAN - 6. Metodo Backward-Euler 7. Dissertacao I. Naidu, Sreeramulu Raghuram, Dr. II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 621.3(043)

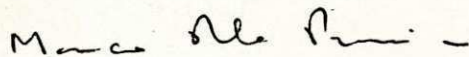
ELEVACÃO DO POTENCIAL DA CARCAÇA DE UMA SUBESTAÇÃO  
ISOLADA A GAS SF6, DEVIDO A UMA OPERAÇÃO DE CHAVEAMENTO

WALMAR FREITAS PORTO

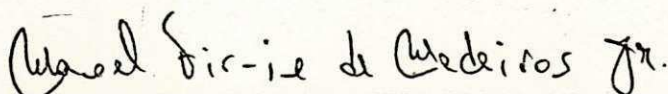
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 10.03.92



SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFPB  
Orientador



MARCO POLO PEREIRA, Mestre, FURNAS  
Componente da Banca



MANOEL FIRMINO DE MEDEIROS JUNIOR, Dr., UFRN  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
MARÇO - 1992

## NOBLESSE OBLIGE

Este trabalho tornou-se possível pelo apoio recebido da Superintendência de Engenharia do Sistema de Transmissão, Distribuição e Planejamento de Edificações da ELETROPAULO ELETRICIDADE DE SÃO PAULO S. A., através do seu atual titular, Engenheiro Vitor Roberto Fernandes. As etapas de compilação e redação dos dados foram desenvolvidos com o suporte da Divisão de Estudos Especiais (EDES) do Departamento de Engenharia de Estações dessa Superintendência.

Contribuíram ainda: Divisão de Sistemas de Engenharia da Diretoria de Engenharia e Construção da ELETROPAULO, Engenheiro Angel Sanches Barrio da Diretoria de Administração da ELETROPAULO, Carlos Lopes Monteiro, Técnico em Informática da Divisão de Estudos Especiais (EDES) e João Viana Neto, MSC., professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPB.

Ao orientador desta pesquisa, Prof. Dr. S. R. Naidu, o meu testemunho do seu empenho no desenvolvimento da Engenharia de Eletricidade em nosso país, através de suas atividades de ensino e pesquisa no Laboratório de Alta Tensão do Campus II da Universidade Federal da Paraíba. E ao Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPB e Mestre em Engenharia Elétrica, Paulo de Tarso Medeiros, o reconhecimento pelo apoio recebido durante as diversas etapas deste trabalho.

Ao estagiário em Informática - ano 1991 - da Divisão de Estudos Especiais (EDES), André Bonifiglio Giannini, meus agradecimentos pelo dedicado trabalho de redação dos originais.

São Paulo, 20 de Dezembro de 1991.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo calcular a elevação de potencial da carcaça de uma subestação isolada a gás SF6 devido a uma operação de chaveamento, usando-se uma simulação digital. Utilizou-se a linguagem FORTRAN no programa computacional e o método de Backward-Euler para a supressão das oscilações numéricas acontecidas.

### ABSTRACT

The aim of this dissertation is to calculate the ground potential rise of a gas insulation substation due to a switching of disconnector by the use of a digital simulation. The major instruments used for data processing were the FORTRAN language and the Backward-Euler method for the suppression of numerical oscillations.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	PÁGINA
1.1.0 Os transitórios de tensão nos sistemas de potência .....	1
1.2.0 O acionamento das chaves seccionadoras nas subestações isoladas à SF6 .....	2
1.3.0 Formação dos transitórios rápidos .....	4
1.4.0 A sobretensão interna ao barramento .....	5
1.5.0 O amortecimento dos transitórios rápidos .....	7
1.6.0 A elevação de potencial da carcaça .....	8
1.7.0 A coordenação de isolamento das subestações isoladas à SF6 ...	8
1.8.0 Porquê calcular os transitórios rápidos .....	10
CAPÍTULO II - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS TRANSITÓRIOS DE CHAVEAMENTO	
2.1.0 Definição de modelo para o estudo .....	13
2.2.0 O efeito pelicular .....	14
2.3.0 Os transitórios no invólucro devido a curto-circuito .....	16
2.4.0 A carga-retida.....	16
2.5.0 Transitórios internos .....	17
2.6.0 As frequências típicas .....	18
2.7.0 A medição dos transitórios rápidos .....	19
2.8.0 O cálculo de transitórios .....	21

### CAPÍTULO III - SIMULAÇÃO DIGITAL DE TRANSITÓRIOS RÁPIDOS

3.1.0	Descrição do arranjo .....	28
3.2.0	A operação de chaveamento realizada .....	31
3.3.0	Representação e descrição dos elementos do arranjo .....	32
3.4.0	Modelos dos elementos do arranjo .....	37
3.5.0	Circuito elétrico equivalente .....	41
3.6.0	A representação do sistema .....	43
3.7.0	Solução do sistema .....	44
3.8.0	O programa computacional .....	45
3.9.0	Supressão das oscilações numéricas .....	48
3.10.0	Aferição do programa desenvolvido .....	55

### CAPÍTULO IV - SIMULAÇÃO DIGITAL DA ELEVAÇÃO DE POTENCIAL NA CARGA DEVIDO A CURTO-CIRCUITO

4.1.0	A ocorrência do curto-circuito .....	67
4.2.0	Descrição do arranjo em estudo .....	68
4.3.0	Representação dos elementos .....	69
4.4.0	Circuito elétrico equivalente .....	70
4.5.0	Solução do curto-circuito .....	71
4.6.0	O programa computacional .....	73
4.7.0	Aferição do programa desenvolvido .....	75



**CAPÍTULO V - RESULTADOS E CONCLUSÕES**

**5.1.0 Considerações preliminares .....85**

**5.2.0 Conclusões .....91**

**Referências Bibliográficas .....103**

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

#### 1.1.0 OS TRANSITÓRIOS DE TENSÃO NOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

Os transitórios de tensão desempenham um papel fundamental na definição do isolamento dos aparatos dos sistemas de potência. Pois apesar de serem projetados para trabalhar em regime estável - frequência de 60 Hz - são as solicitações anormais que podem acontecer na rede elétrica que irão determinar os limites de suportabilidade do seu isolamento. Quando a frequência predominante do surto de tensão observado é próxima da frequência nominal, os transitórios de tensão são denominados de sobretensões temporárias (a rejeição de carga é um exemplo). Por outro lado, quando essas sobretensões possuem frequências elevadas, foram provavelmente originadas por descarga atmosférica ou operação de chaveamento. Em qualquer desses casos entretanto, o surto de tensão originado possui frente de onda bastante íngreme sendo que no caso das descargas atmosféricas, seu tempo-de-subida é fração de micro-segundo e sua duração é de algumas dezenas de micro-segundos. Já no caso de chaveamento, as sobretensões geradas terão tempo-de-subida de vários micro-segundos e duração de alguns ciclos da frequência fundamental. No entanto, no caso das subestações isoladas a gás SF<sub>6</sub>, devido às curtas dimensões a percorrer, os surtos ocorridos devido a operações de chaveamento, terão frequências significativamente mais elevadas (podem chegar à dezenas de MHz) do que no caso das subestações convencionais e a frente de onda será da ordem de nano-segundos [1].

## 1.2.0 O ACIONAMENTO DAS CHAVES SECCIONADORAS NAS SUBESTAÇÕES ISOLADAS À SF6

Subestações isoladas à gás SF6 são instalações de energia elétrica em que as barras em tensão encontram-se fixadas através de discos isolantes no interior de dutos metálicos, de seção circular, preenchidos com o gás sob pressão controlada e que devido ao excelente isolamento assim formado, terão as distâncias fase-fase e fase-terra significativamente reduzidas em relação às subestações convencionais (isoladas ao ar livre). São por isso mesmo denominadas de subestações compactas, ideais para a utilização em grandes concentrações urbanas.

A utilização de chaves seccionadoras nas subestações isoladas a gás é imprescindível tanto quando se deseja isolar partes do barramento que encontram-se tão somente sob tensão como quando se necessita energizar alguma seção da instalação.

As chaves seccionadoras - de agora em diante também denominadas neste trabalho, simplesmente de seccionadoras, - são constituídas de um contacto fixo e outro móvel que com o equipamento operando na posição "fechado", permanecem adequadamente acoplados de maneira a possibilitar a passagem da corrente elétrica pelo barramento. Na operação de abertura, o contacto móvel será deslocado no sentido tal que criará uma descontinuidade no barramento e dessa maneira impedirá o deslocamento do fluxo de corrente. Serão considerados como equipamentos que não devem ser acionados quando o barramento estiver alimentando alguma carga da subestação. Entretanto, no caso de disjuntor aberto, com um trecho da barra só em tensão (figura 1.1), como essa seção terá um comportamento tal qual um capacitor cilíndrico de grandes dimensões, o eventual acionamento de uma chave seccionadora desse trecho se dará sob o deslocamento da carga estática armazenada, provocando em consequência a formação de arco elétrico [1].

Conseqüentemente, a cada manobra dêsse tipo de chave, tendo-se em vista diversos fatores como a baixa velocidade do seu contacto móvel (tempo total do arco: de 0,1 a 2 s [10]), a pressão do meio isolante (entre 2 e 4 bars, valores típicos), a configuração geométrica do contacto móvel e do contacto fixo [2], a energia armazenada no trecho da barra sob manobra, ocorrerão sucessivas reignições entre os contactos da seccionadora o que pode acontecer uma centena de vezes durante cada operação [1]. Essas reignições geram impulsos de tensão, com frente de onda de alguns nano-segundos e devido às curtas dimensões dos barramentos isolados à SF6, provocarão o surgimento de transitórios rápidos - através do fenômeno das ondas viajantes - durante a curtíssima existência de cada reignição, com faixa de frequência típica compreendida entre KHz e MHz.

Como a utilização da micro-eletrônica nos circuitos de comando e proteção das subestações torna-se cada vez mais intensa, em consequência, as operações de chaveamento nessas instalações também proporcionarão a incidência rotineira de indução eletromagnética nesses circuitos. Essas induções são canalizadas para a parte externa do barramento blindado - para então incidir nos circuitos secundários - a partir de flanges e mecanismos acoplados à carcaça do barramento [29] como sensores, mecanismos de acionamento de chaves, sistemas de aterramento, etc. Esses campos eletromagnéticos poderão também provocar a operação indesejável dos relés de comando e proteção da subestação [21].

Os transitórios de tensão, oriundos das operações de chaveamento das subestações isoladas à gás SF6, denominados transitórios rápidos ou VFT (Very Fast Transients) dependem, quanto a sua frequência, das dimensões do barramento e sua intensidade é função da localização do ponto de medição e da carga-retida que por sua vez é resultante de chaveamentos anteriores.

### 1.3.0 FORMAÇÃO DOS TRANSITÓRIOS RÁPIDOS

Os transitórios rápidos de tensão que acontecem durante o acionamento de chaves seccionadoras no interior de um barramento isolado à SF6, são ondas eletromagnéticas formadas durante o arco elétrico gerado pela abertura ou fechamento da chave. Para as chaves de fabricação americana ou européia o tempo de duração desse arco varia entre 0.1 e 2.0 segundos [10]. Testes de campo demonstram [27] que a configuração do barramento, suas ramificações e complexidade e a relação entre as capacitâncias do lado da fonte de tensão alimentadora em relação àsqueias do lado da "carga", influenciam sobremaneira a intensidade desses surtos.

É sabido que cada reignição ocorrida durante o acionamento do equipamento (seccionadora), gera uma determinada sobretensão que por sua vez é função da diferença de tensão entre os contactos da chave, imediatamente antes do surgimento do surto. Por outro lado, a tensão do lado do barramento que em relação à seccionadora convencionou-se denominar de "carga" (figura 1.1) é função da carga elétrica armazenada durante a última reignição ocorrida. Portanto, os surtos de maior intensidade serão gerados quando para determinada reignição, a tensão do lado energizado encontra-se no seu valor máximo e no lado do barramento denominado "carga" tem-se uma razoável carga elétrica armazenada devido as reignições anteriormente ocorridas.

O surto de tensão produzido por uma reignição ao atingir uma terminação SF6/Ar dará origem a um componente de tensão refletido e que retornará ao interior do barramento de origem e a um segundo componente que será refratado para o ambiente exterior a esse barramento. Esse componente refratado por sua vez irá se dividir em dois outros: um surto que se propagará através do condutor isolado a ar que alimenta o barramento e outro que incidirá no invólucro, podendo dessa maneira provocar a elevação de potencial da sua carcaça.

#### 1.4.0 A SOBRETENSÃO INTERNA AO BARRAMENTO

Os transitórios gerados nos chaveamentos possuem um tempo-de-subida típico de 2 a 5 nano-segundos e dissipam-se após algumas dezenas de micro-segundos aproximadamente, depois de haver propiciado sucessivas reflexões ao longo do barramento, a partir do que a corrente gerada pelo arco entre os contactos da chave assumirá um pequeno valor (em torno de 1 Ampére) [4]. A frequência dessas sobretensões possui componentes da ordem de KHz até 100 MHz (valores típicos). No caso de abertura de chave, após a extinção do transitório, a secção desenergizada do barramento terá acumulado uma carga elétrica que ficará retida no mesmo e que é conhecida na literatura especializada como "trapped-charge" (carga-retida). Essa energia residual ficará armazenada tal qual em um capacitor de grandes dimensões. Essa carga no entanto dissipar-se-á lentamente algumas horas depois de acontecido a operação de chaveamento. Valores de carga-retida compreendidos entre -0,1 e -0,5 p.u. são comuns após a operação de chaves seccionadoras [17] em subestações isoladas à SF6. A intensidade dos transitórios gerados nos chaveamentos, no interior do barramento, raramente ultrapassam 1,5 p.u. e na maioria dos casos possuem alguns micro-segundos de duração [10].

#### 1.4.1 A variação de tensão nos contactos da chave

Numa visão preliminar do desenvolvimento de um surto de tensão entre os contactos de uma chave seccionadora, esquematiza-se um arranjo em que o equipamento encontra-se instalado numa secção de barramento à SF6, energizado numa extremidade e aberto na outra conforme o diagrama unifilar da figura 1.1. No caso, supõe-se uma operação de abertura da chave e para fins didáticos a secção de barramento à esquerda da seccionadora será denominado de "fonte" e a secção à direita, no sentido de uma carga hipotética que poderia ser

alimentada pela subestação, será denominado de "carga".

O oscilograma da figura 1.2 representa a tensão variando com o tempo em ambos os contactos da chave durante uma operação de abertura no circuito da figura 1.1 . A tensão  $U_1$  à frequência industrial é aquela do contacto que fica do lado da fonte. A tensão  $U_2$  é aquela do contacto que fica do lado do circuito denominado de carga. A figura esquematiza as consecutivas reignições que ocorrem entre os contactos da chave seccionadora até sua abertura completa, observando-se que:

- . A diferença de tensão no gap, ou seja, entre os contactos da chave é sempre a diferença entre a tensão do lado da fonte (frequência industrial) e a tensão do lado do barramento à SF6, em aberto, denominado de carga.
- . No instante  $T_0$  a diferença de tensão entre os contactos da chave é nula. Entretanto logo após o início da separação entre eles, a tensão do lado da fonte varia com a frequência desta enquanto que a tensão do lado da carga permanece estacionária.
- . O surgimento da primeira reignição entre os contactos da chave significa que naquele instante a diferença de tensão entre eles excedeu a rigidez dielétrica para uma determinada configuração de gap. Neste momento acontece a formação de um canal condutor entre os contactos e em consequência haverá um surto de tensão que irá se deslocar ao longo do barramento.
- . A ocorrência deste primeiro surto de tensão é interrompida tão logo o contacto do lado da carga tenha adquirido a tensão  $U_1$  ou seja, tão logo haja uma equalização da carga elétrica entre os contactos da seccionadora. Após o que, a tensão  $U_2$  permanecerá constante até que o mesmo fenômeno volte a se repetir e em consequência  $U_2$  volte a atingir um novo valor.

Tudo acontece como se a tensão U2 seguisse a tensão U1 aos "saltos". Este processo prossegue até o instante em que devido a distância de separação entre os contactos da chave ser elevada, a diferença de tensão entre eles não será mais capaz de superar a suportabilidade do gap. O gráfico da figura 1.3 representa a tensão U2 na sua forma real. Pois na realidade, as perdas através de correntes de fuga assim como componentes do circuito que se comportam de forma indutiva fazem com que os "saltos" da tensão U2 ocorram de forma exponencial.

#### 1.5.0 O AMORTECIMENTO DOS TRANSITÓRIOS RÁPIDOS

Para cada transitório de tensão gerado em uma reignição, a quantidade de energia dissipada no interior do barramento a SF6, devido a suas reduzidas dimensões, torna-se desprezível. E após a refração do surto na terminação SF6/Ar, haverá um componente que incidirá sobre o invólucro e outro que deslocar-se-á em direção ao restante da subestação, o qual, devido as dimensões a percorrer, será dissipado. Entretanto, se a terminação SF6/Ar for uma bucha capacitiva, antes que a onda refratada atinja a parte externa da carcaça, haverá uma alteração significativa tanto no seu tempo-de-subida quanto na sua intensidade [10]. Ocorre que nesse tipo de terminação, a modificação do tempo-de-subida acontecerá principalmente como resultado dos diferentes tempos de propagação do surto nas diversas camadas isolantes da bucha. À rigor, essas buchas, pelas suas dimensões, não são consideradas como elementos concentrados. Simulações e medições [10] de um surto numa terminação capacitiva SF6/Ar, indicaram uma redução de aproximadamente 25% de sua intensidade e um acréscimo de 200% do seu tempo-de-subida.



### 1.6.0 A ELEVAÇÃO DE POTENCIAL DA CARÇAÇA

A operação de chaveamento numa subestação isolada a SF6, provoca uma súbita elevação de potencial da sua carcaça. Acontece que o transitório de tensão gerado no interior da barra ao atingir uma terminação SF6/Ar terá um componente refratado que irá se deslocar ao longo da parte externa da carcaça dando origem à elevação de potencial do Invólucro com o subsequente surgimento de descargas entre as partes aterradas, próximas à terminação.

Sob certas circunstâncias, durante a realização de ensaios de suportabilidade de tensão por exemplo, a operação de chaveamento numa subestação isolada a gás SF6 poderá eventualmente provocar a ocorrência de curto-circuito para a "terra" nas imediações dos contactos da chave seccionadora. Sendo que neste caso, a elevação de potencial da carcaça da subestação será muito maior do que no caso de uma simples operação de chaveamento, com valores que podem atingir intensidade quatro vezes maior. Em ambos os casos entretanto, o tempo-de-subida do surto se situa entre 5 e 20 nano-segundos [8]. Diversos parâmetros de projeto podem influir na intensidade da elevação de potencial da carcaça da subestação isolada a gás SF6, quais sejam, impedância de surto do Invólucro, indutância da conexão de aterramento, etc.

### 1.7.0 A COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DAS SUBESTAÇÕES ISOLADAS À SF6

A figura 1.4 mostra um gráfico comparativo das coordenações de isolamento dos espaçamentos isolados a ar e a gás SF6 respectivamente. Verifica-se que na faixa de tempo em torno de 5 micro-segundos, o isolamento a ar torna-se significativamente menor do que aquele que utiliza gás SF6 [28].

Tendo em vista o dimensionamento do isolamento em relação aos surtos atmosféricos, o isolamento das subestações necessita de uma coordenação entre o nível dos surtos admitidos no circuito de transmissão alimentador e o nível dos surtos (BIL) permitido no seu interior. No caso das subestações isoladas a ar e alimentada através de circuito aéreo, como as características isolantes do circuito alimentador e dos equipamentos no interior da subestação são idênticos, essa coordenação é obtida de maneira uniforme. No caso de subestação isolada à SF6, também alimentada através de circuito aéreo, como os seus espaçamentos possuem comportamento isolante diferente daqueles isolados a ar (figura 1.4), a coordenação entre o espaçamento a ar da linha de transmissão e o espaçamento isolado a gás no interior da instalação deverá ser definido considerando-se essa diferença.

A coordenação de isolamento das subestações isoladas a ar, privilegia sobremaneira o transformador de potência, desde que pressupõe-se o ar como um isolamento auto-regenerativo. Para tanto, usa-se nessas subestações como regra geral, o posicionamento do pára-raios sempre próximo ao transformador ou banco principal. Nas subestações isoladas à gás SF6, considerações adicionais devem ser feitas, como por exemplo, descargas através dos espaçadores não são uma contingência aceitável.

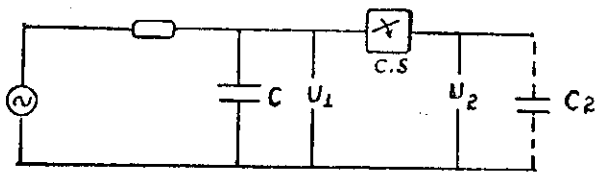
Nas subestações convencionais, devido as grandes dimensões de barramento, consequências indesejáveis provocadas pelos transitórios que ocorrem a cada chaveamento (reignição), tornam-se desprezíveis devido às perdas. Entretanto, nas subestações isoladas a gás, esses transitórios necessitam que suas solicitações sobre o isolamento sejam previstas no dimensionamento do barramento. Para tanto, eles deveriam ser enfatizados na curva dos diversos tipos de sobretensões a que se submete o isolamento durante a fase de ensaios, mais especificamente na faixa de tempo compreendida entre 0 e 1 micro-segundo, ou seja, nas proximidades do ensaio de onda cortada para impulso atmosférico.

## 1.8.0 PORQUE CALCULAR OS TRANSITÓRIOS RÁPIDOS

Desde que o acionamento das chaves seccionadoras faz parte da rotina de operação das subestações de energia elétrica, deduz-se que periodicamente, a cada manobra de chaveamento nas subestações isoladas à SF6, ocorrerão centenas de solicitações abruptas (surtos de tensão com frentes-de-onda bastante íngremes) na rigidez dielétrica do seu isolamento. Do que se conclui que estes transitórios de tensão, de altíssima frequência, que via de regra provocam a elevação de potencial da carcaça do barramento, poderão "contribuir" para a taxa de falhas da instalação. Estes surtos de tensão são influenciados principalmente pelas características da chave seccionadora, como velocidade de operação e forma geométrica dos seus contactos [2].

Portanto, o cálculo dos transitórios rápidos poderá fornecer subsídios ao virtual usuário da subestação, tendo-se em vista analisar em que medida alguns parâmetros de projeto do barramento como conexões de aterramento e impedâncias poderão influir no controle da intensidade do fenômeno.

Neste trabalho, será desenvolvido um modelo de barramento de subestação isolada a gás SF6, para através de simulação digital, utilizando-se a linguagem FORTAN, obter-se os valores da elevação de potencial da carcaça da subestação devido a uma operação de chaveamento. Serão analisados em consequência, a influência de alguns parâmetros da subestação sobre a elevação de potencial calculada.



- U1 . tensão - lado da fonte
- U2 . tensão - lado da "carga"
- C.S . chave seccionadora
- C, C2 . capacitâncias: lado da fonte, lado da "carga"

DIAGRAMA UNIFILAR - BARRAMENTO A SF6

Figura 1.1

início da separação  
dos contactos

ultima ignição

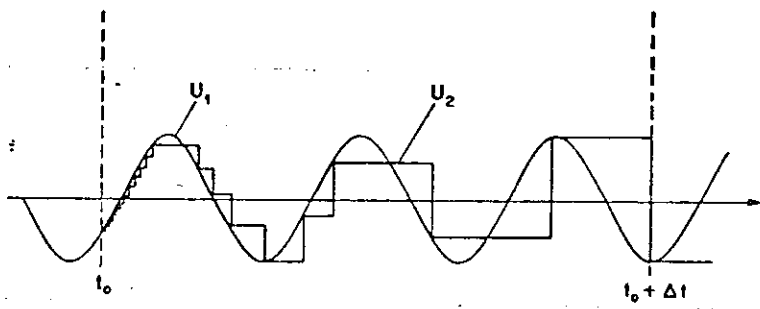


Figura 1.2

REIGNIÇÕES DE UMA ABERTURA DE CHAVE

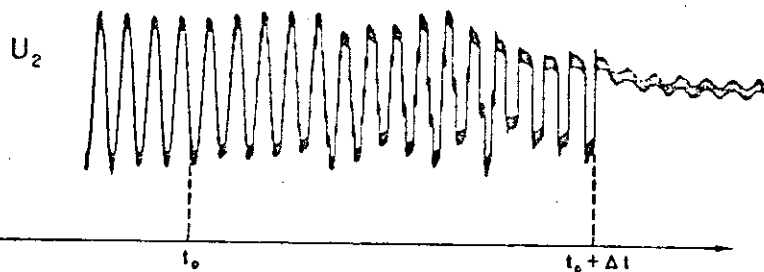


Figura 1.3

OSCILOGRAMA DE ABERTURA DE UMA CHAVE

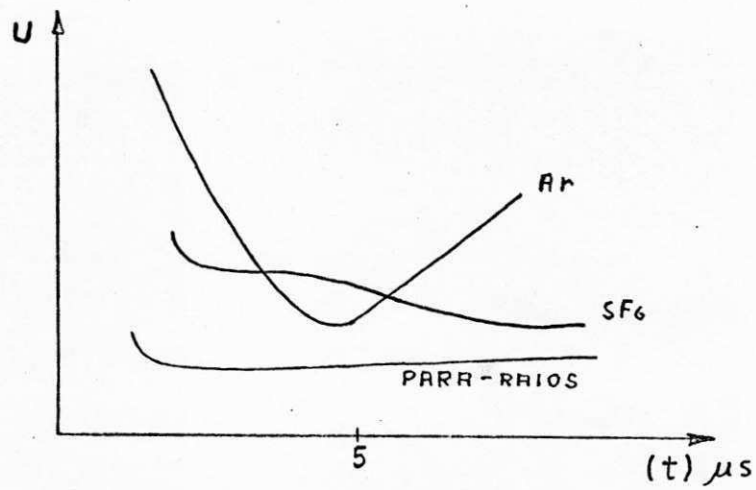


Figura 1.4

COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO COMPARATIVO DE UM ESPAÇAMENTO ISOLADO  
A AR E EM SF6

## CAPÍTULO II

### CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS TRANSITÓRIOS DE CHAVEAMENTO

#### 2.1.0 DEFINIÇÃO DE MODELO PARA O ESTUDO

Para uma análise de comportamento dos transitórios rápidos é imprescindível o conhecimento da ordem de grandeza dos parâmetros elétricos envolvidos bem como da definição de uma secção de barramento cujo desempenho seja o mais representativo possível de uma subestação isolada a gás SF6 durante uma operação de chaveamento.

Por motivos óbvios, o dimensionamento da subestação objeto do estudo não deve ser tão restrito que impossibilite conclusões, por outro lado, não deve ser tão complexo, de maneira a se desviar da proposição inicial do trabalho a ser desenvolvido.

O modelo de subestação aqui eleito para estudo de operação de chaveamento contempla uma secção de barramento de subestação isolada a gás SF6, composto de linha aérea alimentadora, bucha de transição Ar/SF6 e trecho de barramento isolado a gás sob pressão, com uma chave seccionadora no seu interior. Pode ser visualizado através da parte hachurada do diagrama unifilar de uma hipotética subestação como na figura 2.1. A figura 2.2 representa de forma esquemática o trecho hachurado e a figura 2.3 mostra o arranjo com detalhes da secção de barramento destacado, limitando-se o eletrodo energizado na posição (U) ocupada anteriormente pelo disjuntor. Consequentemente, tendo-se em vista qualquer discussão neste trabalho, subestação isolada a gás SF6 será definida como um arranjo de barramento como aquele da figura 2.3, em tensão, à frequência industrial, com uma chave seccionadora na posição TT'.

O barramento encontra-se alimentado por uma fonte através do trecho de cabo aéreo SM, com a carcaça aterrada no ponto O e a transição cabo aéreo/barramento isolado a gás, é feita através de bucha (terminação SF6/Ar). A chave encontra-se inicialmente na posição "aberto", procedendo-se o seu fechamento, será analisado em consequência a propagação de um único surto através do barramento e do invólucro.

## 2.2.0 O EFEITO PELICULAR

Sua influência na elevação do potencial da carcaça.

Durante a operação de chaveamento, a ruptura do dielétrico (SF6) durante cada reignição propicia a propagação do surto de tensão em ambos os sentidos do barramento, a partir dos contactos da chave, através do fenômeno das ondas viajantes. A intensidade da onda em cada sentido será a metade da diferença de potencial entre os contactos antes da disrupção. Essas ondas viajantes, durante sua brevíssima existencia terão um componente importante de sua frequência determinado pelo comprimento do barramento sob manobra além do que a estrutura coaxial interna da barra possibilitará ao transitório de tensão deslocar-se praticamente sem perdas no seu interior.

Quando da ocorrência de um transitório de tensão devido à chaveamento na posição da barra denominada de TT' (figura 2.3), o surto de tensão induzido naquele momento não atravessará instantaneamente o invólucro do barramento para surgir concomitantemente na parte externa da carcaça. O surto de tensão gerado é de alta frequência e devido ao efeito pelicular, comporta-se como tendo de viajar do local onde ocorreu o chaveamento até o ponto N para só então dar início a sua propagação na parte externa do invólucro [9]. Esse comportamento dos transitórios de alta frequência sobre as superfícies metálicas,

desacopla a parte externa do invólucro da parte interna do barramento e em consequência a superfície externa passa a se comportar como uma outra linha de transmissão - trecho OR da figura 2.3 - com impedância própria, Z3.

Ao incidir na terminação SF6/Ar, o surto de tensão proveniente do interior do barramento terá uma parte da onda, refratada para o trecho do barramento isolado a ar, SM, e outra parte que através da flange da terminação SF6/Ar, incidirá na parte externa do invólucro ao longo do trecho OR (figura 2.3).

Supondo-se o arranjo da figura 2.3, teremos como o seu circuito equivalente, a figura 2.4, formada principalmente por três linhas com suas respectivas impedâncias de surto.

Sendo que (ver figura 2.4):

TRECHO NU - Representa o eletrodo isolado à SF6  
TRECHO OR - Representa a parte externa do invólucro  
TRECHO SM - Representa o cabo aéreo alimentador

Onde:

Z1: Impedância de surto da linha aérea que alimenta a secção isolada a SF6.

Z2: Impedância de surto composta do eletrodo da barra isolada à gás e a parte interna do invólucro.

Z3: Impedância de surto da linha composta da superfície externa do invólucro e a terra.

Sendo  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  os tempos de trânsito das respectivas linhas.



### 2.3.0 OS TRANSITÓRIOS NO INVÓLUCRO DEVIDO À CURTO-CIRCUITO

Quando da operação de abertura de chave numa secção de barramento isolado à SF<sub>6</sub>, já foi observado a ocorrência de descargas (flashovers) entre os contactos da chave e o invólucro [6]. Foi também verificado nesses casos que a descarga ocorreu em uma tensão menor que a tensão suportável entre os contactos da chave e a "terra". Através de câmaras fotográficas especiais estrategicamente instaladas, constatou-se que essas descargas ocorrem a partir das avalanclas formadas durante as reignições do chaveamento [6]. A mudança da configuração do campo eletromagnético ao redor dos contactos da chave durante a ocorrência de cada reignição, propicia o surgimento dessas avalanclas. As faltas "fase-terra" que ocorrem em subestações isoladas à gás tem sido observadas, independente de fabricante, com mais frequência naqueles equipamentos de classe de tensão maiores que 300 KV. Sabe-se também que faltas desse tipo têm baixo índice de probabilidade de ocorrer. São necessários centenas de chaveamentos para que haja uma única ocorrência.

Medições em barramentos após a operação de chaveamento indicam que a elevação de potencial na parte externa e próxima a bucha é maior do que em pontos mais afastados [9].

### 2.4.0 A CARGA - RETIDA

Após a abertura de uma chave seccionadora, as dezenas de reignições precedentes resultam no acúmulo de cargas elétricas na secção do barramento "flutuante", constituindo o que se convencionou denominar neste trabalho de carga-retida. Esta carga é um valor estatístico e é função da geometria dos contactos da chave (assimetria) e de sua velocidade. Alguns autores [2] argumentam entretanto que um aumento da assimetria tendo em vista diminuir a carga-retida, implica no

aumento do comprimento do arco, maior tempo de queima, e como consequência numa maior possibilidade de ocorrência de uma falta "fase-terra".

Pode-se considerar o potencial de -0.3 p.u. como um valor provável de carga-retida e nas chaves com velocidade de abertura maior, a carga-retida pode chegar até a -1,0 p.u. [17]. A carga-retida leva várias horas para ser dissipada e sua consequência mais danosa ocorre quando logo após a abertura da chave faz-se necessário o seu fechamento. Nesse caso, supondo-se uma carga-retida de -0,3 p.u. e tendo em vista que a tensão do lado da fonte seja 1,00 p.u., teremos quando do fechamento, uma re-ignição inicial com um surto de 1,3 p.u.. Evidentemente, cargas - retidas mais elevadas, como -0.5 p.u., provocarão surtos iniciais ainda mais intensos. Além disso, uma carga-retida de grande intensidade poderá ocasionar a levitação de partículas condutoras eventualmente existentes no interior do barramento. Essas partículas, sendo movimentadas no interior da barra poderão migrar para a superfície dos espaçadores, acarretando consequências desastrosas para a rigidez dielétrica da subestação [2].

#### 2.5.0 TRANSITÓRIOS INTERNOS

A intensidade do surto de tensão gerado em um chaveamento é função da carga-retida e do ponto aonde está sendo feita a medição, já que essa intensidade irá variar em função das inúmeras reflexões e superposições das ondas viajantes no interior do conjunto blindado. Surtos de tensão com intensidade de até 1,5 p.u. medidos nas posições mais desfavoráveis no interior do barramento podem ser considerados como típicas para subestações européias ou americanas [9]. No caso dos fabricantes japoneses os surtos podem atingir uma maior magnitude, tendo em vista que suas seccionadoras são mais rápidas nas operações de abertura ou fechamento [3].

Cada chaveamento produz dezenas de reignições entre os contactos da chave. Chaves mais velozes produzem um menor número de reignições mas proporcionam surtos induzidos de maior intensidade e maior carga-retida. Por outro lado, chaves mais lentas proporcionam uma menor carga-retida e surtos de menor intensidade mas em maior número [2]. Consequentemente uma solução de compromisso precisa ser assumida na especificação do equipamento.

Na medição dos transitórios rápidos, osciloscópios com largura de faixa de frequência bem acima de 100 MHz, são necessários quando se deseja captar o maior número de informações possíveis tal como as principais frequências envolvidas. Quando se deseja, entretanto, principalmente a frequência fundamental do surto, equipamento com largura de faixa de 20 MHz é suficiente. Estamos falando aqui de surtos provenientes de cada reignição, com duração típica de 50 microsegundos e com frente de onda na sua origem, entre 4 e 7 nanosegundos.

As chaves seccionadoras são equipamentos acionados rotineiramente nas subestações. Sabendo-se que em cada operação de uma seccionadora, a quantidade de reignições atinge facilmente uma centena [9], pode-se prever que durante a vida útil da subestação o seu barramento será "varrido" milhares de vezes pelos transitórios rápidos. Consequentemente, todos os equipamentos diretamente conectados ao barramento como transformadores de medição, terminações de transformadores de força, etc, terão também o seu isolamento submetido a esses surtos de tensão.

#### 2.6.0 AS FREQUÊNCIAS TÍPICAS

Os oscilogramas das figuras 2.5 e 2.6 [17], obtidos através de osciloscópio com tempos de varredura diferentes, representam o surto

de tensão entre os contactos da chave, durante uma reabertura no fechamento de chave seccionadora em um barramento isolado a gás SF<sub>6</sub>. A frequência principal dada pelo comprimento do trecho principal sob manobra, é bem evidente no oscilograma da figura 2.6 e situa-se na faixa de 2 MHz. Essa frequência estabiliza-se após alguns microssegundos. No oscilograma da figura 2.5 referente a mesma reabertura, observa-se o efeito dos pequenos trechos de barramento cujas frequências, da ordem de dezenas de MHz, se superpõe à frequência principal [17].

#### 2.7.0 A MEDIÇÃO DOS TRANSITÓRIOS RÁPIDOS

A medição da intensidade dos surtos gerados no interior dos barramentos isolados a SF<sub>6</sub> quando ocorre um chaveamento, com ou sem curto-circuito, apresenta diversas peculiaridades. A primeira delas diz respeito a acessibilidade do "ponto" de tensão a ser medido. Sabe-se que para a utilização de um sistema medidor de transitórios, a instalação do divisor de tensão (figura 2.7), requer o acesso direto ao eletrodo energizado, onde se deseja captar o sinal a ser medido. Como o barramento em tensão encontra-se confinado no interior do invólucro contendo gás sob pressão, como instalar o divisor no interior do barramento selado? As propostas de divisor de tensão para medição em subestações isoladas a SF<sub>6</sub> mais conhecidas [3, 4, 22] baseiam-se principalmente na utilização do próprio dielétrico do barramento (gás SF<sub>6</sub> sob pressão) como o principal isolamento - capacitor C1 na figura 2.7 - do divisor. E em todos esses trabalhos, para a instalação do medidor, são imprescindíveis adaptações na estrutura da carcaça do barramento nos pontos aonde se deseja efetuar a medição. Como consequência para quem opera esse tipo de subestação e/ou pretende realizar medições de transitórios rápidos, torna-se indispensável a cooperação do fornecedor, de preferência desde a fase de fabricação da instalação.

Os valores numéricos da figura 2.7 podem ser considerados típicos [4] desse tipo de medidor, tendo em vista a faixa de frequência dos surtos de chaveamento.

Outra peculiaridade desse tipo de medição diz respeito à qualidade do sinal que chega até o osciloscópio de medição. Sabe-se que mesmo usando-se cabos coaxiais, é inevitável o surgimento de tensões espúrias no sinal que aparece na tela do aparelho de medição, já que existirá uma diferença entre o potencial de terra em que se encontra o barramento onde serão feitas as medições e o potencial de terra do local aonde se encontra a cabine de medição. Este problema poderia ser resolvido desde que houvesse espaço suficiente para instalar-se a cabine com o sistema de medição, bem próximo ao barramento, entretanto esta não é uma exigência razoável devido a exiguidade do espaço disponível quando se trabalha com instalações isoladas a SF6. Outra forma de se evitar esse tipo de interferência, além de eventuais induções eletromagnéticas no sinal a ser medido, pode ser obtida através da utilização de aparelhos de medição de tecnologia mais recente, nos quais faz-se uso de lasers e fibra ótica.

O medidor de surtos de tensão apresentado na referência [3], de tecnologia atualizada, propõe um sistema de medição em que o sinal a ser transmitido ao osciloscópio é antes convertido em sinal ótico através de LED's (diodos de emissão de luz) especiais, obtendo-se assim uma forma de onda imune às induções comuns ao sinal elétrico. Esse sinal transmitido através de fibra ótica é reconvertido em um sinal elétrico antes de sua entrada no osciloscópio de medição. Esse medidor, entretanto, devido as limitações dos componentes do sistema (faixa de frequência de trabalho reduzido) ótico utilizado, exhibe resultados exclusivamente na faixa de frequência entre 0,8 KHz e 16 MHz.

O medidor de surtos da referência [4] propõe a utilização de cabo coaxial na transmissão do sinal elétrico do divisor de tensão para o

osciloscópio, possuindo em consequência todas as limitações inerentes a esse tipo de medição. Propõe medições nas faixas de frequência de 1 Hz a 100 MHz e de 100 KHz a 500 MHz, dependendo apenas da calibração interna do aparelho de medição.

## 2.8.D O CÁLCULO DE TRANSITÓRIOS

O método clássico para o cálculo de transitórios de tensão é o DIAGRAMA DE LATTICE. Entretanto, embora seja uma ferramenta prática, por ser um método essencialmente manual a sua aplicação é mais viável nos pequenos trechos dos sistemas de potência, apesar de que já existem aplicações específicas para computadores digitais [30].

Tendo em vista as dimensões adquiridas pelos sistemas de potência, o cálculo de transitórios de tensão desses sistemas tornou-se impensável sem a utilização de computadores.

Em princípio, podemos afirmar que existem três tipos de sistemas computacionais que podem ser empregados na solução de transitórios de tensão: Analisadores de Redes (TNA's), Computadores Analógicos e Computadores Digitais. Entretanto, devido a sua baixa velocidade de processamento em relação aos outros sistemas, os computadores analógicos tem pouca utilização no caso específico de cálculo de transitórios em sistemas de potência, apesar de existirem modelos recentes mais rápidos [30].

No caso dos TNA's, para sua utilização, o sistema a ser estudado deverá ser um modelo equivalente, no qual as linhas de transmissão, reatores, transformadores, disjuntores, etc, deverão ser montados em escala reduzida que por sua vez obedecerão determinadas regras. Trabalha-se nestes casos com tensões na faixa de 10 a 100 volts e com correntes na faixa de miliampéres a alguns ampéres [30].

Os geradores são representados por fontes ideais de tensão e funcionam em 60 Hz, o que viabiliza a simulação de transitórios em tempo real. O uso de tempo real por sua vez é uma ferramenta imprescindível quando se investiga operações de relés, e qualquer simulação de modelo em que se necessita analisar "disparos" de ligar ou desligar disjuntores torna-se impraticável quando não se dispõe desse recurso.

Dentre as principais desvantagens dos analisadores de rede encontra-se a limitação técnica de seus modelos de indutores, onde as perdas no modelo reduzido são desproporcionalmente mais altas do que nos componentes do sistema real que está sendo simulado. O tamanho do sistema a ser representado também pode ser uma limitação desde que pode implicar em custos mais altos em termos de quantidade de componentes e espaço disponível. Outro fator limitador desses simuladores é o tamanho das linhas de transmissão que poderão ser estudadas, já que as dimensões físicas dos laboratórios são pré-determinadas.

Os computadores digitais são de longe a ferramenta mais usada no cálculo dos transitórios de tensão dos sistemas de potência. A utilização do método das características para a solução da equação de onda das linhas em conjunto com a regra do trapézio para a integração das equações diferenciais dos componentes de parâmetro concentrado do sistema, propiciam a montagem de um sistema matricial, geralmente com coeficientes esparsos e que dispõe atualmente de poderosos métodos para sua solução. Essas circunstâncias tornaram as simulações digitais a forma mais acessível de análise dos surtos de tensão. Atualmente, a simulação digital mais difundida e completa sobre transitórios de tensão é o EMTP (Eletromagnetic Transient Program) cuja importância, devido a sua funcionalidade e boa aceitação dos seus resultados, tornou-se inquestionável.

O uso do TNA é uma opção efetiva no cálculo de transitórios eletromagnéticos, apesar de que sua disponibilidade é quase que

exclusiva das instituições de pesquisa, sendo portanto um equipamento de uso mais restrito do que os computadores digitais. Na solução digital dos problemas de transitórios, entretanto, alguns pré-requisitos necessitam serem verificados. Na montagem das equações que definem os elementos dos circuitos em análise, como capacitores, indutores, linhas de transmissão, transformadores, pára-raios, etc, o método adotado precisa contemplar com uma mínima precisão, elementos concentrados ou distribuídos, parâmetros lineares e não-lineares. O cálculo computacional dos transitórios em subestações de energia elétrica não substitui a sua medição [7,8] quer seja em laboratórios através de arranjos experimentais, quer seja "in loco", ou seja, no local em que se situa a própria instalação. Na verdade, o cálculo e a medição se complementam e seus resultados devem ser analisados conjuntamente.



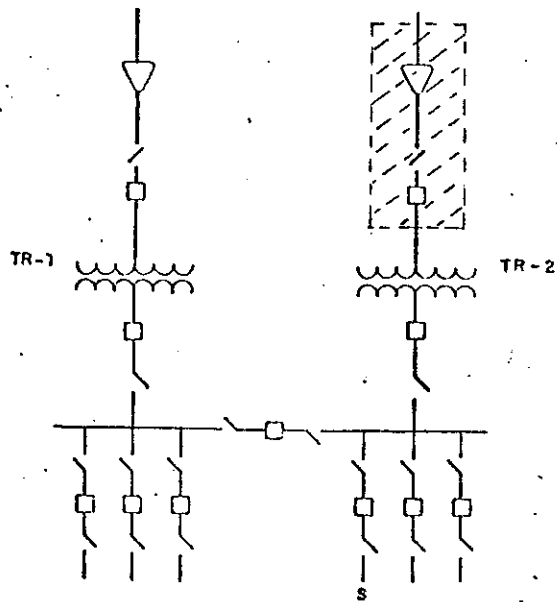


Figura 2.1

DIAGRAMA UNIFILAR DE UMA SUBESTAÇÃO ISOLADA A SF6

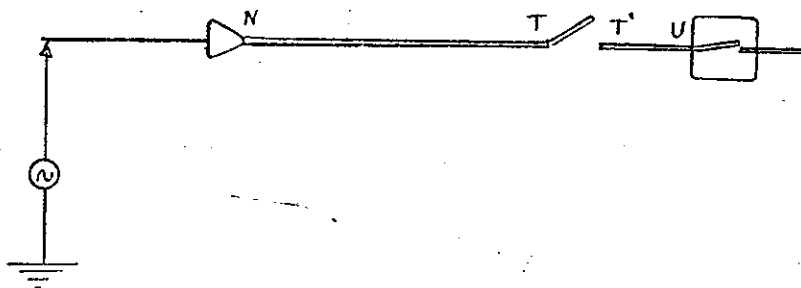


Figura 2.2

DIAGRAMA UNIFILAR - TRECHO HACHURADO DA FIGURA 2.1

NT : Trecho da barra - lado da fonte

T'U : Trecho da barra - lado da "carga"

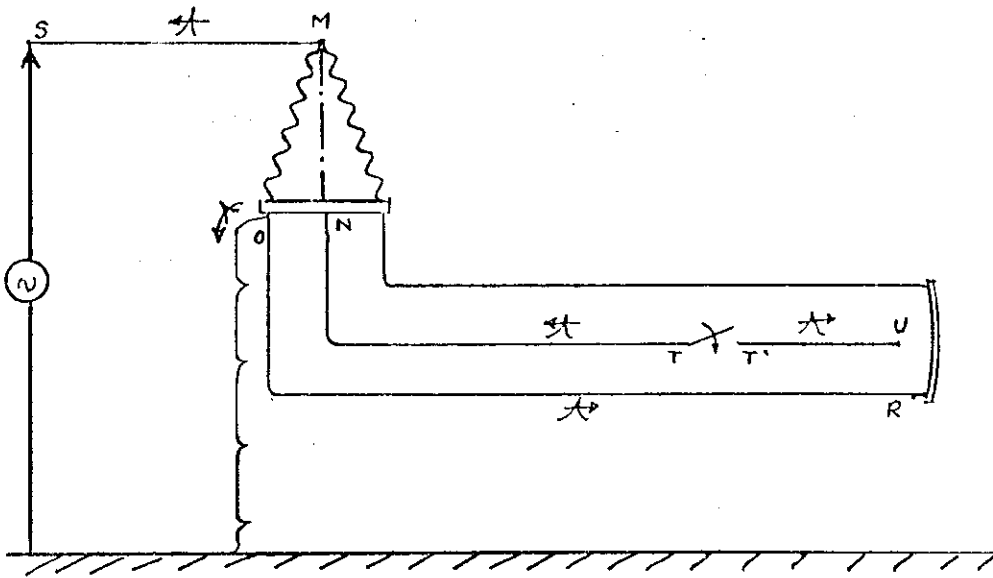


Figura 2.3

DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA SECÇÃO DE BARRAMENTO A SF6

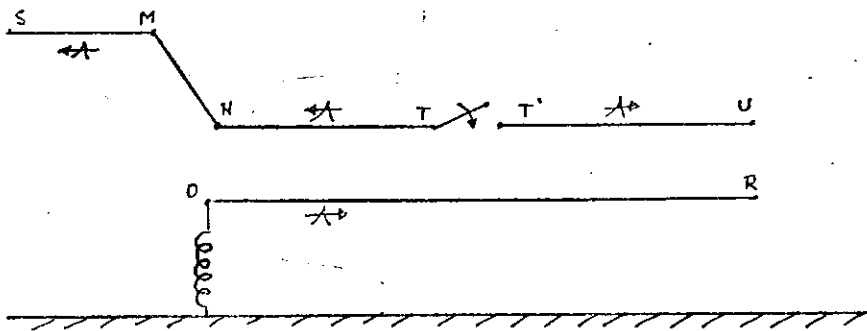


Figura 2.4

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM BARRAMENTO A SF6  
DURANTE UMA OPERAÇÃO DE CHAVEAMENTO

# FREQUÊNCIAS TÍPICAS DE CHAVEAMENTO

TENSÃO DO LADO DA FONTE

TENSÃO DO LADO DA "CARGA"

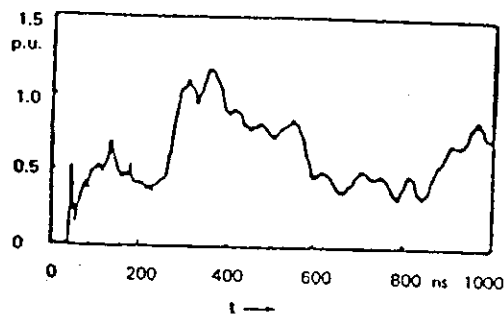
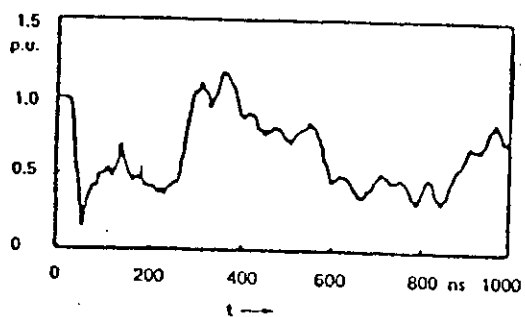


Figura 2.5

SURTOS DE TRANSITÓRIOS - TEMPO DE SUBIDA 5-10 ns

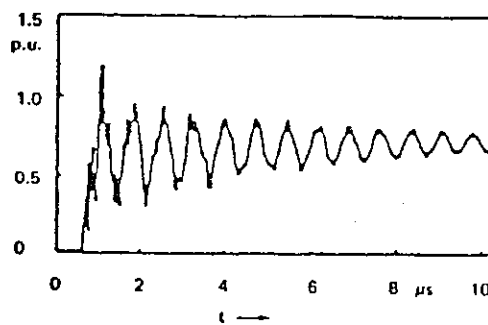
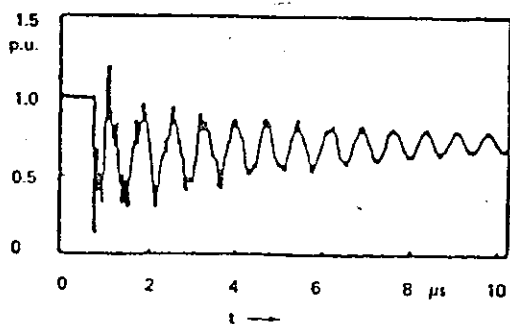


Figura 2.6

OSCILAÇÃO MONOFREQUENTE (APÓS ALGUNS μs)

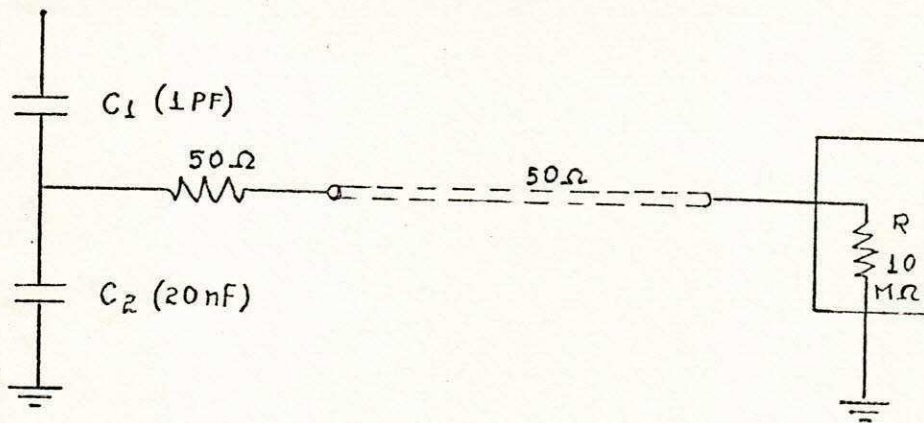


Figura 2.7

DIVISOR DE TENSÃO USADO NA MEDIÇÃO DOS TRANSITÓRIOS RÁPIDOS

## CAPÍTULO III

### SIMULAÇÃO DIGITAL DE TRANSITÓRIOS RÁPIDOS

#### 3.1.0 DESCRIÇÃO DO ARRANJO

O arranjo de barramento a ser simulado (figura 3.1) é alimentado por uma fonte de tensão (cos wt) através do trecho de 300 metros de cabo aéreo e a secção de barra isolada a SF6 têm um comprimento padrão de 15 metros. A conexão do cabo aéreo ao eletrodo da barra isolada a gás será feita através de terminação SF6/Ar. O trecho de eletrodo em tensão e isolado à SF6 será fixado ao invólucro através de três cones isolantes e terá na sua extremidade aberta, uma terminação esférica (TF).

O conjunto de barramento é monofásico, conectado à terra através da conexão AI, que eventualmente terá o seu valor modificado para a verificação da sua influência na elevação do potencial do invólucro da secção isolada a SF6. O cotovelo da barra - trecho em SF6 - não terá representação específica sendo considerado para efeito do circuito equivalente como uma continuação retilínea do eletrodo em tensão.

No presente programa não foram incluídos no circuito elementos não lineares e variáveis com o tempo. Com a inclusão desses, a matriz das condutâncias que descreve o sistema: [G], conteria alguns parâmetros variáveis com o tempo, corrente ou tensão. Nesse caso, a referência [20] aponta alguns métodos de solução e algumas técnicas para reduzir o tempo computacional que a inclusão desses elementos implicaria.

A chave seccionadora (RSW) inserida no trecho de eletrodo isolado a gás encontra-se à 8 metros da extremidade em aberto e será representada por uma resistência com um valor próximo a zero quando for considerada fechada e assumirá um valor elevado (da ordem de Mega-ohms) quando for considerada em aberto.

### 3.1.1 CARACTERÍSTICAS DO ARRANJO EM ESTUDO

O arranjo da figura 3.1 é uma montagem ideal e simplificada de uma secção monofásica de entrada de barramento de uma subestação isolada a gás SF6. A altura do cabo aéreo alimentador - 7 metros - em relação ao solo está dentro dos valores mínimos admissíveis e assim como a altura da parte inferior do invólucro que contem o eletrodo isolado a gás SF6, em relação ao solo - 0,5 metro - são valores estimados para um estudo inicial. Esses valores - referentes a altura do arranjo - serão modificados em algumas simulações, tendo em vista verificar a influência da impedância de surto na elevação de potencial da carcaça do trecho isolado a SF6.

As características dos elementos que compõem o arranjo citado, são valores típicos obtidos da literatura especializada [1, 15, 17] e são os seguintes:

#### Elementos do Trecho de Barramento Aéreo

- Fonte alimentadora de tensão U: 1 p.u.
- Cabo aéreo alimentador (ACSR) de 300 metros de extensão e de 954 MCM de diâmetro e situado a uma altura de 7 metros em relação ao solo.

## Elementos do Trecho de Barramento Isolado a SF6

- Invólucro selado em liga de alumínio de 410 mm de diâmetro, contendo gás SF6 no seu interior e com sua parte inferior situada a uma altura de 0,5 metro em relação ao solo.
- Pressão do gás no interior do invólucro: 4,5 bars
- Condutor rígido em liga de alumínio de 15 metros de comprimento e 130 mm de diâmetro inserido no interior do invólucro anteriormente citado e fixado no mesmo através de três cones isolantes (espaçadores), com uma terminação esférica (TF) em sua extremidade em aberto e uma chave seccionadora (RSW) localizada a 6 metros dessa terminação.
- Capacitância da terminação SF6/Ar: 80 PF.
- Capacitância equivalente ao cone isolante C11: 120 PF.
- Capacitância equivalente ao cone isolante C12: 10 PF.
- Capacitância equivalente ao cone isolante C13: 10 PF.
- Capacitância equivalente à terminação esférica TF: 10 PF.
- Indutância equivalente à conexão a terra-AI: 0,5 micro - Henrie (caso padrão).

Na montagem do circuito equivalente ao arranjo, a capacitância TF mais a capacitância C13 será denominada C2 e valerá 20 PF.

É importante ressaltar que a especificação desses elementos em trabalhos teóricos - simulação em computador digital - sem a correspondente montagem do arranjo numa simulação física em escala real para a comparação dos resultados obtidos está sujeito às limitações inerentes a esse tipo de estudo.

### 3.2.0 A OPERAÇÃO DE CHAVEAMENTO REALIZADA

A operação de energização do barramento e a abertura e fechamento da chave foi idealizado de acordo com a seguinte premissa: a ocorrência da reignição deve acontecer quando entre os contactos da chave houver uma diferença de tensão próximo a 1,15 p.u. que foi constatado como sendo um valor típico no instante inicial do surto [2]. O arranjo (figura 3.1) encontra-se inicialmente desenergizado - a fonte de tensão (cos wt) está desligada - as condições iniciais são iguais a zero e a chave seccionadora (RSW) encontra-se fechada.

Inicialmente, o barramento é energizado através da fonte de tensão de cos wt p.u. durante 12 micro-segundos que é o tempo necessário para o contacto da chave que fica do lado da fonte de tensão assumir o valor de 1 p.u.. Após o que, a chave é aberta e mantida nesta posição durante 5 ms aproximadamente para que o contacto que fica situado no lado denominado de carga, assuma uma carga retida de -0,13 p.u.. Neste instante a chave será fechada provocando a ocorrência de uma única reignição onde a tensão inicial entre os contactos é de 1,13 p.u. com duração de 50 micro-segundos e cujos valores de surto serão calculados em sequência pelo programa computacional.

Os intervalos de 12 micro-segundos e 5 ms acima, foram obtidos após simulações consecutivas quando foi então observado que estes eram os intervalos de tempo exigidos pelo programa computacional para que se conseguisse as tensões de 1 p.u. e -0,13 p.u.. O tempo de reignição, 50 micro-segundos, encontra-se dentro da faixa de tempo obtido nas medições e publicado em trabalhos sobre chaveamento de subestações isoladas a gás SF6 [1].

Na abertura ou fechamento de uma chave em subestações isoladas a SF6, ocorrem dezenas de reignições, entretanto no caso de fechamento, somente os primeiros surtos, ou seja, aqueles associados aos maiores gaps e de maior intensidade solicitam o equipamento de maneira significativa, sendo portanto os mais representativos [2].



### 3.3.0 REPRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS DO ARRANJO

Pode-se considerar como o fator mais importante na análise de transitório em sistemas de potência, o entendimento de que não há um modelo único para simular cada um dos elementos do sistema [30]. São os próprios valores esperados do estudo, como forma de onda de corrente e tensão, que deverão servir de orientação para a escolha do modelo mais adequado para cada elemento que compõe o arranjo. Conseqüentemente, após ter sido definido o ambiente em que será simulado o fenômeno - no caso, computador digital - a definição dos modelos para as linhas e outros componentes como a terminação barramento/linha aérea será uma etapa decisiva do estudo.

Para a representação dos componentes do arranjo de barramento proposto, tendo em vista a montagem do circuito elétrico equivalente, divide-se esses componentes em elementos considerados como parâmetros concentrados (capacitâncias, indutâncias, resistências) e elementos considerados como parâmetros distribuídos - trechos do barramento que se comportam como linhas de transmissão - e que se caracterizam por uma impedância de surto ( $Z$ ) e um tempo de trânsito ( $\tau$ ).

#### 3.3.1 Elementos com parâmetros concentrados

Os elementos do arranjo da figura 3.1 considerados como parâmetros concentrados são os seguintes:

Cordoalha de aterramento (AI) - O aterramento do invólucro da barra isolada a SFB foi realizado através da cordoalha de aterramento fixada na base da terminação SFB/Ar e será representada por uma indutância (AI) com um valor inicial de 0,5 micro-Henrie, posteriormente esse valor será alterado sistematicamente de maneira a aferir a sensibilidade do surto em relação a esse parâmetro.

Terminação esférica (TF) - A extremidade em aberto do eletrodo isolado a SF6 será considerada com uma terminação esférica que delimitará o comprimento desse barramento. O circuito equivalente e o valor da capacitância [17] será como indicado na figura 3.2.

Cone isolante espaçador - O eletrodo em tensão e isolado à gás da secção blindada é fixado nas paredes do interior do invólucro, através de cones isolantes espaçadores (C11, C12 e C13) que serão representados pelas capacitâncias respectivas [17]. Sendo que em um dos casos a serem analisados, a capacitância do cone isolante C11 será modificada de maneira sistemática, tendo em vista aferir a influência da capacitância do cone isolante do contacto da chave que fica do lado da fonte alimentadora, sobre a elevação de potencial da carcaça quando ocorre uma operação de chaveamento.

### 3.3.2 Elementos com Parâmetros Distribuídos

Para o equacionamento dos trechos do arranjo elétrico considerados como linhas de transmissão, ou seja, como parâmetros distribuídos, o desenvolvimento de suas equações para a solução digital será realizado a partir das equações das características de linha, onde os parâmetros principais são a impedância de surto de cada linha ( $Z$ ) e o seu tempo de trânsito ( $\tau$ ), ou seja, o tempo necessário para que um surto de tensão percorra toda a sua extensão.

O arranjo de barramento simulado (figura 3.1) foi considerado como tendo 318 metros de extensão no seu total, tendo-se em vista que a terminação SF6/Ar foi considerada como um elemento de parâmetro distribuído de 3 metros de comprimento (dimensão de sua altura) e com uma impedância de surto ( $Z_s$ ) de 250 ohms [17]. O trecho de cabo aéreo alimentador de 300 metros de comprimento é de bitola 954 MCM, ACSR.

A secção de barramento blindado isolado à gás, de 15 metros de comprimento, tem as características típicas (diâmetro do eletrodo e do invólucro) de equipamento da classe de 230 KV [15].

Esses trechos de barramento - cabo aéreo, terminação SF6/Ar e eletrodo isolado a SF6 - serão representados nas equações do circuito equivalente por suas impedâncias de surto ( $Z_1$ ,  $Z_s$ ,  $Z_2$ ) e tempos de trânsito ( $\tau_1$ ,  $\tau_s$ ,  $\tau_2$ ) respectivamente. Como o invólucro do trecho em SF6 comporta-se também como uma linha de transmissão (parágrafo 2.2.0, Cap. II), será também representado na equação de circuito equivalente, através de sua impedância de surto ( $Z_3$ ) e do seu tempo de trânsito ( $\tau_3$ ).

Em termos de parâmetros distribuídos, o arranjo em estudo pode ser visto como a figura 2.4 (Cap. II). Teremos então os seguintes valores de impedâncias de surto e respectivos tempos de trânsito que caracterizarão cada trecho de linha da figura 3.1:

Cabo aéreo alimentador, com 300 metros de extensão, bitola de 954 MCM, situado a 7 metros acima do solo e com diâmetro de 3,0378 cm, sua impedância de surto ( $Z_1$ ) será [16]:

$$Z_1 = 138 \times \log \frac{2 \times h}{r} \quad (3.1)$$

Onde  $r$  é o raio do condutor e  $h$ , sua altura.

$$\text{Teremos então: } Z_1 = 138 \times \log \frac{1400}{1,51892} \quad \therefore \quad Z_1 = 410 \text{ ohms}$$

O tempo de trânsito do cabo será obtido através da fórmula (considerando-se a velocidade de surto constante no trecho de cabo) seguinte:

$$d = v \times \tau \quad (3.2)$$

Onde  $d$  é o comprimento do cabo,  $V$  a velocidade do surto e  $\tau$ , o tempo de trânsito. Considerando-se a velocidade do surto, igual a velocidade da luz no vácuo ( $300 \times 10^6$  m/s), teremos então:

$$\tau_1 = \frac{300}{300 \times 10^6} \quad \therefore \quad \tau_1 = 1 \text{ micro-segundo}$$

Terminação SF<sub>6</sub>/Ar (bucha), considerada como parametro distribuido com uma impedância de surto (Z<sub>s</sub>) de 250 ohms [17] e com um comprimento igual a altura da bucha que no caso é de 3 metros. O seu tempo de transito ( $\tau_s$ ) será:

$$\tau_s = \frac{3}{300 \times 10^6} \quad \therefore \quad \tau_s = 0,01 \text{ micro-segundos}$$

Eletrodo do barramento blindado a SF<sub>6</sub>, com um diâmetro de 130 mm, com 15 metros de comprimento e que se comportará como um cabo blindado, sua impedância de surto (Z<sub>2</sub>) será [16]:

$$Z_2 = \frac{138}{\sqrt{K}} \times \log \frac{r_2}{r_1} \quad (3.3)$$

Onde  $r_2$  é o raio do Invólucro e  $r_1$ , o raio do eletrodo.

$$\text{Teremos então: } Z_2 = \frac{138}{1} \times \log \frac{205}{65} \quad \therefore \quad Z_2 = 70 \text{ ohms}$$

E o seu tempo de trânsito ( $\tau_2$ ), considerando-se a chave fechada, será obtido usando-se a fórmula (3.2). Teremos então:

$$\tau_2 = \frac{15}{300 \times 10^6} \quad \therefore \quad \tau_2 = 0,05 \text{ micro-segundos}$$

Quando a chave (RSW) estiver aberta, no entanto, o barramento (eletrodo) se comportará como duas seções separadas, uma de 9 metros (trecho NT) e outra de 6 metros (trecho T'U) tomando-se a figura 2.2 como referência. Conseqüentemente haverá neste caso dois tempos de trânsito distintos. Teremos então para o trecho de 9 metros:

$$\tau'_{2} = \frac{9}{300 \times 10^6} \quad \therefore \tau'_{2} = 0,03 \text{ micro-segundos}$$

E para o trecho de 6 metros:

$$\tau''_{2} = \frac{6}{300 \times 10^6} \quad \therefore \tau''_{2} = 0,02 \text{ micro-segundos}$$

Invólucro do trecho de barramento blindado a gás SF<sub>6</sub>, com um diâmetro externo de 410 mm, tem uma altura (h) do seu eixo longitudinal em relação ao solo de 0,7 metro. Sua impedância de surto (Z<sub>3</sub>) será [16], considerando-se a fórmula (3.1):

$$Z_3 = 138 \times \log \left( 2 \times \frac{0,7}{0,2} \right) \quad \therefore Z_3 = 117 \text{ ohms}$$

O tempo de trânsito ( $\tau_3$ ) no invólucro, usando-se a fórmula (3.2) será:

$$\tau_3 = \frac{15}{300 \times 10^6} \quad \therefore \tau_3 = 0,05 \text{ micro-segundos}$$

### 3.3.3 A Chave Seccionadora

Na montagem do circuito equivalente do arranjo em estudo (figura 3.1) a chave seccionadora será denominada de RSW. As chaves seccionadoras americanas e européias possuem tempo de extinção do arco entre os contactos, na faixa de 0,1 a 2 segundos [10]. No presente caso, como será analisada uma única reignição, o tempo de simulação do arco será de 50 micro-segundos. E tendo-se em vista o seu comportamento físico, a chave será considerada como uma resistência de valor consideravelmente alto ( $10^4$  ohms) quando estiver operando na posição "aberto" e assumirá o valor de  $10^{-3}$  ohms na posição "fechado".

### 3.4.0 MODELOS DOS ELEMENTOS DO ARRANJO

#### 3.4.1 Conceitos Básicos do Método Empregado

Como princípio básico da simulação digital realizada, no desenvolvimento das equações dos diversos componentes do circuito elétrico correspondente ao arranjo, fica definido que se trabalhará as equações no domínio do tempo e as variáveis de interesse - corrente e tensão - serão sempre conhecidas há um determinado intervalo de tempo passado. E se estará sempre calculando essas correntes e tensões em função desses valores passados. Evidentemente que para o programa ser inicializado, valores passados de corrente e tensão deverão ser convenientemente "chutados" como dados iniciais do programa. Deve-se também escolher o valor para o intervalo de tempo em que se estará calculando as correntes e tensões desejadas ( $\Delta t$ ) - denominado de intervalo de discretização - extremamente reduzido de maneira que a variação da tensão em um intervalo de tempo ( $\Delta V / \Delta t$ ) aproxime-se do valor de derivada.

Na montagem do modelo matemático dos diversos elementos do circuito, será usado o método das características para os elementos de parâmetros distribuídos - linhas de transmissão sem perdas - e a regra do trapézio para os elementos de parâmetros concentrados. Na simulação realizada, as tensões de surto serão obtidas em intervalo de tempo iguais, passo-a-passo, durante todo o processo computacional. Todos os elementos de circuitos aqui tratados serão considerados desacoplados, monofásicos, sem perdas e são parâmetros constantes.

Na tabela da figura 3.3 são identificados os elementos - parâmetros concentrados e distribuídos - utilizados no arranjo de barramento em estudo, juntamente com seus respectivos circuitos equivalentes.

### 3.4.2 Modelos Para os Elementos de Parâmetro Concentrado

Para o elemento indutor (L), conectado entre dois nós hipotéticos k e m, conforme o modelo correspondente da figura 3.3, aplicando-se a regra do Trapézio, teremos a seguinte equação [20]:

$$i_{km}(t) = i_{km}(t - \Delta t) + [E_{km}(t - \Delta t) + E_{km}(t)] \times \Delta t / 2 \times L \quad (3.4)$$

Essa equação pode ser simplificada e apresentada da seguinte maneira:

$$i_{km}(t) = \frac{E_{km}(t)}{R_L} + i_L(t - \Delta t) \quad (3.5)$$

$$\text{Onde: } i_L(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{E_{km}(t - \Delta t)}{R_L} \quad (3.6)$$

$$\text{e } R_L = \frac{2 \times L}{\Delta t}$$

Sabendo-se que os valores de corrente e tensão há um intervalo de tempo  $(t - \Delta t)$  são sempre conhecidos e mantendo-se  $\Delta t$  constante,

tudo se passa como se a cada instante o indutor fosse representado por uma fonte de corrente  $I_L$ , variando com o tempo, em paralelo com uma resistência constante  $R_L$  como mostra o circuito equivalente da figura 3.3.

Para o capacitor (C), como mostra a figura 3.3, submetido a uma diferença de tensão  $e_{km}(t)$  entre seus terminais, aplicando-se a regra do trapézio, teremos a seguinte equação [20]:

$$i_{km}(t) = - \left[ i_{km}(t - \Delta t) + \frac{2xC}{\Delta t} (-E_{km}(t) + E_{km}(t - \Delta t)) \right] \quad (3.7)$$

Após ser simplificada, esta equação será:

$$i_{km}(t) = - \left[ - \frac{E_{km}(t)}{R_c} + i_c(t - \Delta t) \right] \quad (3.8)$$

Sabendo-se que:

$$R_c = \frac{\Delta t}{2xC} \quad \text{e} \quad i_c(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{E_{km}(t - \Delta t)}{R_c} \quad (3.9)$$

A partir do modelo correspondente da figura 3.3 e desde que o intervalo de tempo  $\Delta t$  seja mantido constante, a equação 3.9 indica que a capacitância pode ser representada por uma fonte de corrente  $i_c$  que varia com o tempo, em paralelo com uma resistência constante,  $R_c$ .

O elemento resistivo (R) irá se comportar durante os transitórios como uma resistência pura, isto é, sem fonte de corrente, conforme a figura 3.3.



### 3.4.3 Modelo Para os Elementos de Parâmetros Distribuídos

No modelo correspondente a uma linha de transmissão da figura 3.3, temos um modelo de linha conectado entre os nós K e m. Os parâmetros principais da linha serão sua impedância de surto (Z) e seu comprimento (d). Se considerarmos a velocidade do surto de tensão na linha igual a velocidade da luz no vácuo (c), obteremos o seu tempo de trânsito ( $\tau$ ), através da equação (3.2).

Neste caso, aplicando o método das características nos nós K e m, teremos as equações [20]:

$$i_{mk}(t) = \frac{E_m(t)}{Z} - i_m(t - \tau) \quad (3.10)$$

$$i_{km}(t) = \frac{E_k(t)}{Z} - i_k(t - \tau) \quad (3.11)$$

Onde cada extremidade da linha pode ser representada por uma fonte de corrente em paralelo com uma impedância de surto conforme o circuito equivalente (figura 3.3). E as fontes de corrente em cada extremo, serão calculados através da história passada desses nós, ou seja:

$$i_m(t - \tau) = \left(\frac{1}{Z}\right) \times E_k(t - \tau) + i_{km}(t - \tau) \quad (3.12)$$

$$i_k(t - \tau) = \left(\frac{1}{Z}\right) \times E_m(t - \tau) + i_{mk}(t - \tau) \quad (3.13)$$

Observa-se ainda através da figura do circuito equivalente que as fontes de corrente e a impedância de surto em cada extremidade da linha estão conectadas entre o respectivo nó e o terra de referência. Conseqüentemente, as extremidades da linha comportam-se de forma independente entre si, o que agiliza a solução numérica do sistema [30].

### 3.5.0 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

O circuito elétrico da figura 3.4 representa o arranjo completo do barramento isolado a gás SF6 em estudo. Na sua montagem, foi incluída a linha de transmissão que representa o invólucro do barramento e para tanto utilizou-se a técnica apresentada no Capítulo II. Por motivos meramente pedagógicos, os nós do circuito foram representados através de números em vez de caracteres alfabéticos como estava no arranjo da figura 3.1. A topologia do circuito assumiu o aspecto atual após os elementos concentrados serem substituídos pelas fontes de corrente em paralelo com as resistências correspondentes e os elementos de parâmetros distribuídos pelas fontes de corrente em paralelo com as impedâncias de surto. O trecho do circuito compreendido entre os nós "7" e "8" põe em evidência o desacoplamento entre as regiões interna e externa do invólucro devido ao efeito pelicular, como foi descrito no parágrafo 2.2.0 do Capítulo II.

Em linhas gerais, na transformação da instalação física apresentada (arranjo do barramento) em um modelo abstrato (circuito elétrico), o posicionamento dos nós da figura 3.4 delimita o seguinte:

O cabo aéreo alimentador de 300 metros de comprimento é representado pelo trecho de circuito entre os nós "1" e "2", contendo as fontes de corrente, CX12 e CX21 e impedância de surto Z1. A terminação SF6/ Ar encontra-se entre os nós "2" e "3", composta por um capacitor de 80 PF e um trecho de linha de transmissão ( $Z_s=250$  ohms), será composta por uma fonte de corrente CC1 em paralelo com o resistor RC1 e as fontes de corrente da linha, CX23 e CX32, além da respectiva impedância de surto, Zs (ver o modelo da figura 3.2). O eletrodo isolado a SF6 ocupa a extensão do circuito entre os nós "3" e "6" que inclui a chave seccionadora e tem o nó "7" como potencial de referência. No trecho à esquerda do nó "4" estão contidos a secção do eletrodo representado pelas fontes de corrente CX34 e CX43 e a impedância de surto Z2 equivalentes à uma linha de transmissão, além da fonte de corrente CD1 em paralelo com a resistência RD1 que equivalem ao espaçador CI1. À

direita do nó "5" temos a fonte de corrente CD2 em paralelo com a resistência RD2 que substituem o espaçador C12 além das fontes de correntes CX56 e CX65 e impedância de surto Z2, equivalentes do trecho de eletrodo restante. No final do eletrodo, mais precisamente no nó "6", encontra-se a fonte de corrente CC2 e resistor RC2, equivalentes da terminação esférica TF em paralelo com o cone isolante C13.

Finalmente, acoplado ao nó "7" e tendo o potencial de terra como referência, tem-se a cordoalha de aterramento representada pela fonte de corrente CL1 em paralelo com a resistência RL e desde o nó "7" até o nó "8", tem-se a linha de transmissão representada pelas fontes de corrente CX78 e CX87 e a impedância de surto Z3 que simula o efeito de linha, da carcaça do trecho de barramento isolado a gás SF6.

### 3.6.0 A REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA

A partir dos nós do circuito da figura 3.2 e utilizando-se as equações dos modelos equivalentes - parágrafo 3.4 - são deduzidas as equações nodais que permitirão a formação de um sistema de equações algébricas que simularão o estado do sistema.

Portanto, aplicando-se a lei de Kirchhoff de corrente para os nós do circuito elétrico obtém-se as seguintes equações nodais:

$$\text{Nó 1: } E_1(t) \times (1/Z_1 + 1/R_G) = (\cos(\omega t)/R_G) + C_X12$$

$$\text{Nó 2: } [E_2(t) \times (1/Z_1 + 1/R_{C1} + 1/Z_s)] - [E_7(t) \times (1/R_{C1} + 1/Z_s)] = C_X21 + C_X23 + C_C1$$

$$\text{Nó 3: } [E_3(t) \times (1/Z_s + 1/Z_2)] - [E_7(t) \times (1/Z_s + 1/Z_2)] = C_X34 + C_X32$$

$$\text{Nó 4: } [(E_4(t) - E_7(t)) \times (1/Z_2 + 1/R_{D1})] + [(E_4(t) - E_5(t))/R_{SW}] = C_X43 + C_{D1}$$

$$\text{Nó 5: } -[(E_4(t) - E_5(t))/R_{SW}] + [(E_5(t) - E_7(t)) \times (1/Z_2 + 1/R_{D2})] = C_{D2} + C_X56$$

$$\text{Nó 6: } (E_6(t) - E_7(t)) \times (1/Z_2 + 1/R_{C2}) = C_X65 + C_{C2}$$

$$\begin{aligned} \text{Nó 7: } & [(E_2(t) \times (1/R_{C1} + 1/Z_s)] + [E_3(t) \times (1/Z_s + 1/Z_2)] + [E_4(t) \times (1/Z_2 + \\ & + 1/R_{D1})] + [E_5(t) \times (1/R_{D2} + 1/Z_2)] + [E_6(t) \times (1/Z_2 + 1/R_{C2})] - \\ & - [E_7(t) \times (2/Z_s + 4/Z_2 + 1/R_{C1} + 1/R_{C2} + 1/R_{D1} + 1/R_{D2} + 1/R_L + 1/Z_3)] = \\ & = C_{C1} + C_X34 + C_X43 + C_{D1} + C_{D2} + C_X56 + C_X65 + C_{C2} + C_{L1} - C_X78 + C_X23 + C_X32 \end{aligned}$$

$$\text{Nó 8: } E_8(t)/Z_3 = C_X87$$

Ordenando-se as equações acima, posicionando-se os fatores das tensões em ordem crescente, da esquerda para a direita e deixando-se os termos independentes da tensão, sempre do lado direito de cada identidade, percebe-se que o sistema pode ser representado através da forma matricial seguinte:

$$[G] \times [E(t)] = [I(t)] - [I] \quad (3.14)$$

E a sua representação em termos matriciais será como na figura 3.5, sabendo-se que:

[G]: Matriz das condutâncias nodais

[E(t)]: Vetor coluna das tensões nos nós

[I(t)]: Vetor coluna das correntes injetadas em cada nó

[J]: Vetor coluna das fontes de correntes fictícias

### 3.7.0 SOLUÇÃO DO SISTEMA

Na solução do sistema referente ao circuito da figura 3.4, tendo-se em vista o cálculo dos surtos de tensão, nos diversos nós:  $E_1(t)$ ,  $E_2(t)$ ,  $E_3(t)$ ,  $E_4(t)$ ,  $E_5(t)$ ,  $E_6(t)$ ,  $E_7(t)$ ,  $E_8(t)$ , mantendo-se o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) constante, todos os termos da matriz das condutâncias [G], que é um fator da equação 3.14, permanecerão constantes. Já o vetor das correntes desse sistema será composto principalmente pelos elementos das fontes fictícias de corrente dos parâmetros distribuídos e concentrados. Os termos referentes às fontes fictícias para os elementos de parâmetros distribuídos assumirão no sistema uma forma genérica do seguinte tipo:

$$I_{Xkm} = (1/Z) \times E_m(t - \tau) + I_{mk}(t - \tau)$$

Com essa fórmula - foi usada a equação (3.13) - dado um trecho de linha entre dois nós k e m quaisquer, se calcula a fonte de corrente do extremo da linha denominado de K. A impedância de surto Z, refere-se ao trecho de linha em questão e a corrente  $I_{mk}$  é a corrente injetada no nó m. Ressalte-se que para haver a inicialização do programa computacional, os valores de tensão  $E_m(t - \tau)$  e a corrente  $I_{mk}(t - \tau)$  injetada no nó m precisam ser "chutados" como dados

Iniciais do programa e que para o próximo intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) esse valor - corrente injetada no nó - deverá ser calculado através da equação (3.10). Observa-se também que em cada trecho de linha trabalha-se sempre aos pares, ou seja, usa-se em conjunto as equações (3.10) e (3.11) para as correntes injetadas nos nós e as equações (3.12) e (3.13) para o cálculo das fontes fictícias do trecho.

Para os elementos de parâmetros concentrados, os termos do sistema da equação (3.14), referente às fontes fictícias de corrente (P/ex, CC1, CD1, CL1) utilizarão para seu cálculo as equações apresentadas no parágrafo 3.4.2. No caso dos elementos capacitivos (CC1, CC2, CD1, CD2) as fontes de corrente fictícias assumirão a seguinte forma:

$$I_c(t - \Delta t) = \frac{E_{km}(t - \Delta t)}{R_c} + I_{km}(t - \Delta t) \quad (3.9)$$

E para o elemento indutivo (CL1) será usada a fórmula:

$$I_L(t - \Delta t) = \frac{E_{km}(t - \Delta t)}{R_L} + I_{km}(t - \Delta t) \quad (3.6)$$

Em ambos os casos,  $R_L$  e  $R_c$  representam a resistência equivalente entre os nós (figura 3.3) aonde encontra-se conectado o elemento.

Como no caso dos elementos de parâmetros distribuídos, neste caso os valores de tensão  $E_{km}(t - \Delta t)$  e corrente  $I_{km}(t - \Delta t)$  devem ser "chutados" como dados iniciais do programa. E a corrente injetada nos nós para o próximo intervalo de tempo discreto ( $\Delta t$ ) será calculado usando-se as equações (3.5) e (3.8) respectivamente.

### 3.8.0 O PROGRAMA COMPUTACIONAL

A simulação digital da elevação do potencial da carcaça de um

barramento isolado a SFG, devido a ocorrência de uma religião, encontra-se representada no fluxograma da figura 3.6.

A escolha do intervalo de tempo a ser utilizado no programa está intimamente relacionada com as dimensões do barramento a ser percorrido por cada surto e obviamente deve ser um intervalo de tempo extremamente reduzido, devido a rapidez do fenômeno em observação (nano-segundo). No caso, a partir da ordem de grandeza dos valores de tempo de trânsito ( $\tau$ ) obtidos em 3.3.2, foi adotado para  $\Delta t$ , o valor de 5 nano-segundos.

O programa computacional desenvolvido divide-se em cinco partes principais. A primeira parte consiste na leitura dos dados de entrada e na geração da matriz das condutâncias nodais [G].

A segunda parte ou LOOP nº1, simula a energização do barramento durante 12 micro-segundos, preparando o circuito para a abertura da chave. Nessa etapa da simulação, o programa deve gerar as tensões naqueles nós previamente determinados, de forma sequencial, numa quantidade de vezes tal que se atinja nos nós do circuito as tensões pré-determinadas para o momento de abertura da chave. Em linguagem computacional, temos um procedimento repetitivo simbolizado pela malha fechada da figura.

A terceira parte do fluxograma, que simula o instante de abertura da chave, compreende um passo computacional que por sua vez será subdividido em dois, onde cada um equivale a  $\Delta t/2$ , quando então é aplicado o método de Backward-Euler [23] para a supressão das oscilações numéricas que surgem na abertura da chave. A utilização deste método será comentado posteriormente com maiores detalhes.

Na quarta parte ou LOOP nº 2, a chave permanecerá aberta durante 5 mili-segundos - procedimento indicado pela malha fechada existente nesse ponto do fluxograma - até que a tensão do lado da fonte atinja 1,00 p.u. e a tensão do lado da carga, -0,13 p.u., o que permitirá

simular de imediato, quando do fechamento da chave, uma reignição de 1,13 p.u. entre os seus contactos.

Na quinta parte do programa ou LOOP nº 3, simula-se a ocorrência de uma única reignição, durante 50 micro-segundos. É nessa parte do programa que serão observados os transitórios de tensão internos ao barramento e na sua carcaça. Serão simulados uma quantidade de surtos de tensão equivalente ao intervalo de tempo anteriormente citado e representado no fluxograma pela malha fechada indicada.

Tendo em vista uma verificação preliminar do programa desenvolvido, as tensões nos nós "7" e "8" referentes a elevação de potencial da carcaça do equipamento, foram registrados sob forma de oscilogramas (parágrafo 3.10). Observe-se que o nó "7" encontra-se próximo à terminação SF6/Ar e o nó "8", localiza-se na extremidade oposta, ou seja, no lado em que o barramento encontra-se seccionado.

Na solução do sistema de equações representativas do circuito, usa-se o método da fatoração LU [19]. Neste método, a subrotina LUSOLV é chamada uma única vez, a não ser que algum elemento do circuito tenha sua condutância modificada, para resolver um sistema do tipo:

$$[A] \times [E] = [B]$$

No retorno dessa subrotina, os elementos da matriz [A], terão sido substituídos pelos seus fatores LU. Posteriormente, ao ser chamada a subrotina FWBWC, os valores da matriz coluna [E], ou seja, a solução do sistema será armazenada no vetor [B].

A subrotina GRAFO possibilita o uso de um plotter, para a edição de oscilogramas para os casos de interesse (figuras 3.7 e 3.8).



### 3.9.0 SUPRESSÃO DAS OSCILAÇÕES NUMÉRICAS

#### 3.9.1 Porque ocorrem oscilações numéricas

Na aplicação de métodos numéricos nas simulações computacionais, a distorção introduzida por qualquer método de integração que seja utilizado, cresce à medida em que a frequência do fenômeno sob observação aproxima-se da frequência de Nyquist [23].

Nas simulações digitais existem vários métodos para a solução das equações diferenciais de um determinado sistema: Método do trapézio, Método de Backward-Euler, Método de Gear de 2ª ordem, etc. Entretanto, a predominância do Método do trapézio deve-se a sua melhor precisão, além de sua boa estabilidade numérica. A precisão de uma solução quando se utiliza tempos discretos, como neste caso, é função do intervalo de tempo escolhido e da regra de integração utilizada. O valor do intervalo de tempo condiciona a máxima frequência que pode ser simulada e a regra de integração condiciona a distorção para cada frequência. A máxima frequência que deve ser simulada é função somente do intervalo de tempo escolhido, é denominada de Frequência de Nyquist e pode ser calculada pela fórmula [23]:  $f_n = 1/(2 \times \Delta t)$

Nas aplicações em altas frequências por exemplo, quando se necessita a tensão em um indutor após o corte repentino da sua corrente ou quando se quer a corrente de um capacitor após um surto de tensão sobre o mesmo, oscilações numéricas sustentadas deverão ocorrer [23].

#### 3.9.2 Como as oscilações são suprimidas

Diversos tipos de soluções são propostas nesses casos:

Amortecer essa oscilação através do próprio método de integração

utilizado, através do método de Backward-Euler, do Método de Gear ou combinação destes.

O amortecimento dessas oscilações também pode ser obtido, adicionando-se ao modelo em estudo, resistências fictícias em paralelo com indutâncias e em série com as capacitâncias [23]. Entretanto, qualquer uma dessas formas de amortecimento provocará alguma distorção na resposta durante o restante da simulação [23].

Uma forma de controlar essas oscilações de maneira localizada e sem afetar o restante da simulação seria o reajustamento das condições iniciais e o uso de interpolação no exato momento de abertura da chave. Essas técnicas entretanto tornam-se complicadas quando se deseja implementá-la de maneira generalizada e quando se tem diversos tipos de componentes no circuito em estudo [23].

Uma outra maneira de amortecimento de forma localizada é a utilização do Método de Backward-Euler exclusivamente durante dois passos da simulação (ajustamento crítico). Esta técnica consiste em, no preciso instante da ocorrência do chaveamento (abertura da chave), dividir o intervalo de tempo subsequente em dois passos de igual duração ( $\Delta t/2$ ), utilizando-se neste instante o Método de Backward-Euler. Após esses dois passos, volta-se a utilizar no restante do programa, o Método Trapezoidal.

Essa forma de suprimir oscilações numéricas também pode ser utilizada quando se tem no circuito sob análise, linhas de transmissão com parâmetros dependentes da frequência e elementos não-lineares.

### 3.9.3 Aplicação do Amortecimento com Ajustamento Crítico

No presente caso, será usado o amortecimento com ajustamento crítico [23] para a supressão das oscilações numéricas decorrentes da abertura da chave seccionadora (RSW). O referido método foi aplicado após o final da segunda parte do programa computacional - energização do barramento do arranjo da figura 3.1 - também denominado no fluxograma, de LOOP 1. O exato instante de sua aplicação ocorreu no primeiro intervalo de tempo discreto ( $\Delta t$ ), referente a abertura da chave seccionadora.

A simulação é iniciada usando-se o método trapezoidal na solução das equações diferenciais a cada intervalo de tempo discreto, até acontecer a abertura da chave, o que no caso ocorre após o término do LOOP nº 1. Neste instante, subdivide-se o próximo intervalo de tempo  $\Delta t$  em dois passos, cada um igual a  $\Delta t/2$ . Nesses dois passos de tempo usa-se o método de Backward-Euler para integração das equações diferenciais para todos os componentes do circuito.

Dois meio-passos são suficientes para amortecer de forma efetiva a oscilação produzida pela abertura da chave. As tensões resultantes do primeiro meio-passo ( $\Delta t/2$ ) servirão como condições iniciais para o segundo. Logo, não farão parte dos valores gerados na saída do programa e em consequência, nenhuma oscilação constará dos resultados que serão listados, os quais somente serão apresentados a cada intervalo de tempo completo ( $\Delta t$ ).

Após a aplicação do método de Backward-Euler, entra-se no LOOP nº 2 que representa a chave já aberta e volta-se a usar o Método Trapezoidal até o final da simulação.

### 3.9.4 As equações dos parâmetros concentrados

Na aplicação do amortecimento com ajustamento crítico, a referência [24] propõe a seguinte equação:

$$Y_{n+1} = Y_n + \frac{\Delta t}{2} \times [(1 + \alpha) \times f_{n+1} + (1 - \alpha) \times f_n] \quad (3.15)$$

Essa equação é denominada de fórmula do Trapézio com amortecimento onde o parâmetro  $\alpha$  representa o efeito do amortecimento. Verifica-se também que a menos da constante L, se  $\alpha$  for igual a zero, a equação passa a representar a expressão da fórmula do Trapézio aplicada a um indutor. Por outro lado, se  $\alpha$  for igual a um, a equação (3.15) será considerada como a fórmula de Backward-Euler aplicada ao elemento indutivo [24].

Amortecimento no indutor. Aplicando-se então a fórmula de Backward-Euler, supondo-se o elemento conectado entre dois nós hipotéticos k e m, e fazendo-se  $\alpha$  igual a um, a equação (3.15) assume a seguinte forma após a inclusão da constante L:

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{L} \times E_{km}(t) + i_{km}(t - \Delta t) \quad (3.16)$$

Vale salientar que a equação 3.16 assume expressão idêntica àquela apresentada para o mesmo elemento pela referência [23].

Considerando agora que o intervalo de tempo a ser considerado será igual a  $\Delta t/2$ , a expressão anterior torna-se:

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2 \times L} \times E_{km}(t) + i_{km}(t - \Delta t/2) \quad (3.17)$$

Agora se compararmos a equação acima com a equação (3.5) apresentada anteriormente (Método Trapezoidal) e aplicada na primeira parte do programa computacional, teremos:

$$i_L(t - \Delta t/2) = i_{km}(t - \Delta t/2) \quad (3.18)$$

Ou seja, para o primeiro meio-passo de tempo ( $\Delta t/2$ ), aplicando-se o Método de Backward-Euler, a corrente da fonte fictícia do indutor é igual a corrente injetada no nó do elemento. E todas as tensões de surto do sistema para os elementos indutivos serão obtidas usando-se a equação (3.18). Observa-se que todas as tensões calculadas durante esse primeiro intervalo de tempo ( $\Delta t/2$ ) não deverão ser listadas na saída do programa, mas servirão principalmente como condições iniciais para o cálculo dos surtos de tensão do próximo intervalo de tempo ( $\Delta t/2$ ). Consequentemente no segundo intervalo de tempo, a equação 3.18 será aplicada novamente e as tensões de surto nesse caso serão listadas.

Amortecimento no elemento capacitivo. Neste caso, a fórmula do Trapézio com amortecimento (3.15) pode ser rearranjada da seguinte maneira:

$$X_{n+1} = - \frac{(1 - \alpha)}{(1 + \alpha)} \times X_n + \frac{2}{\Delta t} \times \frac{(Y_{n+1} - Y_n)}{(1 + \alpha)} \quad (3.19)$$

No caso, o termo "X" está substituindo a função f.

Se imaginarmos agora um elemento capacitivo conectado entre dois nós k e m, a equação anterior assume o seguinte aspecto, após a inclusão da constante C e identificando-se o termo "X", como a corrente:

$$i_{km}(t) = \frac{2xC}{\Delta t \times (1+\alpha)} \times E_{km}(t) - \left[ \left( \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) \times i_{km}(t - \Delta t) + \left( \frac{2xC}{\Delta t \times (1+\alpha)} \right) \times E_{km}(t - \Delta t) \right]$$

Se agora compararmos essa equação com a equação 3.8, deduziremos a seguinte expressão para a fonte fictícia de corrente para o elemento capacitivo:

$$I_c(t - \Delta t) = (2xC/\Delta t \times (1 + \alpha)) \times E_{km}(t - \Delta t) + ((1 - \alpha)/(1 + \alpha)) \times i_{km}(t - \Delta t) \quad (3.20)$$

Se na equação (3.20),  $\alpha$  for igual a um, teremos a expressão correspondente ao método de Backward-Euler para um elemento capacitivo e assumindo-se que o intervalo de tempo considerado é  $\Delta t/2$ , essa expressão será:

$$I_c(t - \Delta t/2) = (2xC/\Delta t) \times E_{km}(t - \Delta t/2) \quad (3.21)$$

A fórmula (3.21) fornecerá os valores das fontes de corrente para os elementos capacitivos e deverá ser aplicada nos dois intervalos de tempo,  $\Delta t/2$  para a supressão das oscilações numéricas.

Assim como aconteceu no caso dos elementos indutivos, após a aplicação dessa fórmula no primeiro intervalo,  $\Delta t/2$ , as correspondentes tensões de surto não deverão ser listadas na saída do programa computacional, mas sim aplicadas como condições iniciais para o segundo intervalo,  $\Delta t/2$ . Ao final desse segundo intervalo, os valores de surto obtidos deverão ser listados.

### 3.9.5 As equações das linhas de transmissão

Para os trechos do circuito da figura 3.2 que se comportam como linhas de transmissão, durante os dois passos de tempo ( $\Delta t/2$ ) do método de Backward-Euler, se trabalhará também com o modelo da fonte de corrente fictícia em paralelo com a impedância de surto da linha. Nesse caso, entretanto, as fontes de corrente para o primeiro meio-passo de tempo ( $\Delta t/2$ ) serão obtidos da seguinte maneira:

Na última varredura do LOOP 1 - energização do barramento - quando se estava calculando as correntes e tensões dos nós antes da abertura da chave, gravou-se essas correntes e tensões há um intervalo de tempo de trânsito ( $\zeta$ ) atrasado para cada uma das linhas. Concluído dessa forma o LOOP 1, calculou-se em seguida para cada uma das linhas acima, as mesmas variáveis correspondentes agora ao mesmo tempo de trânsito ( $\zeta$ ) mais um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), atrasado. Em seguida, em cada nó soma-se os valores assim calculados obtendo-se a equivalente média aritmética para tensões e correntes caso a caso, os quais serão os valores iniciais correspondentes às fontes de corrente fictícias a serem aplicadas para o primeiro meio-passo de tempo ( $\Delta t/2$ ) para os elementos considerados como parâmetros distribuídos.

Após serem calculadas as tensões de surto em todos os nós para o primeiro meio-passo de tempo, a preparação para o segundo meio-tempo ( $\Delta t/2$ ) ocorrerá como se segue:

Para o cálculo das fontes de corrente fictícias, volta-se a usar diretamente as equações (3.12) e (3.13), após o que, soluciona-se todas as tensões de surto para o segundo intervalo de tempo ( $\Delta t/2$ ) dos elementos considerados como linhas de transmissão.

Após terem sido calculados todas as tensões de surto para todos os nós seguindo-se os dois meio-passos de tempo citados, a chave é considerada na posição "aberto" e volta-se a solução do sistema 3.14 até o final do programa, da mesma forma como foi feito no LOOP 1, ou seja, usando-se o Método do Trapézio para os elementos com parâmetros concentrados e o Método das Características para os elementos com parâmetros distribuídos.

### 3.10.0 AFERIÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

Tendo em vista uma aferição preliminar do desempenho do programa computacional desenvolvido neste Capítulo, foram simulados dois casos de cálculo de transitórios no invólucro de uma secção de barramento isolado a SF6 (figura 3.1) devido as reignições originadas em operações de chaveamento. No caso foi observado sua resposta a alteração de um parâmetro que singulariza a forma de onda quando ocorre uma reignição devido a chaveamento: o comprimento do barramento. As características do arranjo simulado são aquelas do início do capítulo, em que a secção isolada a SF6 encontra-se aterrada no nó "7" e situada a 0,5 metro do solo a partir da parte inferior do invólucro, o cabo aéreo alimentador encontra-se a uma altura de 7 metros e as impedâncias de surto do cabo aéreo, eletrodo isolado a gás e do invólucro em relação ao solo são: 410 ohms, 70 ohms e 117 ohms respectivamente.

#### 3.10.1 Casos Simulados

##### CASO 1 - Oscilograma da figura 3.7

Fechando-se a chave RSW, simulando-se assim uma primeira e única reignição de 50 micro-segundos de duração, obtem-se o transitório de tensão no invólucro do barramento - nó "7" - ou seja, no local aonde encontra-se conectada a cordoalha de aterramento. A figura 3.7B representa a mesma reignição, com a escala expandida (duração total de 1 micro-segundo).

##### CASO 2 - Oscilograma da figura 3.8

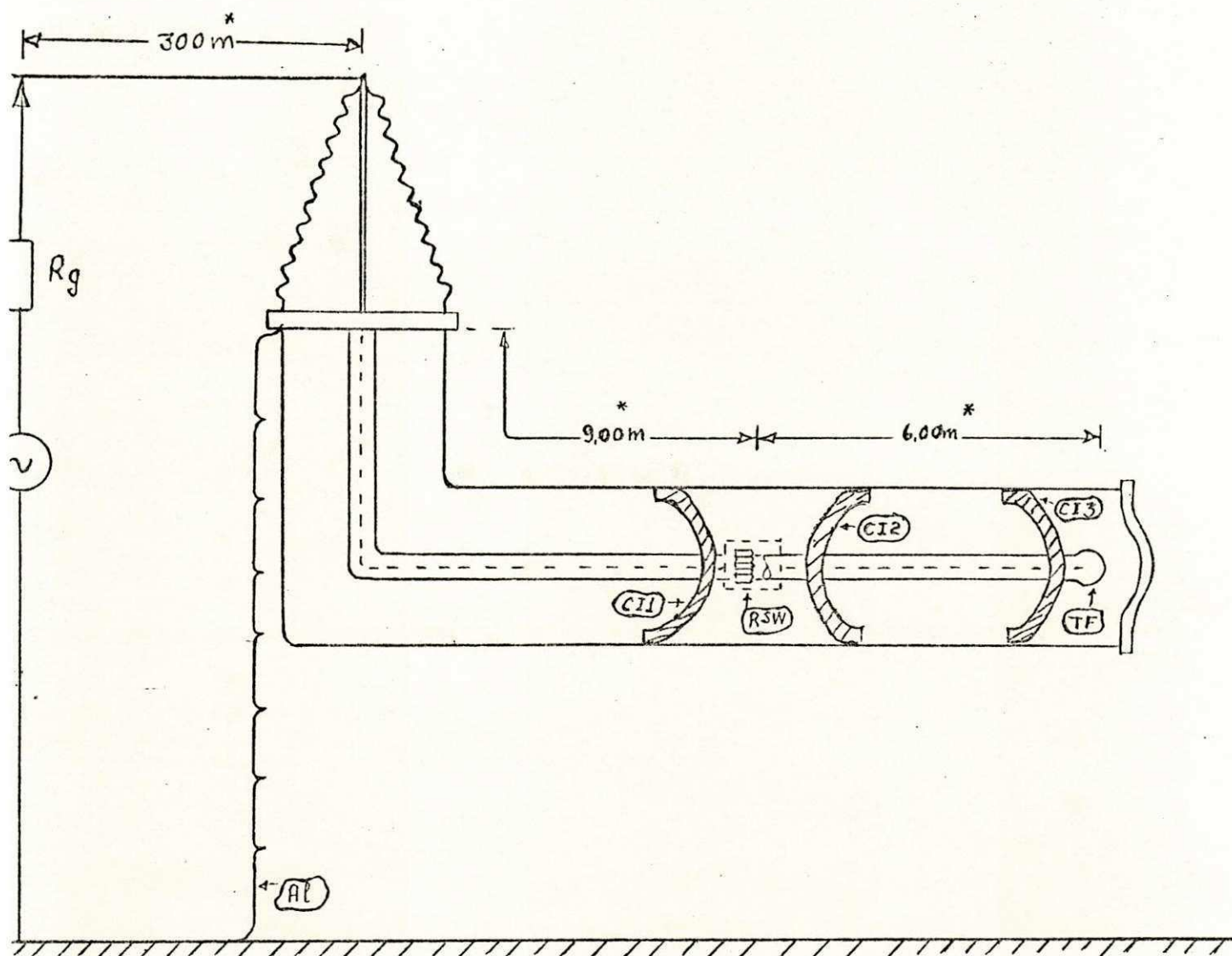
Procedeu-se uma operação idêntica ao caso anterior e mediu-se a tensão no mesmo ponto só que neste caso as dimensões do trecho do barramento



Isolado à gás (comprimento) foram aumentadas de 15m para 60m. A figura 3.8B representa a mesma reignição, com a escala expandida (duração total de 1 micro-segundo)

### 3.10.2 Conclusão da aferição preliminar

Verifica-se através do oscilograma da figura 3.8 a diminuição da frequência principal do surto de tensão no nó "7", referente ao barramento quando o seu comprimento é aumentado para 60 m. Nesse caso, os demais parâmetros foram mantidos iguais aos do caso anterior (características da figura 3.7). Tendo-se em vista a coerência da resposta - para um mesmo surto de tensão, o comprimento maior diminui a frequência principal - pressupõe-se que o programa computacional foi desenvolvido corretamente.



\* Fora de escala

Figura 3.1

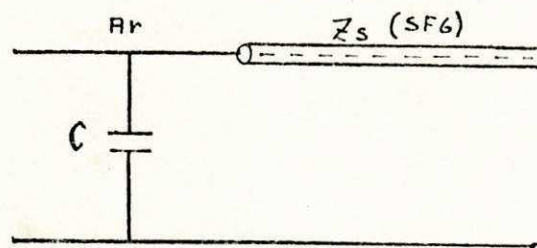
SEÇÃO DE BARRAMENTO ISOLADO A SF6

Circuito equivalente [17]  
para uma terminação SF6/Ar.

Valores adotados para  
seus parâmetros [17]:

$Z_s = 250$  ohms

$C = 80$  pico-Farads



Circuito equivalente a uma  
terminação esférica TF [17].

Onde:  $C = 10$  pico-Farads

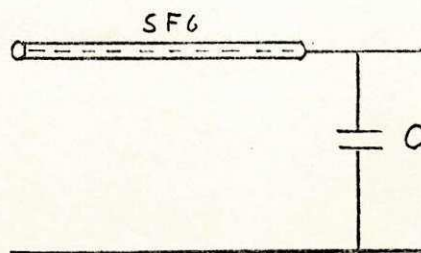


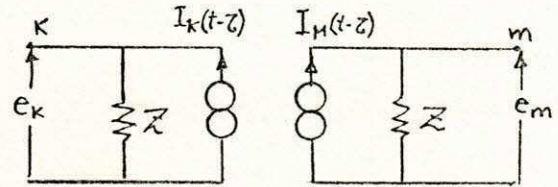
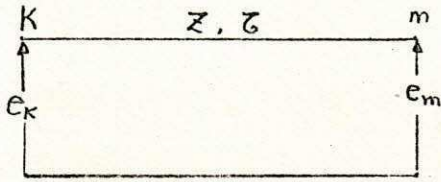
Figura 3.2

MODELOS DE ELEMENTOS DE UM BARRAMENTO ISOLADO A SF6

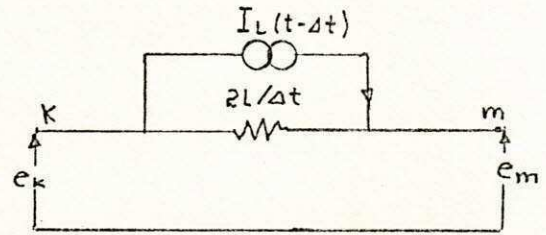
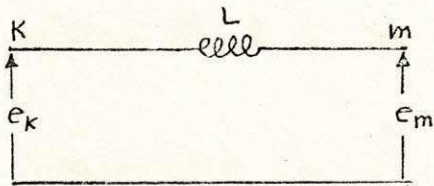
ELEMENTO

CIRCUITO EQUIVALENTE

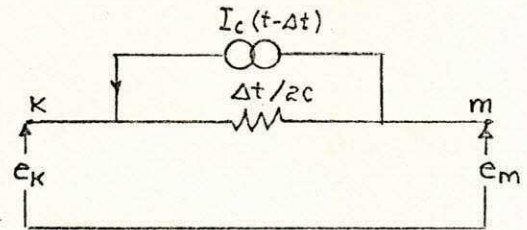
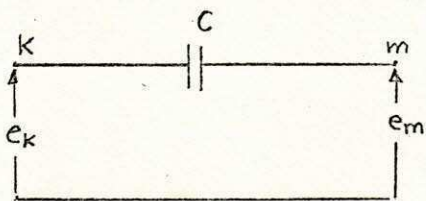
Linha de Transmissão



Indutor



Capacitor



Resistência

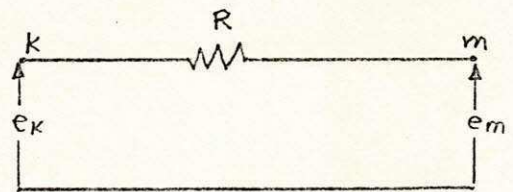
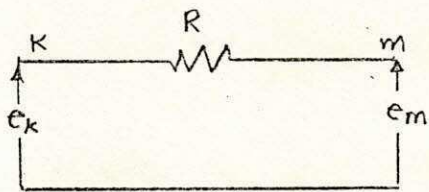


Figura 3.3

CIRCUITOS EQUIVALENTES DOS PARÂMETROS CONCENTRADOS E DISTRIBUIDOS

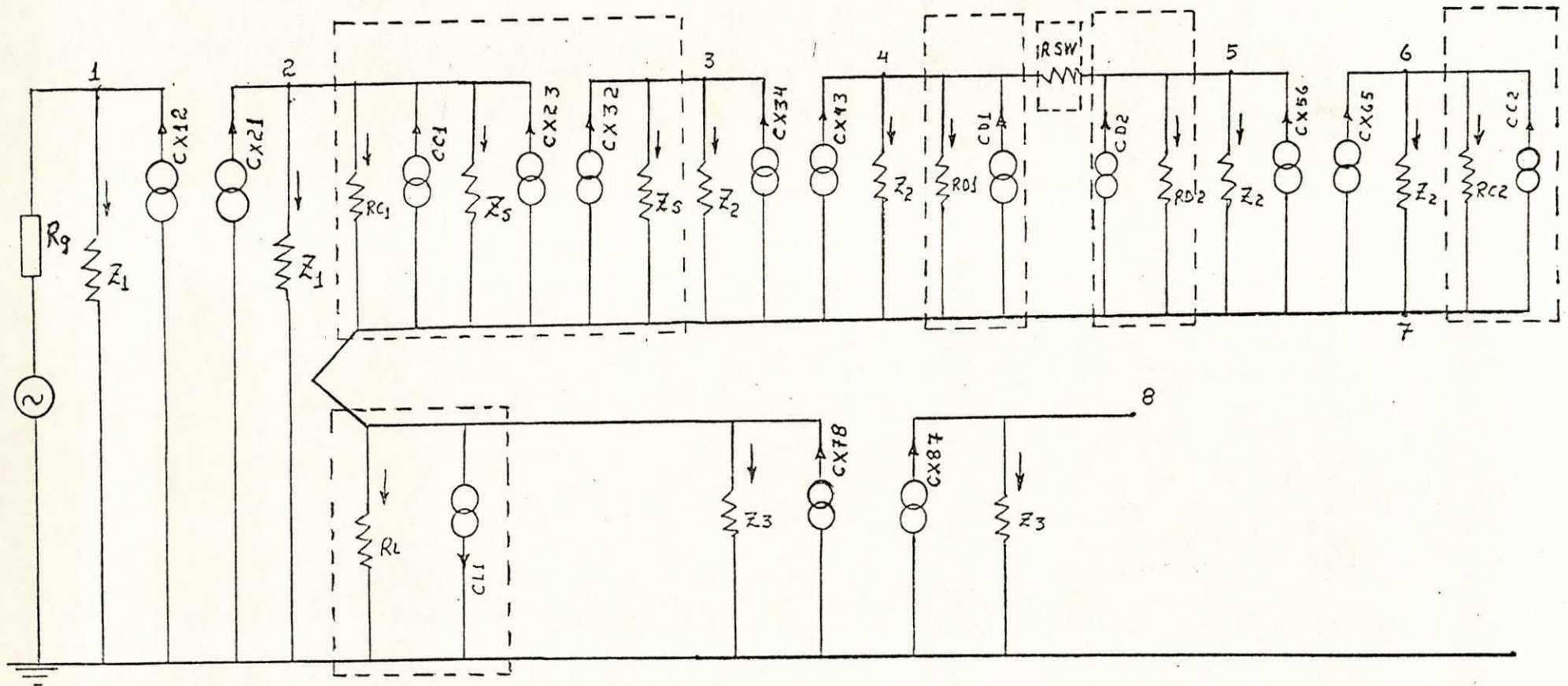


Figura 3.4

CIRCUITO UNIFILAR DE UM BARRAMENTO ISOLADO A SF6 COM OS ELEMENTOS MODELADOS PARA ALTA FREQUÊNCIA

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma \\ \sigma & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{27} & \sigma \\ \sigma & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{37} & \sigma \\ \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{44} & \sigma_{45} & \sigma & \sigma_{47} & \sigma \\ \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{54} & \sigma_{55} & \sigma & \sigma_{57} & \sigma \\ \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{66} & \sigma_{67} & \sigma \\ \sigma & \sigma_{72} & \sigma_{73} & \sigma_{74} & \sigma_{75} & \sigma_{76} & \sigma_{77} & \sigma \\ \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{88} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \\ E_3(t) \\ E_4(t) \\ E_5(t) \\ E_6(t) \\ E_7(t) \\ E_8(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \\ I_4(t) \\ I_5(t) \\ I_6(t) \\ I_7(t) \\ I_8(t) \end{bmatrix}$$

Figura 3.5

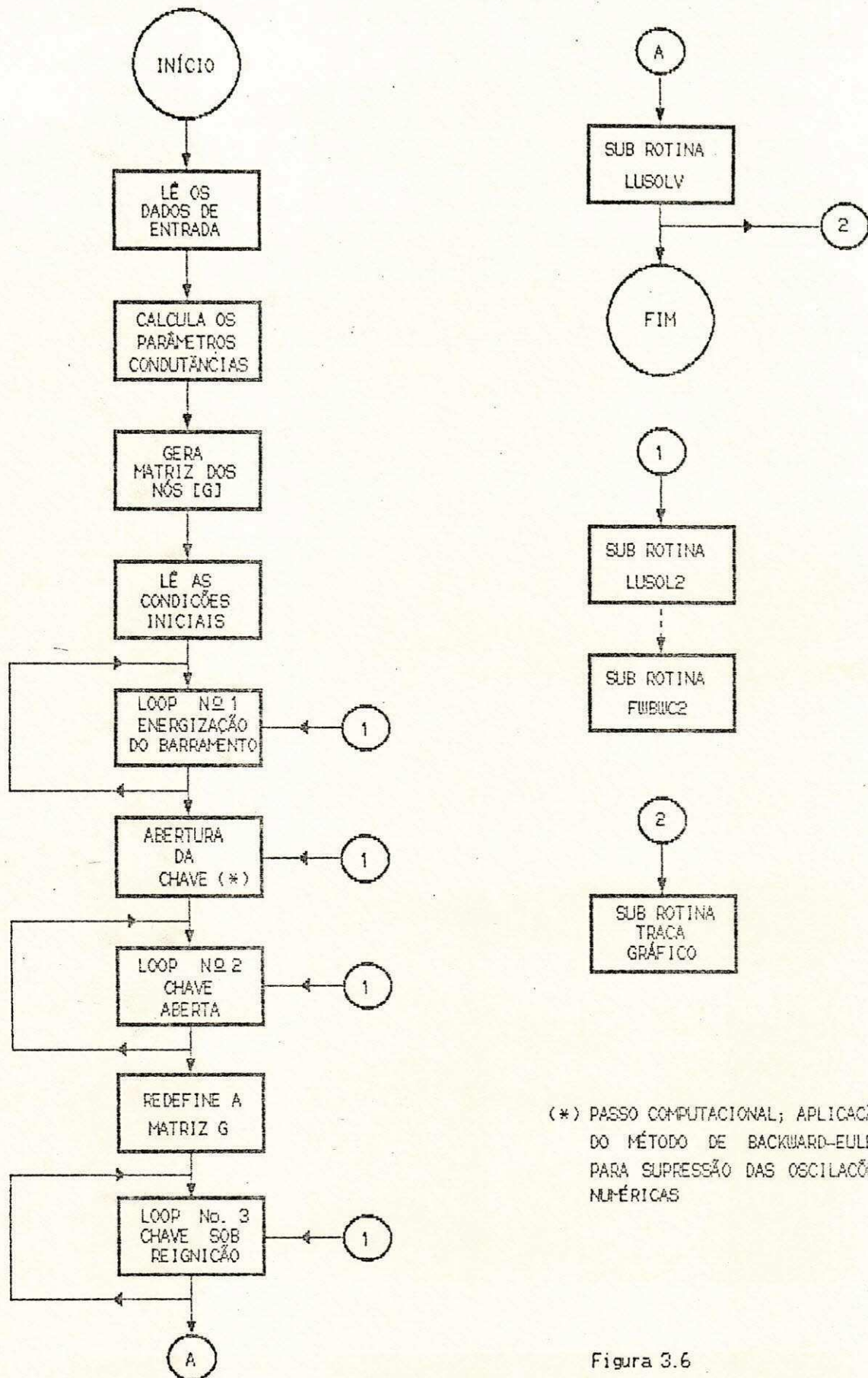
SISTEMA MATRICIAL EQUIVALENTE DE UM BARRAMENTO ISOLADO A SF6

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma \\ \sigma & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{27} & \sigma \\ \sigma & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{37} & \sigma \\ \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{44} & \sigma_{45} & \sigma & \sigma_{47} & \sigma \\ \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{54} & \sigma_{55} & \sigma & \sigma_{57} & \sigma \\ \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{66} & \sigma_{67} & \sigma \\ \sigma & \sigma_{72} & \sigma_{73} & \sigma_{74} & \sigma_{75} & \sigma_{76} & \sigma_{77} & \sigma \\ \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma & \sigma_{88} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \\ E_3(t) \\ E_4(t) \\ E_5(t) \\ E_6(t) \\ E_7(t) \\ E_8(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \\ I_4(t) \\ I_5(t) \\ I_6(t) \\ I_7(t) \\ I_8(t) \end{bmatrix}$$

Figura 3.5

SISTEMA MATRICIAL EQUIVALENTE DE UM BARRAMENTO ISOLADO A SF6

FLUXOGRAMA DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL



(\*) PASSO COMPUTACIONAL; APLICAÇÃO DO MÉTODO DE BACKWARD-EULER PARA SUPRESSÃO DAS OSCILAÇÕES NUMÉRICAS

Figura 3.6



TENSAO.PROXIMA A BUCHA

CAPACITANCIA C11=120 PF

COMPRIMENTO DO BARRAMENTO:15 M

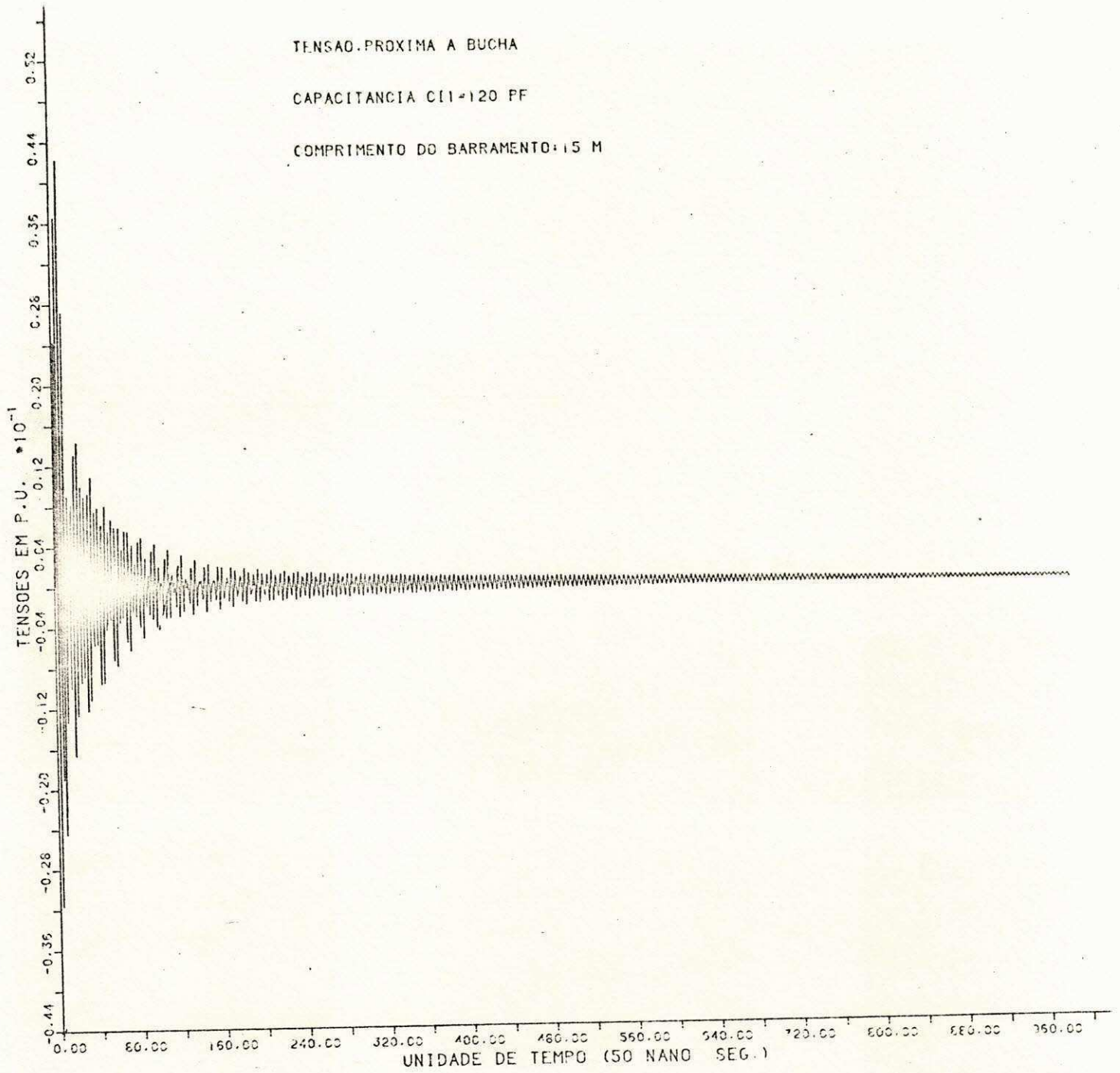


Figura 3.7

OSCILOGRAMA DE UM SURTO DE TENSÃO NA CARCAÇA DO BARRAMENTO DE 15 METROS DE COMPRIMENTO.

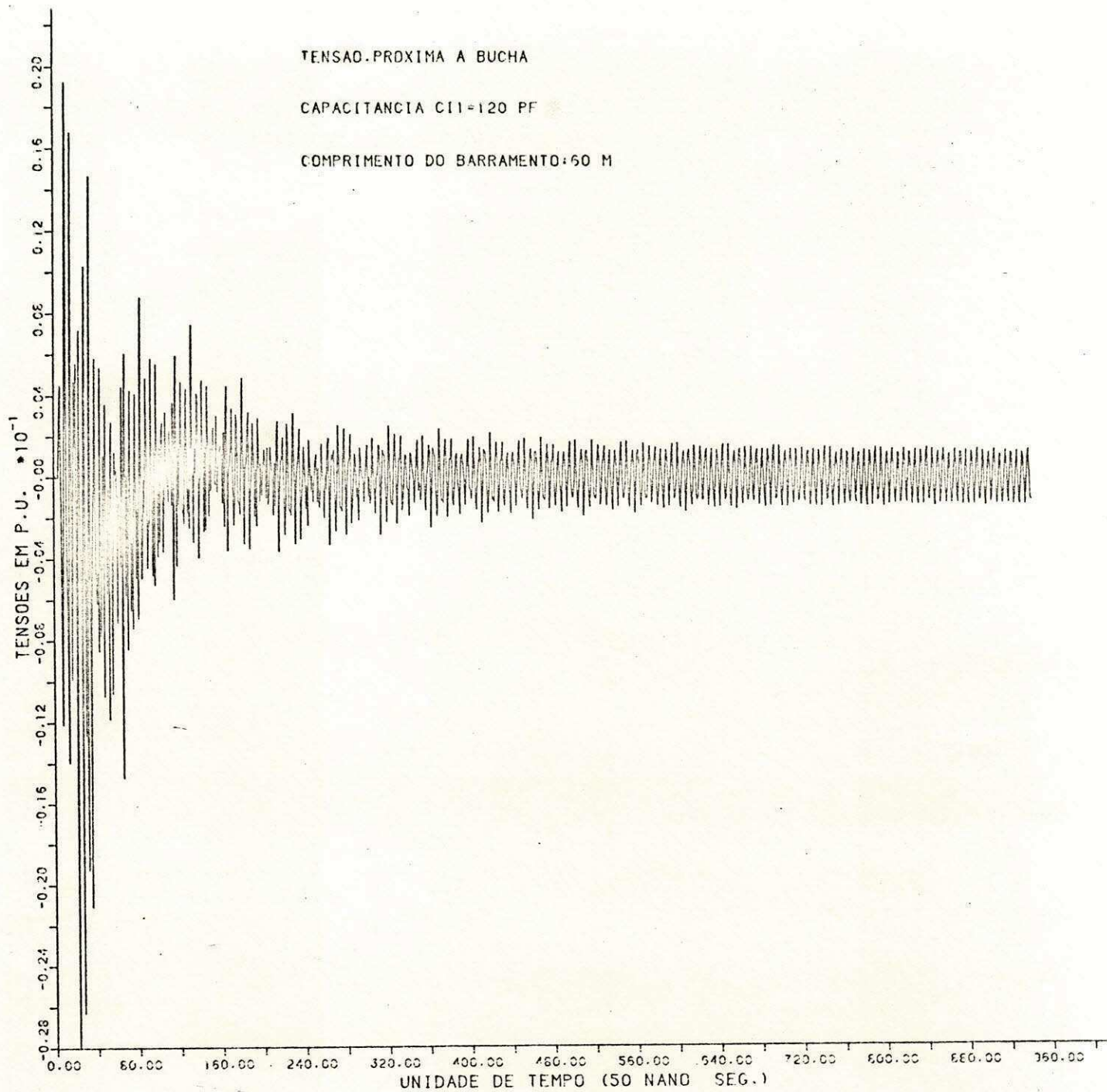


Figura 3.8

OSCILOGRAMA DE UM SURTO DE TENSÃO NA CARGAÇA DO BARRAMENTO DE 60 METROS DE COMPRIMENTO.

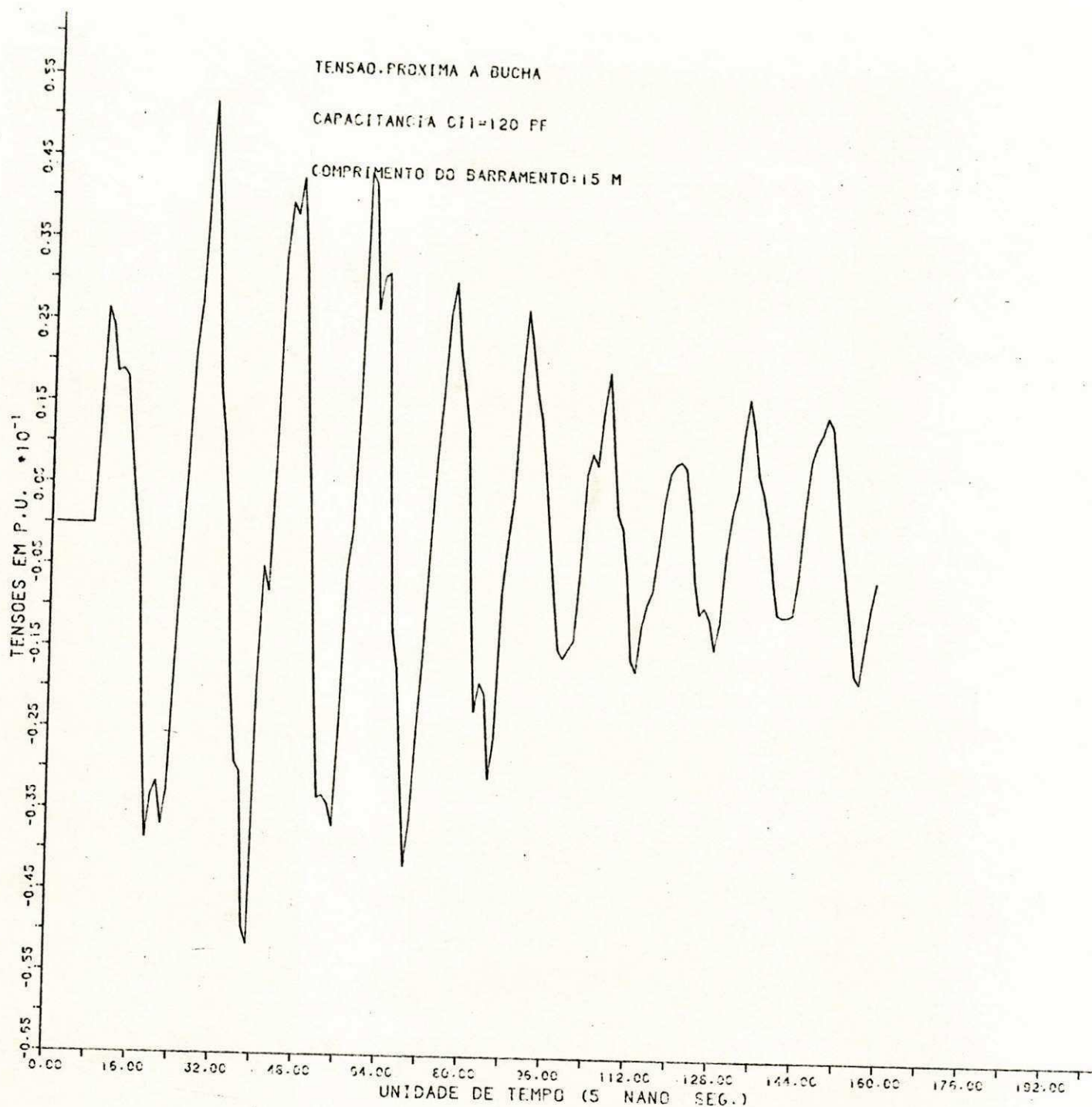


Figura 3.7B

OSCILOGRAMA DE UM SURTO DE TENSÃO NA CARÇAÇA DO BARRAMENTO DE 15 METROS DE COMPRIMENTO (ESCALA EXPANDIDA)

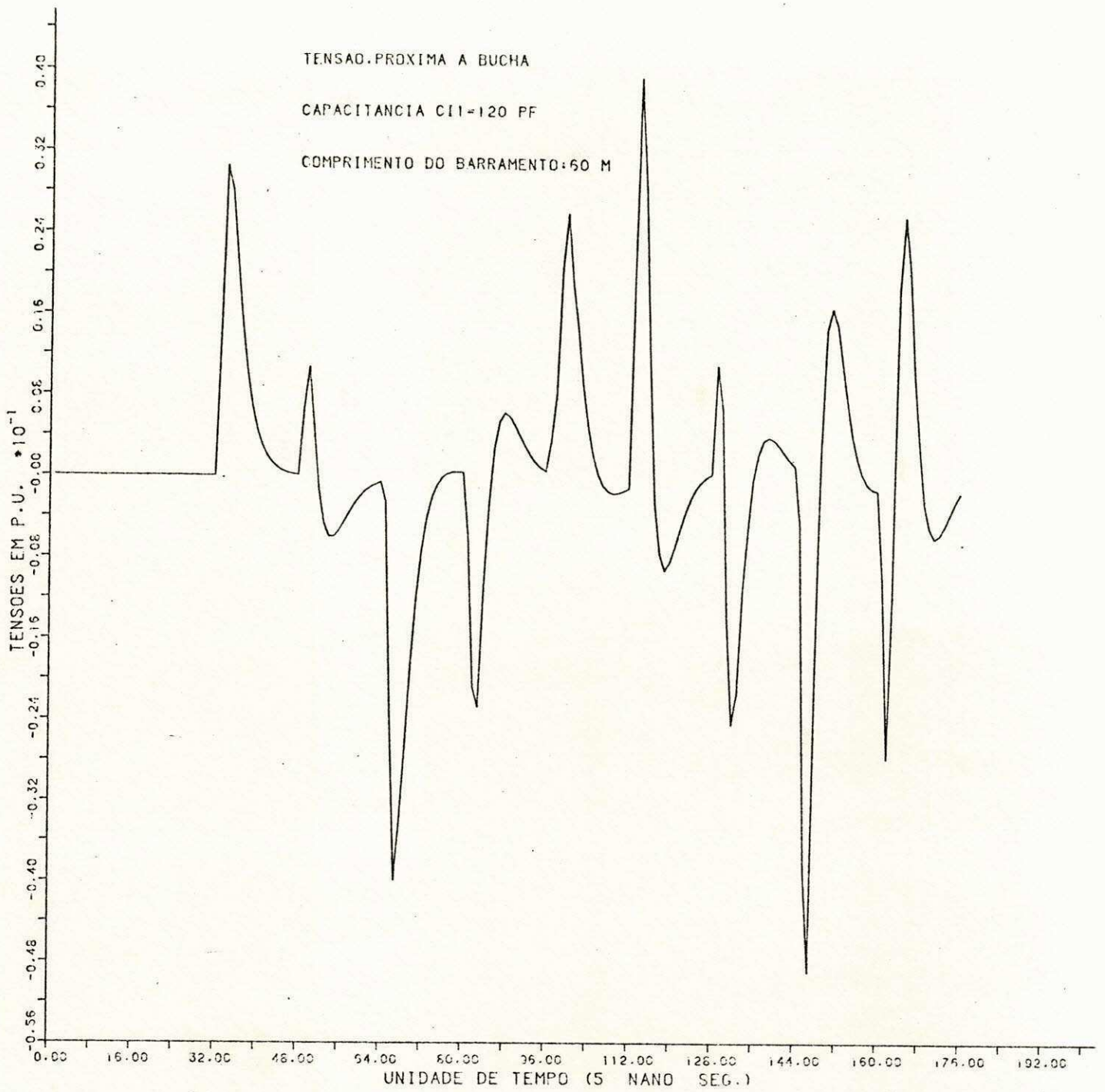


Figura 3.8B

OSCILOGRAMA DE UM SURTO DE TENSÃO NA CARCAÇA DO BARRAMENTO DE 60 METROS DE COMPRIMENTO (ESCALA EXPANDIDA)

## CAPÍTULO IV

### SIMULAÇÃO DIGITAL DA ELEVAÇÃO DE POTENCIAL NA CARÇAÇA DEVIDO A CURTO-CIRCUITO

#### 4.1.0 A OCORRÊNCIA DO CURTO-CIRCUITO

Durante a operação de uma chave seccionadora podem ocorrer descargas "fase-terra", a partir de uma das reignições entre os contactos da chave. Nesse caso, a falta será estabelecida na região do barramento compreendido entre os contactos da chave e as paredes do invólucro.

Montagens experimentais em laboratório, usando-se protótipos de chaves de 550 KV, demonstraram a ocorrência de descargas fase-terra numa subestação blindada, mesmo quando a sobretensão foi menor do que a suportabilidade do isolamento fase-terra do equipamento [6].

A elevação do potencial da carcaça do barramento nestes casos é significativo e acontece através do mecanismo denominado de efeito pelicular como explicado no Capítulo II. Entretanto, o modelo do fenômeno abordado aqui não simula a ocorrência do curto-circuito decorrente de uma reignição originada de chaveamento. Analisa-se unicamente a ocorrência de um curto-circuito na extremidade do eletrodo isolado a SF6 e a conseqüente elevação do potencial da parte externa da carcaça. Evidentemente essa simplificação não prejudica o estudo, já que o que se pretende verificar é a ordem de grandeza do transitório da carcaça em si e os parâmetros de circuito que influenciam esses surtos de tensão.

#### 4.2.0 DESCRIÇÃO DO ARRANJO EM ESTUDO

O arranjo de barramento estudado é aquele da figura 4.1. Durante a ocorrência da sobretensão, a chave seccionadora (RSW) permanecerá fechada e o curto-circuito ocorrerá na extremidade do eletrodo condutor interno ao invólucro blindado e isolado a gás, entre a terminação esférica (TF) e as paredes da secção de barramento.

A parte do arranjo isolado a gás contém um trecho de eletrodo condutor de 15 m de comprimento com um diâmetro de 130 mm e uma terminação esférica na sua extremidade (TF) e encontra-se submetido a uma pressão de 4,5 bars, referente ao dielétrico (SF6) do interior do invólucro selado. A permissividade dielétrica desse meio isolante foi considerada igual a um e o diâmetro do invólucro da secção blindada é igual a 410 mm. Essa secção de barramento encontra-se situada a 0,5 metro de altura em relação ao solo a partir de sua parte inferior e é aterrada através de uma conexão (AI) fixada na base da terminação SF6/Ar, a qual é representada por uma indutância de 0,5 micro-Henrie (valor inicial). A altura do arranjo em relação ao solo deverá ser modificada em algumas simulações, tendo-se em vista aferir a influência da impedância de surto na elevação de potencial da carcaça do barramento. As características dos outros elementos desse trecho de barramento são:

Capacitância equivalente da terminação SF6/Ar (C1): 80 PF

Capacitância equivalente ao cone isolante C11: 120 PF

Capacitância equivalente ao cone isolante C12: 10 PF

Capacitância equivalente ao cone isolante C13: 10 PF

Capacitância equivalente a terminação esférica - TF: 10 PF

O cone isolante C13 mais a terminação esférica TF serão representados por uma única capacitância (C2) de 20 PF e a chave seccionadora permanecerá fechada durante toda a simulação.

A parte do arranjo referente ao trecho alimentador é composta de uma fonte de tensão  $U$  de 1 p.u. que alimenta o trecho isolado a gás através de uma secção de cabo aéreo (ACSR) de 300 metros de comprimento e 954 MCM de diâmetro situado a 7 metros do nível do solo.

#### 4.3.0 REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS

O comportamento do arranjo de barramento da figura 4.1 no caso de curto-circuito, devido as altas frequências envolvidas, possui forte semelhança com o caso de chaveamento do capítulo anterior. Logo, as considerações sobre os modelos que representarão os elementos do circuito, face as frequências do sistema são as mesmas.

Para o modelo de cada componente do arranjo tendo-se em vista a montagem do circuito elétrico equivalente serão usados os elementos da figura 3.3 no desenvolvimento das equações que definirão o sistema. Com os elementos considerados como parâmetros concentrados, será usado o Método do Trapézio para o desenvolvimento das respectivas equações de estado, os quais serão representados cada um por uma resistência em paralelo com sua fonte de corrente fictícia. Os elementos considerados como parâmetros distribuídos usarão o método das características em que cada linha é representada por sua impedância de surto em paralelo com suas fontes de corrente fictícias.

Com relação às impedâncias de surto desses trechos de linhas de transmissão, deverão ser usados os valores obtidos no caso de chaveamento do capítulo anterior. Consequentemente, a linha aérea alimentadora será representada por uma impedância de 410 ohms e um tempo de trânsito de 1 micro-segundo, o eletrodo isolado a gás SF6 e o invólucro, serão representados pelas impedâncias de surto de 70 ohms e 117 ohms respectivamente e como têm o mesmo comprimento, terão um tempo de trânsito único, de 0,05 micro-segundos.

#### 4.4.0 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

O curto-circuito é simulado na extremidade do barramento isolado a gás SF6 entre a terminação esférica (TF) e o invólucro do barramento. A chave seccionadora encontra-se na posição fechada.

Como consequência do efeito pelicular, o surto de tensão devido ao curto-circuito percorrerá em primeiro lugar toda a extensão do barramento blindado para só então surgir no exterior do invólucro. Repete-se aqui o fenômeno acontecido nos casos de chaveamento puro e, como consequência, o modelo do circuito deverá incluir uma terceira linha para simular esse efeito.

A figura 4.2 representará o circuito equivalente do arranjo quando ocorre o curto-circuito. Na montagem do circuito foram usados os elementos das figuras 3.2 e 3.3 em que cada trecho de linha é representado pela impedância de surto do trecho e suas fontes fictícias equivalentes e cada elemento concentrado é representado pela resistência equivalente e a fonte fictícia de corrente correspondente. Em linhas gerais, o trecho de circuito entre o nó "1" e o nó "2" representa o cabo aéreo alimentador com suas fontes de corrente fictícias CX12 e CX21 e sua impedância de surto, Z1. Entre o nó "2" e o nó "3" tem-se a fonte de corrente CC1 e a resistência equivalente RC1 do capacitor além das fontes de corrente, CX23 e CX32 e a impedância de surto Zs, correspondente ao modelo da Terminação SF6/Ar. Entre os nó "3" e "4" e os nós "5" e "6", temos dois trechos de linha correspondentes ao eletrodo isolado a gás e representados pelas fontes de corrente: CX34, CX43, CX56, CX65 e a correspondente impedância de surto, Z2. Entre os nós "4" e "7", "5" e "7" e "6" e "7" temos as fontes de corrente CD1, CD2 e CC2 e as correspondentes resistências equivalentes dos elementos capacitivos: RD1, RD2, RC2. Entre os nós "7" e "8" temos o trecho de circuito equivalente ao invólucro do barramento blindado representado pelas fontes fictícias de corrente: CX78 e CX87 e a impedância de surto Z3.



A conexão de aterramento (AI), como um elemento indutivo, será representada pela fonte de corrente  $GI$  e a resistência equivalente,  $RL$ .

#### 4.5.0 SOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO

A partir do circuito elétrico equivalente - figura 4.2 - serão deduzidas as equações para cada um dos seus nós. Essas equações formarão o sistema cuja solução fornecerá a cada intervalo de tempo especificado os surtos de tensão dos nós de interesse.

Tendo em vista a solução computacional, o sistema de equações deduzidas deverá assumir a forma matricial - equação (3.14) - seguinte:

$$[G] \times [E(t)] = [I(t)] - [I]$$

As equações que fazem parte do sistema, definidas no domínio do tempo, têm suas variáveis de interesse - corrente e tensão - calculadas em intervalos de tempo discretizados e constantes ( $\Delta t$ ). Conseqüentemente os elementos dos parâmetros concentrados terão suas resistências equivalentes -  $RL$  e  $RC$  - constantes.

A matriz das condutâncias  $[G]$  assumirá um valor constante durante a simulação, já que o intervalo de tempo permanece invariável.

O vetor das correntes - lado direito da equação (3.14) - terá as correntes das fontes fictícias e as correntes injetadas nos nós obtidas passo a passo através das seguintes equações:

cont...

a) Para um elemento indutivo conectado entre dois nós hipotéticos k e m serão usadas respectivamente as equações (3.6) e (3.5) seguintes:

$$i_L(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{E_{km}(t - \Delta t)}{R_L}$$

$$i_{km}(t) = \frac{E_{km}(t)}{R_L} + i_L(t - \Delta t)$$

b) Para um elemento capacitivo conectado entre dois nós hipotéticos k e m usa-se as equações (3.9) e (3.8) seguintes:

$$i_C(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{E_{km}(t - \Delta t)}{R_C}$$

$$i_{km}(t) = - \left[ - \frac{E_{km}(t)}{R_C} + i_C(t - \Delta t) \right]$$

Para os trechos de circuito - linhas de transmissão - conectados entre dois nós genéricos k e m, os elementos considerados como parâmetros distribuídos terão suas fontes de correntes fictícias calculadas através das equações (3.12) e (3.13), e as correntes injetadas nestes nós serão calculadas através das equações (3.10) e (3.11), que também foram utilizadas na simulação de chaveamento.

Durante todo o programa, as linhas de transmissão terão seus valores de fontes de corrente fictícias e correntes injetadas nos nós sempre calculados em função dos valores passados, há intervalos de tempo iguais a seus tempos de trânsito. No caso dos elementos considerados como parâmetros concentrados, essas correntes serão para cada elemento calculadas em função do intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) imediatamente anterior.

Após ser inicializado o programa computacional, o sistema representado pela equação (3.14) é resolvido para uma equação matricial igual àquela da figura 3.5 em que se está energizando o barramento, e os valores de tensão que estarão sendo gerados correspondem a cada nó assinalado na figura 4.2 e sem que nenhum surto de tensão haja acontecido.

Ao ocorrer o curto-circuito entre os nós "6" e "7", o sistema deve ser reestruturado e para a solução da nova situação é aplicado o método da modificação da matriz das condutâncias [20]. A aplicação desse método consiste em, durante a ocorrência do curto-circuito entre os referidos nós, suprimir-se do sistema de equações, o nó de menor índice, da seguinte maneira:

Dado o sistema matricial, soma-se todos os elementos da sexta linha à sétima e todos os elementos da sexta coluna são adicionados à sétima coluna, ou seja, entre os dois nós onde ocorre o curto-circuito, os elementos de menor índice são "absorvidos". Evidentemente o sistema passa a ter uma equação a menos - a equação matricial é reduzida em uma linha e uma coluna - e no caso, a matriz das condutâncias [G] passa a ser uma matriz: 7 x 7. Os vetores colunas das correntes e tensões passam a ter uma linha a menos e o sistema matricial passa a ser aquele da figura 4.3.

#### 4.6.0 O PROGRAMA COMPUTACIONAL

O arranjo encontra-se desenergizado e suas condições iniciais são iguais a zero. Inicialmente o barramento é energizado durante 12 micro-segundos que foi o tempo necessário para que toda a sua extensão atingisse uma tensão uniforme, no caso, igual a 0,4 p.u.. Nesse instante é provocado o curto-circuito na secção de barramento isolada a gás, entre a extremidade em aberto (TF) e o invólucro. A condição de

curto-circuito irá durar 62 micro-segundos e durante esse intervalo de tempo será calculado a elevação de potencial da carcaça.

O intervalo de tempo adotado no programa computacional ( $\Delta t$ ) foi de 5 nano-segundos e está relacionado com as dimensões do eletrodo isolado a gás - 15 m - que será percorrido pelo surto de tensão. Observe-se que durante a simulação a chave seccionadora permanecerá fechada.

A figura 4.4 representa o fluxograma do programa computacional desenvolvido que é composto de duas partes principais. Após uma etapa preliminar, que introduz a leitura dos dados de entrada e cálculo dos elementos da matriz dos nós [G], tem-se a primeira parte, no caso denominado de LOOP nº 1, aonde é simulado a energização do barramento isolado a SF6. No caso, o programa irá gerar valores de tensão em todos os pontos de interesse do circuito da figura 4.2, em um procedimento repetitivo que é indicado por uma malha fechada correspondente, na figura do fluxograma, até que a secção de barramento atinja o nível de tensão desejado, quando então haverá a ocorrência do curto-circuito. Após a conclusão da primeira parte, o sistema de equações é modificado através do método da modificação da matriz das condutâncias, o que implicará que a matriz dos nós [G] será reduzida de uma matriz: 8 x 8, para uma matriz: 7 x 7. Isto simulará a situação de curto-circuito ocorrida entre o nó "6" e o nó "7" do circuito elétrico em estudo. A segunda parte do programa, ao ser estabelecido o curto-circuito, que dura 62 micro-segundos, é denominada de LOOP nº 2.

Nessa etapa do programa, representada pelo 2º trecho de malha fechada da figura 4.4, serão gerados os valores de elevação de potencial na carcaça do barramento da figura 4.1.

Para a solução do sistema de equações, é aplicado o método da fatoração LU [19] através das subrotinas LUSOLV e FWBWC. Como para o cálculo do curto-circuito a matriz das condutâncias deve ser reduzida

para um sistema: 7 x 7, torna-se necessário a modificação dessas subrotinas, que na nova situação passam a se chamar LUSOL 2 e FWBWC 2.

Com o objetivo de verificar-se o desempenho do programa computacional, foi incluído na sua saída de dados uma subrotina que irá gerar um oscilograma correspondente ao transitório de tensão simulado. No caso foram obtidos dois oscilogramas de tensão versus tempo, registrados através das figuras 4.5 e 4.6. Os comentários dos resultados obtidos encontram-se na próxima secção - Item 4.7.0.

#### 4.7.0 AFERIÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

Com o objetivo de uma avaliação preliminar do programa computacional desenvolvido, foram plotados dois casos de elevação do potencial da carcaça do trecho de barramento isolado a SF6 devido a ocorrência de curto-circuito.

Os pontos de interesse da secção de barramento em que foram plotadas as elevações de potencial foram: um ponto da região da base da terminação SF6/Ar em que é fixada a cordoalha de aterramento - nó "7" - e um ponto da parte externa do invólucro na extremidade oposta, ou seja, tensão no nó "8" da figura 4.2. Com isso, procurou-se constatar a eficiência do programa quanto ao efeito do aterramento na elevação de potencial da carcaça. As características do arranjo simulado são aqueles especificados no parágrafo 4.2.0. A altura do arranjo em relação ao solo igual a 7 metros para o cabo aéreo alimentador e 0,5 metro para a parte inferior do invólucro. O cabo aéreo, o eletrodo isolado a gás e o invólucro terão em consequência impedâncias de surto de 410 ohms, 70 ohms e 117 ohms respectivamente.

#### 4.7.1 Descrição dos Casos Simulados

##### CASO 1 - Oscilograma da figura 4.5

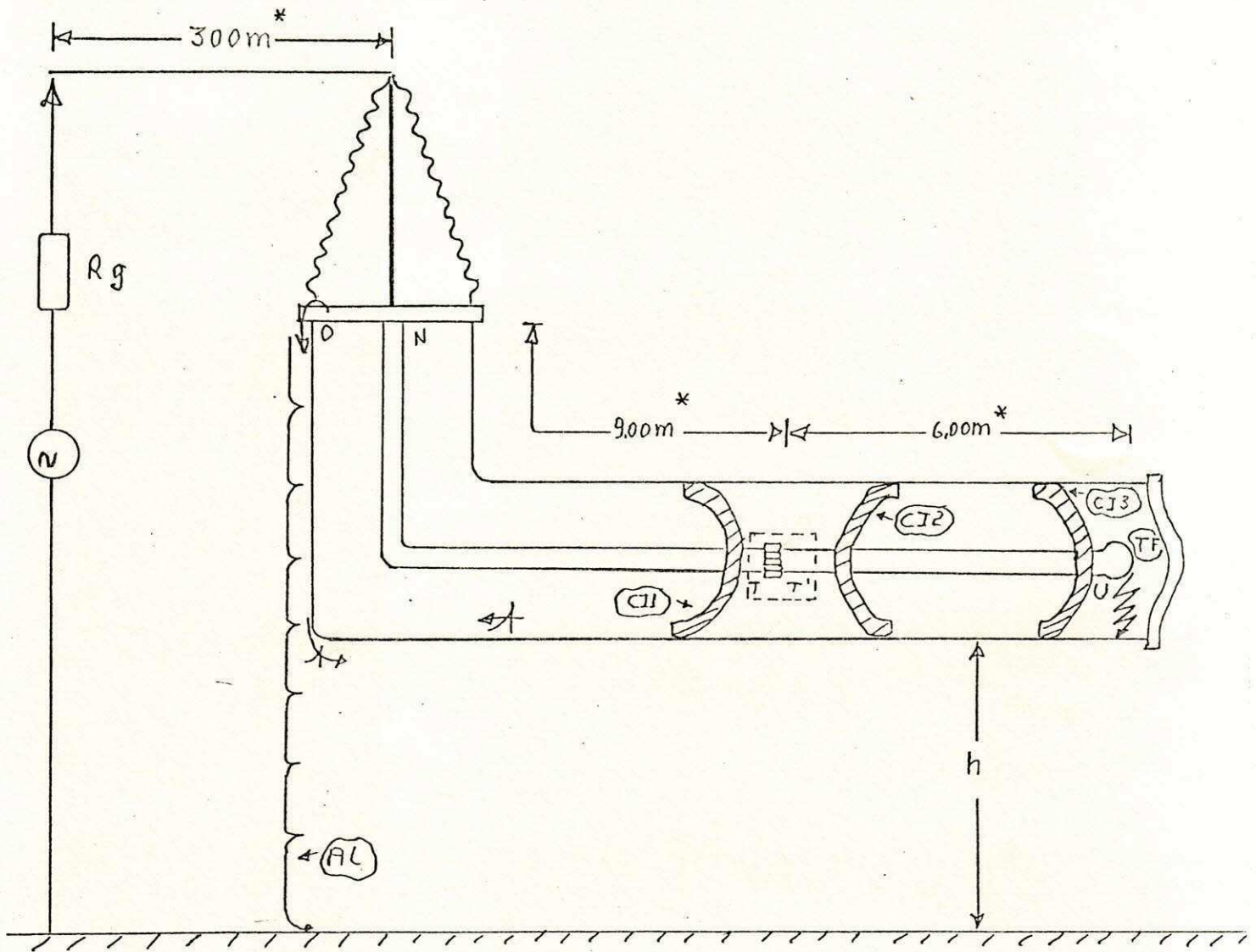
Havendo um curto-circuito entre o nó "6" e o nó "7" foi registrado a elevação de potencial no ponto da carcaça do barramento - nó "7" - em que se encontra conectada a cordoalha de aterramento. O valor máximo de surto registrado pelo oscilograma foi 0,08 p.u.. A figura 4.5B representa o mesmo surto em escala expandida (duração total de 1 micro-segundo).

##### CASO 2 - Oscilograma da figura 4.6

Havendo um curto-circuito entre o nó "6" e o nó "7" foi registrada a elevação de potencial na parte externa do invólucro, mais precisamente no nó "8". O valor máximo de surto registrado foi 0,3 p.u.. A figura 4.6B representa o mesmo fenômeno em escala expandida (duração total de 1 micro-segundo).

#### 4.7.2 Conclusões sobre a aferição preliminar

Através da comparação entre os oscilogramas das figuras 4.5 e 4.6, verifica-se que no ponto em que se encontra conectada a cordoalha de aterramento (AI) - na região da base da terminação SFB/Ar - a elevação de potencial é menor do que na região oposta, ou seja, naquela sem conexão direta à terra. O que atesta inicialmente a validade do programa ao constatar um resultado já esperado.



\* Fora de escala

Figura 4.1

SECÇÃO DE BARRAMENTO ISOLADO A SF6. OCORRÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO NA EXTREMIDADE DO ELETRODO

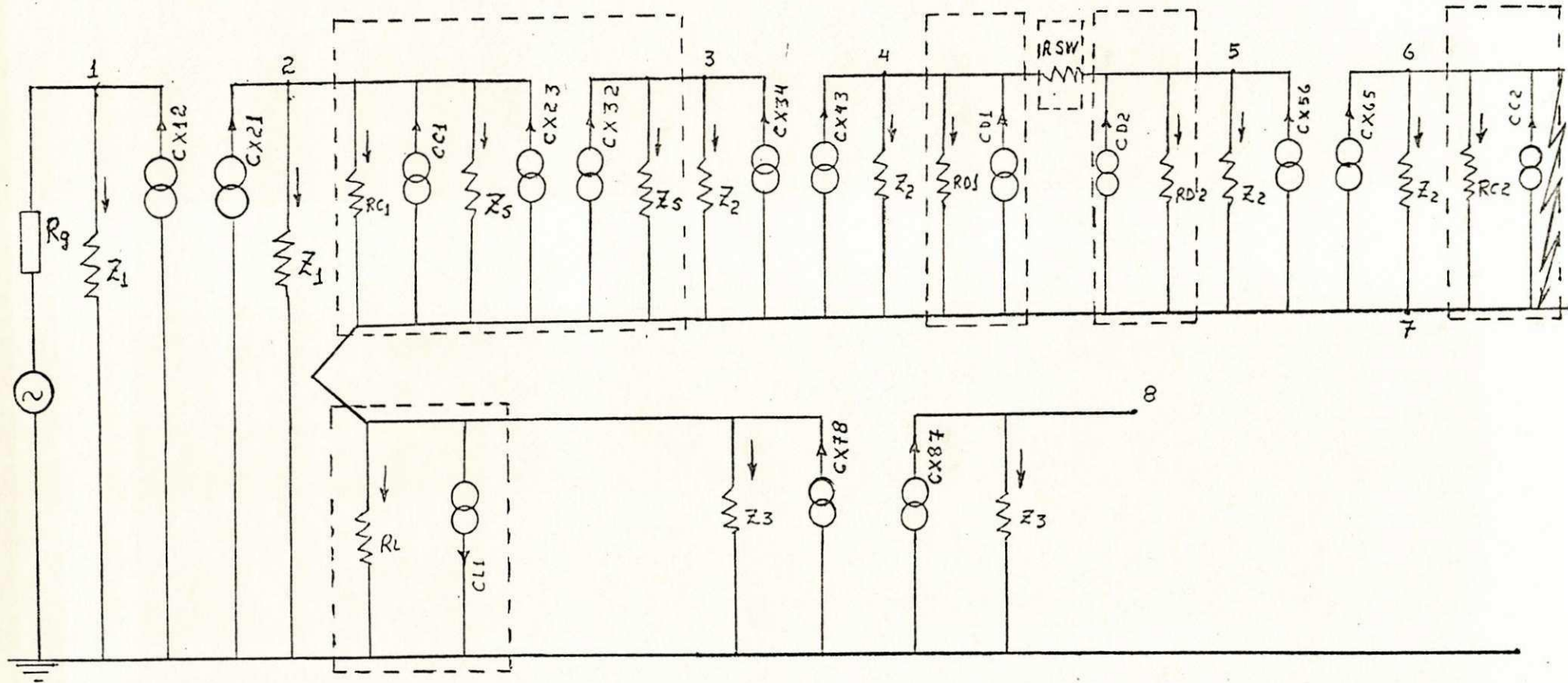


Figura 4.2

CIRCUITO MODELADO PARA ALTAS FREQUÊNCIAS, DURANTE A OCORRÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO



$$\begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{22} & g_{23} & 0 & 0 & g_{26} & 0 \\ 0 & g_{32} & g_{33} & 0 & 0 & g_{36} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{44} & g_{45} & g_{46} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{54} & g_{55} & g_{56} & 0 \\ 0 & g_{62} & g_{63} & g_{64} & g_{65} & g_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{77} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \\ E_3(t) \\ E_4(t) \\ E_5(t) \\ E_6(t) \\ E_7(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \\ I_4(t) \\ I_5(t) \\ I_6(t) \\ I_7(t) \end{bmatrix}$$

Figura 4.3

SISTEMA MATRICIAL EQUIVALENTE (CURTO-CIRCUITO)

FLUXOGRAMA DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

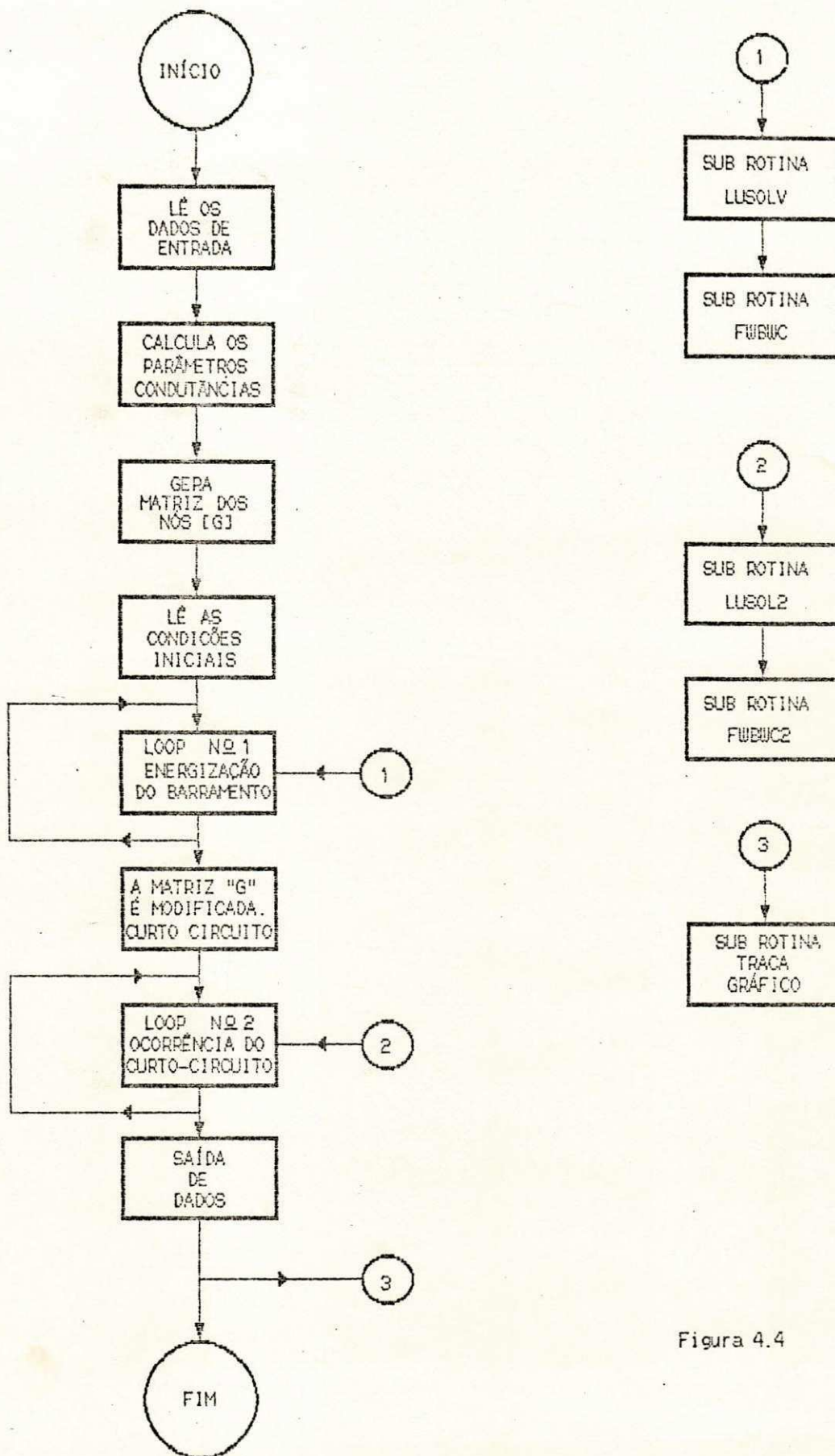


Figura 4.4

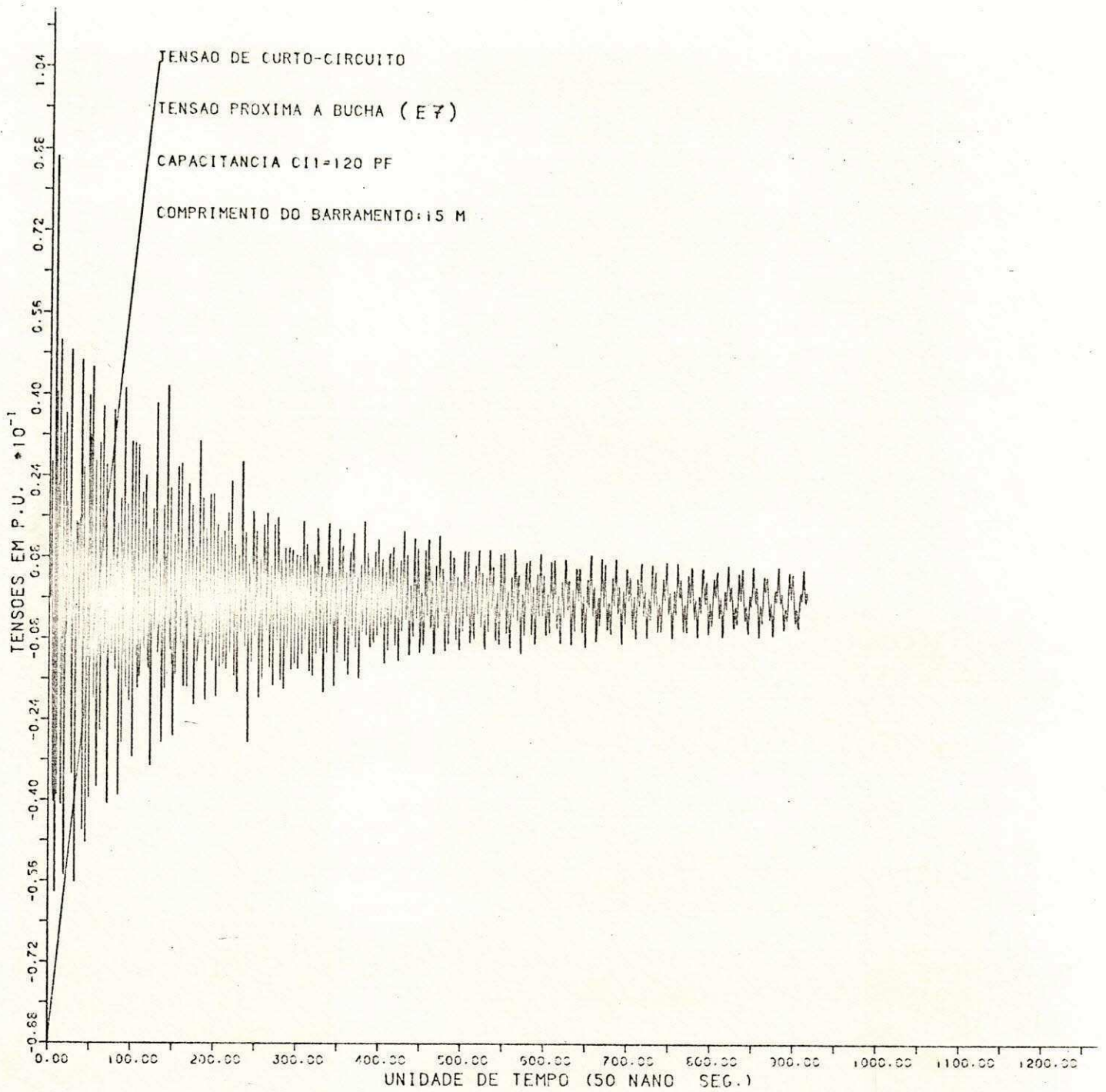


Figura 4.5

OSCILOGRAMA DO SURTO DE TENSÃO NO INVÓLUCRO, NO PONTO QUE ENCONTRA-SE ATERRADO

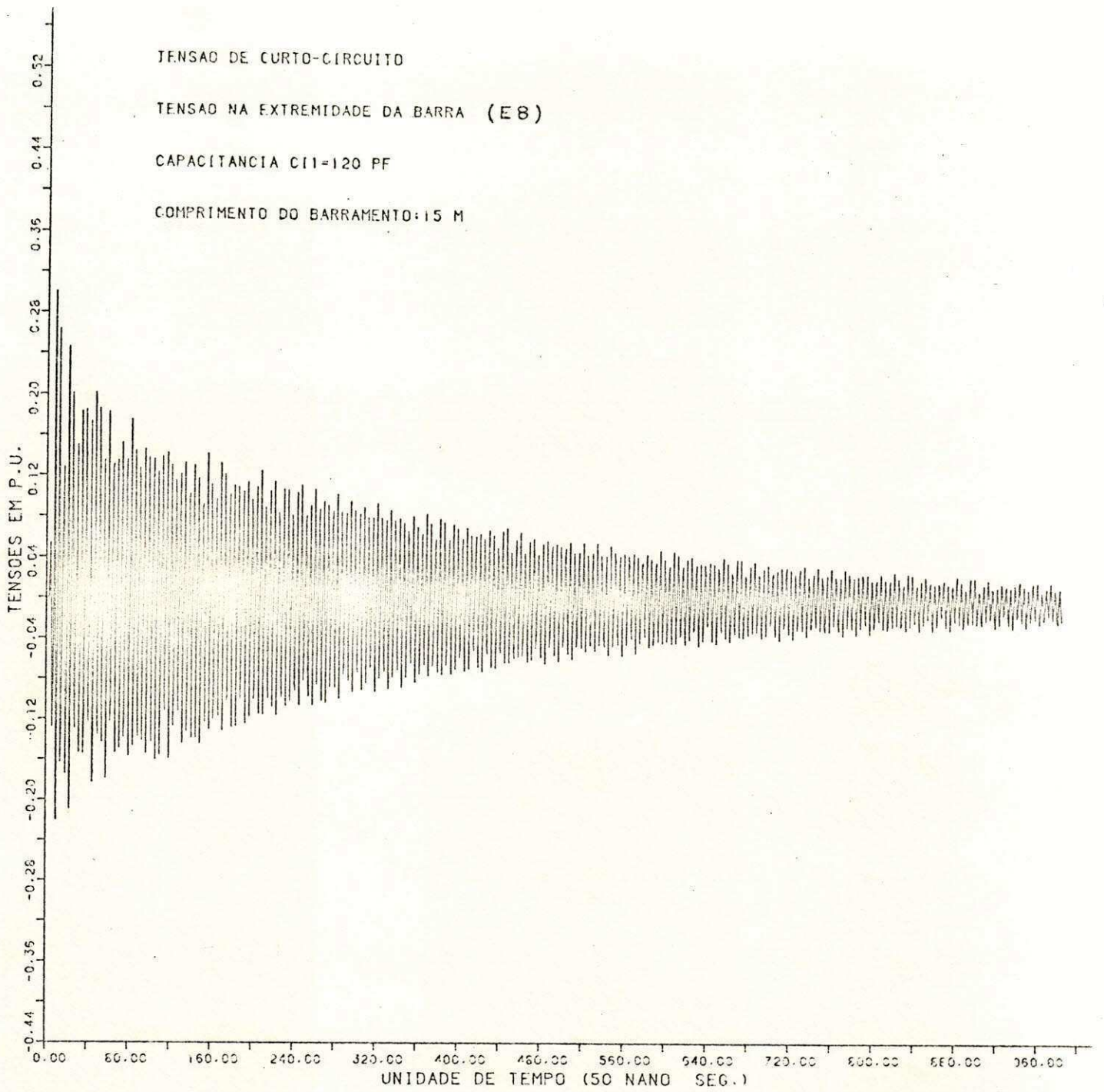


Figura 4.6

OSCILOGRAMA DO SURTO DE TENSÃO NO INVÓLUCRO EM UM PONTO NÃO ATERRADO

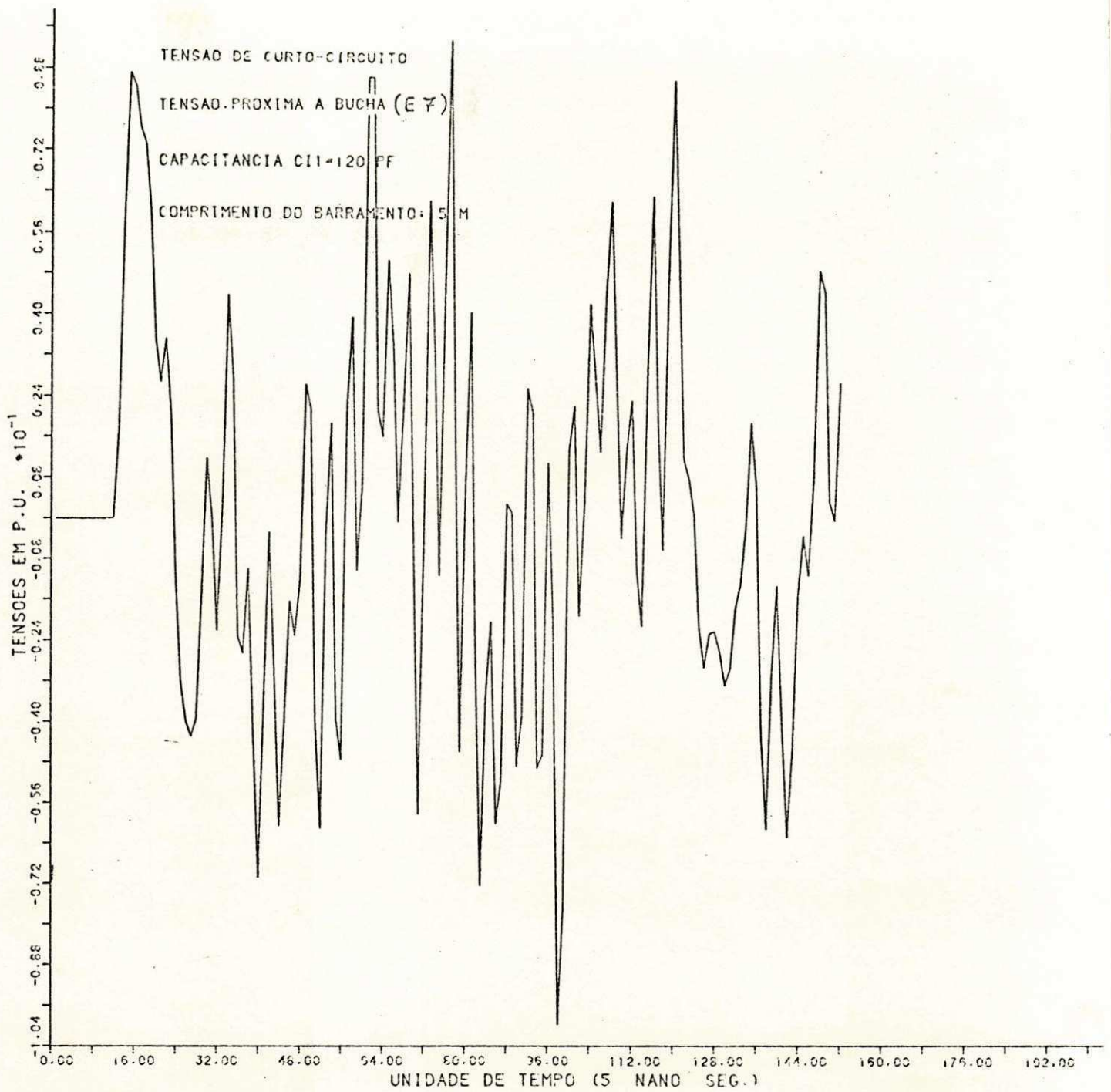


Figura 4.5B

OSCILOGRAMA DO SURTO DE TENSÃO NO INVÓLUCRO NO PONTO QUE ENCONTRA-SE ATERRADO (ESCALA EXPANDIDA)

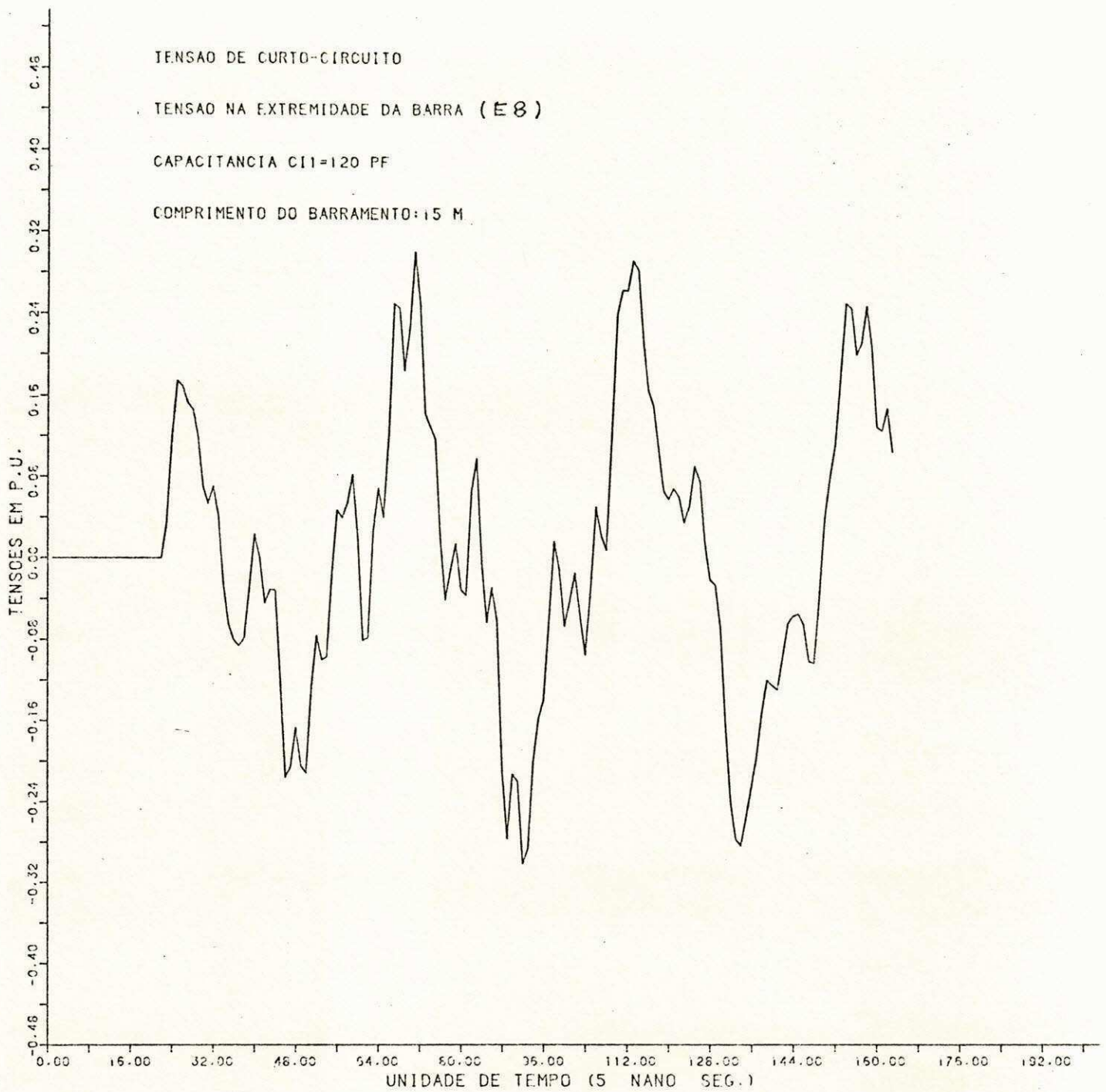


Figura 4.6B

OSCILOGRAMA DO SURTO DE TENSÃO NO INVÓLUCRO EM UM PONTO NÃO ATERRADO (ESCALA EXPANDIDA)

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS E CONCLUSÕES

#### 5.1.0 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

As dimensões principais do arranjo de barramento padrão, utilizado em todos os casos analisados são aquelas da figura 5.7. As características intrínsecas do barramento (dados do projeto) referem-se a um equipamento da classe de 230 KV e são para os casos simulados, as que encontram-se especificadas no início dos Capítulos III e IV respectivamente. Ainda como referências principais são considerados: o circuito elétrico equivalente da figura 3.4 para casos de chaveamento e o circuito elétrico da figura 4.2 para as simulações de curto-circuito. Ressalte-se a associação necessária para o entendimento dos circuitos equivalentes, entre a numeração dos nós - referência elétrica - marcados nessas figuras e a posição geométrica correspondente nos arranjos de barramento da figura 3.1 e figura 4.1. Para isto, o entendimento das consequências do denominado efeito pelicular no invólucro do barramento, descritas no Capítulo II, são fundamentais e as figuras de cada circuito elétrico equivalente devem ser sempre associadas à figura 2.4. Tanto nos casos de chaveamento quanto naqueles de curto-circuito, para o denominado arranjo padrão de barramento utilizado e como decorrência das dimensões principais da figura 5.7, foram consideradas as impedâncias de surto de 410 ohms para o trecho de cabo aéreo alimentador, de 954 MCM ACSR, a impedância de 70 ohms para o eletrodo isolado a gás e 117 ohms para o invólucro da secção de barramento à SF6.

Nas simulações, a linguagem utilizada no programa computacional desenvolvido foi o FORTRAN 77. Em todos os casos apresentados, as tensões utilizadas nos gráficos encontram-se em valores absolutos.

Em cada caso, quando ocorrer, para o entendimento correto da terminologia utilizada, tensão no nó "7" (denominada E7) e, tensão no nó "8" (denominada E8) entenda-se: elevação de potencial no nó "7" e elevação de potencial no nó "8", já que em condições normais de funcionamento as posições correspondentes no arranjo de barramento proposto devem encontrar-se com seus potenciais iguais a zero, ou seja, aterrados.

Nos casos de elevação de potencial devido a reabertura de chaveamento, as expressões, lado da alimentação e lado da carga, significam: lado esquerdo e lado direito, isto para quem olha a chave seccionadora (RSW), tomando-se a figura 3.1 como referência.

Os nós "7" e "8" - das figuras 3.4 e 4.2 - representam respectivamente, a região situada na base da terminação SF6/Ar, conectada diretamente à terra através de cordoalha de aterramento (A1) e aquela região externa do invólucro situada na outra extremidade do barramento, em que o mesmo encontra-se seccionado. E foram privilegiados neste estudo por serem pontos que encontram-se em situações de aterramento opostas, sendo portanto, bem representativos.

#### 5.1.1 Elevação de potencial devido a chaveamento

Os casos de elevação de potencial da carcaça do barramento, devido a chaveamento, tem como programa computacional básico aquele descrito no Capítulo III. A montagem mostrada na figura 3.1 funciona como orientação principal e referência básica a partir da qual, alterações de parâmetros de projeto são realizadas como, impedâncias de surto, conexões de aterramento e capacitâncias, tendo em vista aferir a sua influência no desempenho do arranjo. As simulações devido a chaveamento compreendem os gráficos das figuras 5.1, 5.2, 5.3, e 5.4.



Na figura 5.1 temos o gráfico das tensões E7 e E8, em função de CK. Onde E7 e E8 representam os valores de tensão - elevação de potencial - ocorridos no Invólucro da secção de barramento isolado a SF6 - ver figura 3.1 - a partir de reignições de chaveamento. Foram simulados dez casos de reignições com 50 micro-segundos de duração cada. De cada caso, foi escolhido o surto de tensão de maior intensidade em valor absoluto.

O parâmetro CK é obtido da seguinte maneira;

$$CK = \frac{C11}{CL}$$

Onde CL é a capacitância equivalente aos elementos capacitivos situados no lado da "carga" - figura 3.1 - ou seja;

$$CL = C11 + C12 + C13 + TF$$

E C11 é a capacitância que representa o elemento - cone isolante espaçador - situado do lado da fonte alimentadora tomando-se a chave seccionadora (RSW) como referência. No caso, a capacitância C11 assumiu valores entre 30 e 300 Pico-Farads e CL foi mantida com o valor constante de 30 Pico-Farads. A indutância representando a cordoalha de aterramento foi fixada com o valor de 0,5 micro-Henrie para todos os casos simulados.

No desenvolvimento do projeto dos barramentos isolados a gás SF6, a relação entre as capacitâncias do lado da fonte e do lado da "carga", denominada neste trabalho de CK, tem um peso determinante numa avaliação dos possíveis transitórios extra-rápidos que podem ocorrer nas subestações isoladas a SF6 [27], devido às operações de chaveamento.

Na simulação aqui realizada, observa-se que a medida que o parâmetro CK aumenta, a elevação de potencial da carcaça decresce, havendo uma redução aproximada de 100% da intensidade do surto quando C11 aumenta de 30 para 300 Pico-Farads e o valor de CL permanece invariável. Em todas as simulações, a tensão inicial entre os contactos da chave foi mantido em torno de 1,13 p.u. e a tensão do contacto da chave que fica do lado da fonte alimentadora, foi mantido igual a 1 p.u..

Já as sobretensões internas ao barramento geradas durante cada reignição comportaram-se de maneira inversa ao que ocorreu na parte externa do invólucro, como pode ser observado através da figura 5.2. No caso, variou-se CK de 1 até 10, C11 assumiu valores desde 30 Pico-Farads até 300 Pico-Farads, mantendo-se CL igual a 30 Pico-Farads e mediu-se a intensidade do surto máximo no ponto correspondente à terminação esférica TF, ou seja, potencial E67. Permanecendo todos os demais parâmetros do modelo constantes, verificou-se que a tensão máxima de surto naquele ponto aumentou a medida em que CK aumentou, variando em consequência de 1,3 p.u. até 2,00 p.u. sendo que em todas as reignições a carga retida foi mantida em torno de -0,13 p.u.. e a tensão do lado da fonte no instante inicial de cada reignição foi de 1,00 p.u..

A figura 5.3 representa a elevação de potencial do ponto de conexão da cordoalha de aterramento (nó "7") e do nó "8", em função da indutância da cordoalha (AI). Foram realizadas dez simulações com AI variando de 0,5 micro-Henrie até 2,75 micro-Henrie. Neste estudo, a relação Ck foi igual a 4 (C11=120 PF). A elevação de potencial da carcaça no ponto que se encontra conectado diretamente a terra - nó "7" - que irá variar desde 0,05 p.u. até um valor próximo a 0,2 p.u. para o modelo em análise, mostrou que este é também um importante parâmetro de projeto. O gráfico em evidencia mostra que a medida que a indutância cresce, a elevação de potencial assume maior intensidade tanto no ponto diretamente aterrado quanto naquele destituído de conexão de aterramento. Entretanto, a elevação de potencial da carcaça é maior no

ponto não aterrado, no caso o nó "8".

Os casos apresentados através da figura 5.4 mostram a elevação do potencial do invólucro do barramento nos nós "6" e "7" em função da impedância de surto do invólucro. Foram simulados dez casos, nos quais a altura do arranjo (secção isolada a SF6) variou de 0,50 m até 2,75 m tendo como consequência a modificação da sua impedância de surto, que estão anotadas como abscissas do gráfico citado. No caso, a mudança da altura do barramento não altera a impedância de surto do eletrodo isolado a SF6, mas modifica ainda que um mínimo (em termos percentuais), a impedância de surto do cabo aéreo alimentador que por sua vez, assume valores desde 410 ohms até 426 ohms. Observa-se através da figura citada, que o aumento da impedância de surto do invólucro não alterou de forma significativa a elevação de potencial da carcaça do barramento, quer seja no nó conectado diretamente a terra - nó "7" - quer seja no seu oposto, o nó "8". Mas verifica-se no mesmo gráfico, uma tendência de queda do valor da elevação de potencial dos dois nós, quando a impedância  $Z_3$  cresce. Vale ressaltar entretanto, a título ilustrativo, que esta tendência foi revertida quando no modelo em estudo, a impedância da bucha ( $Z_s$ ) teve o seu valor alterado de forma aleatória de 250 ohms [17] para 150 ohms.

#### 5.1.2 Elevação de potencial devido a curto-circuito

Nos casos simulados de curto-circuito, o programa computacional desenvolvido no Capítulo IV, em conjunto com as dimensões do arranjo proposto na figura 5.7, definirão o caso padrão. E o circuito elétrico da figura 4.2 é sua referência básica. Os gráficos representados pelas figuras 5.5 e 5.6 especificam os casos simulados.

Na figura 5.5 tem-se a elevação de potencial dos nós "7" e "8" em função da indutância da conexão de aterramento. O curto-circuito que origina o surto de tensão ocorre entre os nós "6" e "7" do circuito elétrico equivalente (figura 4.2). Nesta simulação, o barramento - secção isolada a SF6 - foi mantido na sua altura considerada padrão, em relação ao solo, de 0,5 m. E as impedâncias de surto do cabo aéreo alimentador, eletrodo isolado a SF6 e do invólucro, foram mantidas iguais a 410 ohms, 70 ohms e 117 ohms respectivamente.

Neste estudo observa-se uma influência da indutância da cordoalha de aterramento (AI) na elevação de potencial de carcaça, menos evidente do que no caso equivalente do chaveamento (figura 5.3). Verifica-se por outro lado que a intensidade da elevação de potencial é bem maior no caso de curto-circuito. Como consequência observa-se no gráfico da figura 5.5., uma diferença em média de 40% nos valores da elevação de potencial do nó "7" e de um pouco mais de 100% na elevação de potencial do nó "8" quando comparados com a simulação correspondente, do caso de chaveamento.

Na figura 5.6 tem-se a elevação de potencial da carcaça, dos nós "7" e "8", em função da impedância de surto do invólucro da secção de barramento isolada a SF6. O curto-circuito que origina o transitório ocorre entre os nós "6" e "7" (figura 4.2) e a variação da impedância de surto do invólucro é obtida através da mudança da altura do barramento. Neste caso observa-se que o comportamento da elevação do potencial da carcaça é diferente do caso similar do chaveamento. A alteração da impedância de surto - aumento - do invólucro indica uma tendência de acréscimo da elevação de potencial do nó que encontra-se aterrado - nó "7" - ainda que não defina um padrão de alteração da elevação de potencial do nó "8".

## 5.2.0 CONCLUSÕES

Através dos casos estudados a partir dos modelos dos programas computacionais desenvolvidos nos Capítulos III e IV, ficaram evidentes os principais parâmetros que influenciam diretamente a elevação de potencial da carcaça de um barramento isolado a SF6 quando da ocorrência de chaveamento ou curto-circuito.

Ficou demonstrado através dos casos simulados e representados pelas figuras 5.1 e 5.2 como a relação entre as capacitâncias do lado da fonte e do lado da carga ( $C_k$ ) influencia de forma direta a elevação de potencial da carcaça da instalação. Sendo que aqui, uma solução de compromisso necessita ser obtida já que se um maior valor de  $C_k$  diminui a elevação de potencial no invólucro, irá acarretar por outro lado, maiores valores de surto no interior do próprio barramento e em consequência uma maior solicitação do dielétrico dos equipamentos diretamente conectados ao eletrodo sob tensão. Vale ressaltar entretanto que o quociente  $GK$  é um fator intrínscico ao equipamento e a sua otimização é definida pelo fabricante na etapa de estudos de projeto que antecipam o lançamento do produto no mercado.

Os casos apresentados através das figuras 5.3 e 5.5 evidenciam outro parâmetro fundamental para o controle da elevação de potencial da carcaça das instalações isoladas a SF6: a indutância da conexão de aterramento. No caso do chaveamento, a elevação do potencial no ponto aterrado (nó "7") ficou em torno de 0,05 p.u. para uma instalação da classe de 220 Kv. quando considerou-se uma conexão de aterramento representada por uma indutância de 0,5 micro-Henrie. No mesmo estudo foi verificado que esse valor cai para próximo de zero quando a indutância assume o valor de 1 nano-Henrie. Sabe-se entretanto, que valores para a indutância em torno de 70 nano-Henrie são impossíveis de serem obtidos e que valores em torno de 5,00 micro-Henrie são mais plausíveis (28). Diferentemente do parâmetro que denominou-se neste estudo de  $GK$ , a indutância da cordoalha de aterramento ( $A_I$ ) é um

parâmetro cujo controle encontra-se mais próximo do usuário da instalação e no qual ele pode interferir de forma mais direta recorrendo por exemplo, ao uso de cordoalhas de aterramento de menor indutância, ou seja, aquelas de maior diâmetro.

A impedância de surto do invólucro é outro parâmetro de projeto que pode influir diretamente na elevação de potencial da carcaça de uma subestação isolada à gás SF<sub>6</sub>. Sendo que essa elevação de potencial é diretamente proporcional à referida impedância [9], apesar de que nos modelos aqui desenvolvidos, esse comportamento só aconteceu, no caso de curto-circuito. No caso de chaveamento, somente houve esta proporcionalidade, quando especificou-se de forma aleatória para a impedância Z<sub>s</sub> (modelo da terminação SF<sub>6</sub>/Ar), o valor de 150 ohms que na verdade é bem menor do que aquele indicado na referência [17] e adotado no presente trabalho ( 250 ohms ).

É importante ressaltar que cordoalhas de aterramento de pequenas dimensões contribuem de forma efetiva para a atenuação da elevação de potencial da carcaça do barramento. A referência [8] mostra medições comparando-se o desempenho de cordoalhas de 1 m; 2,4 m e 7 m respectivamente. E nesse estudo é verificado que, no caso da cordoalha de menor tamanho (1 m), o surto de tensão proveniente do invólucro ao atingir o plano de terra, tem o seu sentido de deslocamento invertido (onda refletida), devido a menor impedância do plano de aterramento e ao retornar, no sentido do invólucro, anula o surto antes que ele atinja a sua plenitude. Isto nos permite deduzir que nos casos reais de barramentos mais baixos em relação ao solo a atenuação decorrente da utilização de conexões de aterramento mais curtas, fará com que a elevação de potencial da carcaça seja menor do que aqueles valores mostrados nos gráficos das figuras 5.4 e 5.6.

### 5.2.1 VALORES TÍPICOS DA ELEVAÇÃO DE POTENCIAL DO INVÓLUCRO EM SUBESTAÇÕES ISOLADAS A GÁS SF6

A intensidade da elevação de potencial da carcaça de uma subestação isolada a gás SF6 é função do ponto aonde é realizada a medição. Em arranjos de barramento simples (sem ramificações), atinge valores entre 0,1 e 0,25 p.u. [17] mas pode alcançar maior intensidade nos pontos localizados próximos à terminação SF6/Ar. O que pode ser explicado pelo fato de que são as flanges das terminações, as principais "janelas" que permitirão a passagem do surto para a parte externa do invólucro. Como durante todo o deslocamento do surto no exterior da carcaça, as suas perdas devem ser consideradas, torna-se evidente que a intensidade da elevação de potencial deverá ser menor naqueles pontos mais distantes da terminação SF6/Ar. Obviamente neste raciocínio não está sendo considerado o efeito sobre o surto das eventuais conexões de aterramento do invólucro.

Os valores da elevação de potencial da carcaça de uma subestação isolada a SF6 devido a uma operação de chaveamento, obtidos neste trabalho para o arranjo da figura 3.1, foi de 0,05 p.u. para um ponto aterrado (nó "7") e de 0,1 p.u. para um ponto não-aterrado (nó "8"). Ressaltando-se que no presente modelo, não foram considerados eventuais perdas devido ao efeito resistivo da carcaça do barramento.

### 5.2.2 MEDIDAS PARA ATENUAR A ELEVAÇÃO DO POTENCIAL DO INVÓLUCRO DO BARRAMENTO

A partir de algumas iniciativas do usuário da instalação, algumas medidas podem atenuar a elevação de potencial das subestações isoladas a gás SF6. Já a eliminação das perturbações eletromagnéticas decorrentes desses surtos na aparelhagem de comando e controle (circuito secundário) da instalação, exigirão um estudo específico de

compatibilidade eletromagnética (EMC) da subestação [29].

Na etapa de definição do arranjo, deve-se projetar a terminação de entrada, não muito próxima do corpo principal da subestação. Dessa maneira, eleva-se o tempo de trânsito do surto que deslocar-se-á através da carcaça nos casos de chaveamento já que ao penetrar nas ramificações do barramento, o transitório será atenuado pelas conexões de aterramento e causará menor risco de choques elétricos. Esse procedimento, no entanto, não diminuirá a elevação de potencial da carcaça nas proximidades da terminação SF6/Ar.

Ainda durante a fase de projeto, a especificação das terminações SF6/Ar e dos barramentos adjacentes, com alturas o mais baixo possível em relação ao solo é certamente um fator de atenuação dos transitórios rápidos. Esta medida por sua vez possibilitará a utilização de cordoalhas de aterramento de menor comprimento o que tornará o aterramento do barramento mais eficaz.

Na especificação da malha de aterramento da subestação deve-se conectar à terra todos os pontos do barramento em que haja descontinuidade de impedâncias como no caso das terminações SF6/Ar. Uma conexão eficaz da malha de aterramento à armação metálica da edificação em que encontra-se instalada a subestação, irá incrementar a sua eficiência. Deve-se também garantir o aterramento da carcaça a cada intervalo de secção da subestação, nos pontos aonde os invólucros são justapostos e parafusados para permitir a montagem completa do barramento. Nesses intervalos também é importante que a conexão a terra englobe as três fases do barramento.

A utilização de placas metálicas inseridas no interior das paredes da subestação nos locais aonde os dutos de SF6 penetram através do edifício da instalação é uma forma não-convencional de atenuar a propagação dos transitórios rápidos. No caso, a carcaça dos dutos nos locais de passagem deve ser eficientemente soldada às placas, as quais



por sua vez necessitam estarem bem aterradas [8].

Pode-se também evitar os efeitos dos transitórios rápidos através de procedimentos operacionais, como a previa emissão de um sinal sonoro em cada operação de chaveamento. Sinais de alerta, visíveis nas dependências do edifício da instalação também irão desencorajar o toque na carcaça durante o acionamento do equipamento. Essa medida, no entanto, obviamente não elimina possíveis induções eletromagnéticas nos circuitos secundários nem o efeito danoso do surto de tensão no isolamento dos equipamentos que estejam conectados diretamente ao eletrodo isolado à SF6.

FIGURA 5.1 - TENSÃO X CK

- CHAVEAMENTO -

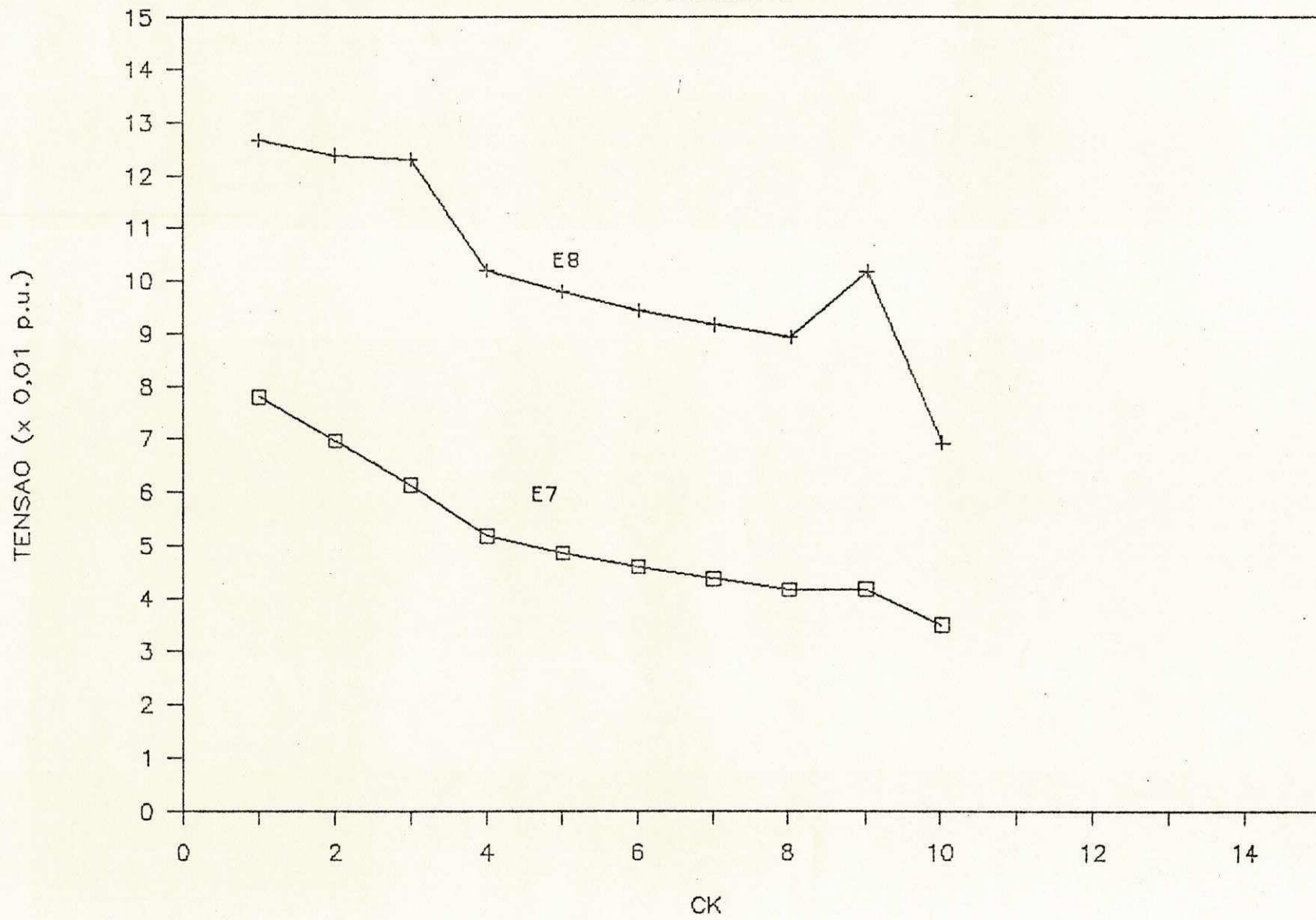


FIGURA 5.2 - TENSÃO X CK

- CHAVEAMENTO -

- 76 -

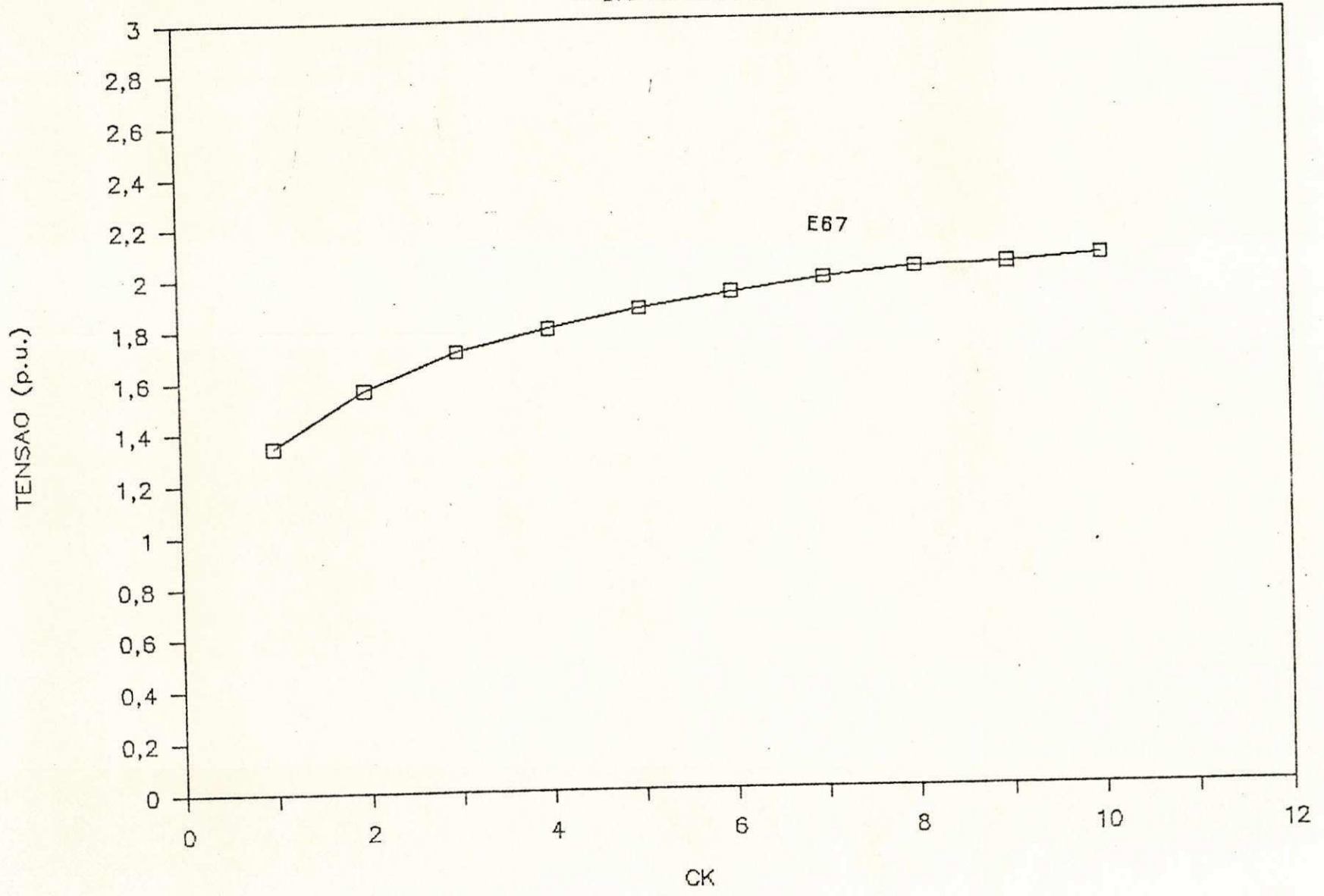


FIGURA 5.3 - TENSÃO X INDUTANCIA

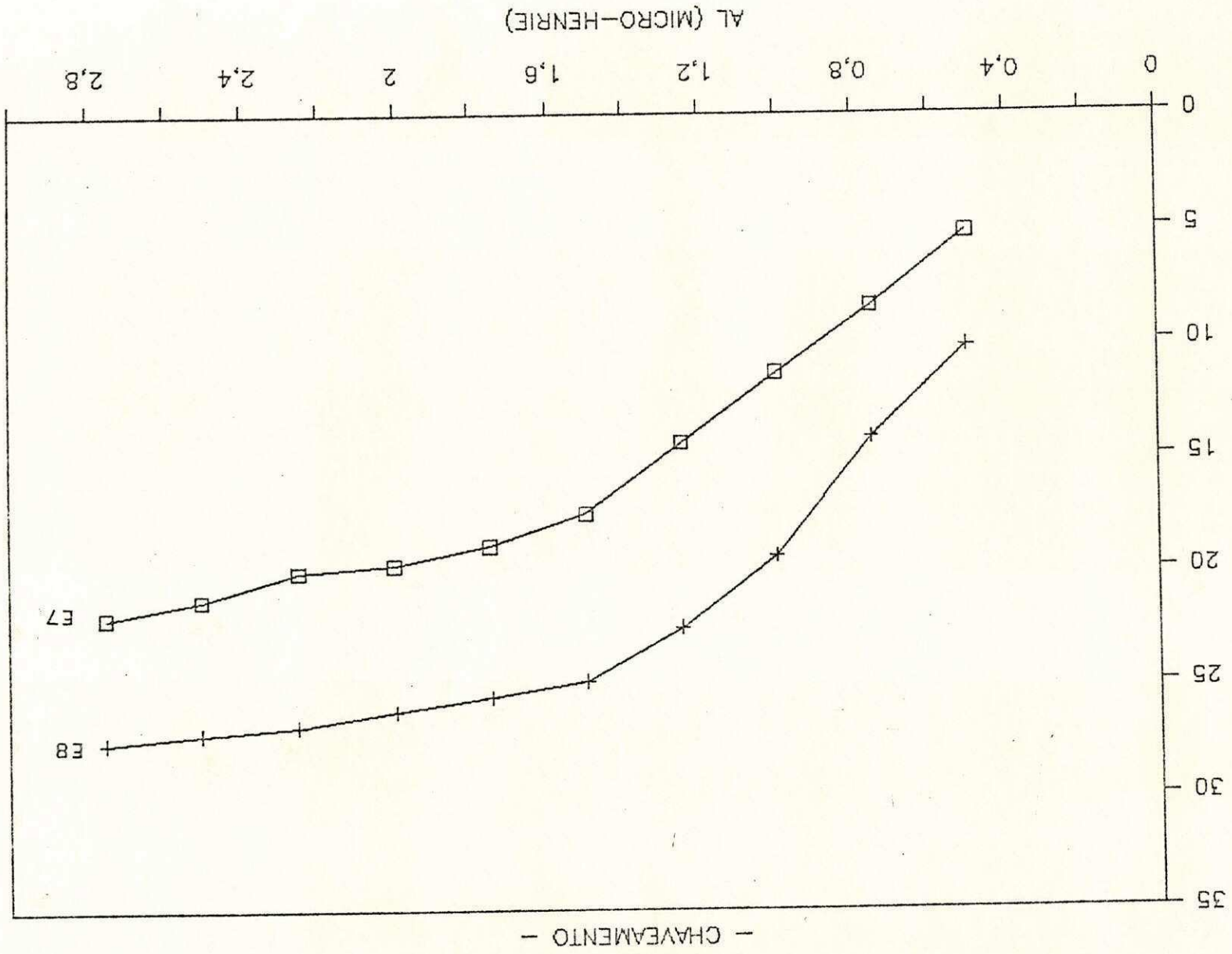


FIGURA 5.4 — TENSÃO X IMPEDANCIA (Z3)

— CHAVEAMENTO —

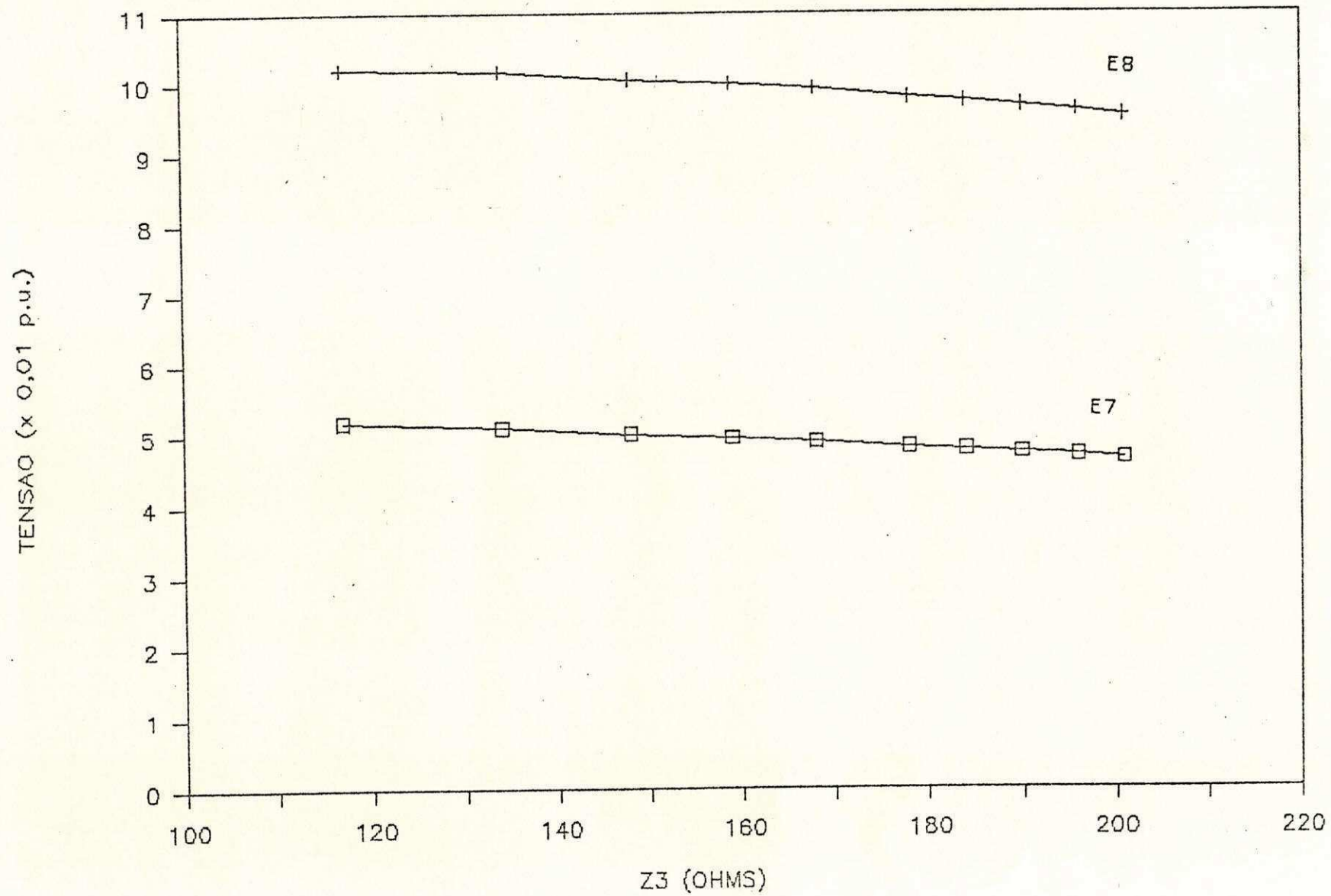


FIGURA 5.5 – TENSÃO X INDUTANCIA  
CURTO CIRCUITO

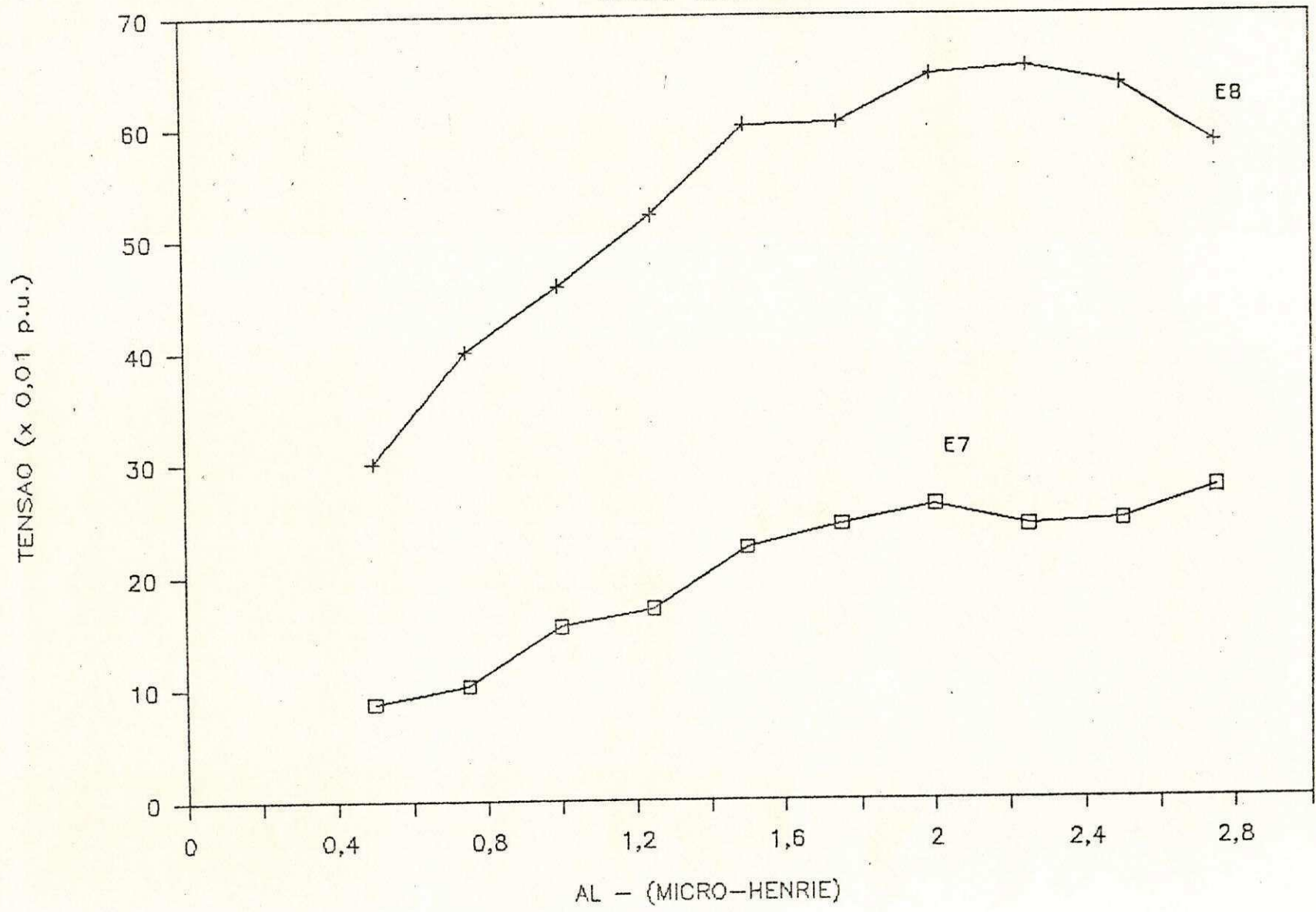
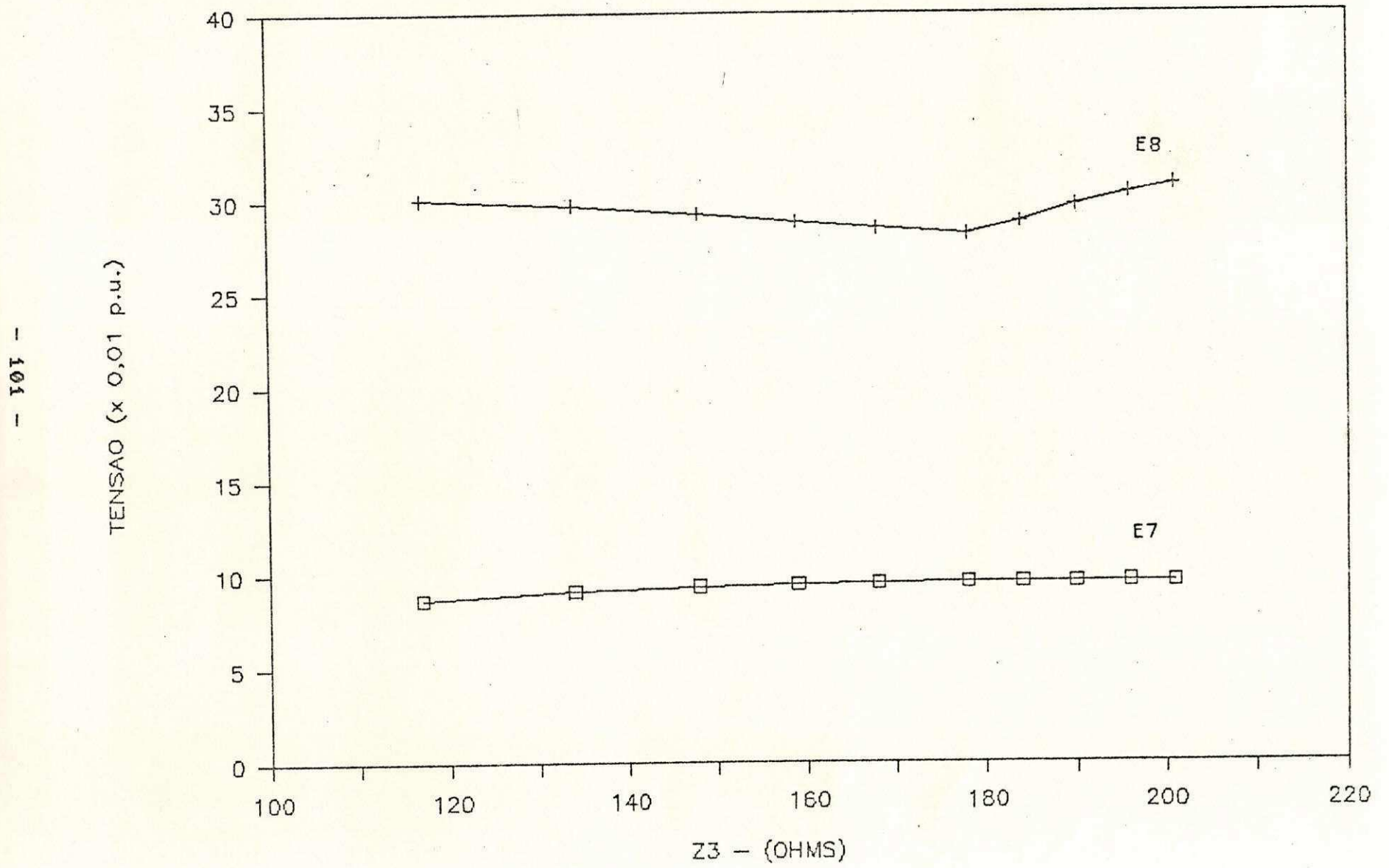


FIGURA 5.6 – TENSÃO X IMPEDANCIA (Z3)  
CURTO CIRCUITO



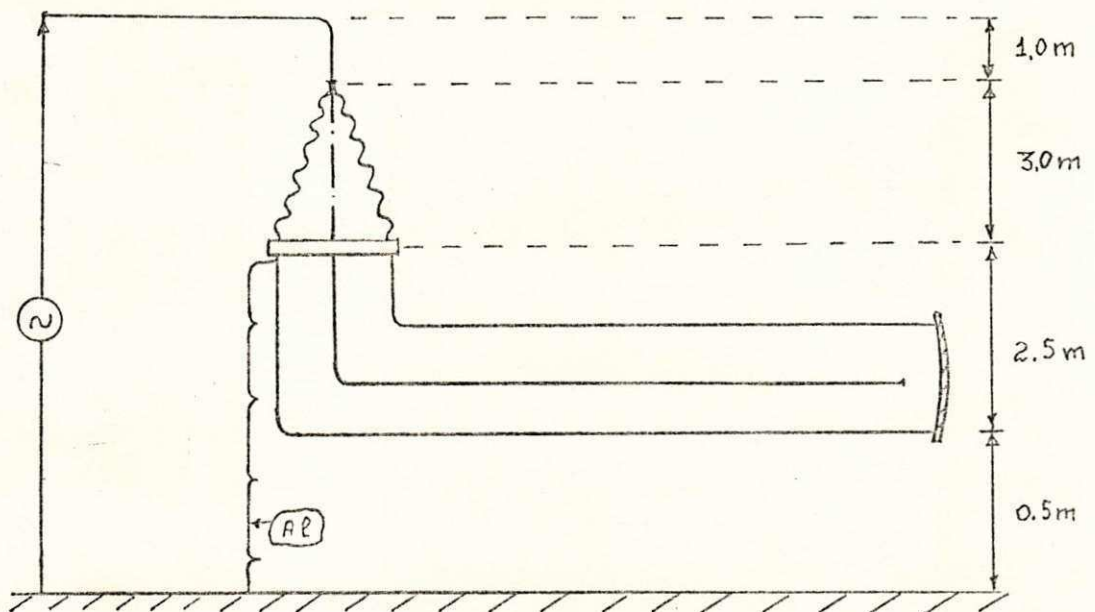


Figura 5.7

DIMENSÕES DO ARRANJO DE BARRAMENTO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES DE CHAVEAMENTO E CURTO-CIRCUITO



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) G. Ecklin, G. D. Schlicht, A. Plessl. "Overvoltages in G.I.S. caused by the operation of isolators". Surges in High-voltage Network K. Regaller, ed. plenum, 1980.
- (2) S. A. Boggs, F. Y. Chu, N. Fujimoto, "Disconnect switch in induced transients and trapped charge in gas-insulated substations", IEEE Trans. PAS. vol. 101, p. 3593, 1982.
- (3) H. Murase, I. Ohshima, H. Aoyagi, I. Miwa, "Measurement of transient voltages induced by disconnect switch operation" IEEE Trans. PAS. vol. 104 p. 157, 1985.
- (4) S. A. Boggs, N. Fujimoto, "Techniques and instrumentation for measurement of transients in gas-insulated switchgear" IEEE Trans. EI, vol.19, p. 87, 1984.
- (5) G. L. Ford, S. A. Boggs, F. Y. Chu, "Transient groundrise in SF6 substations investigated". Transmission and Distribution, p. 46, 1979, August.
- (6) S. Nishiwaki, Y. Kanno, S. Sato, E. Haginomori, S. Yamashita, S. Yanabu, "Ground fault by restriking surge on SF6 gas-insulated disconnecting switch", IEEE Trans. PAS. vol. 102, p. 219, 1983.
- (7) J. Lalot, A. Sabot, J. Kieffer, S. W. Rowe, "Preventing earth faulting during switching of disconnectors in G.I.S. including voltage transformer", IEEE Trans. PWRD, vol. 1, p. 203, 1986.
- (8) G. L. Ford, S. A. Boggs, N. Fujimoto, "Transient groundrise in G.I.S.", Transmission and Distribution, p. 42, 1982, April.
- (9) J. Meppelink, K. Diederich, K. Feser, W. Pfaff, "Very fast transient in G.I.S.", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. PD-04, 1989 pp. 223 - 233.
- (10) N. Fujimoto, S. A. Boggs, "Characteristics of G.I.S. disconnecter-induced short risetime transients incident on externally connected power system components", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. PD-03, 1988 pp. 961 - 970.
- (11) H. Fujinami, T. Takuma and Y. Aoshima, "Impulse breakdown characteristics in SF6 gas in the presence of a local spark" IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol EI-18, nº 4, 1983 pp. 429 - 435.

- (12) J. Osawa, T. Yamagiwa, T. Kichikawa, S. Takaeuchi, M. Hosokawa, "Characteristic of insulation to ground by restriking of disconnecting switch in gas insulated switchgear", Fourth International symposium on high voltage engineering, Athens-Greece, 5-9 september 1983.
- (13) E. P. Dick, N. Fujimoto, G. L. Ford and S. Harvey, "Transient ground potential rise in G.I.S. problem identification and mitigation", IEEE Trans. PAS. vol. 101, no 10 october 1982, pp. 3610 - 3619.
- (14) J. Ozawa, T. Yamagiwa, M. Hosokawa, S. Takaeuchi, H. Kozawa "Suppression of fast transient overvoltage during gas disconnecter switching in G.I.S.", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. PWRD-1, no 4, 1986, pp. 194 - 201.
- (15) N. Guk, K. K. Hishikawa, "Specification and application of SF6 compressed gas insulated switchgear. A utility's point of view", IEEE Trans. PAS. vol. 99, pp. 2241 - 2250, 1980.
- (16) Electrical Transmission and Distribution - Reference book Westinghouse Electric CO. pp. 524 - 525, 1964, fourth edition.
- (17) CIGRE GT 33/13: "Very fast transient phenomena associated with gas insulated substations". (1988 Session - 28th August 3rd September).
- (18) Hermann W. Dommel, "Digital computer solution of eletromagnetic transients in single and multiphase networks". IEEE Trans. PAS. vol. PAS-88, no 4, pp. 388 - 399, 1969.
- (19) Stephen W. Director "Circuitos Elétricos", Livros técnicos e científicos editora S. A., Rio de Janeiro, 1980.
- (20) S. R. Naidu, "Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência". Eletrobrás/UFPB, pp. 225 - 263, 1985.
- (21) N. Fujimoto, E. P. Dick, S. A. Boggs, G. L. Ford, "Transient ground potential rise in gas insulated substation". IEEE Trans. PAS. vol. PAS-101, no 10, pp. 3603 - 3609, 1982.
- (22) J. Meppelink, P. Hofer, "Design and calibration of a high voltage divider for measurement of very fast transients in gas insulated switchgear", 5rd International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, Federal Republic of Germany, 1987.
- (23) José R. Marti, Jiming Lin, "Suppression of numerical oscillation in the EMT". IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, no 2 pp. 739 - 747, 1989.

- (24) Fernando L. Alvarado, Robert H. Lasseter, Juan J. Sanchez, "Testing of trapezoidal integration with damping for the solution of power transients problems". IEEE Trans. PAS, vol. PAS-102, no 12, pp. 3783 - 3790, 1983.
- (25) R. Witzmann, "Fast transient in gas insulated substation-modeling of different G.I.S. components", Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, Federal Republic of Germany, 24 - 28 August, 1987.
- (26) W. Boeck, R. Witzmann, "Main influences on the fast transients development in gas insulated substations", Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, Federal Republic of Germany, 24 - 28 August 1987.
- (27) E. E. Kynast, H. M. Luehrmann, "Switching of disconnector in G.I.S. laboratory and field tests", IEEE Trans. PAS, vol. 104, no 11, November 1985, pp. 3143 - 3150.
- (28) B. M. Pryor, "Specification of user requirements for gas insulated switchgear" In S. A. Boggs, F. Y. Chu and N. Fujimoto (editors) "GAS-INSULATED SUBSTATION. TECHNOLOGY AND PRACTICE". Pergamon Press, New York 1986.
- (29) J. Meppeling, H. Remde, "Electromagnetic compatibility in G.I.S." BROWN BOVERI REVIEW, vol 73, no 9, 1986, pp. 498 - 502.
- (30) A. G. Phadke, "Digital simulation of electrical transient phenomena" IEEE TUTORIAL COURSE, pp. 4-10, 1980.