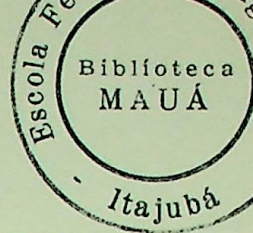


TESE

441



ANÁLISE DAS SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS CAUSADAS  
PELO CHAVEAMENTO DE DISJUNTORES A VÁCUO.

José de Castro Correia

Trabalho de Dissertação apresentado à comissão de Pós-Graduação da ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ, como parte dos requisitos para a obtenção do título de "MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA".

Itajubá, julho de 1985.



Ministério da Educação e Cultura  
 ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Análise das Sobretensões Transitórias Causadas pelo Chaveamento de Disjuntores a Vácuo"

Autor: José de Castro Correia

JULGAMENTO

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

Resultado médio: Conceito A+, ou seja aprovado com distinção.

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 06 de Setembro de 1985

1º Examinador  
 Prof. José Carlos de Oliveira  
 UFUB

2º Examinador  
 Prof. João Roberto Cogo  
 EFEI

3º Examinador  
 Prof. Ademir Carnevalli Guimarães

Dedicat6ria

A minha esposa Luzia e as minhas filhas Raquel e  
Camila

# I N D I C E

		<u>Página</u>
<u>CAPÍTULO I</u>	<u>INTRODUÇÃO</u>	
1.1	Considerações Gerais	01
1.2	Objetivos do Trabalho	06
<u>CAPÍTULO II</u>	<u>SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS CAUSADAS</u>	08
	<u>PELO CHAVEAMENTO DE CORRENTES INDU</u>	
	<u>TIVAS E CAPACITIVAS POR DISJUNTORES</u>	
	<u>A VÁCUO</u>	
2.1	Introdução	08
2.2	Mecanismo de Corte de Corrente	09
2.3	Corte Verdadeiro de Corrente	10
2.4	Corte Virtual de Corrente	11
2.5	Sobretensões Transitórias Causadas por Corte de Corrente Indutiva em Circuitos Oscilatórios.	16
2.5.1	Chaveamento de Transformadores a Vazio	26
2.5.2	Chaveamento de Reatores Paralelos	30
2.5.3	Chaveamento de Grandes Motores	31
2.6	Chaveamento de Circuitos Capaciti vos	32
2.7	O Fenômeno do Aumento Sucessivo de Tensão por Múltiplas Reignições	42

		<u>Página</u>
2.8	Conclusões	47
<u>CAPÍTULO III</u>	<u>O ARCO NO DISJUNTOR A VÁCUO E AS</u>	49
	<u>CARACTERÍSTICAS DE RECUPERAÇÃO DIE</u>	
	<u>LÉTRICA</u>	
3.1	Introdução	49
3.2	A Formação e Extinção do Arco Elé	50
	trico no Disjuntor a Vácuo e o Per	
	fil de Recuperação Dielétrica	
3.2.1	Nível de Corte Verdadeiro de Corren	51
	te (Estabilidade do Arco)	
3.2.2	Capacidade de Interrupção de Corren	55
	tes de Alta Frequência	
3.2.3	Suportabilidade Dielétrica	58
3.3	Modelo de Recuperação Dielétrica	60
	Dinâmica do Espaço a Vácuo	
3.3.1	Considerações Teóricas	60
3.3.2	Resultados Computacionais	64
3.4	O Fenômeno da Preignição ("Prestrike")	68
	numa Operação de Fechamento dos	
	Contatos	
3.4.1	Considerações Teóricas	68
3.4.2	Resultados Computacionais e Comen	70
	tários	
3.5	Conclusões	73

		<u>Página</u>
<u>CAPÍTULO IV</u>	<u>MODELO MATEMÁTICO DO MECANISMO DE</u> <u>INTERRUPÇÃO DE CORRENTE INDUTIVA</u> <u>POR DISJUNTORES A VÁCUO E SIMULA</u> <u>ÇÕES DE CHAVEAMENTO DE CARGAS INDU</u> <u>TIVA E CAPACITIVA</u>	75
4.1	Introdução	75
4.2	Modelo Matemático do Mecanismo de Interrupção de Corrente Indutiva por Disjuntores a Vácuo e Procedi- mento Computacional	76
4.2.1	Circuito Básico e Considerações Teóri- cas .	76
4.2.2	Procedimento Computacional	79
4.3	Chaveamento de Corrente Capacitiva- Procedimento Computacional	85
4.3.1	Interrupção de Corrente Capacitiva- Procedimento Computacional	85
4.3.2	Energização de Carga Capacitiva - Procedimento Computacional	85
4.4	Saída de Dados	88
4.5	Simulações de Interrupção de Corren- tes Indutivas e Análise dos Resul- tados	100
4.5.1	Influência da Distância Entre Con- tatos Sobre o Número de Reignições	102

		<u>Página</u>
4.5.2	Efeito do Nível de Corte de Corrente Sobre o Número de Reignições	102
4.6	Interrupção de Correntes Capacitivas e Análise dos Resultados	107
4.6.1	Efeito da Distância Entre Contatos Sobre o Número de Reignições	108
4.7	Simulação de Energização de Carga Capacitiva	112
4.7.1	Número de Reignições como Função dos Parâmetros do Circuito	113
4.7.2	Número de Reignições como Função do Ponto de Partida dos Contatos	117
4.8	Conclusões	119
<u>CAPÍTULO V</u>	<u>DISCUSSÕES - CONCLUSÕES GERAIS</u>	122

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## APÊNDICES

Apêndice A

Apêndice B



## SIMBOLOGIA

A nomenclatura a seguir define os principais símbolos utilizados nesta tese.

- $i$  = Corrente instantânea
- $v$  = Tensão instantânea
- $V$  = Volume
- $R$  = Resistência
- $L$  = Indutância
- $C$  = Capacitância
- $t$  = Tempo de observação
- $\Delta t$  = Incremento de tempo para integração numérica
- $f$  = Frequência em Hz
- $\omega$  = Frequência da fonte, em rad/seg
- $\omega_0$  = Frequência natural dos circuitos oscilatórios, em rad/seg.
- $\eta_m$  = Rendimento ou eficiência magnética
- $\theta$  = Ângulo de abertura ou fechamento dos contatos com relação a  $0^\circ$
- $\frac{di}{dt}$  = Taxa de variação da corrente com o tempo
- $\bar{v}$  = Velocidade térmica média das partículas de vapor de metal
- $S$  = Dispositivo de chaveamento
- $W_{el}$  = Energia eletromagnética
- $W_{ee}$  = Energia eletrostática
- $Z_0$  = Impedância de surto

CLR = Liga constituída basicamente de cobre, cromo,  
bismuto e tungstênio

BIL = Nível Básico de Isolamento

## RESUMO

Esta dissertação se propõe a mostrar os mecanismos de geração das sobretensões transitórias originadas nas operações de chaveamento, por disjuntores a vácuo, em circuitos oscilatórios.

Os trabalhos desenvolvidos resumem-se em três partes fundamentais, a saber:

- 1) Estudo dos mecanismos básicos de geração das sobretensões transitórias, onde se mostra a interação "circuito-disjuntor" no processo de chaveamento (abertura ou fechamento elétrico dos contatos).
- 2) Determinação das características dielétricas dos interruptores a vácuo, onde se apresenta o mecanismo de interrupção de corrente com corte (Chopping) e o perfil de recuperação das características do dielétrico entre os contatos.
- 3) Desenvolvimento de programas para simulação digital das operações de chaveamento e resultados computacionais onde se verifica os problemas das reignições e preignições dos contatos nas operações de chaveamento.

## ABSTRACT

This dissertation is proposed to show the transient overvoltages generation mechanism originated in the switching operations, by vacuum circuit breakers, in oscillating circuits.

The developed works are resumed in three main parts namely:

- 1) Study of the generation basic mechanisms of the transient overvoltages, where is shown the "circuit-circuit breaker" interaction in the switching process (electrical opening or closing of the contactor).
- 2) Determination of the vacuum interrupters dielectric characteristics, where is presented the interruption mechanism of chopping current and the recuperation profile of the dielectric characteristics between the contacts.
- 3) Programs development for digital simulation of the switching operations and computational results when is verified the restrikes problems and prestrikes of the contacts in the switching operations.

### Agradecimentos

Aos professores Ademir Carnevalli Guimarães e João Roberto Cogo pela orientação recebida.

Aos colegas professores do departamento de eletricidade da FUA, Carlos Alberto Figueiredo e Ernani Câmara pelo incentivo recebido ao longo de todo este trabalho.

A minha esposa Luzia pelo incentivo e pela compreensão da importância deste trabalho.

Ao colega Amauri R.C.Oliveira por sua valiosa ajuda no desenvolvimento computacional.

À Ana Angélica Santos Marinho e ao Willians César da Silva pela datilografia deste trabalho.

Ao Argemiro dos Santos e ao Messias Tadeu Salgado por seus trabalhos de desenho.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho chegasse a bom termo.

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O uso crescente do disjuntor a vácuo em sistemas de distribuição de energia elétrica (notadamente na Europa, Japão, USA e, recentemente, no Brasil) numa variedade de aplicações e condições de operação, tem fornecido considerável experiência operacional. Os resultados, de uma maneira geral, têm sido bons [1,2,3,4]. Entretanto, em algumas aplicações, tais como energização de capacitores paralelo [5], chaveamento de transformador de forno a arco [6] e abertura de corrente de partida de motores de baixa potência [7], problemas de sobretensões transitórias têm sido encontrados. Porém, estes problemas deram origem a investigações sobre suas causas e um razoável número de trabalhos tem sido publicado, oferecendo soluções para a supressão dos problemas de sobretensões transitórias [3,8,9]. Simultaneamente, diversos artigos têm sido apresentados [10,11,12], abordando as características de corrente de corrente em disjuntores a vácuo. A causa básica das sobretensões tem sido a capacidade do disjuntor a vácuo em interromper correntes transitórias de alta frequência.

As sobretensões transitórias de chaveamento (importantes nas definições das características dos disjuntores, inclusive

ve a vácuo) não são dependentes apenas das características dos dispositivos de chaveamento, mas também, dos parâmetros do circuito chaveado e da interação entre ambos. Estas sobretensões podem ser divididas em duas categorias:

*Sobretensões transitórias devidas ao chaveamento de correntes indutivas em circuitos oscilatórios.*

*Sobretensões transitórias devidas ao chaveamento de correntes capacitivas em circuitos oscilatórios.*

- (a) Nos disjuntores a vácuo, assim como em outros tipos de disjuntores, durante as operações de interrupção de pequenas correntes indutivas poderá haver uma instabilidade do arco elétrico, forçando a corrente a zero, antes do seu zero natural. Há, ainda, outros casos em que durante o processo de interrupção de corrente uma corrente de alta frequência se superpõe à corrente de carga fluindo pelo arco elétrico, também forçando um zero de corrente. Em ambos os casos o disjuntor poderá interromper a corrente prematuramente em sua passagem por zero. Este é o denominado "CORTE DE CORRENTE". A carga, porém, não permite uma passagem abrupta da corrente a zero e a energia eletromagnética contida na mesma no instante do corte de corrente, não tendo mais a fonte, é transferida às capacitâncias (parasitas e/ou paralelas) do sistema, transformada em energia eletrostática, e o resultado é o aparecimento das sobretensões transitórias oscilató-

rias, com frequência superior à industrial. Havendo resistência nestes circuitos oscilatórios, a onda de tensão é amortecida. Os níveis de corte de corrente dos disjuntores a vácuo, por instabilidade do arco elétrico, situam-se entre 1 e 20 amperes<sup>[3]</sup> e dependem dos parâmetros do sistema e principalmente do tipo de material dos contatos. A literatura tem apresentado resultados de experiências práticas, onde se verifica que o aumento da impedância de surto paralela, aos contatos do disjuntor a vácuo tem o efeito de diminuir estes níveis de corte de corrente [8].

- (b) O chaveamento de corrente capacitiva é considerado uma tarefa relativamente severa para qualquer tipo de disjuntor<sup>[1]</sup>, devido à alta tensão de recuperação imposta sobre os contatos do disjuntor nesta operação. Isto se deve ao fato de que a corrente é interrompida em valor próximo ou no zero natural, quando então a tensão sobre o capacitor está no máximo ou próximo a este. O disjuntor a vácuo pode ser considerado um dispositivo ideal para desenergizar cargas capacitivas, visto que o mesmo tem uma taxa de recuperação de suas características dielétricas extremamente rápida, podendo evitar, desta forma, o fenômeno de recondução de corrente por ruptura do dielétrico. Problemas poderão apresentar-se por



ocasião da energização de cargas capacitivas, onde poderá ocorrer o fenômeno do aumento de tensão por múltiplas pré-conduções de corrente [14].

O disjuntor a vácuo tem tido seu uso crescente em sistemas industriais e de distribuição de energia, tendo sido mais notadamente aplicado em [15]:

- (a) Motores de indução
- (b) Transformadores a óleo e tipo seco
- (c) Capacitores e reatores Shunt
- (d) Equipamentos especiais, tais como: transformadores para forno a arco.

Merece ser destacado que no estudo das sobretensões transitórias de chaveamento é interessante conhecer-se tanto a magnitude da onda de tensão transitória (TRV) como a taxa de crescimento desta tensão (RRRV), visto que, embora o disjuntor possa ser capaz de suportar o pico esperado da onda de tensão, pode ocorrer que a taxa de crescimento desta seja mais rápida que a taxa de crescimento da suportabilidade do dielétrico do volume do espaçamento entre os contatos e provoque um rompimento ("Breakdown"), com consequente recondução de corrente pelos contatos. Isto pode dar origem a uma sequência de abertura e fechamento elétrico dos contatos causando sobretensões transitórias perigosas. Como consequência, poderá ocorrer, por exemplo, o rompimento do isolamento de espira para espira em enrolamentos de motores e transformadores.

Numa operação de fechamento mecânico dos contatos, poderá haver também uma ruptura do dielétrico, dando origem a uma preignição dos contatos (Prestrike)\* com injeção de surtos de frente de onda no sistema, o que poderá ser tão severo quanto os surtos causados pelas reconduções. Os disjuntores a vácuo são capazes de interromper correntes de alta frequência, logo, o número de precondução (Prestrike) causados pelos mesmos é maior que aquele causado por outros tipos de disjuntores.

Uma vez que os testes de campo são dispendiosos e consomem muito tempo [15], os engenheiros de projeto têm se contentado com os resultados obtidos de simulações das condições de campo em modelos matemáticos ou analógicos. Neste sentido, métodos analíticos estão sendo crescentemente usados em conjunto com computadores digitais para os cálculos necessários. Um modelo matemático de interruptor a vácuo se faz necessário para que seja feita a programação para simulação de abertura e fechamento do mesmo, considerando os fenômenos de recondução e precondução de corrente, respectivamente.

Nas operações de abertura ou fechamento do disjuntor, devem ser considerados vários parâmetros que interagem nas operações, tais como a tensão de ruptura estática e dinâmica do dielétrico do espaço entre os contatos\*\*, a taxa de variação de corrente ( $di/dt$ ) fluindo através dos contatos, velocidade de fechamento e abertura dos contatos, tensão do sistema, etc.

---

\* Condução de corrente antes do contato metálico dos eletrodos do disjuntor.

\*\* A tensão de ruptura estática é definida como a tensão capaz de romper o dielétrico, sem que este esteja sob efeito de extinção do arco elétrico, enquanto a tensão de ruptura dinâmica leva em conta o efeito do arco, ou seja, o dielétrico é rompido quando ainda não se recuperou totalmente do período que esteve sujeito ao arco elétrico.

É necessário, ainda, que os parâmetros do sistema estejam representados o mais fielmente possível para que os resultados obtidos sejam confiáveis.

Em adição à representação do sistema, a fidelidade dos resultados depende, também, do método de cálculo utilizado. Neste trabalho, os cálculos de tensões e correntes no sistema são feitos pelo método de integração numérica "Trapezoidal". Este método numérico tem sido bastante utilizado em cálculos de transitórios eletromagnéticos [16,17], com a obtenção de bons resultados. Como todo método numérico, este método também apresenta problemas. O que merece mais atenção é o problema de oscilação numérica. Este, no entanto, é relativamente fácil de ser identificado e pode ser contornado alterando-se o sistema pela introdução de elementos passivos de circuito, que não tragam prejuízos consideráveis ao resultado, ou por artifícios matemáticos [18].

## 1.2 - OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho é estudar a causa das sobretensões transitórias de chaveamento, por disjuntores a vácuo, em circuitos com características indutiva e capacitiva, bem como a interação "Circuito-disjuntor". Ao longo deste trabalho, serão apresentados gráficos e tabelas que têm por finalidade ilustrar os fenômenos transitórios e mostrar algumas características inerentes ao disjuntor a vácuo em função de determinados parâmetros (próprios e externos).

No capítulo II, procura-se apresentar, em linhas gerais, os problemas de surtos de chaveamento em circuitos com características indutiva e capacitiva, suas causas e seus efeitos. Os casos onde a utilização do disjuntor a vácuo está caracterizada merecerão comentários à parte.

O capítulo III discute a formação do arco elétrico, no disjuntor a vácuo, as características de recuperação do dielétrico entre os contatos, além de apresentar um modelo matemático do perfil da tensão de ruptura dinâmica do dielétrico, seguindo a extinção do arco elétrico. O capítulo III contém resultados de simulações, para um determinado disjuntor a vácuo, cuja finalidade é mostrar a influência da distância entre os contatos e da velocidade térmica média das partículas de gás do volume entre os contatos, sobre o tempo de recuperação final do dielétrico, seguindo a extinção do arco. Contém ainda resultados que mostram os níveis de preignição (Prestrike) como função da velocidade de fechamento dos contatos, do ponto da curva de tensão onde os contatos partem e da tensão do sistema, numa operação de fechamento eletromecânico dos contatos.

No capítulo IV serão apresentados procedimentos computacionais para simulação de interrupção de corrente e energização de cargas, além da apresentação de resultados de simulações e análises dos resultados, enfocando o problema das reignições e preignições dos contatos como função das características do disjuntor empregado e dos parâmetros do sistema chaveado. O capítulo V contém um sumário de discussões do trabalho como um todo.

## CAPÍTULO II

### SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS CAUSADAS PELO CHAVEAMENTO DE CORRENTES INDUTIVAS E CAPACITIVAS POR DISJUNTORES A VÁCUO

#### 2.1 - INTRODUÇÃO

Conforme já foi previamente mencionado, seção 1.1, a causa básica das sobretensões transitórias causadas pelo chaveamento de disjuntores a vácuo tem sido a capacidade do mesmo em interromper correntes transitórias de alta frequência. Isto, no entanto, não ausenta outros tipos de disjuntores de também darem origem a sobretensões transitórias de chaveamento, como é de conhecimento geral.

Neste capítulo, porém, pretende-se mostrar como o disjuntor a vácuo interage com o restante do circuito de modo a causar os surtos de tensão, visto que o mesmo possui características que o difere dos demais, conforme será apresentado no capítulo III.

Nos circuitos com características indutivas, as sobretensões transitórias de chaveamento têm como causa básica a interrupção prematura de corrente, ou seja, interrupção fora do zero natural de corrente (corte de corrente).

Nos circuitos com características capacitivas, as

causas básicas das sobretensões transitórias são o reacendimento\* arco elétrico pela tensão de recuperação sobre os contatos do disjuntor, após uma interrupção de corrente, e as preignições.

## 2.2 - MECANISMOS DE CORTE DE CORRENTE

Antes de se iniciar o estudo das sobretensões transitórias devidas ao chaveamento de correntes indutivas por disjuntores a vácuo, faz-se necessário uma breve explanação envolvendo tanto os disjuntores como o fenômeno do corte de corrente, como segue:

O corte de corrente (ou do inglês "CHOPPING" de corrente), pode ser definido como a interrupção de uma corrente que foi abrupta e prematuramente levada a zero, ou seja, a corrente foi interrompida após ter sido levada a zero antes do seu zero natural. A figura 2.1 serve para ilustrar os mecanismos de interrupção sem corte e com corte de corrente.

São definidos dois mecanismos que podem provocar a passagem da corrente a zero, fora do seu zero natural, a saber:

- (a) Corte verdadeiro de corrente e
- (b) Corte virtual de corrente.

---

\*.reacendimento é definido como o restabelecimento da corrente no decorrer de um processo de interrupção de corrente, tal que o intervalo de tempo com corrente zero é maior ou igual a  $1/4$  de período correspondente à frequência nominal do sistema [19].

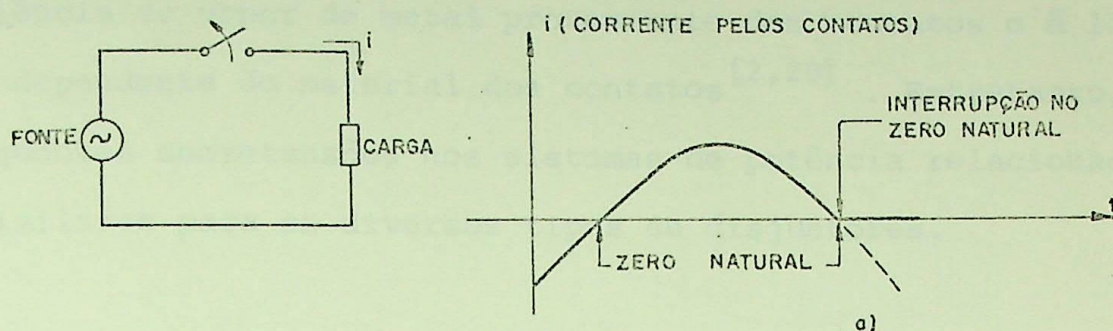


FIG. 2.1a - Mecanismo de Interrupção de Corrente sem corte de corrente.

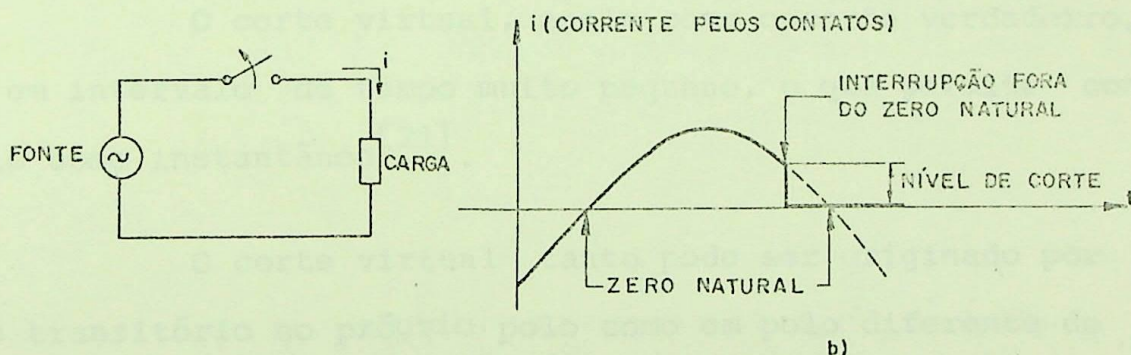


FIG. 2.1b - Mecanismo de interrupção de corrente com corte de corrente.

### 2.3 - CORTE VERDADEIRO DE CORRENTE

O mecanismo de corte verdadeiro de corrente é função das características do meio entre os contatos. Este mecanismo no disjuntor a vácuo é diferente daqueles encontrados em outros tipos de disjuntores. O corte de corrente nos disjuntores a óleo e a ar comprimido, por exemplo, surge de uma instabilidade na coluna de arco, ou seja, de uma deficiência das moléculas de gás ionizado<sup>[1]</sup>. Nos

disjuntores a vácuo, no entanto, este corte ocorre devido a uma deficiência de vapor de metal proveniente dos contatos e é largamente dependente do material dos contatos [2,20]. Entretanto, as conseqüentes sobretensões nos sistemas de potência relacionados são similares para os diversos tipos de disjuntores.

#### 2.4 - CORTE VIRTUAL DE CORRENTE

O corte virtual de corrente ocorre como uma conseqüência da superposição de uma corrente de alta frequência com a corrente à frequência do sistema, fluindo pelo arco elétrico, gerando um zero de corrente, com conseqüente interrupção pelo disjuntor.

O corte virtual, assim como o corte verdadeiro, ocorre em intervalo de tempo muito pequeno, o que permite considerá-lo como instantâneo [21].

O corte virtual tanto pode ser originado por fenômeno transitório no próprio polo como em polo diferente de um mesmo disjuntor. Quando o corte é originado pelo restabelecimento de corrente de um polo de um disjuntor tripolar, a abertura ocorre quase que simultaneamente nas três fases, por isso o corte trifásico também tem sido denominado de "Interrupção Trifásica Simultânea" [4].

Para o caso trifásico, a corrente que se sobrepõe à corrente à frequência do sistema fluindo através do arco tanto pode ser uma parte da corrente restabelecida, fluindo à alta frequência, como pode ser uma corrente induzida.

Na figura 2.2, é apresentado um circuito trifásico



simples, a fim de que se possa ilustrar o fenômeno do corte virtual originado por parte da corrente que se restabeleceu por um dos polos.

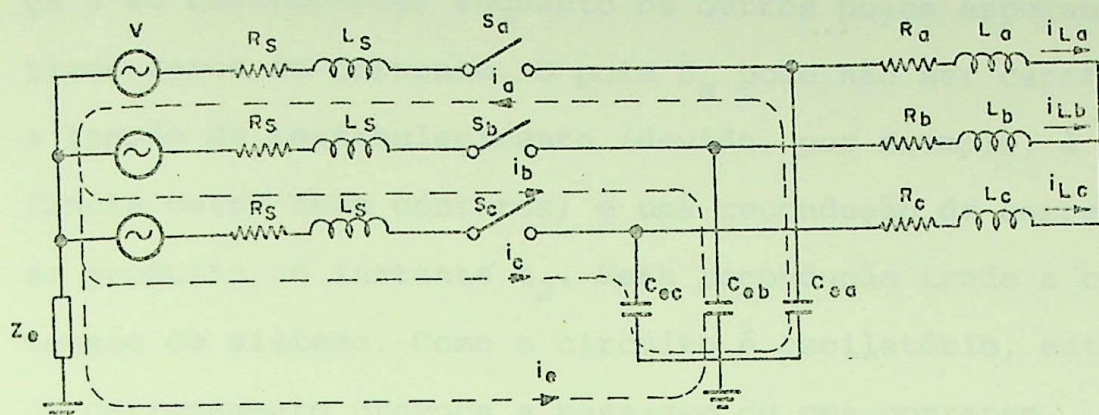


FIG. 2.2 - Circuito Simplificado para ilustrar o corte virtual, extraído da referência [21]

No circuito da figura 2.2, uma fonte trifásica e equilibrada, de tensão interna  $v$  e impedância  $R_s, L_s$ , alimenta uma carga  $R, L$  por intermédio de um disjuntor. A capacitância  $C_e$  é a capacitância equivalente para a terra nos terminais do disjuntor.

Suponha-se que a corrente na carga trifásica,  $i_{LA}$ ,  $i_{LB}$  e  $i_{LC}$ , está sendo interrompida pelo disjuntor  $S$  e que os contatos em todos os três polos se separam no instante  $t_k$  com respeito à onda de corrente, conforme pode ser visto na figura 2.3.

Seja o polo  $S_a$ , o primeiro a interromper sua corrente quando esta passa por zero no instante  $t_1$ . A tensão entre seus contatos começa a se restabelecer enquanto os outros polos esperam seus respectivos zeros de corrente. O polo  $S_a$  pode não ser capaz de suportar a tensão de restabelecimento (devido, por exemplo, à pequena distância entre seus contatos) e uma recondução de corrente poderá se produzir no instante  $t_2$ . Esta recondução tende a carregar  $C_e$  à tensão do sistema. Como o circuito é oscilatório, este processo de carregamento provoca a passagem de uma corrente transitória  $i_a$  através do polo  $S_a$  do disjuntor.

As componentes da corrente transitória,  $i_b$  e  $i_c$ , retornam pelos polos  $S_b$  e  $S_c$ , e uma parte,  $i_e$ , fluirá através do retorno pela Terra. A soma da componente da corrente de restabelecimento,  $i_c$ , e da corrente de carga da fase c pode passar por zero, por exemplo, no instante  $t_3$ . O polo  $S_c$  pode cortar a corrente neste instante. Para a carga, estes fenômenos aparecem como um corte de corrente de carga em seu valor instantâneo  $i_{vc}$ . Em se tratando de carga indutiva, a energia eletromagnética armazenada nas indutâncias será transferida às capacitâncias equivalentes do lado da carga, podendo dar origem a grandes sobretensões.

Sabe-se que o interruptor a vácuo tem excepcional capacidade de recuperação de suas propriedades dielétricas. Entretanto, existem determinadas operações de abertura dos contatos em que estes partem imediatamente antes de um zero de corrente e a interrompe neste zero. Desta forma, os contatos encontram-se ainda muito

próximos, de tal maneira que a tensão de recuperação do sistema, que normalmente tem alta taxa de crescimento, pode vencer o dielétrico do polo que interrompeu a corrente e promover o restabelecimento da corrente à alta frequência pelos contatos. Embora a corrente de reignição seja normalmente de alta frequência, sua interrupção pode não ser um problema para o disjuntor a vácuo, já que o mesmo tem capacidade de interrupção em alta frequência.

Assim, poderá se caracterizar o problema das múltiplas aberturas e fechamentos elétricos dos contatos.

É oportuno assinalar que o fenômeno do corte virtual, em circuitos práticos (reais), é limitado. Não somente os parâmetros do circuito devem se encontrar dentro de uma faixa de valores muito limitada, como há também condições extremamente restritivas relacionando a suportabilidade do dielétrico e o valor da tensão na qual se produz o restabelecimento de corrente. Como exemplo, um alto valor de capacitância  $C_e$  é necessário para gerar uma corrente de reignição suficientemente alta a fim de gerar um corte virtual. Porém, com o aumento de  $C_e$ , a frequência da tensão de restabelecimento, que é dada por  $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ , diminui, de tal maneira que pode se tornar insuficiente para vencer a suportabilidade do dielétrico, tornando improvável uma recondução de corrente. Portanto, do ponto de vista prático, o corte virtual está limitado a certos circuitos específicos.

O fenômeno do corte virtual de corrente, embora pouco frequente, existe. Foi a partir de problemas causados pelo mesmo que se deu início a investigações que tornaram possível

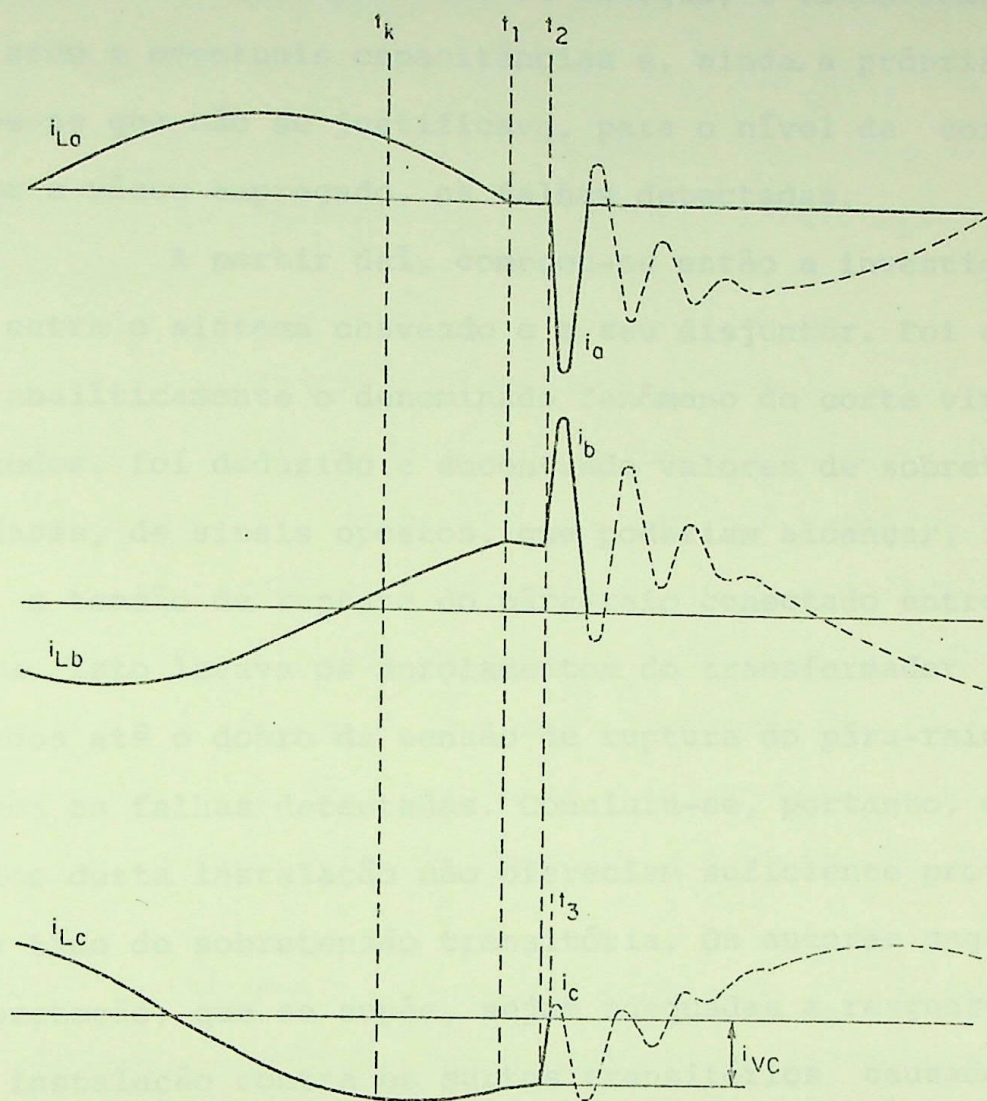


FIG.2.3 - Ondas de corrente ilustrando o fenômeno do corte virtual.

detectá-lo, através de análise teórica [4,6,22]. Os estudos de Moore e Blalok [22], e de Panck e Fehrle [6], por exemplo, começaram a partir de falhas detectadas no isolamento de alguns tipos de transformadores de forno a arco. Estudando cuidadosamente o circuito elétrico en

volvendo o sistema de suprimento de energia, o transformador do forno a arco e eventuais capacitâncias e, ainda, a própria carga, verificou-se que não se justificava, para o nível de corte de disjuntor a vácuo empregado, as falhas detectadas.

A partir daí, começou-se então a investigar a interação entre o sistema chaveado e o seu disjuntor. Foi então detectado analiticamente o denominado fenômeno do corte virtual. Em seus estudos, foi deduzido e encontrado valores de sobretensões, em duas fases, de sinais opostos, que poderiam alcançar, individualmente, a tensão de ruptura do pára-raio conectado entre a fase e a terra. Isto levava os enrolamentos do transformador a serem solicitados até o dobro da tensão de ruptura do pára-raio, causando-lhes as falhas detectadas. Concluiu-se, portanto, que os pára-raios desta instalação não ofereciam suficiente proteção para estes tipo de sobretensão transitória. Os autores sugeriram, então, proteção, que se supõe, sejam adequadas a resguardar este tipo de instalação contra os surtos transitórios causados por corte virtual de corrente (p.ex., circuito R-C série, paralelos aos enrolamento de alta tensão do transformador).

Após definidos os tipos de mecanismo de corte de corrente, apresenta-se, a partir deste ponto, o processo de geração das sobretensões transitórias originadas por operações de chaveamento.

## 2.5 - SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS CAUSADAS POR CORTE DE CORRENTE INDUTIVA EM CIRCUITOS OSCILATÓRIOS

Nesta seção, será apresentado o mecanismo básico de geração de sobretensão transitória, originado na interrupção, fora do zero natural, de corrente indutiva. Será dada ênfase às pequ

nas correntes indutivas, tais como correntes de excitação de transformadores e motores a vazio e reatores. Isto se justifica porque estas correntes representam cargas altamente indutivas e os seus valores são tais que permitem aos disjuntores interrompê-las em níveis consideráveis.

As sobretensões transitórias causadas por interrupção de corrente indutiva fora do seu zero natural (corte de corrente) podem ser brevemente explicadas da seguinte maneira:

Ao se cortar a corrente de carga que flui pelos contatos do disjuntor, a energia magnética existente na indutância da carga no momento do corte, e que seria trocada com a fonte, passa a carregar as capacitâncias paralelas do sistema em forma de energia capacitiva (eletrostática), gerando as sobretensões transitórias.

Os fenômenos que ocorrem durante a interrupção de pequenas correntes indutivas, podem ser mais claramente entendidos com a utilização de um circuito bastante simples.

A figura 2.4 mostra um diagrama simples de circuito para interrupção de pequenas correntes indutivas [23]. Com a capacitância  $C_2$  e a indutância  $L_2$ , o circuito é adequado para a descrição de transformadores, reatores e motores. Assume-se, em primeiro lugar, que  $L_2$  representa uma indutância não saturável.

Quando os contatos do disjuntor iniciam a separação, forma-se um arco elétrico entre os mesmos. A medida que a corrente pelo arco aproxima-se de zero, diminui a vaporização de partículas dos eletrodos. Isto pode dar origem a uma oscilação da corrente, como um resultado de sua interação com o sistema. Poderá haver, portanto, uma

instabilidade da corrente. As duas capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  (figura 2.4a) descarregam-se mutuamente por meio de uma seção de linha com indutância  $L_3$ . As indutâncias  $L_1$  e  $L_2$ , normalmente bem maiores que  $L_3$ , não permitem praticamente nenhum fluxo de corrente pelas mesmas, visto que a oscilação de corrente ocorre em altas frequências. Por conseguinte, a oscilação de corrente ocorre na frequência dada por:

$$f_3 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_3 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}}$$

Durante a oscilação em alta frequência, a corrente poderá passar por zero, ocasião em que poderá ser interrompida pelo disjuntor. Isto equivale a um corte instantâneo da corrente  $i$  (figura 2.4b) que flui pelo arco.

Está claro, das considerações anteriores, que o nível da corrente cortada é afetada não somente pelas características do disjuntor, mas, em grande parte, também pelos parâmetros interagindo com a corrente (neste caso, pelos parâmetros  $L_3$ ,  $C_1$  e  $C_2$  do diagrama simplificado da figura 2.4a).

Seja  $i_a$  a corrente que passa pelo indutor de indutância  $L_2$  no momento do corte de corrente e  $v_a$  o valor instantâneo da tensão  $v_2$  sobre a carga. Se forem desprezadas todas as perdas, o lado desconectado conterá a energia  $E = \frac{1}{2} L_2 i_a^2 + \frac{1}{2} C_2 v_a^2$ . Esta energia  $E$  terá uma frequência de oscilação dada por:

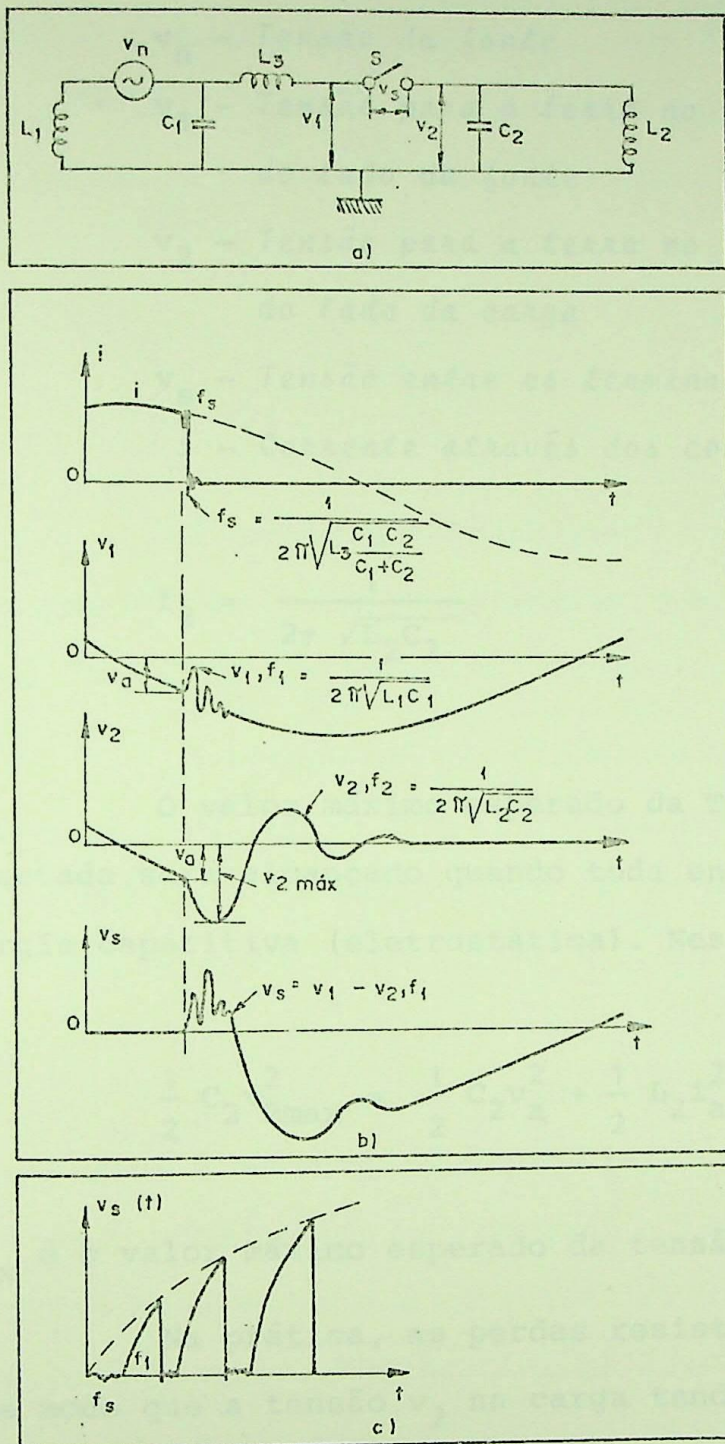


FIG.2.4 - Diagrama simplificado e curvas de corrente e Tensão Transitórias para mostrar o fenômeno do corte de corrente indutiva.

- a. Diagrama Simplificado
- b. Curvas de Corrente e Tensão
- c. Curva de Tensão de restabelecimento do sistema (—) versus curva de recuperação dielétrica(---) do disjuntor para o caso de recondução de corrente.



$v_n$  - Tensão da fonte

$v_1$  - Tensão para a terra no terminal do disjuntor do lado da fonte

$v_2$  - Tensão para a terra no terminal do disjuntor do lado da carga

$v_s$  - Tensão entre os terminais do disjuntor

$i$  - Corrente através dos contatos do disjuntor.

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_2}}$$

O valor máximo esperado da Tensão da carga indutiva desconectada será alcançado quando toda energia for transformada em energia capacitiva (eletrostática). Neste momento:

$$\frac{1}{2} C_2 v_{2\max}^2 = \frac{1}{2} C_2 v_a^2 + \frac{1}{2} L_2 i_a^2 \quad (2.1)$$

onde  $v_{2\max}$  é o valor máximo esperado da tensão.

Na prática, as perdas resistivas estão sempre presentes, de modo que a tensão  $v_2$  na carga tende a decair a zero, em intervalo de tempo que depende, de maneira complexa, da constante de tempo do circuito (RC para circuito RLC paralelo e L/R para circuito RLC série).

No momento do corte de corrente, a Tensão  $v_1$  do lado da fonte do disjuntor é praticamente igual a  $v_a$ , visto que a tensão do arco é geralmente desprezível. A tensão  $v_1$ , seguindo o cor

te de corrente, tende para Tensão do suprimento,  $v_n$ , variando com a frequência  $f_1$  dada pela equação seguinte. Note que esta oscilação ocorre em torno  $v_n$ , que é a tensão mantida pela fonte.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$$

A componente transitória do lado da fonte é normalmente amortecida pelas resistências presentes nas altas frequências, como pode ser visto na figura 2.4b.

A tensão sobre os contatos, seguindo a abertura dos mesmos, é dada por  $v_s = v_1 - v_2$ . Usualmente,  $v_{2max}$  é maior do que  $v_{1max}$ , porém, a característica da carga, governada principalmente por sua impedância de surto, é que determina o valor de pico de  $v_2$ .

As suposições anteriores foram grandemente simplificadas para a determinação quantitativa de  $v_{2max}$ . No caso de transformador a núcleo de ar, no qual a indutância é constante, praticamente toda energia é devolvida ao sistema após o corte de corrente magnetizante. Entretanto, na maioria dos casos, não existe um valor verdadeiro de indutância, uma vez que não há uma relação linear entre o campo e o fluxo magnético, de modo que se considerou um valor  $L_2$  como uma indutância instantânea equivalente da carga, a qual faz  $\frac{1}{2} L_2 i_a^2$  igual à energia aplicada na magnetização no momento do corte de corrente.

Para se permitir o uso da fórmula familiar da energia magnética ( $\frac{1}{2} L_2 i_a^2$ ), introduz-se o rendimento magnético [24] ou

eficiência de energia magnética<sup>[23]</sup>,  $\eta_m$ , que é definido como a relação entre a energia magnética obtida durante a desmagnetização e a energia magnética aplicada durante a magnetização. Como consequência, a equação (2.1) torna-se:

$$\frac{1}{2} C_2 v_{2\max}^2 = \frac{1}{2} C_2 v_a^2 + \frac{1}{2} \eta_m L_2 i_a^2 \quad (2.2)$$

É preciso entender que  $\eta_m$  não é um valor constante, mas depende, de uma maneira complexa, de:

- . não linearidade do material magnético,
- . grau de magnetização do núcleo,
- . frequência natural de oscilação do circuito de carga.

O valor de  $\eta_m$  é próximo da unidade no caso de motores, reatores e transformadores alimentando reatores a núcleo de ar, enquanto em modernos transformadores a vazio tem-se  $\eta_m$  da ordem de 0,3 a 0,5<sup>[23,24]</sup>. Isto reduz consideravelmente o nível das sobretensões após o corte da corrente.

A fim de ilustrar a dependência da energia recuperável do núcleo de um indutor com a frequência, considera-se a figura 2.5, na qual pode-se observar claramente esta dependência. Considere-se que a corrente foi cortada em seu valor de pico  $i_p$ .

A energia recuperável a 60 [Hz] está representada pela área  $E_1$  da figura 2.5. Para frequências maiores que 60 [Hz], como é o caso geral de frequências naturais de cargas, o laço de histerese

torna-se mais amplo (curva 2 da figura 2.5) e a energia magnética recuperável menor, conforme está representada pela área  $E_2$  da figura 2.5.

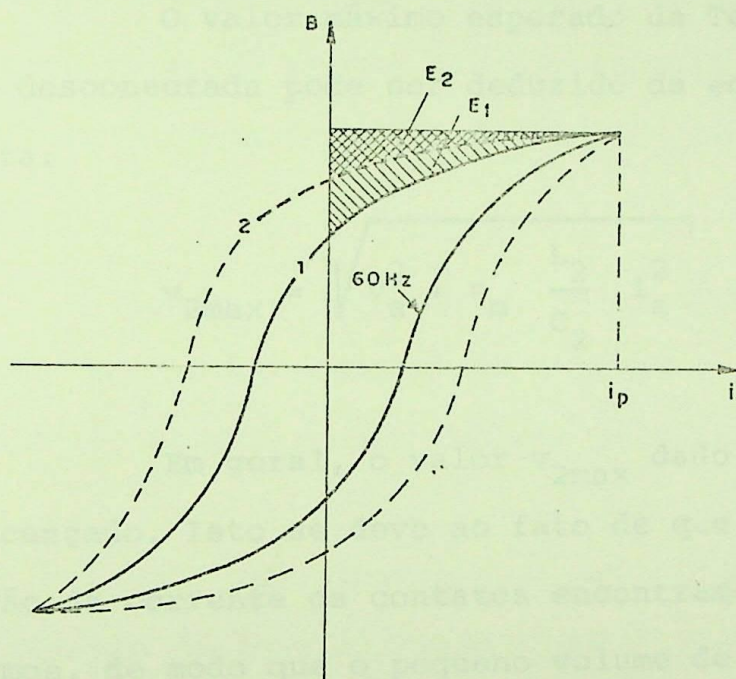


FIG.2.5 - Energia recuperável do núcleo, extraído da referência [25].

A coincidência dos extremos das curvas 1 e 2 da figura, indica que o pico da corrente transitória coincide com o pico da corrente contada. Isto, no entanto, não impõe interpretações e construiu-se as curvas desta forma apenas para ressaltar a influência da frequência da corrente no laço de histerese.

O valor máximo esperado da Tensão nos terminais da carga desconectada pode ser deduzido da equação (2.2), de onde resulta:

$$v_{2\max} = \sqrt{v_a^2 + \eta_m \frac{L_2}{C_2} i_a^2} \quad (2.3)$$

Em geral, o valor  $v_{2\max}$  dado pela equação (2.3) não é alcançado. Isto se deve ao fato de que no instante de interrupção da corrente os contatos encontram-se normalmente muito próximos, de modo que o pequeno volume de dielétrico entre os contatos em separação pode não oferecer suficiente resistência à tensão de recuperação transitória do sistema, imposta aos contatos. As curvas (c) da figura 2.4, mostram este processo de concorrência entre a tensão suportável pelo dielétrico que recupera suas características e a tensão de recuperação transitória do sistema imposta aos contatos. A ruptura do dielétrico ocorre quando as curvas se encontram.

A frequência com que a tensão transitória imposta aos contatos varia é praticamente igual a  $f_1$ , visto que  $f_2$ , na

maioria dos casos, é bem menor que  $f_1$ , de forma que a tensão transitória na carga, para o pequeno tempo de observação do fenômeno, pode ser considerada constante em relação à tensão transitória do lado da fonte.

A corrente que flui pelos contatos imediatamente após a ruptura do dielétrico, é normalmente de alta frequência ( $f_3$ ). Seu nível, no entanto, é baixo, visto que  $L_3, C_1$  e  $C_2$  são geralmente muito pequenos. Logo, em se tratando de disjuntor a vácuo, o qual tem habilidade em interromper correntes transitórias de alta frequência, esta corrente poderá ser interrompida em um de seus zeros, ou até mesmo fora do zero, dependendo do seu nível e de sua frequência.

Assim, o processo de interrupção e restabelecimento da corrente poderá se repetir até o momento em que o disjuntor seja capaz de suportar a tensão imposta pelo sistema aos seus contatos.

Vale ressaltar que, em geral, o processo de restabelecimento do arco elétrico ajuda a reduzir a energia magnética armazenada no circuito desconectado. Portanto, o pico esperado da tensão tende a diminuir ao longo do processo repetitivo de fechamento e abertura elétrica dos contatos. Há situações muito especiais, no entanto, em que a tendência é de um armazenamento de energia na carga, provocado pelo restabelecimento da corrente pelos contatos. Neste caso, o pico esperado de Tensão tende a aumentar até um certo número de recondução de corrente, para em seguida decair. Este processo é denominado de "escalamento" da tensão e será apresentado em seção posterior.

Até aqui, nas análises feitas no sentido de mostrar o mecanismo de geração das sobretensões transitórias que aparecem durante uma interrupção de corrente indutiva, considerou-se que o corte e corrente ocorre de maneira instantânea (corte vertical), como é frequente nos disjuntores. Esta é a condição mais pessimista, visto que o aumento do tempo em que a corrente é levada a zero, comparado com o período de oscilação natural da carga, implica na redução do valor de pico máximo esperado, como mostra a curva ilustrativa da figura 2.5.a [38].

Observa-se, nesta curva, que para um tempo de decaimento a zero da corrente,  $t_c$ , entre 0 (zero) e  $1/4$  (um quarto) do período de oscilação natural da carga,  $T$ , praticamente não há redução da sobretensão, mas quando  $t_c$  excede  $T/4$ , o pico da tensão transitória da carga diminui rapidamente.

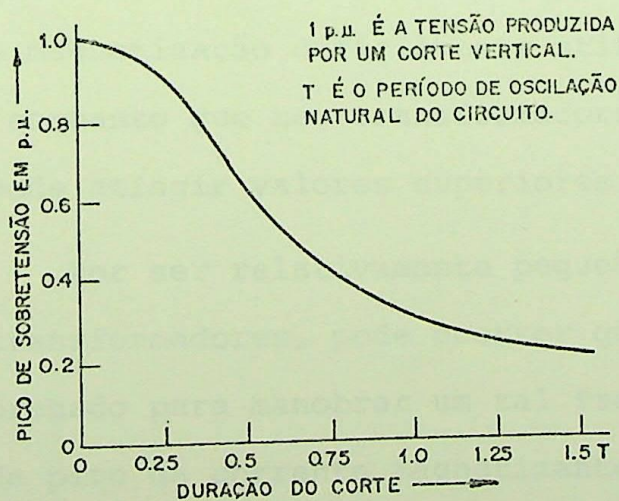


FIG. 2.5 a - Diminuição da sobretensão transitória quando a interrupção de corrente ocorre em tempo finito.

Durante todo o equacionamento nesta seção utilizou-se um valor instantâneo de indutância (L) para indicar que em determinado instante, quando flui uma corrente  $i$  pelo indutor, a energia magnética contida neste é equivalente a  $\frac{1}{2} L i^2$ . Entretanto, vale lembrar que os indutores construídos com núcleo de material ferromagnético têm indutâncias que se alteram com a variação da corrente fluindo pelos mesmos.

Neste trabalho, devido às dificuldades impostas à simulação digital ao se considerar uma indutância  $L$  variando durante o processo transitório, todos os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  serão considerados invariantes com a corrente e com a frequência durante um processo de simulação de chaveamento.

### 2.5.1 - CHAVEAMENTO DE TRANSFORMADORES À VAZIO

O transformador a vazio constitui-se numa carga altamente indutiva. Nos transformadores com potência acima de 1MVA a corrente de magnetização dificilmente atinge 2% da corrente nominal [1], enquanto que nos transformadores de menor potência esta corrente pode atingir valores superiores a 2%.

Por ser relativamente pequena a corrente de magnetização dos transformadores, pode ocorrer que o nível de corte do disjuntor empregado para manobrar um tal transformador esteja acima do valor de pico da corrente magnetizante do transformador, havendo, pois, a possibilidade de corte no valor de pico da corren



te.

Suponha-se que o circuito do transformador possa ser representado pela indutância  $L_2$  e pela capacitância  $C_2$  da figura 2.4a, sendo  $L_2$  sua indutância magnetizante equivalente e  $C_2$  a capacitância paralela ao seu enrolamento, representando as capacitâncias parasitas ao longo do enrolamento, capacitância dos acessórios, barramentos e cabos<sup>[14]</sup>. Seja  $i_p$  a corrente de pico instantânea cortada, em ampéres. Desta forma, a tensão nos terminais do enrolamento do transformador é nula e a energia magnética no núcleo, desprezando as perdas, é dada por:

$$W_{el} = \frac{1}{2} L_2 i_p^2 \quad (2.4)$$

A energia magnética disponível no núcleo do transformador, para ser transformada em energia capacitiva, é dada por:

$$W_{ed} = \eta_m \frac{1}{2} L_2 i_p^2 \quad (2.4.1)$$

onde  $\eta_m$  é o rendimento magnético do transformador.

Nas equações (2.4) e (2.4.1),  $L_2$  representa a indutância equivalente do transformador correspondente ao pico da corrente magnetizante.

Como já foi devidamente apresentado na seção anterior, seguindo o corte de corrente há uma oscilação no circuito desconectado ( $L_2, C_2$ ) ao se carregar  $C_2$ . Quando toda energia magnética disponível na indutância  $L_2$  ( $W_{ed}$ ) for transformada em energia eletrostática ( $W_{ee}$ ) na capacitância  $C_2$ , tem-se:

$$W_{ee} = \frac{1}{2} C_2 v_{2max}^2 \quad (2.5)$$

onde  $v_{2max}$  é o valor máximo que poderá alcançar a tensão nos terminais do enrolamento do transformador.

Igualando-se as equações (2.4.1) e (2.5) tem-se:

$$v_{2\max} = \sqrt{\eta_m \frac{L_2}{C_2}} \cdot i_p \quad (2.6)$$

ou

$$v_{2\max} = \sqrt{\eta_m} Z_o i_p \quad (2.7)$$

Na equação (2.7),  $Z_o = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$  representa a impedância de surto do transformador.

Nota-se na equação (2.7), que  $v_{2\max}$  independe da tensão do sistema, dependendo apenas do rendimento magnético e dos parâmetros do circuito.

É de se esperar ainda que uma diminuição no valor de  $C_2$  na equação (2.6) resulte num aumento do valor de pico  $v_{2\max}$  calculado pela referida equação. Esta é, no entanto, uma idéia enganosa, já que a diminuição de  $C_2$  na equação (2.6) resulta num aumento da frequência natural do circuito, dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}},$$

tendo como consequência um aumento (alargamento) do laço de histerese, conforme foi mostrado na seção anterior, o que resulta numa diminuição da energia magnética disponível.

A fim de se ter uma sensibilidade numérica, considera-se um transformador da classe 15 [kV], onde  $L_2$  é tipicamente 10 [H] e  $C_2$  é igual 4000 [pF], com resultante  $Z_o$  igual a 50.000 $\Omega$  [26].

De acordo com a equação (2.7), e considerando que  $\eta_m$  para transformadores a vazio está entre 0,3 e 0,5, o pico de tensão esperado, por ampère cortado, estará entre 27,5 [kV] e 35,5 [kV].

Estes picos teóricos esperados de tensão podem não ser alcançados, pelas seguintes razões:

- . Limitação da Tensão de recuperação transitória por ruptura do dielétrico do disjuntor e
- . Rompimento do dielétrico do meio em que se encontra o equipamento, em seu ponto mais fraco.

Dos diversos trabalhos publicados<sup>[1,26,27]</sup> a cerca de interrupção de "Corrente de Excitação" de transformadores a vazio, conclui-se que as sobretensões transitórias geradas por corte de corrente não devem ser consideradas perigosas para os transformadores, a menos que a frequência de chaveamento seja alta (mais de uma vez por semana) ou, para transformadores da classe 15 [kV], que o BIL seja maior ou igual a 90 [kV]<sup>[26]</sup> (por exemplo, para certos transformadores a seco).

Nos transformadores trifásicos, a interrupção da corrente transitória de magnetização pode ser uma operação perigosa. Isto se justifica porque esta corrente tem valor de pico

normalmente alto e, na ocorrência do fenômeno do corte virtual, poderá ser cortada uma alta corrente fluindo pela indutância do transformador, ocasionando sobretensão transitória mais elevada que a que resultaria no corte de corrente magnetizante permanente. É sabido que a desconexão de transformadores durante o período transitório de energização com religamento logo a seguir, poderá resultar em altos valores de corrente. Isto depende do fluxo remanente no núcleo e do ponto da curva de Tensão no momento do restabelecimento de corrente pelos contatos do disjuntor [34]. Conclui-se, portanto, que deve ser evitada qualquer operação de abertura dos polos de um disjuntor de transformador, especialmente trifásico, cuja corrente magnetizante ainda se encontre no período transitório, ("Inrush Current").

#### 2.5.2 - CHAVEAMENTO DE REATORES PARALELO

Os reatores paralelos (SHUNT) são utilizados em circuitos de transmissão de energia elétrica para o controle de reativo. Eles podem ser conectados diretamente à linha mas, muito frequentemente, estão localizadas no enrolamento terciário de 13,8 [KV] de um transformador [26].

Por requererem variação com as condições de carga, os reatores são algumas vezes chaveados frequentemente. Sabe-se que o disjuntor a vácuo tem um desgaste dos contatos bem inferior aos demais tipos de disjuntores, principalmente porque tem um tempo de manutenção do arco elétrico inferior. Uma vez que a impedância de surto do reator não é tão alta, de modo a causar uma grande sobretensão (embora o rendimento magnético de reatores seja próximo à unidade) quando ocorre um corte de corrente,

esta é considerada uma boa aplicação para este tipo de disjuntor. Está implícito nestes comentários que em certos casos o disjuntor não limita a sobretensão transitória por não permitir a ruptura do seu dielétrico. Estes casos poderão ser muitos, dependendo da frequência de chaveamento.

Os reatores paralelos são algo semelhantes a transformadores a vazio, tendo, porém, uma menor indutância. Uma indutância menor significa menos energia magnética armazenada. O reator a núcleo de ar é o que requer mais preocupação no que diz respeito à geração de sobretensão transitória, já que praticamente toda sua energia é recuperável, e tem uma capacitância menor que os outros correspondentes a núcleo de ferro e, consequentemente, uma maior impedância de surto.

### 2.5.3 - CHAVEAMENTO DE GRANDES MOTORES

O chaveamento de grandes motores por disjuntores a vácuo tem merecido atenção com relação à geração de surtos de tensão transitória.

A resistência do isolamento dos motores é menor que a dos transformadores da mesma classe de tensão, porém, como a impedância de surto é consideravelmente menor, são esperadas menores sobretensões.

De experiências práticas<sup>[28]</sup>, as sobretensões mais elevadas são geradas na interrupção de correntes de partida, devido ao baixo fator de potência neste regime de operação. Para esta corrente alta na partida do motor espera-se que o nível de corte do disjuntor seja pequeno, com consequente pequena Tensão de re-

cuperação transitória. No entanto, pode ocorrer o fenômeno de corte virtual de corrente pelo disjuntor, com corte de corrente em nível consideravelmente alto, fazendo aparecer grandes sobretensões transitórias.

Devido às capacitâncias relativamente pequenas dos motores, os cabos entre o motor e o disjuntor têm grande influência na frequência dos transitórios, visto que suas capacitâncias são mais significantes que as capacitâncias dos enrolamentos dos motores.

Diversos trabalhos têm sido publicados [7,9,28,29], mostrando resultados de experiências práticas e análises teóricas e todos são unânimes em que a interação "circuito-disjuntor a vácuo" pode dar origem a surtos de tensão que, principalmente pela repetitividade, podem danificar o isolamento dos enrolamentos do motor. A repetitividade dos surtos deve-se à grande capacidade do disjuntor a vácuo em interromper correntes transitórias de alta frequência.

## 2.6 - CHAVEAMENTO DE CIRCUITOS CAPACITIVOS

O chaveamento de circuitos capacitivos, tais como uma linha longa a vazio, um cabo isolado ou um banco de capacitores, associados a indutores, pode representar um sério problema de sobretensão. Surtos transitórios de alta tensão, experimentados durante a energização de capacitores paralelos, têm sido apresentados pela literatura [31,30].

Visando abordar o problema de maneira simples,

considere-se o circuito da figura 2.6, com fonte de tensão  $v$ , sujeito a uma operação de abertura do disjuntor  $S$ , quando a corrente passa por zero. A indutância  $L$  é a indutância equivalente da fonte e  $C$  representa a carga. A tensão  $v$  da fonte é dada por:

$$v = V_m \cos \omega t,$$

onde  $V_m$  é a Tensão de pico da fonte e  $\omega$  a sua frequência angular.

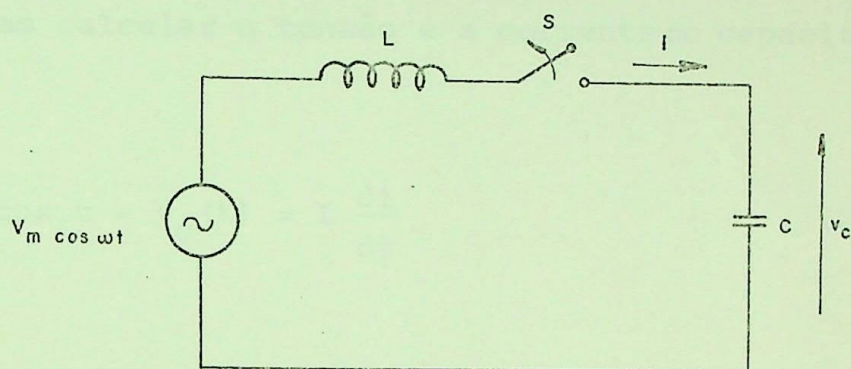


FIG. 2.6 - Circuito para análise de transitório de chaveamento.

Visto que o circuito é capacitivo, a corrente estará adiantada de  $90^\circ$  em relação à Tensão no capacitor, ou seja, quando a corrente é interrompida no seu ponto zero, a Tensão terá alcançado seu valor de pico  $V_m$ .

Supondo-se que a corrente seja interrompida no ponto  $t_{I1}$  da curva da figura 2.7, a tensão no capacitor, a partir deste instante, permanecerá igual a  $-V_m$  (não considerando queda de

Tensão em L). Isto pode ser visualizado na figura 2.7b.

Como se observa na figura 2.7b, decorrido meio ciclo (à frequência da fonte) da interrupção de corrente a tensão imposta pelo circuito aos contatos do disjuntor é o dobro da tensão no capacitor, ou seja,  $2V_m$ . Caso o dielétrico do espaço entre os contatos seja incapaz de suportar esta tensão, haverá reacendimento da corrente pelos contatos (ponto  $t_{R1}$  das curvas da figura 2.7). A partir daí, pode-se tirar as seguintes equações do circuito, as quais permitem calcular a tensão e a corrente no capacitor:

$$V_m \cos \omega t - v_c(t) = L \frac{di}{dt} \quad (2.8)$$

e

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int i dt + v_c(0) \quad (2.9)$$

substituindo-se a equação (2.9) na equação (2.8), vem:

$$V_m \cos \omega t - \frac{1}{C} \int i dt - v_c(0) = L \frac{di}{dt} \quad (2.10)$$

Considerando-se que o tempo de observação desejado para análise do fenômeno transitório é muito pequeno, uma vez que em circuitos práticos os transitórios são altamente amortecidos, e tendo em vista que a Tensão da fonte passa no seu valor máximo,  $V_m$ , no instante do reacendimento da corrente pelos contatos, a equação (2.10) torna-se:



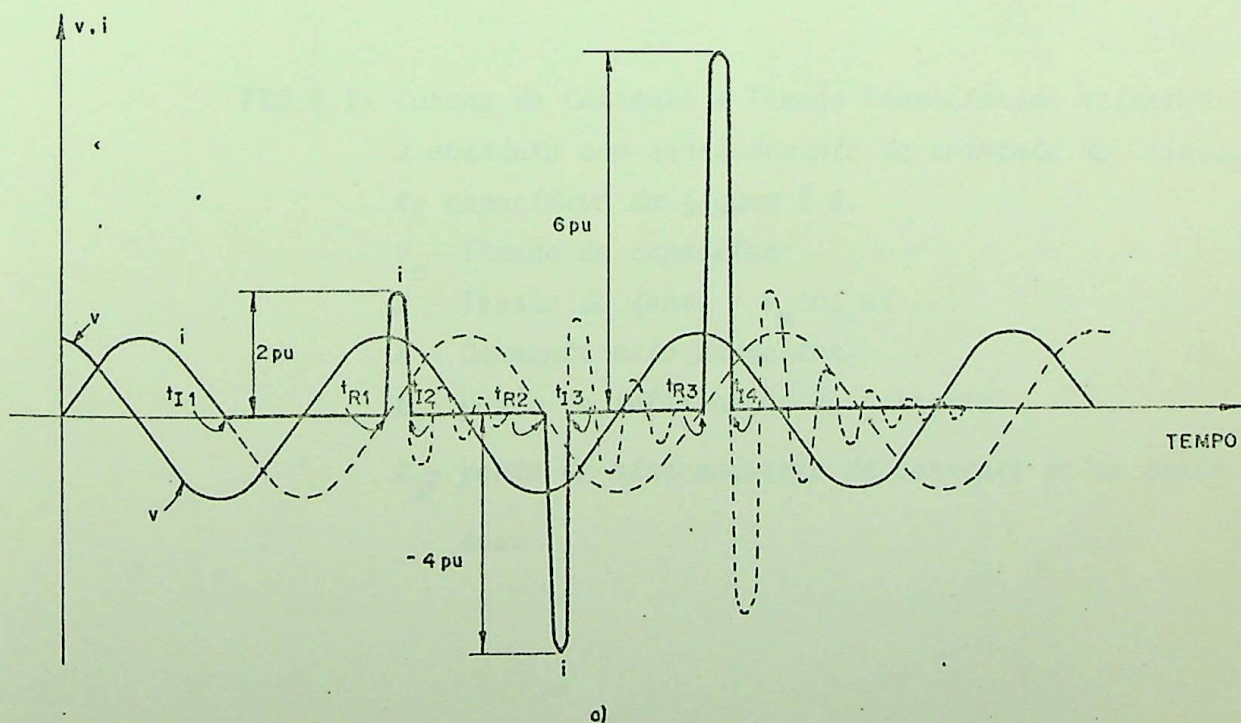
$$v_m - v_c = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{c} \int idt \quad (2.11)$$

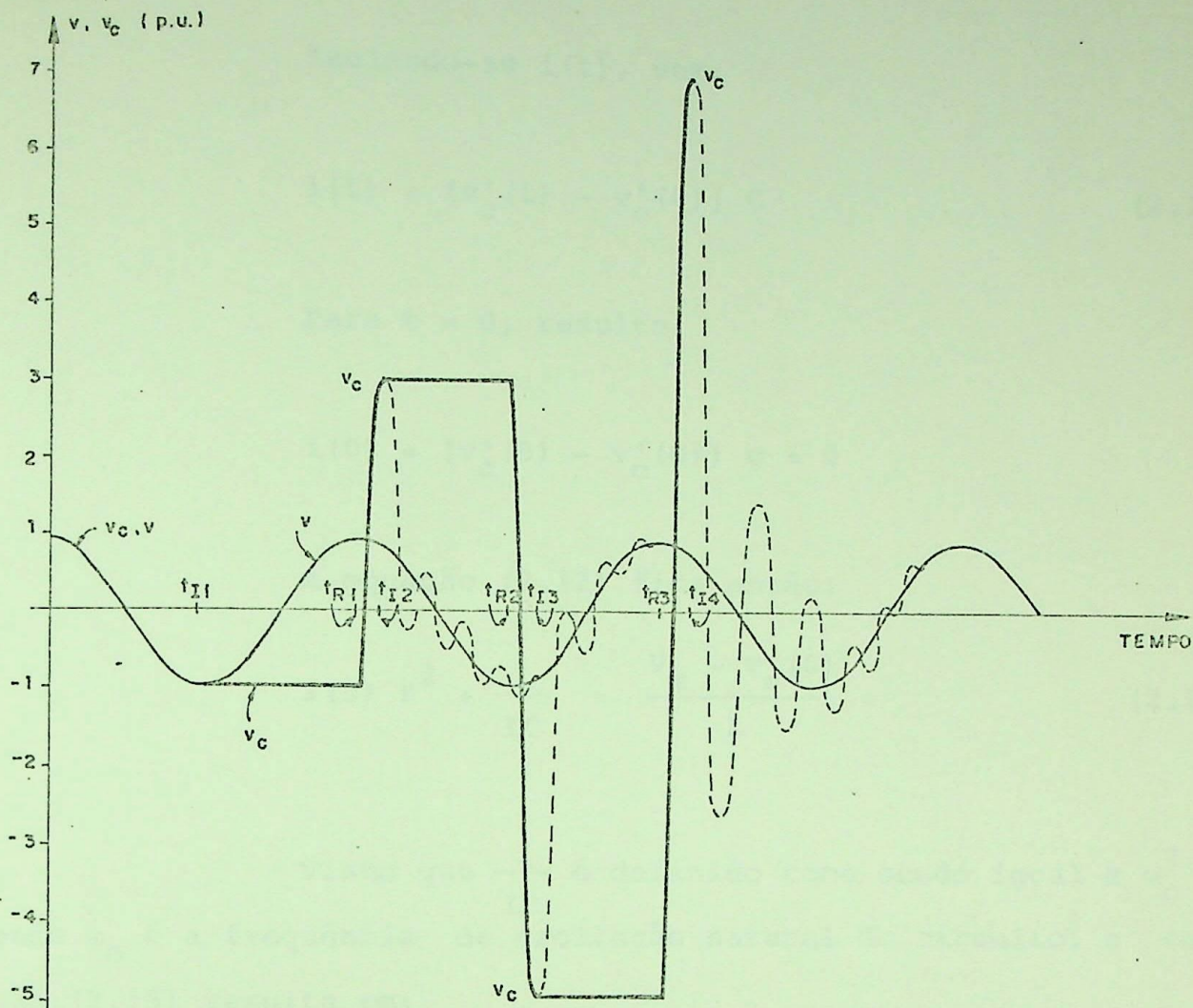
Utilizando-se o método da transformada da Laplace para resolver a equação diferencial linear (2.11), vem:

$$\frac{v_m - v_c(0)}{s} = LsI(s) - Li(0) + \frac{1}{Sc} I(s) \quad (2.12)$$

Derivando-se a equação (2.9), com a finalidade de encontrar  $i(0)$ , tem-se:

$$v'_c(t) = \frac{1}{c} i(t) + v'_c(0) \quad (2.13)$$





b)

FIG.2.7- Curvas de Corrente e Tensão Transitórias referentes à abertura com reacendimento de corrente do circuito capacitivo da figura 2.6.

$V_c$  - Tensão no capacitor

$V$  - Tensão da fonte =  $V_m \cos \omega t$

$i$  - Corrente pelo capacitor

$t_I$  - ponto de interrupção de corrente

$t_R$  - ponto de reacendimento da corrente pelos contatos.

Isolando-se  $i(t)$ , vem:

$$i(t) = [v'_c(t) - v'_c(0)] C \quad (2.14)$$

Para  $t = 0$ , resulta:

$$i(0) = [v'_c(0) - v'_c(0)] c = 0$$

A equação (2.12) fica então:

$$I(s) S^2 + \frac{1}{LC} = \frac{V_m - v_c(0)}{L} \quad (2.15)$$

Visto que  $\frac{1}{LC}$  é definido como sendo igual a  $\omega_0^2$ , onde  $\omega_0$  é a frequência de oscilação natural do circuito, a equação (2.15) resulta em:

$$I(s) = \frac{V_m - v_c(0)}{L} \cdot \frac{1}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2.16)$$

Anti transformando-se a equação (2.16), encontra-se a corrente em função do tempo, dada por:

$$i(t) = \frac{V_m - v_c(0)}{L\omega_0} \text{sen } \omega_0 t \quad (2.17)$$

Uma vez que  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , a equação (2.17) pode ser colocada na forma:

$$i(t) = [V_m - v_c(0)] \left(\frac{C}{L}\right)^{1/2} \text{sen } \omega_0 t \quad (2.18)$$

Como  $v_c(0)$  é igual a  $-V_m$ , como mostra a figura 2.7b, vem:

$$i(t) = 2V_m \left(\frac{C}{L}\right)^{1/2} \text{sen } \omega_0 t \quad (2.19)$$

Substituindo-se a equação (2.19) na equação (2.9), sabendo-se que  $v_c(0) = -V_m$ , calcula-se  $v_c(t)$ , dada por:

$$v_c(t) = -V_m + \frac{1}{C} \int 2V_m \left(\frac{C}{L}\right)^{1/2} \text{sen } \omega_0 t \quad (2.20)$$

de onde resulta:

$$v_c(t) = -V_m + 2V_m(1 - \cos \omega_0 t) \quad (2.21)$$

Observando-se as equações (2.19) e (2.21), vê-se que para  $t = \pi/\omega_0$  ( $t =$  tempo contado a partir do reacendimento) a corrente  $i$  passa por zero (ponto  $t_{R2}$ ), enquanto  $v_c$  alcança o seu valor de pico  $v_c = 3V_m$ .

Considerando-se que a chave seja capaz de interromper a corrente neste ponto de zero de corrente, ficará impressa no capacitor uma tensão de  $3V_m$  ou 3 p.u (considerando-se que  $V_m = 1$  p.u).

Seguindo aproximadamente meio ciclo da tensão do sistema (ponto  $t_{R2}$  da figura 2.7) a tensão sobre os contatos do

disjuntor será de 4 pu, ou seja, a diferença da Tensão sobre o capacitor (3 pu) e da Tensão da fonte (-1 pu). Supondo-se que o dielétrico entre os contatos do disjuntor seja incapaz de suportar tal magnitude de tensão, haverá reacendimento de corrente pelos contatos. Nesta nova situação do circuito continuam válidas as equações (2.8) e (2.9) e, por conseguinte a equação (2.18).

Partindo-se da equação (2.18), tendo em mente que  $V_m = -V_m$  e que  $v_c(0) = 3V_m$ , vem:

$$i(t) = -4V_m \left( \frac{C}{L} \right)^{1/2} \text{sen } \omega_0 t \quad (2.22)$$

A tensão sobre o capacitor,  $v_c$ , será de (2.9)

$$v_c(t) = 3V_m + \frac{1}{C} \int -4V_m \left( \frac{C}{L} \right)^{1/2} \text{sen } \omega_0 t \, dt \quad (2.23)$$

de onde resulta:

$$v_c(t) = 3V_m - 4V_m (1 - \cos \omega_0 t) \quad (2.24)$$

Nota-se nas equações (2.22) e (2.24) que em  $t = \pi/\omega_0$  ( $t =$  tempo contado a partir de  $t_{R2}$ ) a corrente  $i$  passa por zero (ponto  $t_{I3}$  da figura 2.7.a), enquanto a tensão  $v_c$  encontra seu valor de pico igual a  $-5V_m$  (-5pu). Se a corrente for novamente interrompida em  $t_{I3}$ , a tensão sobre o capacitor permanecerá igual a -5pu. Ocorre que, seguindo aproximadamente meio ciclo da tensão do sistema (ponto  $t_{R3}$ ) a tensão imposta aos contatos já é de 6 pu. Supondo-se que haja novo reacendimento de corrente pelos contatos, as equações de corrente e tensão no capacitor, partindo das equações (2.8) e (2.9) serão:

$$i(t) = 6 V_m \left(\frac{C}{L}\right)^{1/2} \text{sen } \omega_0 t \quad (2.25)$$

e

$$v_c(t) = -5V_m + 6V_m(1 - \cos \omega_0 t) \quad (2.26)$$

O valor de pico que  $v_c(t)$  poderá alcançar neste novo reacendimento do arco elétrico é de 7 pu e ocorrerá em  $t = \pi/\omega_0$  (ponto  $t_{I3}$  da figura 2.7b).

Deve ser lembrado que os tempos  $t$  acima referidos são contados a partir dos instantes de reacendimento do arco elétrico.

Verifica-se nas equações de corrente e tensão transitórias no capacitor, seguindo o restabelecimento de corrente, que a corrente e a tensão aumentam em 2pu a cada restabelecimento, em relação aos valores anteriores. Isto seria o que tenderia a ocorrer se o processo de abertura e fechamento dos contatos se repetisse.

Viu-se que este é um processo de escalamento da tensão devido ao reacendimento repetitivo de corrente pelos contatos, o qual pode levar a consequências imprevisíveis. É bem verdade que foram impostas as piores condições de chaveamento, tais como a abertura do arco elétrico no primeiro zero de corrente (portanto, a tensão no capacitor ainda não sofreu amortecimento (embora não tenham sido consideradas as perdas) e o restabelecimento de corrente pelos contatos quando a tensão da fonte se encontrava

em seu valor de pico.

Embora não tenham sido incluídas as perdas nos equacionamentos desenvolvidos, na figura 2.7 procura-se ilustrar os amortecimentos da corrente e da tensão transitórias, como denotam as linhas descontínuas das curvas.

O disjuntor a vácuo, como já foi repetidamente salientado, recupera suas características dielétricas com extrema rapidez, o que pode vir a evitar o problema de reacendimento de corrente pelos contatos, isentando o circuito das sobretensões e sobrecorrentes transitórias inadmissíveis, geradas por múltiplos reacendimentos numa operação de abertura dos contatos. Entretanto, o chaveamento parece mais problemático quando se está energizando o circuito capacitivo por meio de um disjuntor a vácuo. Isto porque, ante cedendo o contato metálico dos eletrodos do disjuntor, poderá haver uma produção de corrente através de um arco formado entre os eletrodos, com injeção de surtos de corrente e tensão no sistema. Embora sejam esperados níveis menores de tensão transitória (comparando com a abertura), visto que os contatos estão se aproximando, a repetitividade destes surtos pode ser altamente danosa ao sistema.

Um disjuntor a vácuo destinado a chavear um circuito capacitivo, não deve permitir que, na energização do circuito, o contato móvel recue, após o impacto mecânico de fechamento com o contato fixo, interrompendo momentaneamente a corrente, pois isto poderá também dar origem a transitórios no sistema.

A corrente transitória de energização de circuito capacitivo, embora alta, está abaixo da corrente de curto

circuito do sistema na barra da carga capacitiva. Logo, um disjuntor capaz de suportar a corrente de curto-circuito, automaticamente suportará a corrente transitória de energização da carga capacitiva [32]. Entretanto, na ocorrência do reacendimento repetitivos, como foi apresentado, a corrente pode exceder em muito a corrente de curto-circuito do sistema, de tal forma que tornam-se inevitáveis os danos provocados ao sistema.

A título de informação, em estudo de pesquisa feito na EFEI [33] sobre os transitórios de chaveamento dos tipos mais usuais de bancos de capacitores (delta, estrela com neutro aterrado, estrela com neutro flutuante e dupla estrela), conclui-se que: na energização, os transitórios alcançarão sempre valores iguais ou inferiores aos alcançados, para o caso monofásico aqui estudado. Na desenergização, no entanto, as solicitações de tensões de restabelecimento mais severas ocorrem no caso trifásico, principalmente na ligação Delta. Portanto, a simulação de uma operação de abertura de um banco de capacitores trifásicos pela representação de um circuito monofásico não dará uma visão real do problema, a menos que o banco esteja ligado na conexão estrela aterrada.

Concluiu-se, do exposto acima, que o chaveamento de circuitos capacitivos requer a instalação de equipamentos de proteção e/ou de minimização dos níveis de surto, principalmente se o dispositivo de chaveamento for um disjuntor a vácuo.

## 2.7 - O FENÔMENO DO AUMENTO SUCESSIVO DE TENSÃO POR MÚLTIPLAS REIGNIÇÕES (OU FENÔMENO DO ESCALAMENTO DE TENSÃO)

Nesta seção, pretende-se abordar o fenômeno do escalamento de tensão em circuitos com características indutivas devido a múltiplas reignições.



O escalamento de tensão é um fenômeno que surge do processo repetitivo de abertura e fechamento elétrico dos contatos do disjuntor.

Já foi visto na seção 2.5.4. que a tensão transitória sobre o capacitor de capacitância C aumentava a cada reacendimento de corrente pelos contatos e que estes não serviram de fator de limitação para o aumento daquela tensão.

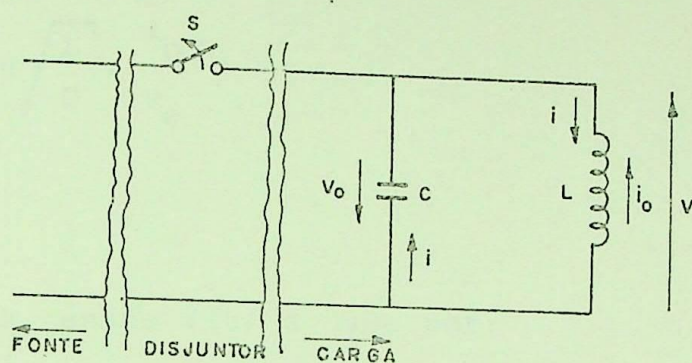
Os circuitos com características indutivas também podem estar sujeitos aos fenômenos de escalamento de tensão, o qual depende da configuração do circuito chaveado e da interação entre o circuito e o disjuntor. Embora o escalamento de tensão devido às múltiplas reignições\*tenha se apresentado com mais frequência em circuitos chaveados por disjuntores a vácuo, tem - se notícia de ocorrência do fenômeno durante a operação de abertura de circuito com disjuntor a óleo<sup>[26]</sup>. Alguns estudos têm sido publicados a respeito do assunto<sup>[1,3,7,26,27]</sup> e todos procuram estabelecer condições necessárias ao fenômeno do escalamento de tensão, porém, tratando de casos específicos, ou seja, configurações de circuitos que permitem, de acordo com valores dos parâmetros, a ocorrência do escalamento da tensão transitória.

Os autores têm usado diversos artifícios, de acordo com a configuração do circuito em análise, para estabelecer as condições que permitem o escalamento da Tensão Transitória. O pre

---

\* Reignição é definido<sup>[19]</sup> como "O Restabelecimento da corrente no decorrer de um processo de interrupção de corrente, tal que o intervalo de tempo com corrente zero é menor que 1/4 de período correspondente à frequência nominal do sistema. Entretanto, nesse caso particular de carga indutiva, reignição significa restabelecimento de corrente devido à ruptura do dielétrico entre os contatos, não importando o instante de restabelecimento.

sente trabalho utilizará o circuito típico, simples, de representação de carga indutiva, fig.2.8, utilizado por M.Murano e outros [3] para determinar as condições para escalamento da tensão transitória, de acordo com a teoria da dissipação e armazenamento da energia indutiva.



$i$  = Corrente instantânea após a abertura do disjuntor  $s$   
 $v$  = Tensão instantânea no indutor  $L$  após a abertura do disjuntor  $s$ .

FIG.2.8 - Circuito Oscilatório LC para Estudo do Escalamento de Tensão.

Suponha-se que o circuito da figura 2.8 está sujeito a uma operação de abertura dos contatos do disjuntor ( $S$ ), onde  $v_0$  é a tensão inicial sobre o capacitor de capacitância  $C$  e  $i_0$  a corrente pelo indutor de indutância  $L$ , com as polaridades indicadas, no momento de abertura elétrica dos contatos.

Sejam  $v(t)$  e  $i(t)$ , a tensão e a corrente instantânea no circuito com as condições iniciais acima.

A corrente  $i(t)$  é dada pela equação:

$$i(t) = -i_0 \cos \omega_0 t + v_0 \left(\frac{L}{C}\right)^{-1/2} \sin \omega_0 t \quad (2.27)$$

onde  $\omega_0 = 1/LC$ .

Colocando-se  $i(t)$  em função de seno apenas, resulta:

$$i(t) = - \left( \sqrt{i_0^2 + \frac{C}{L} v_0^2} \right) \sin(\omega_0 t + \phi) \quad (2.28),$$

$$\text{onde } \phi = \arctg \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{i_0}{v_0}$$

A tensão  $v(t)$  é dada por:

$$v(t) = L \frac{di}{dt} \quad (2.29)$$

que resulta em:

$$v(t) = - \left( \sqrt{v_0^2 + \frac{L}{C} i_0^2} \right) \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (2.30)$$

A figura 2.9 mostra as curvas da tensão e da corrente referente às equações (2.28) e (2.30).

De acordo com estudos<sup>[3]</sup>, se houver reignição dos contatos durante os intervalos (a) e (b), figura 2.9 das curvas de tensão e corrente, haverá um armazenamento de energia indutiva e a tensão crescerá.

Quando a reignição é repetida na duração (c), figura 2.9, a energia indutiva é dissipada e a tensão decresce.

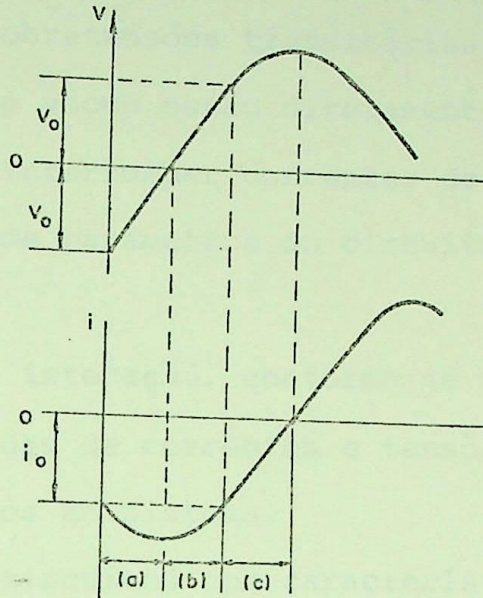


FIG.2.9 - Curvas de Tensão e Corrente na carga do circuito da figura 2.9.

O ponto de partida do escalamento de tensão é a chave abrir os contatos mecânicamente perto de um zero de corrente e interrompê-la neste ponto zero. Como os contatos estarão próximos, poderá haver reignição dos mesmos e, a partir daí, desencadear-se um processo de múltiplas reignições com escalamento de tensão transitória.

Este item teve por objetivo apenas abordar o assunto, apresentado um exemplo de circuito cuja configuração permite o fenômeno do escalamento de tensão por múltiplas reignições.

Aqui, vale ressaltar, diferentemente do chaveamento de circuito capacitivo, a sobretensão ocorre após a abertura

dos contatos, de tal maneira que a Tensão de ruptura do dielétrico dos contatos limita a sobretensão de restabelecimento do sistema.

## 2.8 - CONCLUSÕES

As sobretensões transitórias causadas pelo chaveamento de disjuntores a vácuo estão diretamente ligadas à melhor performance do mesmo em interromper correntes de alta frequência, à distribuição e valor dos parâmetros do circuito e à interação circuito-disjuntor.

Esta interação, conforme se viu, pode gerar um complexo mecanismo de ondas de correntes e tensões transitórias, as quais poderão causar danos ao sistema.

Nos circuitos com características indutivas, com capacitâncias associadas, a pior consequência da interação circuito-disjuntor é o corte virtual de corrente, pois poderão ser cortados altos valores de corrente de carga, gerando, por conseguinte, as sobretensões transitórias perigosas acima citadas.

Nos circuitos capacitivos com indutâncias associadas, o chaveamento poderá dar origem a altas sobretensões transitórias tanto na abertura quanto no fechamento dos contatos. Nas equações do circuito tomado como exemplo na seção 2.5.4, verifica-se que o nível da sobretensão sobre o capacitor, seguindo um reacendimento de corrente pelos contatos, depende tanto do valor da tensão inicial do capacitor no momento do fechamento elétrico dos contatos quanto dos valores de capacitâncias e indutâncias associadas. A dependência da tensão inicial sugere um mecanismo de dissipação de energia eletrostática para diminuir esta tensão. Além disto, é desejável que um disjuntor a vácuo destinado exclusivamente a chavear carga capacitiva tenha alto nível de corte de corrente, já que desta forma a tensão que ficaria no capacitor no instante do corte

seria inferior à tensão máxima, sendo seu nível determinado pelo nível de corte de corrente.

## CAPÍTULO III

### O ARCO NO DISJUNTOR A VÁCUO E AS CARACTERÍSTICAS DE RECUPERAÇÃO

#### DIELETRICA

##### 3.1 - INTRODUÇÃO

As tensões transitórias originadas por operações de chaveamento estão ligadas às características do equipamento de chaveamento, aos parâmetros do sistema e à interação entre ambos.

A característica mais importante de um disjuntor é, provavelmente, o seu nível de corte de corrente (Nível de CHOPPING), embora, como será visto na seção 3.2.1, o nível de corte seja influenciado pelos parâmetros do circuito no qual o dispositivo é destinado a operar.

Graças às pesquisas que vêm sendo desenvolvidas em chaveadores a vácuo, tem-se conseguido materiais de contato que permitem a diminuição do nível de corte de corrente, com consequências favoráveis ao sistema que está sendo chaveado. Foi visto no Capítulo II que a extraordinária capacidade de recuperação da suportabilidade dielétrica do disjuntor a vácuo, interagindo com o sistema chaveado pode, em alguns casos, gerar grandes sobre tensões com múltiplas reignições ( ou reacendimentos).

As múltiplas reignições ocorrem principalmente quando se interrompe correntes transitórias de alta frequência. Isto significa que a corrente que flui seguindo imediatamente a ruptura do dielétrico passa por zero em curto intervalo de tempo, de tal maneira que os contatos encontram-se ainda muito próximo após a interrupção desta corrente, permitindo a reignição.

Em algumas situações, as reignições podem beneficiar os componentes do circuito, por não permitirem que a tensão nos seus terminais se eleve a níveis danosos. Porém, há casos especiais, conforme foi mostrado no capítulo anterior, em que as múltiplas reignições dão origem a sobretensões escalantes, as quais podem se tornar perigosas ao sistema.

No capítulo IV será simulada a interação "circuito - -disjuntor a vácuo", com o disjuntor modelado matematicamente para simular operações de abertura e fechamento de circuitos. A modelagem matemática do disjuntor a vácuo para as simulações referidas está incorporada a um programa para cálculo de transitórios eletromagnéticos, desenvolvido na EFEI por Oliveira, A.R. [17], por meio de duas subrotinas que desempenham tais operações (abertura e fechamento).

### 3.2 - A FORMAÇÃO E EXTINÇÃO DO ARCO ELÉTRICO NO DISJUNTOR A VÁCUO E O PERFIL DE RECUPERAÇÃO DIELÉTRICA

A formação do arco elétrico no espaço entre os contatos de um disjuntor a vácuo, ocorre devido a vaporização de material dos contatos durante a passagem de correntes através dos



mesmos.

As seguintes características no processo de geração e extinção do arco elétrico em disjuntores a vácuo e outros tipos de disjuntores, têm influência decisiva no processo de chaveamento de correntes transitórias:

- (1) Níveis de corte verdadeiro de corrente ( estabilidade do arco).
- (2) Capacidade de interrupção de correntes de alta frequência.
- (3) Suportabilidade dielétrica e taxa de crescimento da suportabilidade dielétrica seguindo a extinção do arco elétrico.

Deve ser notado que os itens (2) e (3) estão diretamente relacionados, uma vez que a capacidade de interrupção de correntes de alta frequência depende da recuperação do dielétrico do volume do espaço entre os contatos.

### 3.2.1 - NÍVEL DE CORTE VERDADEIRO DE CORRENTE (ESTABILIDADE DO ARCO)

Conforme já foi mencionado no capítulo anterior , o corte verdadeiro de corrente em disjuntores a vácuo ocorre devido a uma deficiência de vapor de metal proveniente dos contatos e é largamente dependente do tipo de material dos contatos. Outros parâmetros do circuito também afetam a estabilidade do arco. Esses parâmetros são: amplitude e frequência da corrente a ser interrompida, o circuito visto dos contatos, caracterizado pela impedância de surto, e outros.

Com relação à influência do material dos contatos sobre o nível de corte, testes experimentais revelam que o corte de corrente em eletrodos de cobre-bismuto, por exemplo, é quatro vezes maior que em eletrodos de CLR, sob as mesmas condições de testes. Os testes revelam ainda, que o nível de corte diminui com o aumento da impedância de surto, conforme mostram os gráficos da figura 3.1. Isto está de acordo com os estudos de M. Murano e outros<sup>[11]</sup>, de onde se conclui que a corrente de corte no disjuntor a vácuo diminui com a diminuição da capacitância do sistema vista dos terminais do espaço entre os contatos. Note que quando a capacitância diminui, a frequência natural de oscilação cresce e o valor máximo da sobretensão imposta aos contatos, devido ao aumento da impedância de surto, também cresce.

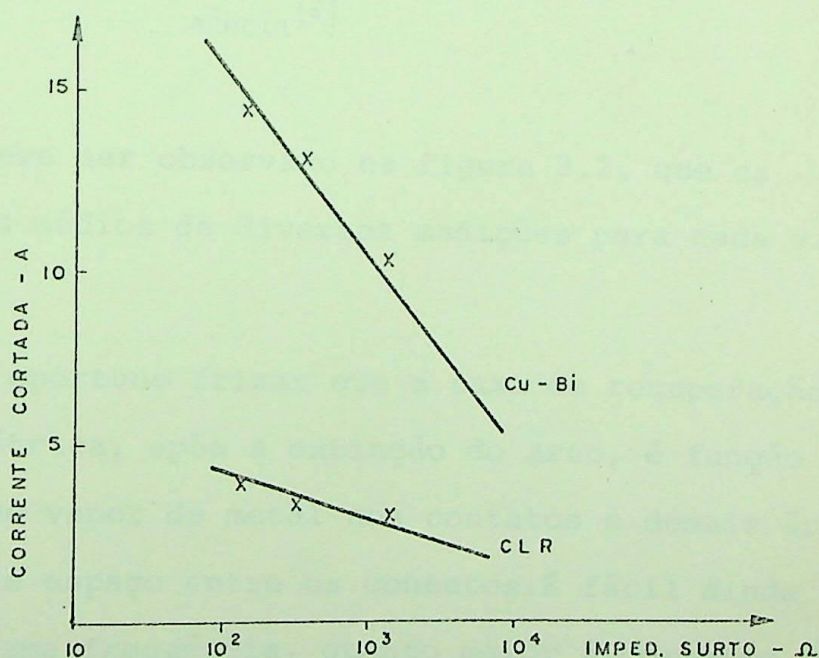


FIG. 3.1 - Variação de Corrente de Corte com a Impedância de surto para Disjuntores a Vácuo com Contatos de Cu-Bi e CLR, extraído da Referência<sup>[15]</sup>.

A figura 3.2 mostra, apenas como ilustração, a variação da corrente de corte com a variação da capacitância paralela ao espaçamento entre os contatos de um disjuntor a vácuo.

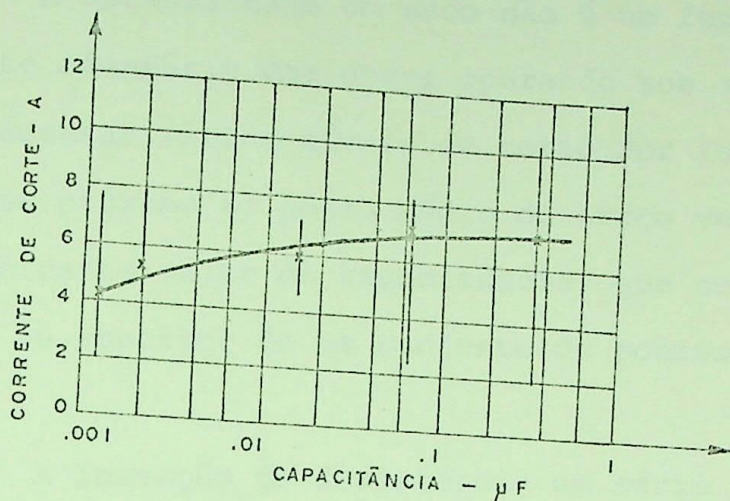


FIG. -3.2 - Variação da Corrente de Corte com a Capacitância vista pelo Arco Elétrico, extraído da Referência [8].

Deve ser observado na figura 3.2, que os pontos marcados são pontos médios de diversas medições para cada valor de capacitância.

É oportuno frisar que a taxa de recuperação da susceptibilidade dielétrica, após a extinção do arco, é função da taxa de condensação do vapor de metal nos contatos e demais áreas que envolvem o volume de espaço entre os contatos. É fácil ainda concluir que, para uma mesma frequência, quanto maior a corrente fluindo através do arco menor será o nível de corte de corrente, visto que sua taxa de variação,  $di/dt$ , é maior que a taxa de variação de uma corrente menor, com conseqüente maior dificuldade de interrupção.

Além disto, deve-se associar o fato de que quanto maior a corrente de arco, maior a vaporização de material dos contatos<sup>[11]</sup> e, conseqüentemente, mais estável será o arco.

A estabilidade do arco não é um fenômeno fixo, mas completamente aleatório. Uma chave operando sob as mesmas condições pode apresentar vários níveis de corte. Por isso, a curva da Fig. 3.2 passa próximo ao ponto médio do traço vertical, correspondente a um certo valor de capacitância, que se estende do limite inferior ao superior de um conjunto de pontos de corrente de corte.

A inserção de resistência em série com os contatos do disjuntor, conforme a fig. 3.3, tem a função de diminuir o nível de corte, como se vê na Fig. 3.4<sup>[11]</sup>. Na mesma figura, ainda se pode ver a influência da capacitância paralela ( $C_p$ ) sobre o nível de corte de corrente.

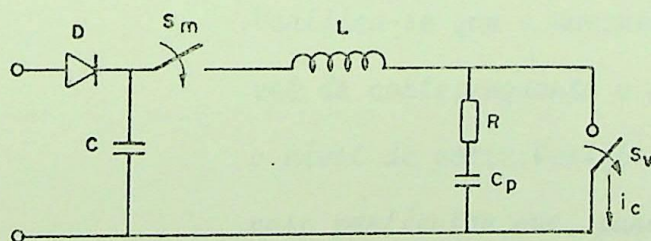


FIG. 3.3 - Circuito ilustrativo para estudo do efeito de capacitância  $C_p$  e do resistor  $R$  sobre o nível de corrente em  $S_v$ .

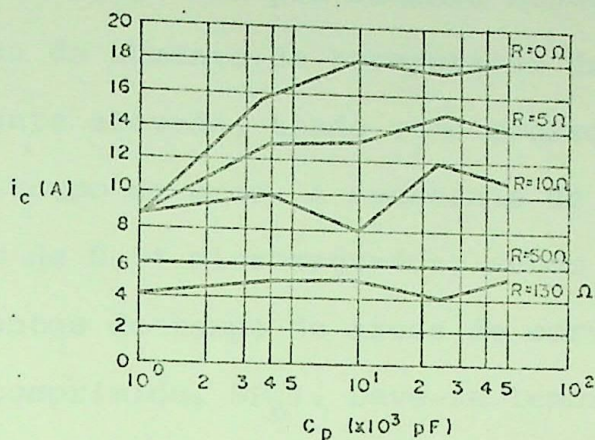


FIG. 3.4 - Curvas Ilustrativas do Efeito de  $C_p$  e  $R$  sobre o nível de corte em Sv.

Os testes para obtenção das curvas da Figura 3.4 foram executados após o fechamento da chave  $S_m$  (Figura 3.3).

Verifica-se que o aumento de  $R$  diminui o nível de corte, enquanto o aumento de  $C_p$  aumenta o nível de corte. Verifica-se ainda, para este caso particular, que, para  $R=50[\Omega]$ , o nível de corte independe da capacitância.

### 3.2.2 - CAPACIDADE DE INTERRUPTÃO DE CORRENTES DE ALTA FREQUÊNCIA

A notável capacidade de interrupção de correntes de alta frequência pelo disjuntor a vácuo tem sido objeto de estudo por parte de vários pesquisadores [1, 2, 26, 35, 36, 37],

que vêm publicando resultados de análises teóricas e testes de campo em equipamentos reais.

Conforme já foi previamente mencionado, o espaço a vácuo tem uma taxa de aumento de recuperação da suportabilidade dielétrica bastante elevada, tendo como consequência uma pequena constante de tempo de arco. A constante de tempo de arco a vácuo está em torno de 0,01 microsegundos, sendo 10 a 100 vezes menor que as constantes de tempo de arcos de corrente em gases e fluidos (óleo, ar-comprimido,  $SF_6$ ). Deve-se lembrar que, embora o disjuntor a vácuo tenha capacidade de interrupção de correntes de alta frequência, existem níveis de corrente ou taxa de variação de corrente,  $di/dt$ , em torno do zero em que a densidade de vapor de metal no zero e logo após é bastante alta, reduzindo desta forma a suportabilidade dielétrica. Portanto, pode não haver interrupção no primeiro zero de corrente.

É oportuno citar, neste ponto, que existe uma faixa crítica entre o sucesso e o insucesso da interrupção. Juntamente com a amplitude de corrente e sua taxa de variação,  $di/dt$ , perto do zero, inclui-se o projeto do disjuntor (material dos contatos, espaçamento, coeficiente de condensação, etc) no processo de sucesso/falha do mesmo numa operação de interrupção de corrente. A figura 3.5 mostra um gráfico da taxa crítica de variação de corrente em função da frequência da mesma para o Cu-Bi e o CLR (correspondente a 50% do sucesso na interrupção). A Tabela 3.1 mostra um estudo comparativo de taxas de variação crítica de corrente para diversos tipos de disjuntores [15].

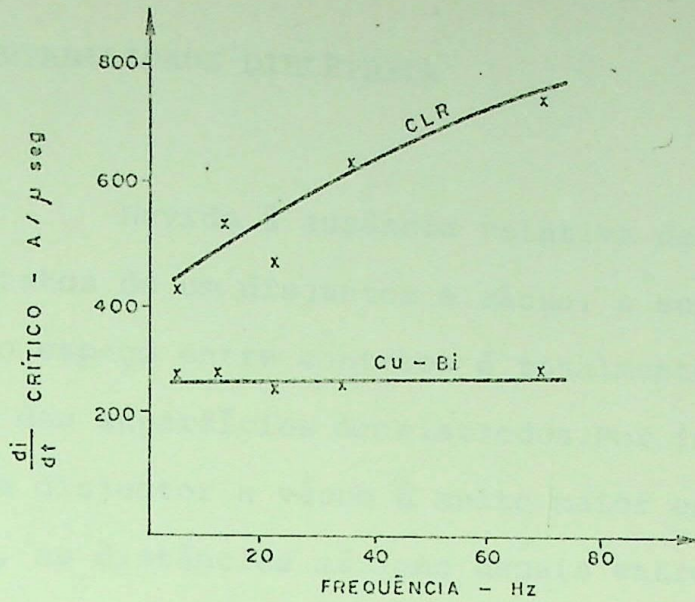


FIG. 3.5 - Característica de Interrupção Crítica de Disjuntores a Vácuo com Diferentes Tipos de Contato, correspondente a 50% de sucesso na interrupção. Extraído da Referência [13].

TIPO DE INTERRUPTOR CONTATO	(di/dt) CRÍTICO	COMENTÁRIO
VÁCUO COBRE- BISMUTO CLR	190-280 A/ μseg 400-750 A/ μseg	MAIS OU MENOS DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA. MUITO MAIS DEPENDENTE DA FRE- QUÊNCIA.
ÓLEO	10-80 A/ μseg	MUITO MAIS DEPENDENTE DA IMPE- DÂNCIA DE SURTO DO CIRCUITO DE INJEÇÃO DE CORRENTE
AR-COMPRESSO	10-15 A/ μseg	
SF <sub>6</sub>	10-60 A/ μseg	MUITO MAIS DEPENDENTE DA IMPE- DÂNCIA DE SURTO DO CIRCUITO DE INJEÇÃO DE CORRENTE.

TABELA 3.1 - Capacidade de Interrupção Crítica, di/dt, para Diversos Tipos de Disjuntores, Extraído da Referência [15]

### 3.2.3 - SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA

Devido à ausência relativa de partículas de gás entre os contatos de um disjuntor a vácuo, a suportabilidade do dielétrico do espaço entre contatos é totalmente dependente das propriedades das superfícies dos eletrodos. Por isso, a tensão de ruptura de um disjuntor a vácuo é muito maior entre contatos. Como consequência, as distâncias máximas usuais entre contatos são bem menores que as distâncias nos disjuntores diferentes, da mesma classe de tensão. Um espaçamento típico para um disjuntor a vácuo, especificado para 11 [KV] tem uma abertura máxima de  $8\text{mm}$  [11].

O vapor de metal que alimenta o caminho para o arco elétrico é proveniente dos contatos pelo aquecimento dos mesmos. Quando uma corrente alternada que flui pelo arco elétrico caminha no sentido do seu zero natural o vapor de metal do volume do espaço entre os contatos tende a diminuir, visto que diminui a vaporização de metal dos contatos, e se mantém a condensação de vapor nas superfícies que envolvem o volume do espaçamento. Desta forma, pode ocorrer que o vapor de metal seja insuficiente para manter o arco. Para que isto ocorra, a taxa de condensação de vapor nas superfícies deve ser superior à taxa de vaporização dos contatos.

Os resultados experimentais de Rich e Farral [20] mostram que o tempo de recuperação total do dielétrico de um disjuntor a vácuo varia de 1 a 30  $[\mu\text{s}]$ , dependendo das proporções do espaçamento entre contatos. Os gráficos da figura 3.6 servem para ilustrar a dependência da recuperação da suportabilidade do espaçamento em relação ao diâmetro dos eletrodos e à distância entre os



mesmos. Os testes foram feitos em disjuntores com contatos de prata, livres de gases.

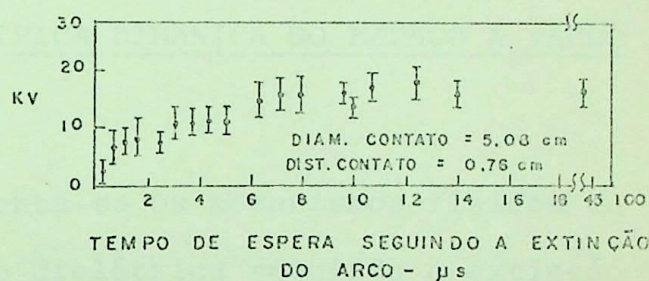
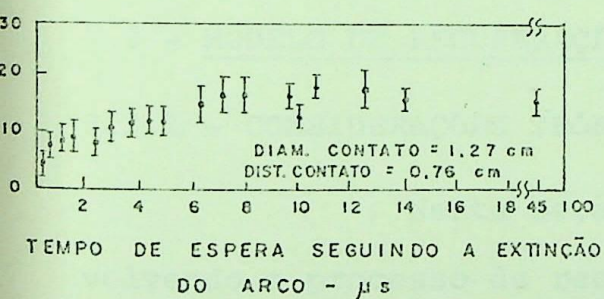
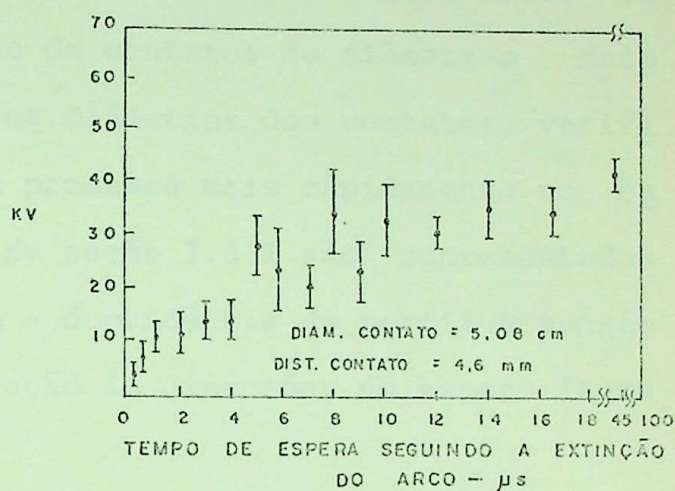
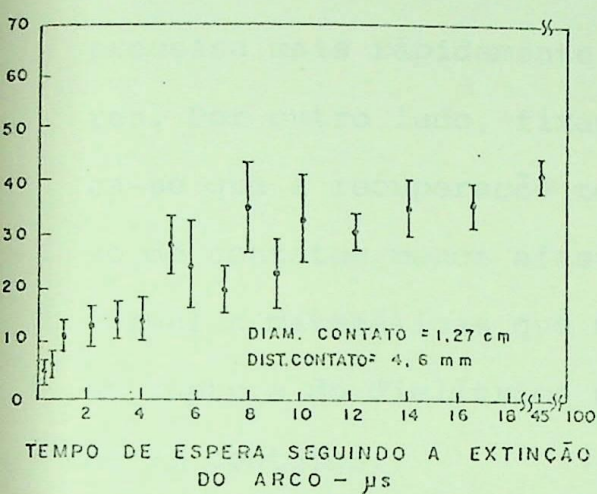


FIG 3.6- Gráficos de Recuperação de Tensão de Ruptura do dielétrico como Função do Diâmetro dos Contatos e Separação dos mesmos, Extraído da Referência [20].

Cada ponto marcado sobre os segmentos representa a média de aproximadamente dez pontos medidos, com os limites indicados de erro provável. Os erros prováveis, por Kilovolt, nestes dados, variam entre 0,2 e 0,4 [KV].

Examinando-se as curvas, verifica-se que, para uma distância fixa entre contatos, a recuperação dielétrica total se processa mais rãpidamente no caso de contatos de diãmetros maiores. Por outro lado, fixando-se os diãmetros dos contatos, verifica-se que a recuperação total se processa mais rãpidamente no caso de contatos menos afastados. Na seção 3.3.1 são representadas fórmulas matemáticas que mostram a dependência do perfil de tensão de ruptura do dielétrico com relação às dimensões do espaço livre entre contatos.

### 3.3 - MODELO DE RECUPERAÇÃO DIELÉTRICA DINÂMICA DO ESPAÇO A VÁCUO

#### 3.3.1 - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Nesta seção apresenta-se os mecanismos físicos envolvendo o processo de recuperação dielétrica seguindo a extinção do arco. Rich e Farral<sup>[20]</sup>, em seus trabalhos, partem do princípio de que a suportabilidade elétrica de um espaçamento entre contatos durante o período de recuperação é extremamente dependente da densidade de vapor de metal existente no espaçamento e que a recuperação estará completa quando o vapor de metal residual tornar-se tão tênue que o mecanismo de ruptura dependerá sómente das propriedades das superfícies dos eletrodos. O ponto de partida para a determinação da densidade de vapor crítica é a forma integral da equação do princípio de conservação da partícula

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V n(r,t) d\tau = - \oint \Gamma \cdot ds \quad (3.1)$$

aplicada ao volume de espaçamento cilíndrico

Partindo-se da equação (3.1), chega-se à seguinte equação diferencial para densidade média de partículas de vapor de metal [20].

$$\frac{d\bar{n}(t')}{dt} = S(t') - \beta\bar{n}(t') \quad (3.2)$$

onde:

- (1)  $t'$  é o tempo contado a partir do instante de extinção do arco elétrico.
- (2)  $S(t')$  representa o número de partículas evaporadas dentro do volume do espaçamento, provenientes do catodo, e é assumido ser zero após a extinção do arco.
- (3)  $\beta\bar{n}(t')$  representa a perda de partículas por segundo para as superfícies envolvendo o volume de espaçamento entre contatos.

A equação (3.2), após a extinção do arco, torna-se:

se:

$$\frac{d\bar{n}(t')}{dt} = -\beta\bar{n}(t') \quad (3.3)$$

que tem como solução [12,20]

$$\bar{n}(t') = n_0 e^{-\beta t'} \quad (3.4)$$

sendo

$$\beta = \frac{\bar{v} \sum C_i A_i}{4V} \quad [\text{seg}^{-1}] \quad (3.5)$$

onde,

- (1)  $n_0$  = densidade de vapor inicial em  $t'=0$
- (2)  $\bar{v}$  = velocidade térmica média das partículas de vapor de metal.
- (3)  $C_i$  = Coeficiente de condensação da  $i$ -ésima superfície envolvendo o volume de espaçamento.
- (4)  $A_i$  = Área de  $i$ -ésima superfície envolvendo o volume de espaçamento.
- (5)  $V$  = Volume de espaçamento.

A velocidade térmica média é expressa por:

$$\bar{v} = \left[ \frac{8 KT}{\pi M} \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

onde,

- (1)  $K$  = constante de Boltzman
- (2)  $T$  = Temperatura do gás de plasma difuso.
- (3)  $M$  = Massa dos átomos de gás do material dos contatos.

Pesquisando os trabalhos de Cobine e Farral<sup>[10]</sup>,

Ismail, A.B.<sup>[15]</sup>, com base nos estudos de Rich e Farral<sup>[20]</sup> e em resultados de testes experimentais, postula que o perfil de recuperação dielétrica pode ser ajustado às características experimentais por uma função da forma

$$b(t') = 1 - e^{-t'/\tau} \quad \text{ou} \quad (3.7)$$

$$b(t') = 1 - e^{-\beta t'} \quad (3.7.1)$$

onde,  $\tau = 1/\beta$  é a constante de tempo do gás do volume do espaçamento. O perfil de tensão de recuperação dielétrica através do espaçamento de vácuo, após a extinção do arco, pode ser representado por:

$$V(t') = v_{bd}(t) \cdot b(t') \quad (3.8)$$

onde  $V_{bd}(t)$  é a tensão de ruptura estática do espaçamento de vácuo (para dado material de contato).  $V_{bd}(t)$  é função da distância entre contatos, logo, é função da velocidade de abertura dos contatos e do tempo  $t$ , uma vez que a distância = velocidade de abertura x tempo de abertura ( $t$ ). O autor apresenta também, de resultados de medições, a equação polinomial seguinte para  $V_{bd}(t)$ , obtida pelo método de "ajuste de curva" para um disjuntor com eletrodos de CLR (válida para espaçamento  $\leq 6$  mm):

$$V_{bd}(t) = (760G - 1200G^2 - 1500G^3 + 1750G^4 + 4000G^5) \text{ kV} \quad (3.9)$$

onde  $G$  = velocidade de abertura x tempo. As características de projeto do interruptor são:

- (1) Material dos contatos = CLR
- (2) Diâmetro dos contatos = 5 cm
- (3) Distância máxima entre contatos = 0,8 cm

- (4) Velocidade de abertura dos contatos = 100 cm/s  
 (5) Coeficiente de condensação das áreas envolvendo  
 do o volume do espaçamento = 1,0

### 3.3.2 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Nesta seção, pretende-se apresentar a influência da distância entre os contatos do disjuntor a vácuo e da velocidade térmica média de gás de vapor de metal no volume de espaçamento sobre a recuperação da tensão de suportabilidade dinâmica ( tensão de breakdown dinâmica) final do espaçamento.

Para tal, foi desenvolvida numa rotina capaz de desimular interrupções de corrente em um programa para cálculo de transitórios eletromagnéticos e calcular o perfil da tensão de ruptura dinâmica do dielétrico,  $V_{bd}(t')$ , seguindo a interrupção de corrente. O disjuntor a vácuo utilizado para obtenção dos resultados computacionais é o já descrito na seção 3.3.1, cuja tensão de ruptura (breakdown) estática é representada pela equação polinomial (3.9). Foram feitas as seguintes considerações para simulação:

- . A corrente a ser interrompida é senoidal a 60 [Hz]
- . Na simulação, o disjuntor é forçado a interromper a corrente em torno do primeiro zero de correrente após a formação do arco elétrico.

Devido ao fato de que o método de cálculo de corrente é discreto (Método de Integração Numérica Trapezoidal), não foi possível escolher um ponto exato de zero de corrente, mas sim um ponto em torno de zero. A figura 3.7 serve para ilustrar o mecanismo de extinção do arco elétrico.

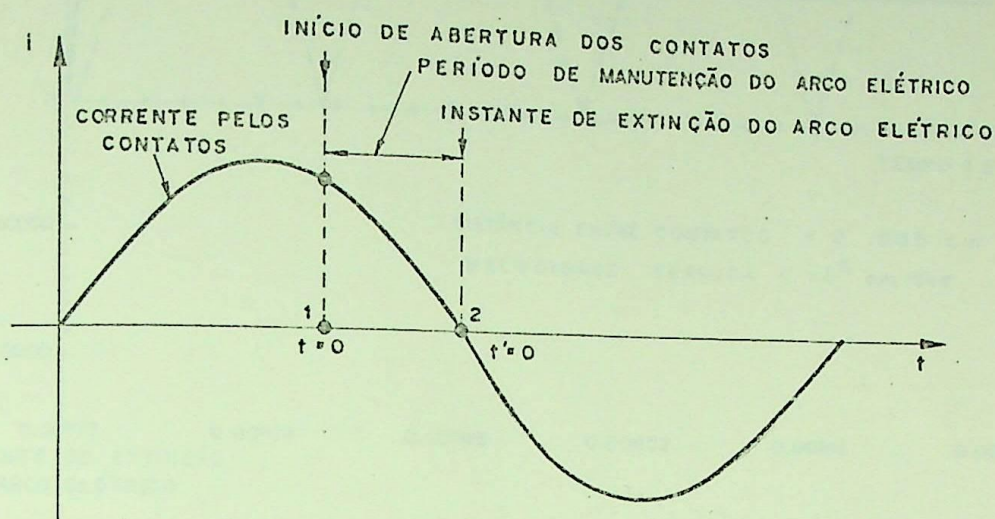


FIG. 3.7 - Definição do Tempo de Partida dos Contatos ( $t=0$ ) e Instante de Extinção do Arco Elétrico ( $t' = 0$ )

No ponto 1 ( $t=0$ ), (Figura 3.7), tem início a separação dos contatos. A duração do arco vai do ponto 1 ao ponto 2 ( $t' = 0$ ). O arco elétrico é finalmente extinto e inicia a contagem de tempo para cálculo da tensão de ruptura dinâmica do dielétrico do espaçamento entre os contatos. Considere-se que a distância entre os contatos permanece constante a partir do instante de extinção do arco, já que se deseja estudar os efeitos da distância sobre a recuperação final do dielétrico.

Os efeitos da distância entre os contatos e da velocidade térmica sobre a suportabilidade final do dielétrico foram estudadas e estão ilustrados na figura a seguir:

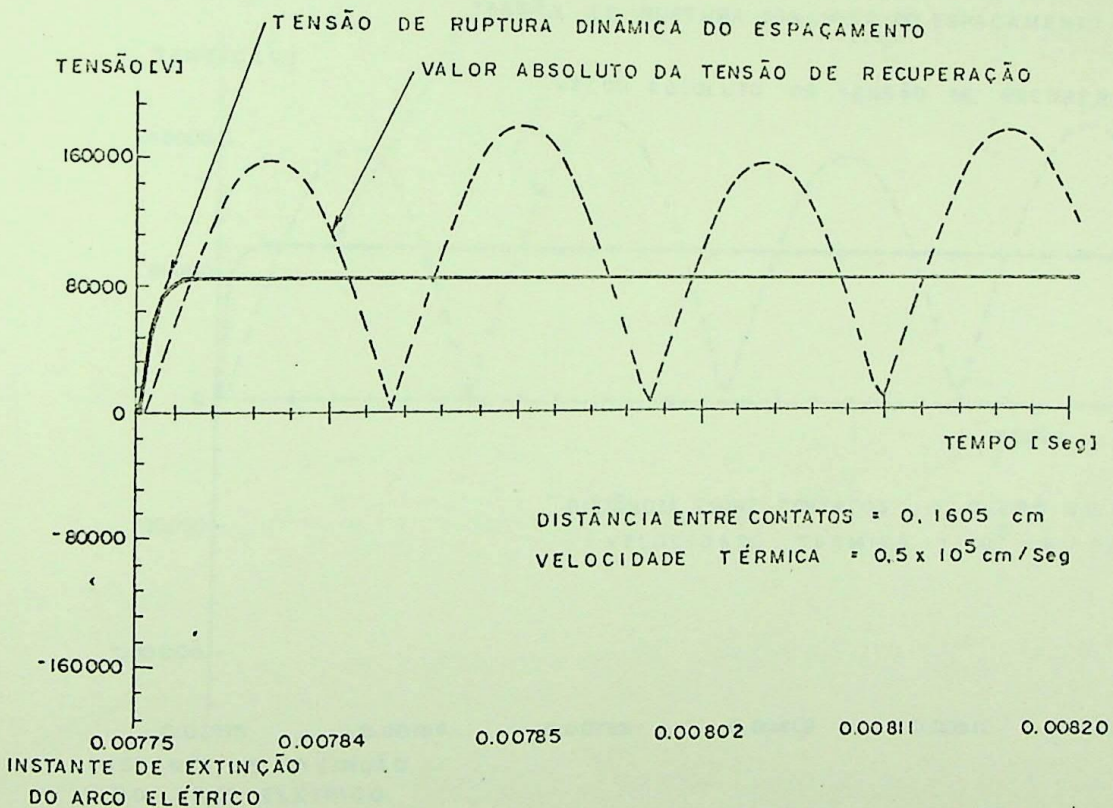
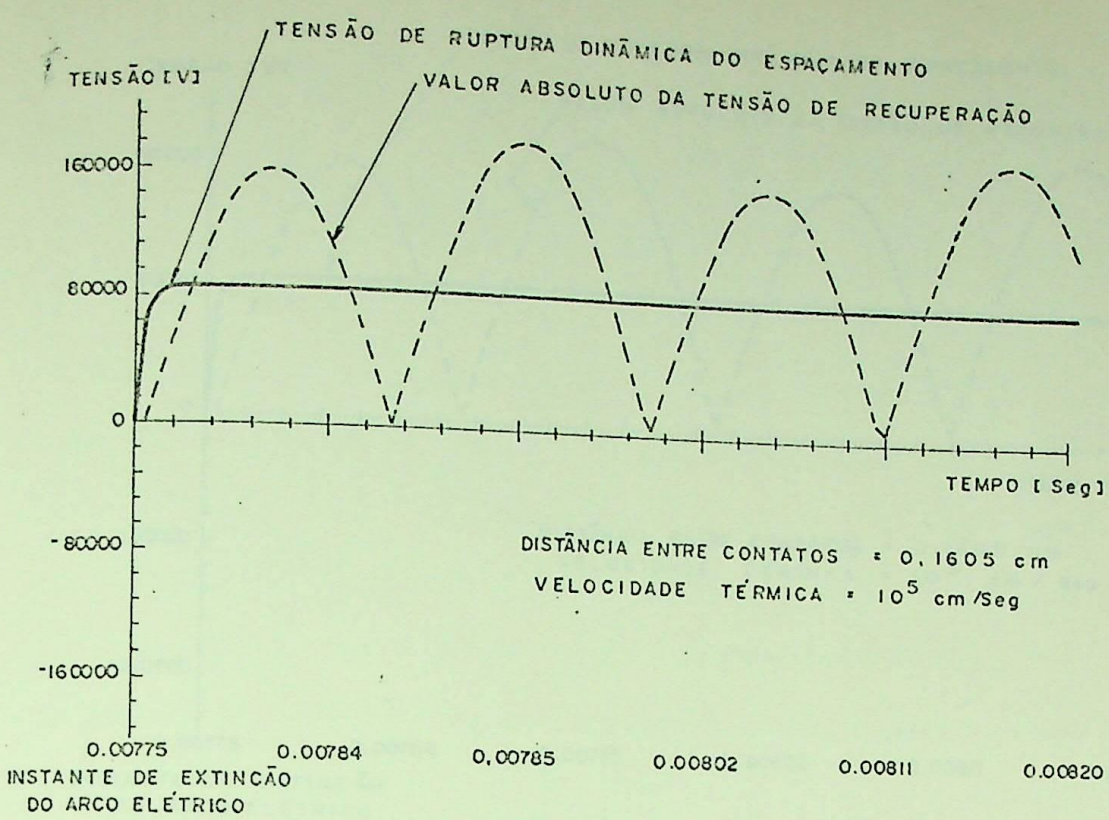


FIG. 3.8 - Efeito da Velocidade Térmica média sobre o tempo de recuperação total do dielétrico (para uma mesma distância entre contatos). Verifica-se nas figuras que o tempo para recuperação total da suportabilidade do dielétrico é menor em a) que em b), visto que a velocidade térmica de a) é o dobro da de b). Isto satisfaz a equação (3.7.1), na qual está implícito que quanto maior a velocidade térmica média das partículas, mais rapidamente se recupera o dielétrico.



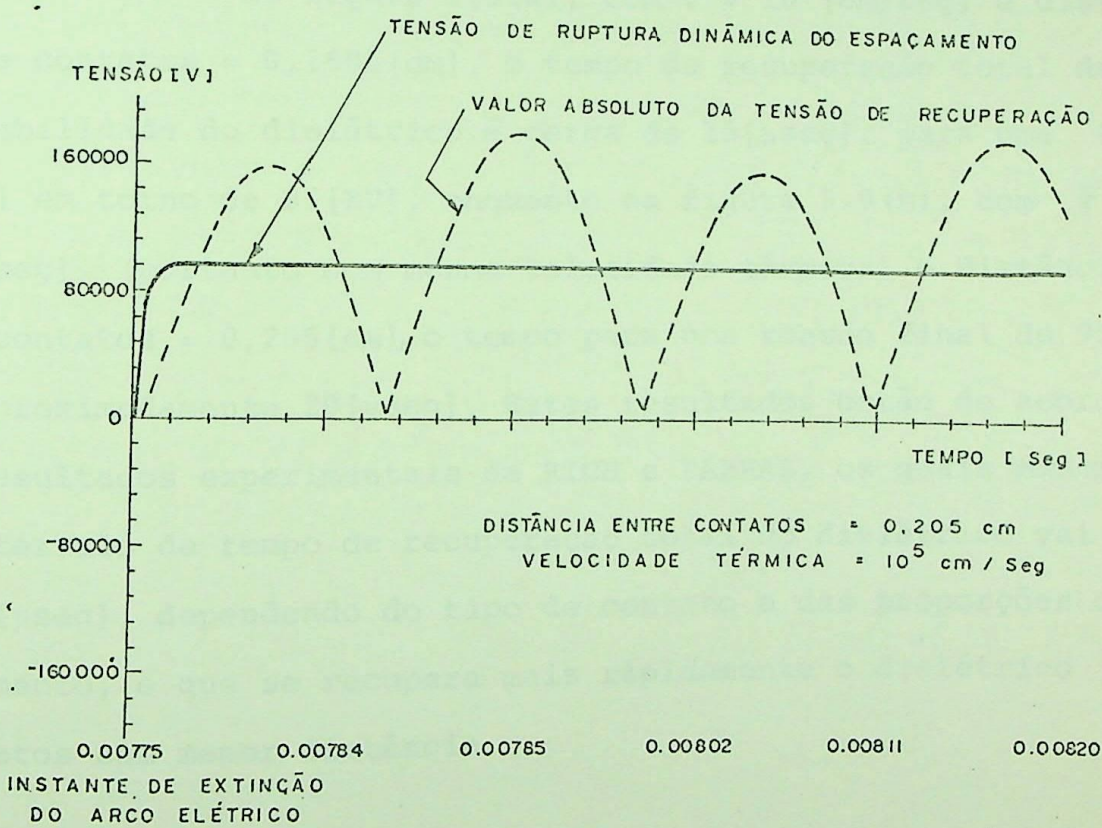
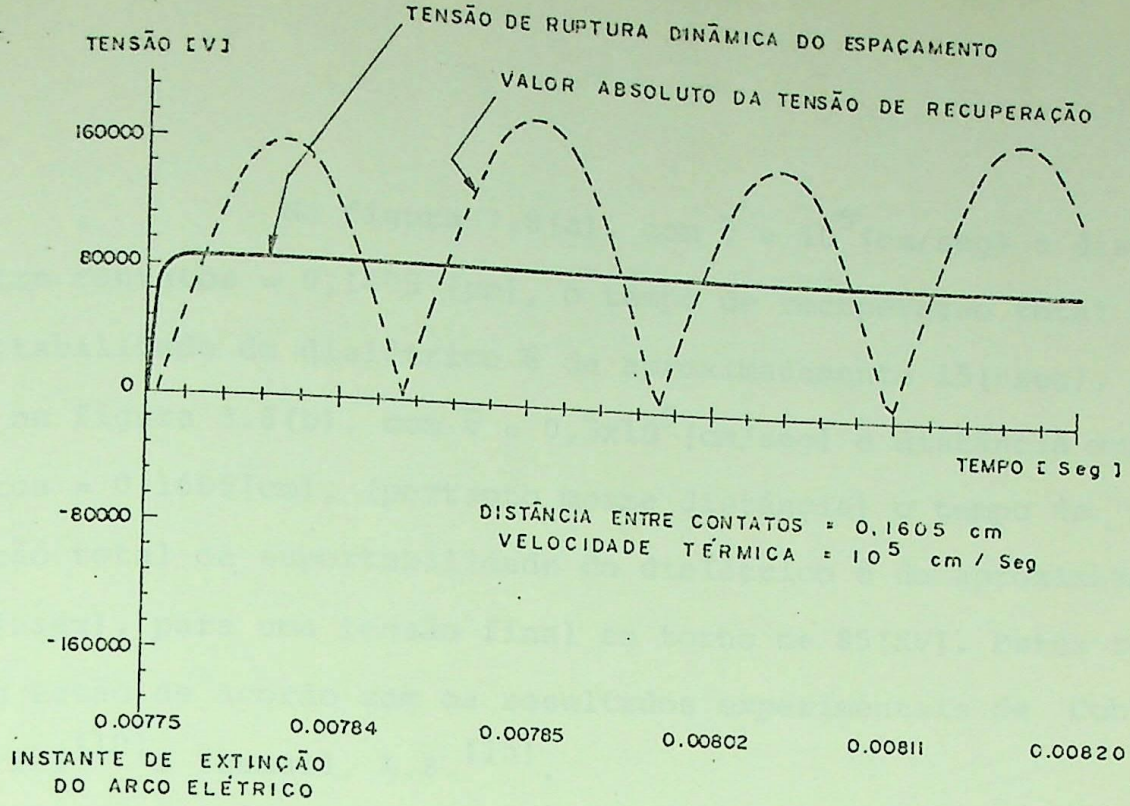


FIG. 3.9 - Efeito da distância entre contatos sobre o tempo de recuperação total do dielétrico (para uma mesma velocidade de térmica). Verifica-se nas figuras que o tempo de recuperação total é menor em a) que em b), já que a distância entre contatos em a) é menor que em b). Estes resultados estão de acordo com os testes experimentais de Rich e Farral [20].

Na figura 3.8(a), com  $\bar{v} = 10^5$  [cm/seg] e distância entre contatos = 0,1605 [cm], o tempo de recuperação total da suportabilidade do dielétrico é de aproximadamente 15[ $\mu$ seg], enquanto na figura 3.8(b), com  $\bar{v} = 0,5 \times 10^5$  [cm/seg] e distância entre contatos = 0,1605 [cm], (portanto mesma distância) o tempo de recuperação total da suportabilidade do dielétrico é de aproximadamente 25[ $\mu$ seg], para uma tensão final em torno de 85[KV]. Estes resultados estão de acordo com os resultados experimentais de Cobine e Farral<sup>[10]</sup> e Isamail, A.B.<sup>[15]</sup>.

Na figura 3.9(a), com  $\bar{v} = 10^5$  [cm/seg] e distância entre contatos = 0,1605 [cm], o tempo de recuperação total da suportabilidade do dielétrico é cerca de 15[ $\mu$ seg], para uma tensão final em torno de 85[KV], enquanto na figura 3.9(b), com  $\bar{v} = 10^5$  [cm/seg], (portanto com mesma velocidade térmica) e distância entre contatos = 0,205 [cm], o tempo para uma tensão final de 95[KV] é de aproximadamente 20[ $\mu$ seg]. Estes resultados estão de acordo com os resultados experimentais de RICH e FARRAL, os quais mostram que o intervalo de tempo de recuperação total do dielétrico vai de 1 a 30[ $\mu$ seg], dependendo do tipo de contato e das proporções do espaçamento, e que se recupera mais rapidamente o dielétrico entre contatos com menor distância.

### 3.4 - O FENÔMENO DA PREIGNIÇÃO ("PRESTRIKE") NUMA OPERAÇÃO DE FECHAMENTO DE CONTATOS

#### 3.4.1 - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS:

Numa operação de fechamento de qualquer disjuntor há uma preignição, ou seja, um fechamento elétrico entre os conta

tos, antes que ocorra uma junção metálica entre os mesmos.

À medida em que a distância entre os contatos vai diminuindo, o nível da tensão de suportabilidade do dielétrico também vai diminuindo, de tal maneira que chegará o instante em que a tensão aplicada aos terminais do disjuntor vencerá a suportabilidade do dielétrico e haverá uma reignição. Como consequência, haverá uma irradiação de ondas de corrente e tensão a partir da fonte sobre as linhas, cabos e outros equipamentos, criando oscilações de alta frequência no sistema. Devido à extraordinária capacidade de extinção de correntes de alta frequência do disjuntor a vácuo, conforme já foi descrito em seções anteriores, poderá haver nova abertura elétrica dos contatos. Estes permanecerão abertos até que a tensão imposta ao espaçamento entre os mesmos vença a suportabilidade do dielétrico e ocorra nova ignição. Tais interrupções e reignições de correntes de alta frequência dão origem a surtos de tensão nos terminais dos equipamentos associados ao sistema.

Merece ser observado que a magnitude da tensão imposta aos contatos na primeira reignição e o instante em que o mesmo ocorre depende, para um determinado nível de tensão, da velocidade de fechamento dos contatos e do ponto da curva de tensão em que os contatos partiram.

A figura 3.10 serve para ilustrar o instante de partida dos contatos para a tensão nos terminais da chave, dada por  $V_m \cos(\omega t + \theta)$ , onde  $\theta$  será o ângulo correspondente ao ponto de partida dos contatos para o fechamento.

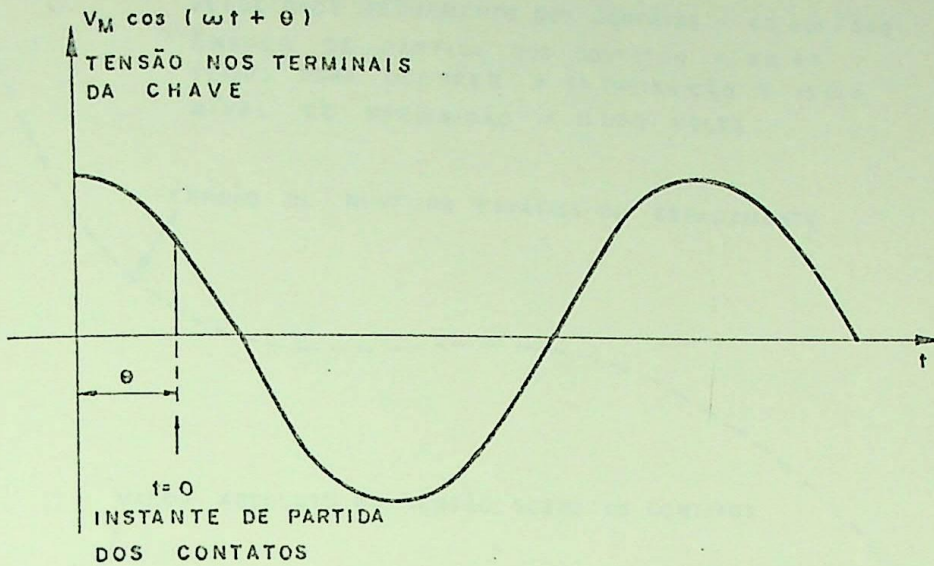


FIG. 3.10 - Ilustração da Partida dos contatos com relação à onda de tensão.

### 3.4.2 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS E COMENTÁRIOS

A figura 3.11 mostra um exemplo de variação do nível de preignição como função da velocidade de fechamento dos contatos na determinação da tensão de ruptura estática. Só estão representadas nas curvas as tensões de ruptura correspondentes ao instante em que a distância entre contatos alcança 6 mm até o instante da primeira preignição (a equação 3.9 só vale para distâncias entre contatos  $\leq 6$  mm).

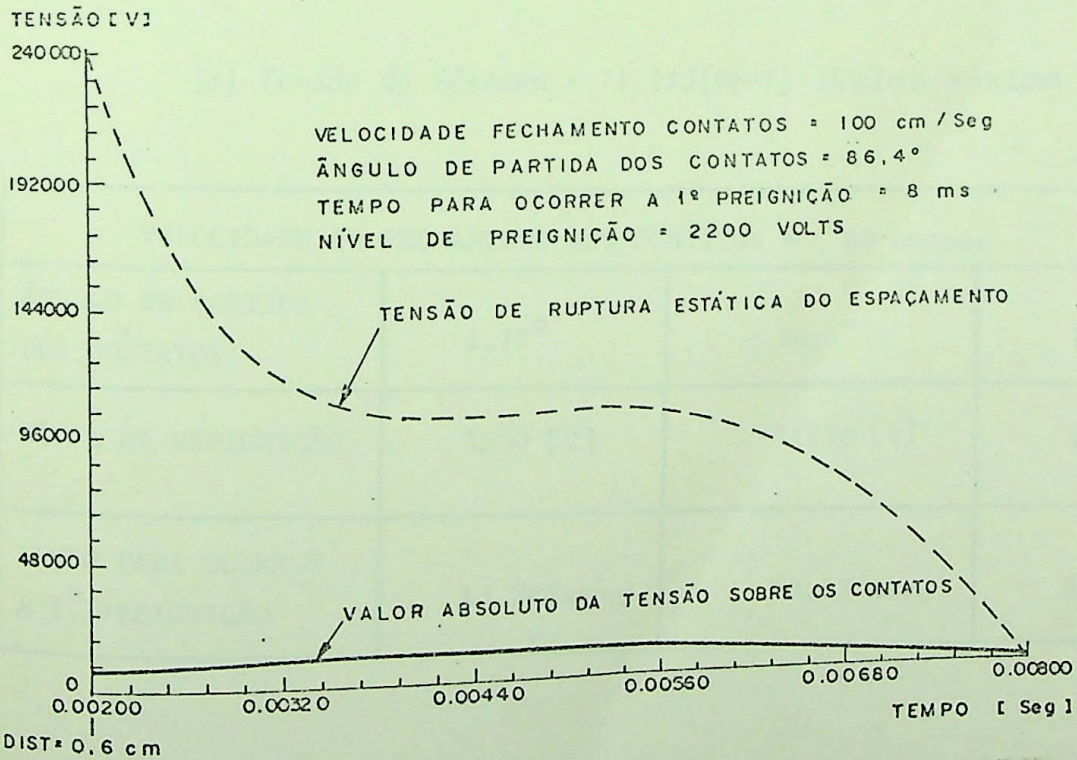
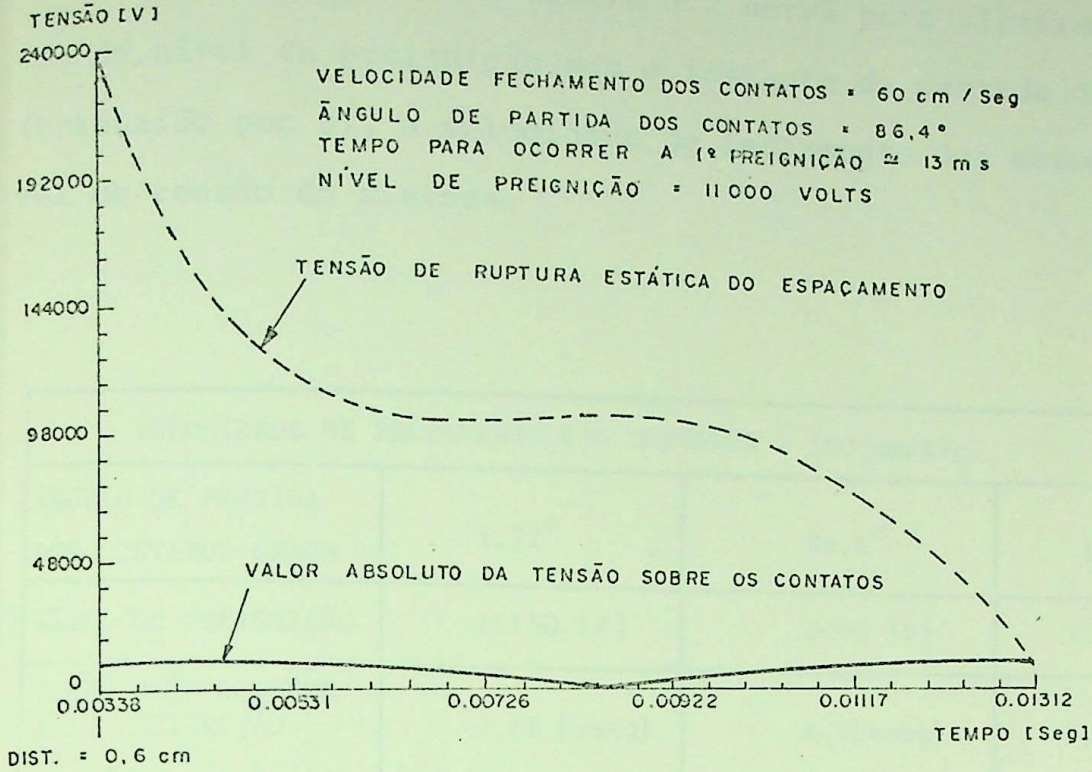


FIG. 3.11 - Variação do nível de preignição como função da velocidade de fechamento dos contatos

A tabela 3.2 serve para ilustrar a dependência do nível de preignição com o instante de partida dos contatos (traduzido por  $\theta$ ), a velocidade de fechamento dos mesmos e o nível de tensão do sistema.

VELOCIDADE DE FECHAMENTO DOS CONTATOS = 100 cm/seg.			
ÂNGULO DE PARTIDA DOS CONTATOS-GRAUS	1,72°	86,4°	108°
NÍVEL DE PREIGNIÇÃO	11150 [V]	2200 [V]	2050 [V]
TEMPO PARA OCORRER A 1. <sup>a</sup> PREIGNIÇÃO	7,88 [mseg]	4,0 [mseg]	8,0 [mseg]

(a) Tensão do Sistema = 11.280 [V $\phi$ -T] (Valor máximo fase-neutro)

VELOCIDADE DE FECHAMENTO DOS CONTATOS = 60 cm/seg			
ÂNGULO DE PARTIDA DOS CONTATOS	1,72°	86,4°	108°
NÍVEL DE PREIGNIÇÃO	3500 [V]	11130 [V]	9680 [V]
TEMPO PARA OCORRER A 1. <sup>a</sup> PREIGNIÇÃO	13,28 [mseg]	13,12 [mseg]	13,12 [mseg]

(b) Tensão do Sistema = 11.280 [V $\phi$  - T] (Valor máximo fase-neutro).

VELOCIDADE DE FECHAMENTO DOS CONTATOS = 100 cm/seg.			
ÂNGULO DE PARTIDA DOS CONTATOS	1,72°	86,4°	108°
NÍVEL DE PRESTRIKE	42500 [V]	10700 [V]	6750 [V]
TEMPO PARA OCORRER A 1. <sup>a</sup> PREIGNIÇÃO	7,4 [mseg]	7,44 [mseg]	7,92 [mseg]

(c) Tensão do Sistema = 45000 [V $\phi$  - T] (Valor máximo fase-neutro).

Tabela 3.2

### 3.5 - CONCLUSÕES

Sem dúvida, o que de mais importante se destaca neste capítulo é o desenvolvimento de um modelo matemático da tensão de recuperação dinâmica do dielétrico entre os contatos, seguindo a extinção do arco elétrico (Seção 3.3 deste capítulo).

Primeiramente, estudou-se a influência das propriedades termofísicas do material dos contatos (representada pela velocidade térmica das partículas de gás do volume do espaçamento entre contatos) e das dimensões do espaçamento. Estes dois parâmetros, conforme pôde ser visto, são decisivos no que se refere à taxa de recuperação da tensão de suportabilidade dinâmica do dielétrico entre os contatos. Deve ser observado que o perfil da suportabilidade dinâmica do espaçamento, após a extinção do arco, tem como limite superior o perfil da tensão de ruptura estática do espaçamento. A literatura tem mostrado que os disjuntores a vácuo são capazes de suportar tensões de recuperação transitória (TRV's) da

ordem de 10 a 20 [KV/ $\mu$ seg], ou seja, 10 a 20 vezes mais que o esperado para disjuntores a ar comprimido, por exemplo [35].

Quanto à capacidade de interrupção de correntes de alta frequência, observa-se que o disjuntor a vácuo tem capacidade bem superior aos demais tipos de disjuntores.

Por último, foi feito um estudo sobre o nível de preignição numa operação de fechamento dos polos de um disjuntor a vácuo, onde se conclui que não é correto a idéia frequente de que a preignição ocorre no pico da tensão aplicada aos terminais do disjuntor. Observou-se, no entanto, que, para um dado nível de tensão e velocidade de fechamento dos contatos, o nível de preignição depende do ponto da curva de tensão em que partem os contatos. Observou-se ainda que, para velocidades de fechamento diferentes, os níveis de preignição são diferentes, embora o ponto de partida dos contatos tenha sido o mesmo (Fig.3.11). Portanto, o nível de preignição é função da tensão do sistema, do ângulo de fechamento dos contatos e da velocidade de fechamento dos contatos.



## CAPÍTULO IV

MODELO MATEMÁTICO DO MECANISMO DE INTERRUPTÃO DE CORRENTE INDUTIVA POR DISJUNTORES A VÁCUO E SIMULAÇÃO DE CHAVEAMENTO DE CARGAS INDUTIVA E CAPACITIVA.

### 4.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar um modelo matemático do mecanismo de interrupção de correntes por disjuntores a vácuo e, em conjunto com o modelo matemático do perfil da Tensão de recuperação dielétrica desenvolvido no Capítulo II, obter resultados de simulações digitais de interrupção de correntes indutivas e capacitivas e energização de cargas capacitivas\*. Nestas simulações serão estudados os fenômenos de re-ignição e pre-ignição, como função de distância entre contatos no instante de chaveamento, da corrente cortada e dos parâmetros do circuito.

Os chaveamentos a serem simulados serão aqueles que se conhece serem objeto de muitos estudos, pelos problemas que têm apresentado. Serão simulados, portanto, interrupções de correntes indutivas, interrupção de correntes capacitivas e energização de cargas capacitivas.

O mecanismo de interrupção de corrente aqui mencionado, considera o corte verdadeiro de corrente. Uma vez que este

\* As simulações a serem executadas serão monofásicas. O procedimento para simulações em circuitos trifásicos será apresentado no Apêndice A.

corrente é particularmente interessante nas pequenas correntes indutivas, face ao nível de corrente que pode ser cortada, e à impedância de surto normalmente alta neste tipo de carga, será utilizado na simulação de interrupção de corrente indutiva um circuito simples, classicamente utilizado para representar pequenas cargas indutivas.

#### 4.2 - MODELO MATEMÁTICO DO MECANISMO DE INTERRUPTÃO DE CORRENTE INDUTIVA POR DISJUNTORES A VÁCUO E PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL.

##### 4.2.1 - CIRCUITO BÁSICO E CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

O circuito mostrado na figura 4.1 é comumente utilizado para representar uma fonte alimentando uma pequena carga indutiva [15,23,24]. Neste circuito, um disjuntor a vácuo (s) controla uma carga indutiva de indutância  $L_L$  e sua capacitância associada,  $C_L$ . Esta indutância pode ser, por exemplo, a indutância de magnetização de um transformador a vazio.

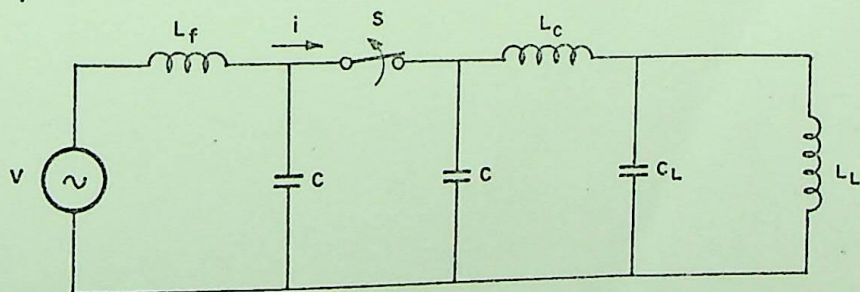


FIG.4.1- Circuito Básico para ilustrar interrupção de corrente indutiva.

onde,

NCCM = Nível de corte característico máximo, determinado de testes experimentais; por exemplo, 4A (dado de entrada).

DIDTM = Um valor presumido de  $di/dt$  no qual não ocorreria corte de corrente; por exemplo, 100 A/  $\mu$ s (dado de entrada).

$|DI|$  = Valor absoluto de  $di/dt$  calculado em determinado instante de tempo.

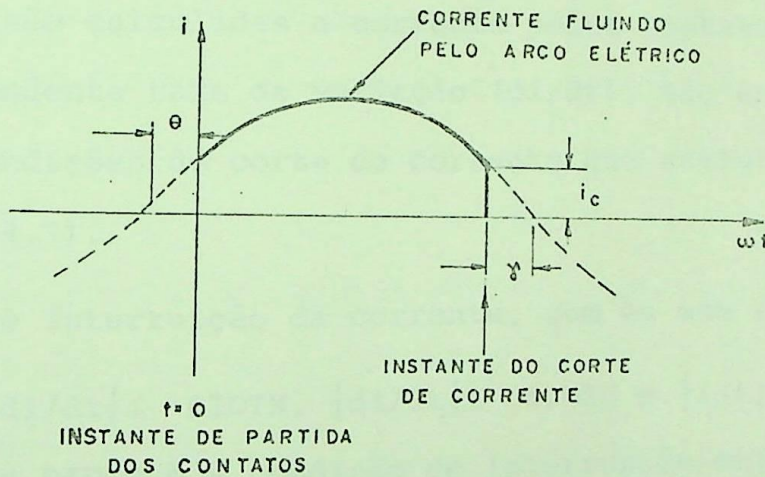


FIG. 4.2 - Ilustração da Interrupção de Corrente com corte.

#### 4.2.2 -- PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

O processo de interrupção de corrente, modelado matematicamente, está representado por uma chave que simula interrupção e condução de corrente, a qual está incorporada (via subrotina) a um programa para cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistema elétricos de potência, desenvolvido na EFEI. A chave procede da seguinte maneira, quando solicitada a interromper uma corrente:

1. A partir do instante de solicitação para interrupção, dá-se a partida dos contatos.
2. A cada intervalo de tempo (contando da partida dos contatos) são calculadas a corrente pelos contatos e sua correspondente taxa de variação ( $di/dt$ ). São então testadas as condições de corte de corrente que satisfazem à equação (4.1).
3. Ocorre interrupção da corrente, com ou sem corte, se:
  - (a)  $|di/dt| \leq DIDTM$ ,  $|di/dt| \leq DIDTC$  e  $|i(t)| \leq i_c(t)$ , onde  $DIDTC$  é a condição de interrupção crítica do interruptor (obtida de testes experimentais).
  - (b)  $|di/dt| \leq DIDTM$ ,  $|di/dt| \leq DIDTC$  e a corrente passou por zero entre o instante  $t$  considerado e o instante  $t' - \Delta t$ .
  - (c)  $|di/dt| \leq DIDTC$ , e  $|i(t)| \leq I_{REF}$  ou  $i(t)$  passou por zero entre  $t - \Delta t$  e  $t$ , onde  $I_{REF}$  é um valor pequeno, tomado como referência.

Os seguintes fatos devem ser observados, neste

processo de interrupção de corrente:

1. Como os cálculos são discretos, executados a cada intervalo de tempo, um valor calculado igual a zero somente ocorreria por pura coincidência. É por este motivo que não se compara a corrente calculada com zero (quando necessário), e sim com um pequeno valor tomado como referência ( $I_{REF}$ ). A liberdade de escolha do valor de referência está relacionada com o intervalo de integração, ou seja, quanto menor o intervalo de integração, menor poderá ser o valor tomado como referência.
  
  2. Pode ocorrer que sejam satisfeitas DIDTM e DIDTC, porém, a corrente pelos contatos é superior ao nível de corte calculado ( $i_c$ ). Nesta situação, é feito um teste para verificar se a corrente passou por zero entre o instante de tempo  $t - \Delta t$  e o instante  $t$  em estudo, onde  $\Delta t$  é o intervalo de integração. Caso a corrente tenha passado por zero entre estes dois instantes, é executada a interrupção da mesma no instante  $t$ .
- Esta é, no entanto, uma condição muito difícil de ocorrer, já que há necessidade de se utilizar intervalo de integração muito pequeno (poucos microssegundos), de tal modo que a corrente fatalmente irá se situar abaixo do nível de corte do disjuntor, ao se aproximar de zero.

Uma vez ocorrida a interrupção de corrente pelo disjuntor, em determinado instante de tempo  $t$ , a partir do instante  $t + \Delta t$  calcula-se a Tensão de Ruptura do dielétrico em

tre os contatos e a Tensão de restabelecimento do circuito sobre os mesmos. Compara-se os dois valores calculados e, se por acaso, a Tensão de Restabelecimento do sistema for igual ou maior que a Tensão suportável pelo disjuntor, haverá recondução de corrente através do arco formado entre os contatos.

A corrente transitória seguindo imediatamente a ruptura do dielétrico é, normalmente, de alta frequência. Por isso a interrupção desta corrente é comumente executada em um de seus zeros, por exemplo, o segundo, o que significa que não se considera corte na corrente fluindo pelo arco. Por motivo já tornado conhecido, compara-se o valor da corrente calculada com um valor tomado como referência, em vez de comparar com zero. Uma outra condição que impõe a interrupção desta corrente de alta frequência é que a mesma tenha passado por zero entre os instantes  $t - \Delta t$  e  $t$ , onde  $t$  é o instante de tempo em estudo. Esta verificação para interrupção ocorre se a primeira condição não for satisfeita, ou seja, a corrente em  $t$  é maior que a corrente tomada como referência.

Todo o processo de interrupção e restabelecimento de corrente é comandado por uma subrotina incorporada ao Programa para cálculo de Transitórios Eletromagnéticos já mencionado a qual é solicitada a partir do instante de comando de abertura dos contatos. O fluxograma da figura 4.3 mostra o procedimento computacional de interrupção de corrente, onde se pode observar a interação da subrotina com o programa principal.

PROGR. PRINCIPAL FOR-  
NECE TENSÃO E COR-  
RENTE NA CHAVE A  
CADA INTERVALO DE  
TEMPO

SUBROTINA DE ABERTURA

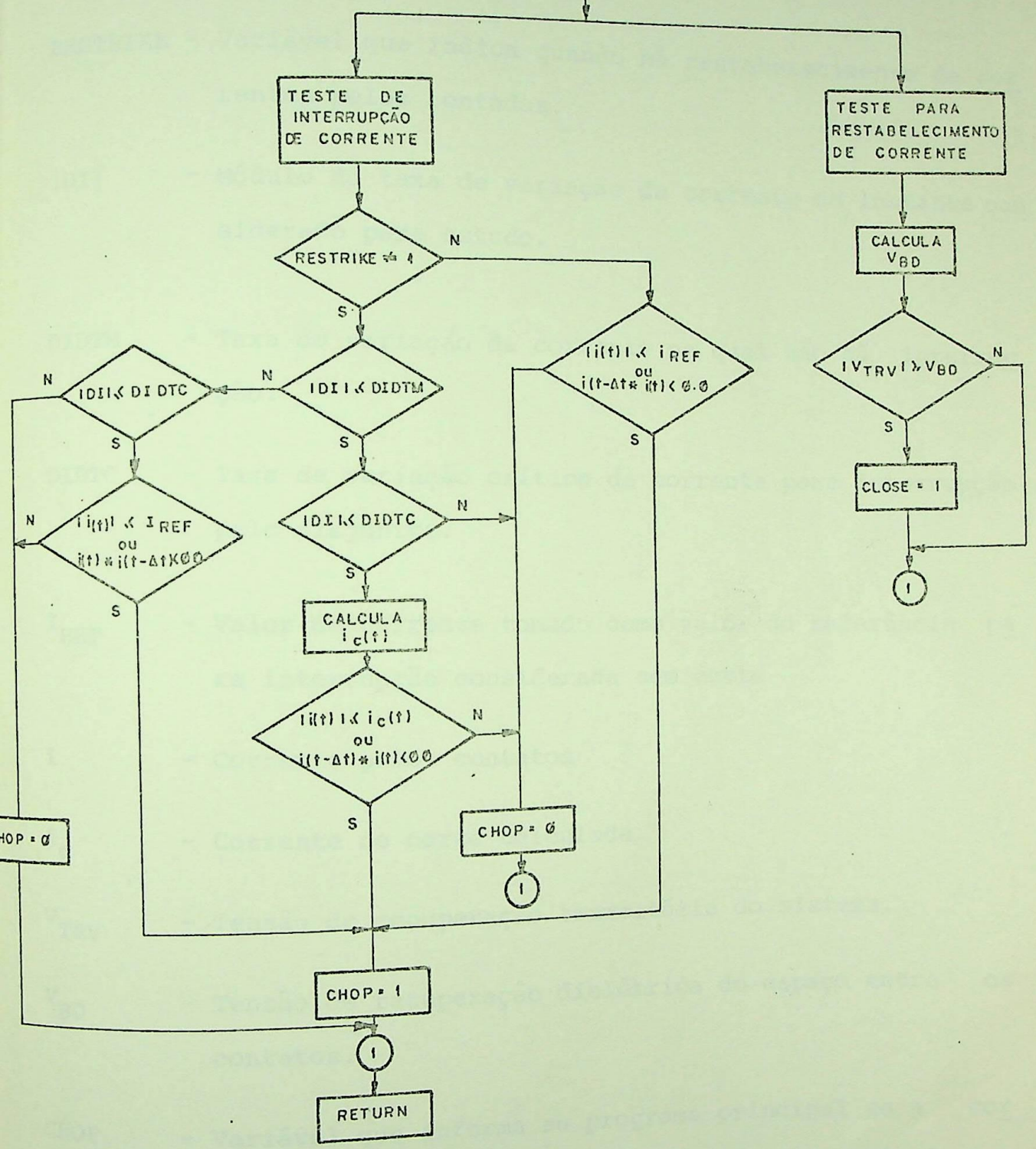


FIG. 4.3 - Fluxograma do Mecanismo de Abertura Eletromecânica dos Contatos.

## DEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS

- RESTRIKE - Variável que indica quando há restabelecimento de correntes pelos contatos.
- $|DI|$  - Módulo da taxa de variação da corrente no instante considerado para estudo.
- DIDTM - Taxa de variação da corrente na qual não há interrupção.
- DIDTC - Taxa de variação crítica de corrente para interrupção pelo disjuntor.
- $I_{REF}$  - Valor de corrente tomado como valor de referência para interrupção considerada sem corte
- $i$  - Corrente pelos contatos
- $i_c$  - Corrente de corte calculada
- $V_{TRV}$  - Tensão de recuperação transitória do sistema.
- $V_{BD}$  - Tensão de recuperação dielétrica do espaço entre os contatos.
- CHOP - Variável que informa ao programa principal se a corrente deve ou não ser interrompida no instante de tempo considerado.



CHOP=1 - Deve haver interrupção

CHOP=0 - Não deve haver interrupção

CLOSE - Variável que informa ao programa principal se deve ou não haver restabelecimento de corrente no instante de tempo considerado.

CLOSE=1 - Deve haver restabelecimento de corrente

CLOSE=0 - Não deve haver restabelecimento de corrente

#### 4.3 - CHAVEAMENTO DE CORRENTE CAPACITIVA - PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

##### 4.3.1 - INTERRUPÇÃO DE CORRENTE CAPACITIVA-PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

Nas simulações de interrupção de correntes capacitivas, a interrupção ocorre quando a corrente encontra-se em torno de zero, ou seja, encontra-se dentro de um limite de referência fornecido nos dados de entrada. Este procedimento decorre do fato de que a pior situação de chaveamento de uma carga capacitiva é quando a corrente da carga está em torno de zero, uma vez que nesta situação a Tensão está em torno de seu valor máximo, o que favorece o aparecimento das sobretensões, por ocasião das reignições ou reacendimentos do arco elétrico.

Embora o disjuntor utilizado nas simulações tenha um nível de corte de 4[A], não significa que, na prática, não possam ser interrompidas correntes em torno de zero. Portanto, nas simulações de interrupção de correntes capacitivas, será adotado um valor em torno de zero como sendo o nível de corte dado como entrada. Desta forma, o procedimento para interrupção de correntes capacitivas será o mesmo que para correntes indutivas, apenas variando o nível de corte.

##### 4.3.2 - ENERGIZAÇÃO DE CARGA CAPACITIVA-PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

O principal objetivo deste item é: ordenada a operação de

fechamento dos contatos do disjuntor, verificar o problema de pré-ignição dos contatos por meio do arco elétrico formado entre os mesmos.

A fim de se poder executar estas simulações, desenvolveu-se uma subrotina que, incorporada ao programa para cálculo de transitórios eletromagnéticos já mencionado, é capaz de comandar não apenas o fechamento dos contatos, como também interromper as correntes de alta frequência que poderão fluir através de um arco elétrico gerado por ruptura do dielétrico entre os contatos. Quer isto dizer que a chave simula múltiplas pré-ignições dos contatos.

Cabe lembrar que a corrente de pré-ignição é interrompida em um de seus zeros, visto que a mesma é normalmente de alta frequência.

O critério de interrupção é (dado o zero no qual se deseja interromper a corrente):

- (a) A corrente será interrompida quando se situar dentro de uma margem de referência,  $I_{REF}$ .
- (b) A corrente será interrompida quando passar por zero entre dois intervalos de tempo.

Para que haja interrupção, tanto no critério (a), como no (b), é necessário que o nº de zeros em que a corrente passou seja igual ao nº de zeros em que se deseja que haja interrupção, o que é um dado de entrada (Ver apêndice A, A.3.4).

O fluxograma da figura 4.4 mostra o procedimento computacional do fechamento eletromecânico dos contatos.

Embora se trate nesta seção da energização de carga capacitiva, o mecanismo de energização é o mesmo para qualquer tipo de carga.

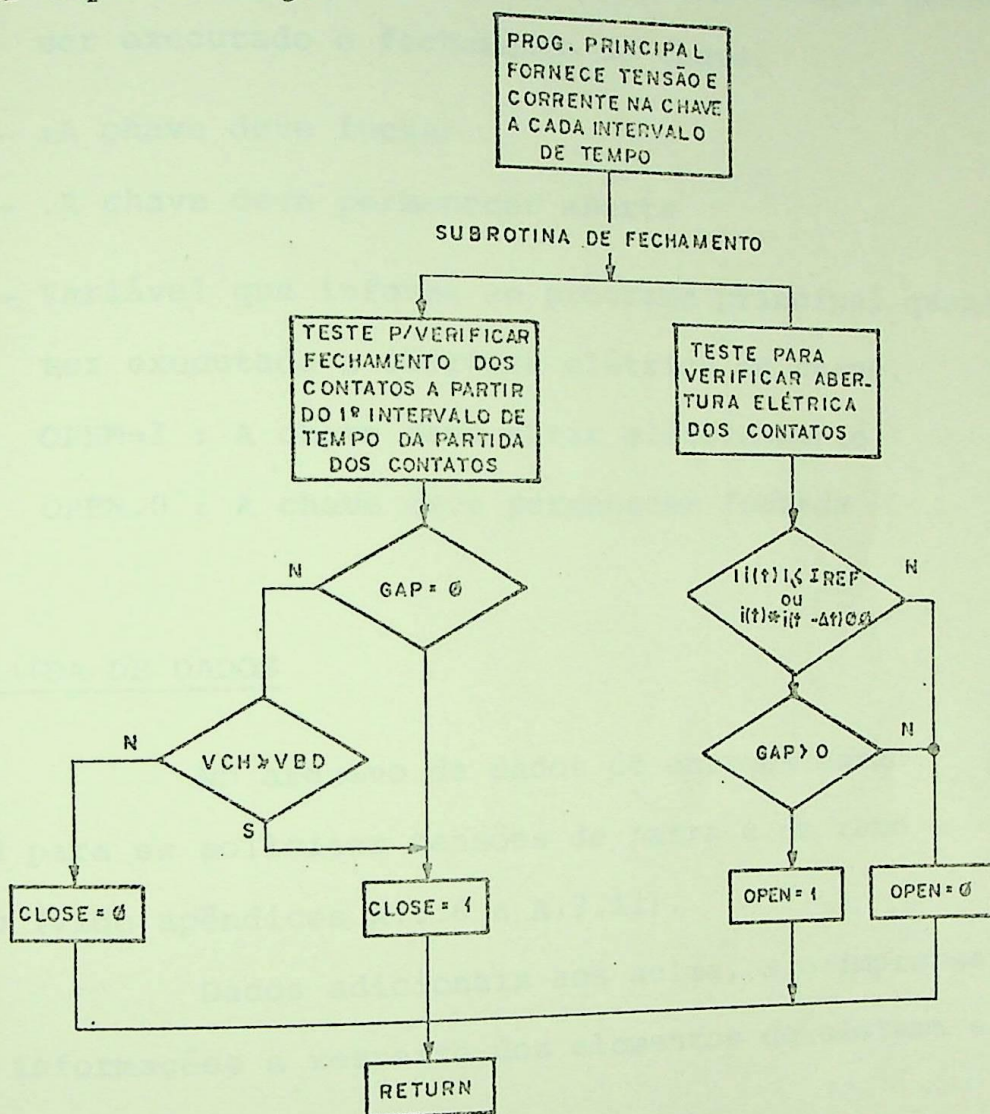


FIG. 4.4 - Fluxograma do Mecanismo de Fechamento Eletromecânico dos Contatos.

#### DEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS

- GAP - Distância entre contatos
- VCH - Tensão sobre a chave imposta pelo sistema
- VBD - Tensão suportável pelo interruptor
- $i(t)$  - Corrente pelos contatos.

- $I_{REF}$  - Valor de corrente tomado como valor de referência para interrupção sem corte de corrente.
- CLOSE - Variável que informa ao programa principal quando deve ser executado o fechamento da chave.
- CLOSE=1 - :A chave deve fechar
- CLOSE=0 - .A chave deve permanecer aberta
- OPEN - Variável que informa ao programa principal quando deve ser executada a abertura elétrica da chave.
- OPEN=1 : A chave deve abrir eletricamente
- OPEN=0 : A chave deve permanecer fechada

#### 4.4 - SAÍDA DE DADOS

No arquivo de dados de entrada estão previstos cartões para se solicitar tensões de barra e de ramo e correntes de ramo (vide apêndices A.3.6 a A.3.11).

Dados adicionais aos acima, são impressos a fim de dar informações a respeito dos elementos do sistema e da configuração deste.

Todas as variáveis impressas estão definidas no manual de uso do programa (Apêndice A).

As tensões de barra são valores máximos, para a referência ( $V_{max} \emptyset-t$ ). A seguir, apresenta-se uma saída de dados, com a finalidade de mostrar a maneira de apresentação dos dados e confirmar o funcionamento do programa. Para tal, simulou-se a abertura do disjuntor representado no circuito da figura 4.5.

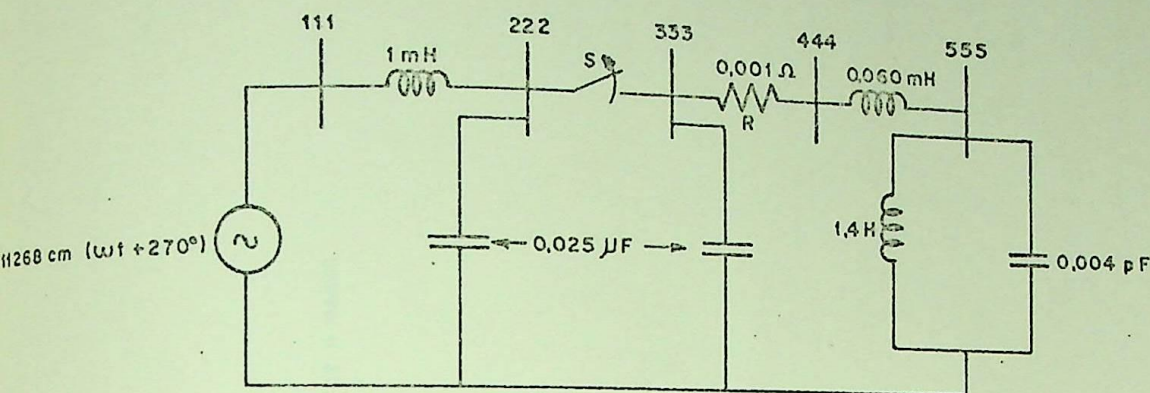


FIG.4.5 - Circuito para simulação de interrupção da corrente.

Os resultados de tensões da barra e correntes de ramo foram impressos de 99 em 99 pontos. Esta é uma opção de saída (vide A.3.2).

Nos dados de chave impressos, verifica-se que  $TC = 2$ . Isto significa que, havendo reabertura dos contatos, a corrente deve ser interrompida ao passar duas vezes por zero. A curva 4.6 mostra este procedimento.

DADOS GERAIS  
-----

```

- NOME DO CASO ..... CASO TESTE DE CHAVEAMENTO COM DISJUNTOR A VACUO
- FREQUENCIA ..... .6000E+02 HZ
- INTERVALO DE INTEGRACAO .. .2000E-05
- TEMPO MAXIMO ..... .1500E-01
- LOPT ..... 0
- COPT ..... 0
- ISTART ..... 0 <CONDICOES INICIAIS IGUAIS A ZERO>
- IRESUL ..... 99
- IPLOT ..... 0
- ISOLEP ..... 0

```

-----  
DADOS DE RAMOS  
-----

I I I	NUMERO RAMO	DO I	TIPO I	BARRA I	EMISSORA I	RECEPTORA I	BARRA I	RECEPTORA I	RESISTENCIA I	INDUTANCIA I	INDUTANCIA I	CAPACITANCIA I
I	1	I	I	332	I	344	I	344	.1000E-02	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00
I	2	I	I	111	I	222	I	222	.0000E+00	.1000E+01	.0000E+00	.0000E+00
I	3	I	I	222	I		I	0	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	.2500E-01
I	4	I	I	333	I		I	0	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	.2500E-01
I	5	I	I	444	I	555	I	555	.0000E+00	.6000E-01	.0000E+00	.0000E+00
I	6	I	I	555	I		I	0	.0000E+00	.1400E+04	.0000E+00	.0000E+00
I	7	I	I	555	I		I	0	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	.4000E-08

RAMOS



## DADOS DE CHAVES

```

I NUMERO I CODIGO I BARRA I TEMPO DE I TEMPO DE I MARGEM DE I TENSÃO DE I
I I I I RECEPTORA I FECHAMENTO I ABERTURA I CONDUCAO I CORRENTE I DESCARGA I
I I I I 222 I 333 I -1000E-02 I .1520E-01 I .1000E-02 I .1000E+06 I
I NCCM = .2300E+01 DIDTM = .1000E+03 DIOTC = .5500E+03 VTERM = .1000E+06 I
I VMOVE = .1000E+03 CCOND = .1000E+01 TC = 2 ACONT = .1960E+02 CMAX = .6000E+00 I
I PA = .7600E+05 PB = -.1200E+07 PC = -.1500E+07 PD = .1750E+07 I
I PE = .4000E+07 PF = .6000E+00 PG = .0000E+00 PH = .0000E+00 I

```

CODIGO 1 - CHAVE CONTROLADA POR TEMPO

CODIGO 2 - CHAVE CONTROLADA POR TENSÃO

CODIGO 3 - CHAVE SEMICONDUCTORA &lt; TIRISTOR OU DIODO &gt;

CODIGO 4 - MODELO DE ARCO

CHAVES

DADOS DE FONTES

```

-----
I TIPO I BARRA I COD I AMPLITUDE A I AMPLITUDE B I TEMPO T0 I TEMPO T1 I DEFAZAGEM I ADIC I
-----
I 12 I 111 I 1 I .112680E+05 I .000000E+00 I .000000E+00 I .000000E+00 I .270000E+03 I 0 I
-----

```

```

TIPO 11 - FONTE DE CORRENTE
TIPO 12 - FONTE DE TENSÃO

```

```

CODIGO 1 - SENCIDAL
CODIGO 2 - DEGRAU
CODIGO 3 - RAMPA LIMITADA POR DEGRAU
CODIGO 4 - RAMPA DE DUPLA INCLINACAO

```

```

FONTES
VF CHAYE

```

## DADOS ESTADÍSTICOS DO SISTEMA

- NUMERO DE BARRAS.....	5
- NUMERO DE RAMOS.....	7
- NUMERO DE CHAVES.....	1
CHAVES DO TIPO 1.....	0
CHAVES DO TIPO 2.....	0
CHAVES DO TIPO 3.....	0
- CHAVES DO TIPO 4.....	1
- NUMERO DE FONTES DE TENSÃO.....	1
- NUMERO DE FONTES DE CORRENTE....	0

DADOS DE SAIDA

- BARRAS PARA IMPRESSAO DE TENSORES DE BARRA

111 222 333 444 555

- RAMOS PARA IMPRESSAO DE CORRENTES DE RAMO

111 \* 222 222 \* 333 .333 \* 444 555 \* 0

DADOS SAIDA

RESULTADOS - TENSORES DE BARRA

INTERVALO TEMPO BARRA 111 BARRA 222 BARRA 333 BARRA 444 BARRA 555

0	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00
99	.1980E-03	.8403E+03	.8267E+03	.8267E+03	.8267E+03	.8267E+03
198	.3960E-03	.1679E+04	.1698E+04	.1698E+04	.1698E+04	.1698E+04
297	.5940E-03	.2562E+04	.2471E+04	.2471E+04	.2471E+04	.2471E+04
395	.7920E-03	.3314E+04	.3341E+04	.3341E+04	.3341E+04	.3341E+04
495	.9900E-03	.4188E+04	.4082E+04	.4082E+04	.4082E+04	.4082E+04
594	.1188E-02	.4879E+04	.4899E+04	.4899E+04	.4899E+04	.4899E+04
692	.1366E-02	.5623E+04	.5619E+04	.5619E+04	.5619E+04	.5619E+04
792	.1554E-02	.6399E+04	.6318E+04	.6318E+04	.6318E+04	.6318E+04
891	.1782E-02	.7013E+04	.7031E+04	.7031E+04	.7031E+04	.7031E+04
990	.1980E-02	.7851E+04	.7616E+04	.7616E+04	.7616E+04	.7616E+04
1039	.2178E-02	.8246E+04	.8270E+04	.8270E+04	.8270E+04	.8270E+04
1139	.2376E-02	.8759E+04	.8756E+04	.8756E+04	.8756E+04	.8756E+04
1237	.2574E-02	.9297E+04	.9304E+04	.9304E+04	.9304E+04	.9304E+04
1336	.2772E-02	.9746E+04	.9738E+04	.9738E+04	.9738E+04	.9738E+04
1435	.2970E-02	.1014E+05	.1012E+05	.1012E+05	.1012E+05	.1012E+05
1534	.3168E-02	.1047E+05	.1049E+05	.1049E+05	.1049E+05	.1049E+05
1633	.3366E-02	.1079E+05	.1072E+05	.1072E+05	.1072E+05	.1072E+05
1732	.3564E-02	.1097E+05	.1100E+05	.1100E+05	.1100E+05	.1100E+05
1831	.3762E-02	.1113E+05	.1105E+05	.1105E+05	.1105E+05	.1105E+05
1930	.3960E-02	.1124E+05	.1124E+05	.1124E+05	.1124E+05	.1124E+05
2029	.4158E-02	.1128E+05	.1125E+05	.1125E+05	.1125E+05	.1125E+05
2128	.4356E-02	.1133E+05	.1121E+05	.1121E+05	.1121E+05	.1121E+05
2227	.4554E-02	.1148E+05	.1116E+05	.1116E+05	.1116E+05	.1116E+05
2326	.4752E-02	.1099E+05	.1098E+05	.1098E+05	.1098E+05	.1098E+05
2425	.4950E-02	.1078E+05	.1080E+05	.1080E+05	.1080E+05	.1080E+05
2524	.5148E-02	.1058E+05	.1047E+05	.1047E+05	.1047E+05	.1047E+05
2623	.5346E-02	.1017E+05	.1017E+05	.1017E+05	.1017E+05	.1017E+05
2722	.5544E-02	.9728E+04	.9774E+04	.9774E+04	.9774E+04	.9774E+04
2821	.5742E-02	.9336E+04	.9320E+04	.9320E+04	.9319E+04	.9319E+04
2920	.5940E-02	.8942E+04	.8858E+04	.8858E+04	.8858E+04	.8858E+04
3019	.6138E-02	.8269E+04	.8262E+04	.8262E+04	.8262E+04	.8262E+04
3118	.6336E-02	.7999E+04	.7729E+04	.7729E+04	.7729E+04	.7729E+04
3217	.6534E-02	.7070E+04	.7041E+04	.7041E+04	.7041E+04	.7041E+04
3316	.6732E-02	.6396E+04	.6406E+04	.6406E+04	.6406E+04	.6406E+04
3415	.6930E-02	.5687E+04	.5681E+04	.5681E+04	.5681E+04	.5681E+04
3514	.7128E-02	.4948E+04	.4930E+04	.4930E+04	.4930E+04	.4930E+04
3613	.7326E-02	.4170E+04	.4196E+04	.4196E+04	.4196E+04	.4196E+04
3712	.7524E-02	.3394E+04	.3393E+04	.3393E+04	.3393E+04	.3393E+04
3811	.7722E-02	.2574E+04	.2601E+04	.2601E+04	.2601E+04	.2601E+04
3910	.7920E-02	.1749E+04	.1723E+04	.1723E+04	.1723E+04	.1723E+04
4009	.8118E-02	.9197E+03	.9273E+03	.9273E+03	.9273E+03	.9273E+03
4108	.8316E-02	.7390E+02	.7203E+02	.7203E+02	.7199E+02	.7199E+02
4207	.8514E-02	.7668E+03	.7779E+03	.7779E+03	.7779E+03	.7779E+03
4306	.8712E-02	.1603E+04	.1579E+04	.1579E+04	.1579E+04	.1579E+04
4405	.8910E-02	.9430E+04	.9475E+04	.9475E+04	.9475E+04	.9475E+04
4504	.9108E-02	.5442E+04	.5212E+04	.5212E+04	.5212E+04	.5212E+04
4603	.9306E-02	.4039E+04	.4061E+04	.4061E+04	.4061E+04	.4061E+04

4752	.9504E-02	.47951E+04	.47951E+04	.47951E+04	.47951E+04
4851	.9702E-02	.5557E+04	.5557E+04	.5557E+04	.5557E+04
4950	.9900E-02	.6261E+04	.6261E+04	.6261E+04	.6261E+04
5049	.1010E-01	.6922E+04	.6922E+04	.6922E+04	.6922E+04
5148	.1020E-01	.7620E+04	.7620E+04	.7620E+04	.7620E+04
5247	.1049E-01	.8161E+04	.8161E+04	.8161E+04	.8161E+04
5346	.1069E-01	.8758E+04	.8758E+04	.8758E+04	.8758E+04
5445	.1089E-01	.9254E+04	.9254E+04	.9254E+04	.9254E+04
5544	.1109E-01	.9704E+04	.9704E+04	.9704E+04	.9704E+04
5643	.1129E-01	.1012E+05	.1012E+05	.1012E+05	.1012E+05
5742	.1148E-01	.1042E+05	.1042E+05	.1042E+05	.1042E+05
5841	.1168E-01	.1073E+05	.1073E+05	.1073E+05	.1073E+05
5940	.1188E-01	.1092E+05	.1092E+05	.1092E+05	.1092E+05
6039	.1208E-01	.1114E+05	.1114E+05	.1114E+05	.1114E+05
6138	.1228E-01	.1126E+05	.1126E+05	.1126E+05	.1126E+05
6237	.1247E-01	.1142E+05	.1142E+05	.1142E+05	.1142E+05
6336	.1267E-01	.1163E+05	.1163E+05	.1163E+05	.1163E+05
6435	.1287E-01	.1185E+05	.1185E+05	.1185E+05	.1185E+05
6534	.1307E-01	.1207E+05	.1207E+05	.1207E+05	.1207E+05
6633	.1327E-01	.1247E+05	.1247E+05	.1247E+05	.1247E+05
6732	.1346E-01	.1297E+05	.1297E+05	.1297E+05	.1297E+05
6831	.1366E-01	.1357E+05	.1357E+05	.1357E+05	.1357E+05
6930	.1386E-01	.1427E+05	.1427E+05	.1427E+05	.1427E+05
7029	.1406E-01	.1507E+05	.1507E+05	.1507E+05	.1507E+05
7128	.1426E-01	.1597E+05	.1597E+05	.1597E+05	.1597E+05
7227	.1446E-01	.1697E+05	.1697E+05	.1697E+05	.1697E+05
7326	.1466E-01	.1807E+05	.1807E+05	.1807E+05	.1807E+05
7425	.1486E-01	.1927E+05	.1927E+05	.1927E+05	.1927E+05
7524	.1506E-01	.2057E+05	.2057E+05	.2057E+05	.2057E+05
7623	.1526E-01	.2197E+05	.2197E+05	.2197E+05	.2197E+05
7722	.1546E-01	.2347E+05	.2347E+05	.2347E+05	.2347E+05
7821	.1566E-01	.2507E+05	.2507E+05	.2507E+05	.2507E+05
7920	.1586E-01	.2677E+05	.2677E+05	.2677E+05	.2677E+05
4752	.47951E+04	.47951E+04	.47951E+04	.47951E+04	.47951E+04
4851	.5557E+04	.5557E+04	.5557E+04	.5557E+04	.5557E+04
4950	.6261E+04	.6261E+04	.6261E+04	.6261E+04	.6261E+04
5049	.6922E+04	.6922E+04	.6922E+04	.6922E+04	.6922E+04
5148	.7620E+04	.7620E+04	.7620E+04	.7620E+04	.7620E+04
5247	.8161E+04	.8161E+04	.8161E+04	.8161E+04	.8161E+04
5346	.8758E+04	.8758E+04	.8758E+04	.8758E+04	.8758E+04
5445	.9254E+04	.9254E+04	.9254E+04	.9254E+04	.9254E+04
5544	.9704E+04	.9704E+04	.9704E+04	.9704E+04	.9704E+04
5643	.1012E+05	.1012E+05	.1012E+05	.1012E+05	.1012E+05
5742	.1042E+05	.1042E+05	.1042E+05	.1042E+05	.1042E+05
5841	.1073E+05	.1073E+05	.1073E+05	.1073E+05	.1073E+05
5940	.1092E+05	.1092E+05	.1092E+05	.1092E+05	.1092E+05
6039	.1114E+05	.1114E+05	.1114E+05	.1114E+05	.1114E+05
6138	.1126E+05	.1126E+05	.1126E+05	.1126E+05	.1126E+05
6237	.1142E+05	.1142E+05	.1142E+05	.1142E+05	.1142E+05
6336	.1163E+05	.1163E+05	.1163E+05	.1163E+05	.1163E+05
6435	.1185E+05	.1185E+05	.1185E+05	.1185E+05	.1185E+05
6534	.1207E+05	.1207E+05	.1207E+05	.1207E+05	.1207E+05
6633	.1247E+05	.1247E+05	.1247E+05	.1247E+05	.1247E+05
6732	.1297E+05	.1297E+05	.1297E+05	.1297E+05	.1297E+05
6831	.1357E+05	.1357E+05	.1357E+05	.1357E+05	.1357E+05
6930	.1427E+05	.1427E+05	.1427E+05	.1427E+05	.1427E+05
7029	.1507E+05	.1507E+05	.1507E+05	.1507E+05	.1507E+05
7128	.1597E+05	.1597E+05	.1597E+05	.1597E+05	.1597E+05
7227	.1697E+05	.1697E+05	.1697E+05	.1697E+05	.1697E+05
7326	.1807E+05	.1807E+05	.1807E+05	.1807E+05	.1807E+05
7425	.1927E+05	.1927E+05	.1927E+05	.1927E+05	.1927E+05
7524	.2057E+05	.2057E+05	.2057E+05	.2057E+05	.2057E+05
7623	.2197E+05	.2197E+05	.2197E+05	.2197E+05	.2197E+05
7722	.2347E+05	.2347E+05	.2347E+05	.2347E+05	.2347E+05
7821	.2507E+05	.2507E+05	.2507E+05	.2507E+05	.2507E+05
7920	.2677E+05	.2677E+05	.2677E+05	.2677E+05	.2677E+05

RESULTADOS - CORRENTES DE RAMO

INTERVALO	TEMPO	RAMO 111*222	RAMO 222*333	RAMO 333*444	RAMO 555* 0
0	.0000E+00	.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00
59	.46211E+00	.46211E+00	.56561E+00	.59110E-01	.59110E-01
197	.3960E-02	.31437E+00	.3960E-02	.23723E+00	.23723E+00
292	.5940E-03	.79740E+00	.91487E+00	.53245E+00	.53245E+00
396	.7920E-03	.11927E+01	.13173E+01	.94337E+00	.94337E+00
495	.5900E-02	.15345E+01	.15680E+01	.14686E+01	.14686E+01
594	.1168E-02	.24855E+01	.26765E+01	.21037E+01	.28465E+01
693	.136E-02	.49132E+01	.42331E+01	.36916E+01	.36916E+01
792	.1584E-02	.40592E+01	.46575E+01	.46355E+01	.46355E+01
891	.1900E-02	.53776E+01	.59304E+01	.56720E+01	.56720E+01
1039	.2178E-02	.68850E+01	.70795E+01	.6795E+01	.8000E+01
1133	.2375E-02	.8037E+01	.8037E+01	.8009E+01	.9279E+01
1287	.2574E-02	.95894E+01	.97442E+01	.9279E+01	.1062E+02
1366	.2772E-02	.10521E+02	.10668E+02	.1066E+02	.1293E+02
1464	.3168E-02	.12317E+02	.12460E+02	.1202E+02	.1293E+02
1603	.3366E-02	.15195E+02	.15163E+02	.1491E+02	.1491E+02
1782	.3504E-02	.16618E+02	.16663E+02	.1628E+02	.1628E+02
1931	.3762E-02	.17995E+02	.17947E+02	.18091E+02	.18091E+02
1980	.3960E-02	.19073E+02	.19930E+02	.1967E+02	.1967E+02
2079	.4155E-02	.2107E+02	.20946E+02	.2126E+02	.2126E+02
2173	.436E-02	.2303E+02	.23122E+02	.2287E+02	.2287E+02
2377	.455E-02	.2426E+02	.24180E+02	.2443E+02	.2443E+02
2376	.4752E-02	.2600E+02	.26012E+02	.2602E+02	.2602E+02
2475	.4950E-02	.27521E+02	.27510E+02	.27541E+02	.27541E+02
2574	.5148E-02	.28843E+02	.28741E+02	.29046E+02	.29046E+02
2673	.5346E-02	.30605E+02	.30655E+02	.3050E+02	.3050E+02
2772	.5544E-02	.31601E+02	.31443E+02	.31519E+02	.31519E+02
2871	.5742E-02	.3346E+02	.33384E+02	.33270E+02	.33270E+02
2970	.5940E-02	.34286E+02	.34151E+02	.3456E+02	.3456E+02
3069	.6138E-02	.35675E+02	.35635E+02	.35737E+02	.35737E+02
3168	.6336E-02	.36725E+02	.36725E+02	.3689E+02	.3689E+02
3267	.6534E-02	.37852E+02	.37807E+02	.37943E+02	.37943E+02
3366	.6732E-02	.38907E+02	.38914E+02	.3895E+02	.3895E+02
3465	.6930E-02	.39954E+02	.39155E+02	.39749E+02	.39749E+02
3564	.7128E-02	.40930E+02	.40507E+02	.40501E+02	.40501E+02
3663	.7326E-02	.4090E+02	.40641E+02	.4116E+02	.4116E+02
3762	.7524E-02	.41535E+02	.4166E+02	.4166E+02	.4166E+02
3861	.7722E-02	.41934E+02	.41934E+02	.4210E+02	.4210E+02
3960	.7920E-02	.42074E+02	.41907E+02	.42407E+02	.42407E+02
4059	.8118E-02	.42570E+02	.42557E+02	.4255E+02	.4255E+02
4158	.8316E-02	.42241E+02	.4200E+02	.4266E+02	.4266E+02
4257	.8514E-02	.42600E+02	.4252E+02	.4244E+02	.4244E+02
4356	.8712E-02	.4208E+02	.41947E+02	.4216E+02	.4216E+02
4455	.8910E-02	.42015E+02	.41947E+02	.4176E+02	.4176E+02
4554	.9108E-02	.41595E+02	.41511E+02	.4123E+02	.4123E+02
4653	.9306E-02	.40927E+02	.40766E+02	.4123E+02	.4123E+02

4752	.5504E+02	.4061E+02	.4062E+02	.4062E+02	.4062E+02
4801	.5945E+02	.3945E+02	.3945E+02	.3945E+02	.3945E+02
4850	.5907E+02	.3907E+02	.3907E+02	.3907E+02	.3907E+02
5049	.1602E-01	.3707E+02	.3707E+02	.3707E+02	.3707E+02
5148	.1930E-01	.3599E+02	.3599E+02	.3599E+02	.3599E+02
5247	.1349E-01	.3355E+02	.3355E+02	.3355E+02	.3355E+02
5346	.1629E-01	.3451E+02	.3451E+02	.3451E+02	.3451E+02
5445	.1088E-01	.3355E+02	.3355E+02	.3355E+02	.3355E+02
5544	.1102E-01	.3189E+02	.3189E+02	.3189E+02	.3189E+02
5643	.1125E-01	.3091E+02	.3091E+02	.3091E+02	.3091E+02
5742	.1148E-01	.2903E+02	.2903E+02	.2903E+02	.2903E+02
5841	.1162E-01	.2780E+02	.2780E+02	.2780E+02	.2780E+02
5940	.1185E-01	.2624E+02	.2624E+02	.2624E+02	.2624E+02
6039	.1208E-01	.2455E+02	.2455E+02	.2455E+02	.2455E+02
6138	.1222E-01	.2338E+02	.2338E+02	.2338E+02	.2338E+02
6237	.1245E-01	.2132E+02	.2132E+02	.2132E+02	.2132E+02
6336	.1267E-01	.2016E+02	.2016E+02	.2016E+02	.2016E+02
6435	.1287E-01	.1809E+02	.1809E+02	.1809E+02	.1809E+02
6534	.1307E-01	.1548E+02	.1548E+02	.1548E+02	.1548E+02
6633	.1327E-01	.1255E+02	.1255E+02	.1255E+02	.1255E+02
6732	.1346E-01	.1070E+02	.1070E+02	.1070E+02	.1070E+02
6831	.1365E-01	.9067E+01	.9067E+01	.9067E+01	.9067E+01
6930	.1382E-01	.8155E+01	.8155E+01	.8155E+01	.8155E+01
7029	.1402E-01	.7352E+01	.7352E+01	.7352E+01	.7352E+01
7128	.1422E-01	.6647E+01	.6647E+01	.6647E+01	.6647E+01
7227	.1442E-01	.6031E+01	.6031E+01	.6031E+01	.6031E+01
7326	.1462E-01	.5504E+01	.5504E+01	.5504E+01	.5504E+01
7425	.1482E-01	.5074E+01	.5074E+01	.5074E+01	.5074E+01
7524	.1502E-01	.4739E+01	.4739E+01	.4739E+01	.4739E+01
7623	.1522E-01	.4498E+01	.4498E+01	.4498E+01	.4498E+01
7722	.1542E-01	.4357E+01	.4357E+01	.4357E+01	.4357E+01
7821	.1562E-01	.4316E+01	.4316E+01	.4316E+01	.4316E+01
7920	.1582E-01	.4375E+01	.4375E+01	.4375E+01	.4375E+01



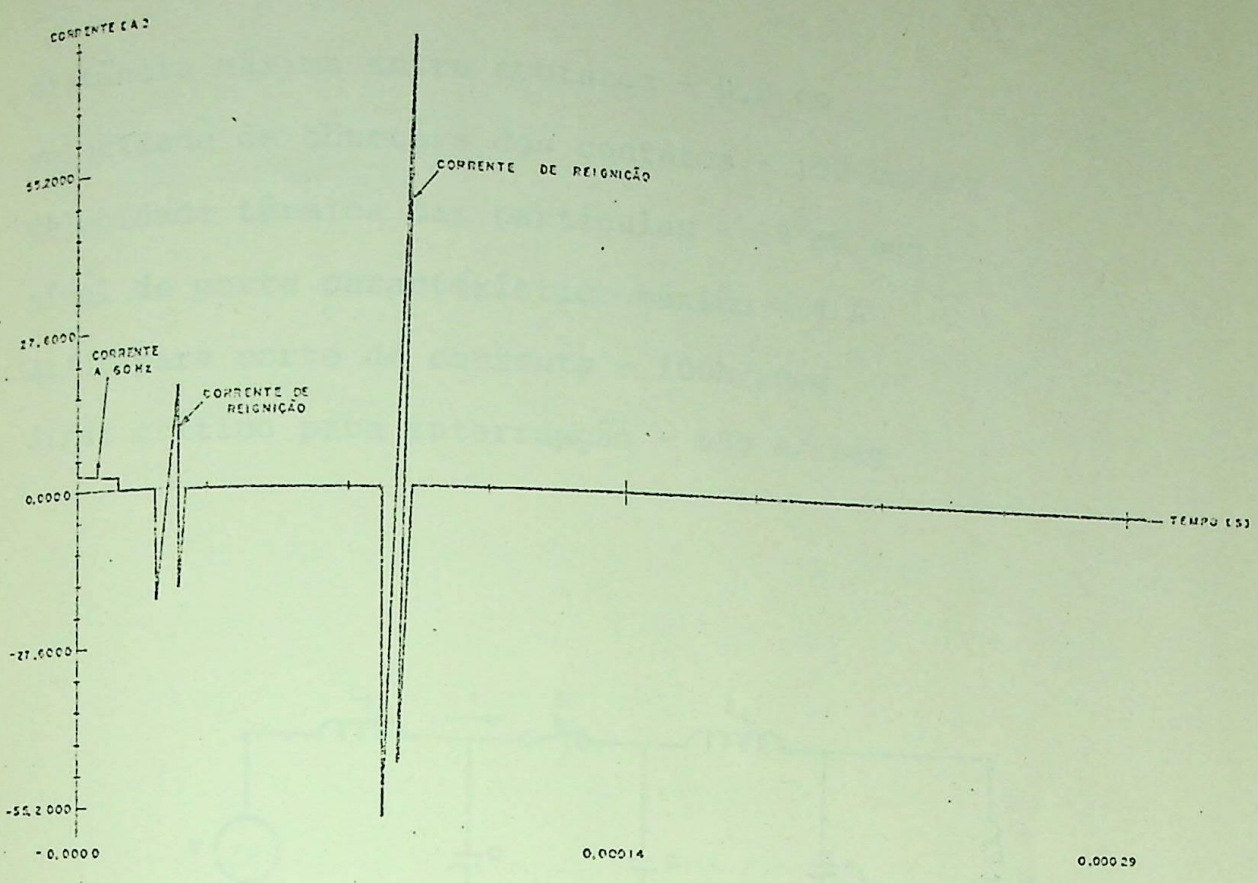


FIG. 4.6 - Corrente de reignição sendo interrompida ao passar duas vezes por zero.

4.5 - SIMULAÇÃO DE INTERRUPTÃO DE CORRENTES INDUTIVAS E ANÁLISE

DOS RESULTADOS

O circuito da figura 4.1, aqui repetido na figura 4.7, será utilizado nas simulações de interrupção de correntes in dutivas.

O disjuntor S, empregado nas simulações, tem as seguintes características:

- material dos contatos - CLR
- diâmetro dos eletrodos - 5,0 cm

distância máxima entre contatos - 0,8 cm  
 velocidade de abertura dos contatos - 100 cm/seg  
 velocidade térmica das partículas -  $10^5$  cm/seg  
 nível de corte característico máximo = 4 A  
 $di/dt$  para corte de corrente - 100A/ $\mu$ seg  
 $di/dt$  crítico para interrupção - 550 A/ $\mu$ seg

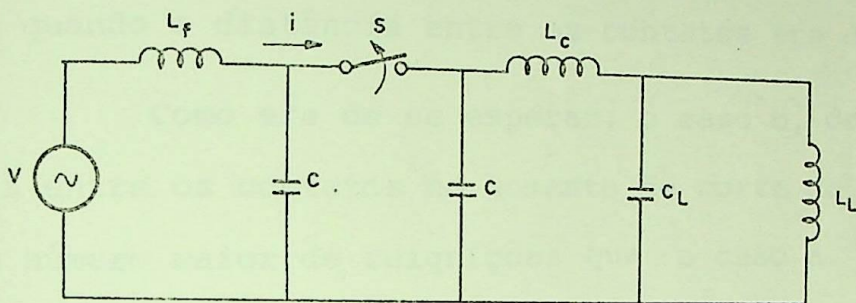


FIG. 4.7 - Circuito utilizado para simulação de  $I_n$  interrupção de correntes Indutivas.

$$v = 11268 \cos(\omega t + 270^\circ)$$

$$L_f = 1,0 \text{ mH}$$

$$C = 0,025 \text{ } \mu\text{F}$$

$$L_c = 0,06 \text{ mH}$$

$$C_L = 0,04 \text{ pF}$$

$$L_L = 1,4 \text{ H}$$

#### 4.5.1-INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE CONTATOS SOBRE O NÚMERO DE REIGNIÇÕES

As curvas da fig. 4.8 mostram os resultados de dois cortes de corrente, no mesmo nível, no circuito da figura 4.7. As curvas da figura 4.8a mostram os resultados do corte de corrente quando a distância entre os contatos era de 0,008 mm, enquanto as curvas da figura 4.8b mostram a interrupção da mesma corrente quando a distância entre os contatos era de 0,002mm .

Como era de se esperar, o caso b, devido à menor distância entre os contatos no momento de corte de corrente, permitiu um número maior de reignições que o caso a.

#### 4.5.2 - EFEITO DO NÍVEL DE CORTE DE CORRENTE SOBRE O NÚMERO DE REIGNIÇÕES

Na seção 4.5.1, os resultados obtidos para um mesmo nível de corte de corrente mostraram que ocorreu um maior número de reignições naquele caso onde os contatos estavam menos distanciados no momento do corte de corrente. Nesta seção, apresenta-se resultados de simulações onde fixou-se a distância entre os contatos e se variou o nível de corte de corrente.

A figura 4.9a mostra os resultados de um corte de corrente de 2,5A, quando a distância entre os contatos era de 0,016 mm, enquanto a figura 4.9b mostra os resultados de um cor

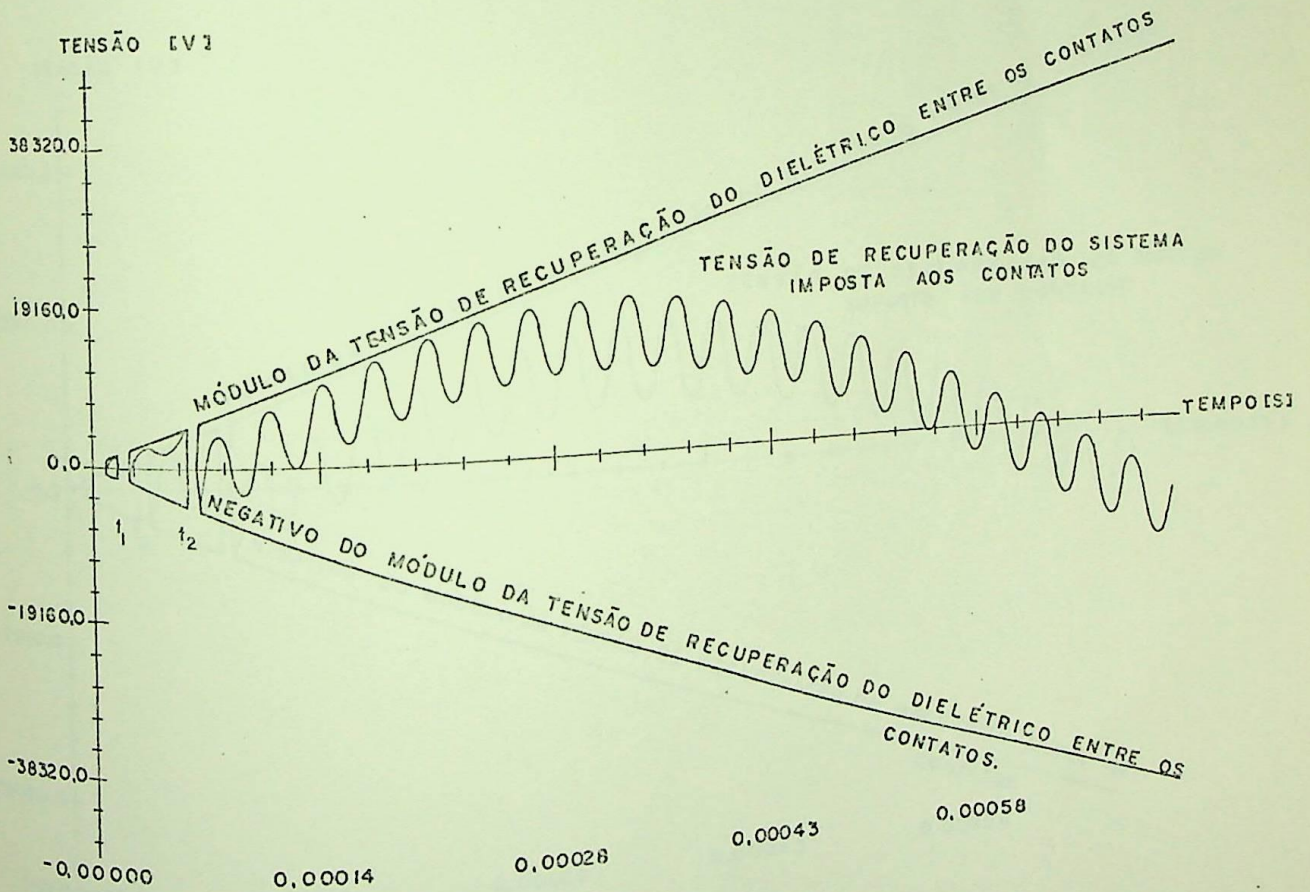
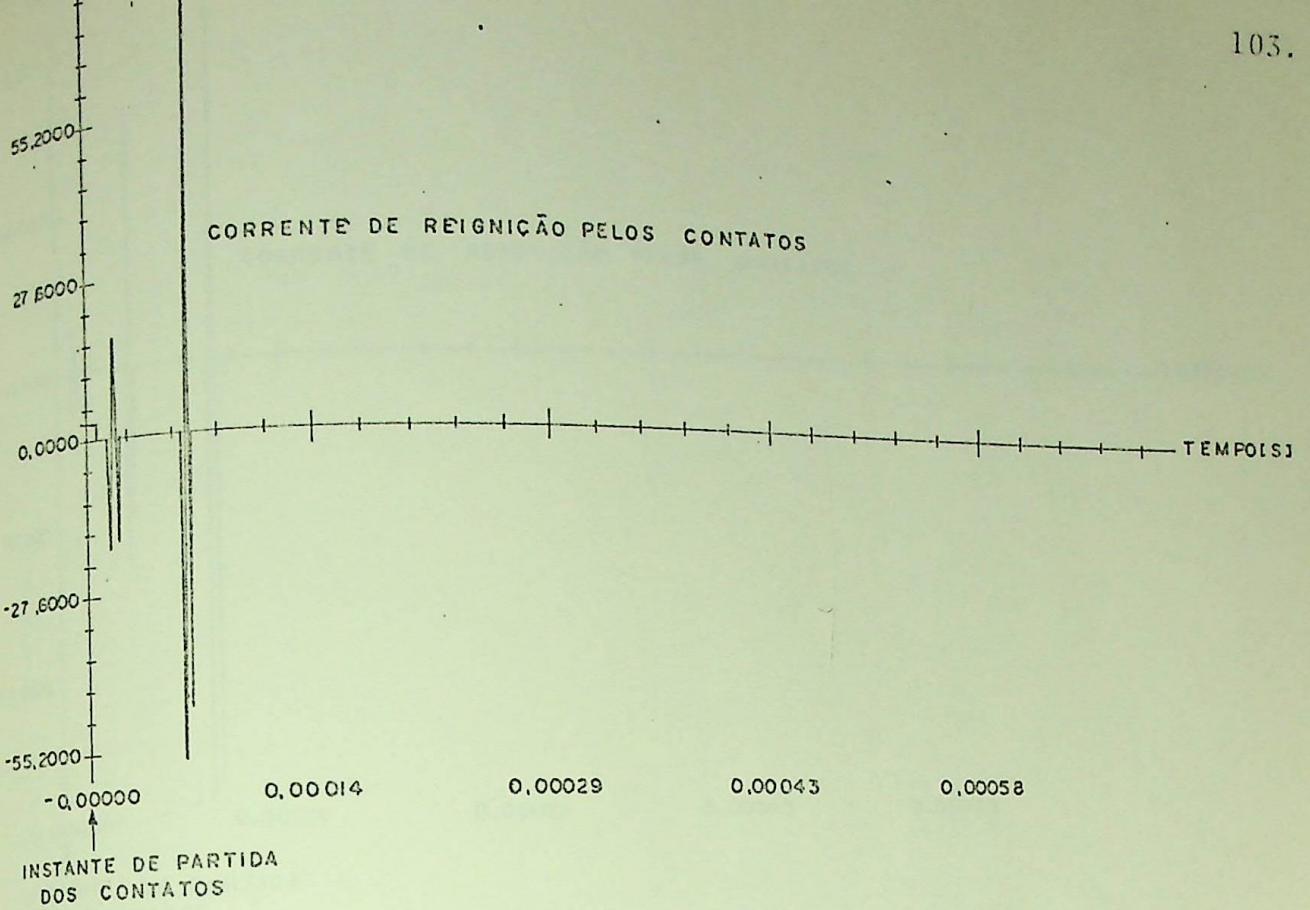


FIG. 4.8a - Número de reignições como função de distância entre os contatos. Curvas de corrente e tensão sobre o disjuntor, após um corte de corrente de 2,8A, quando a distância entre os contatos era de 0,008mm no momento do corte de corrente. Observa-se nas curvas que houve duas reignições dos contatos (instante  $t_1$  e  $t_2$ ).

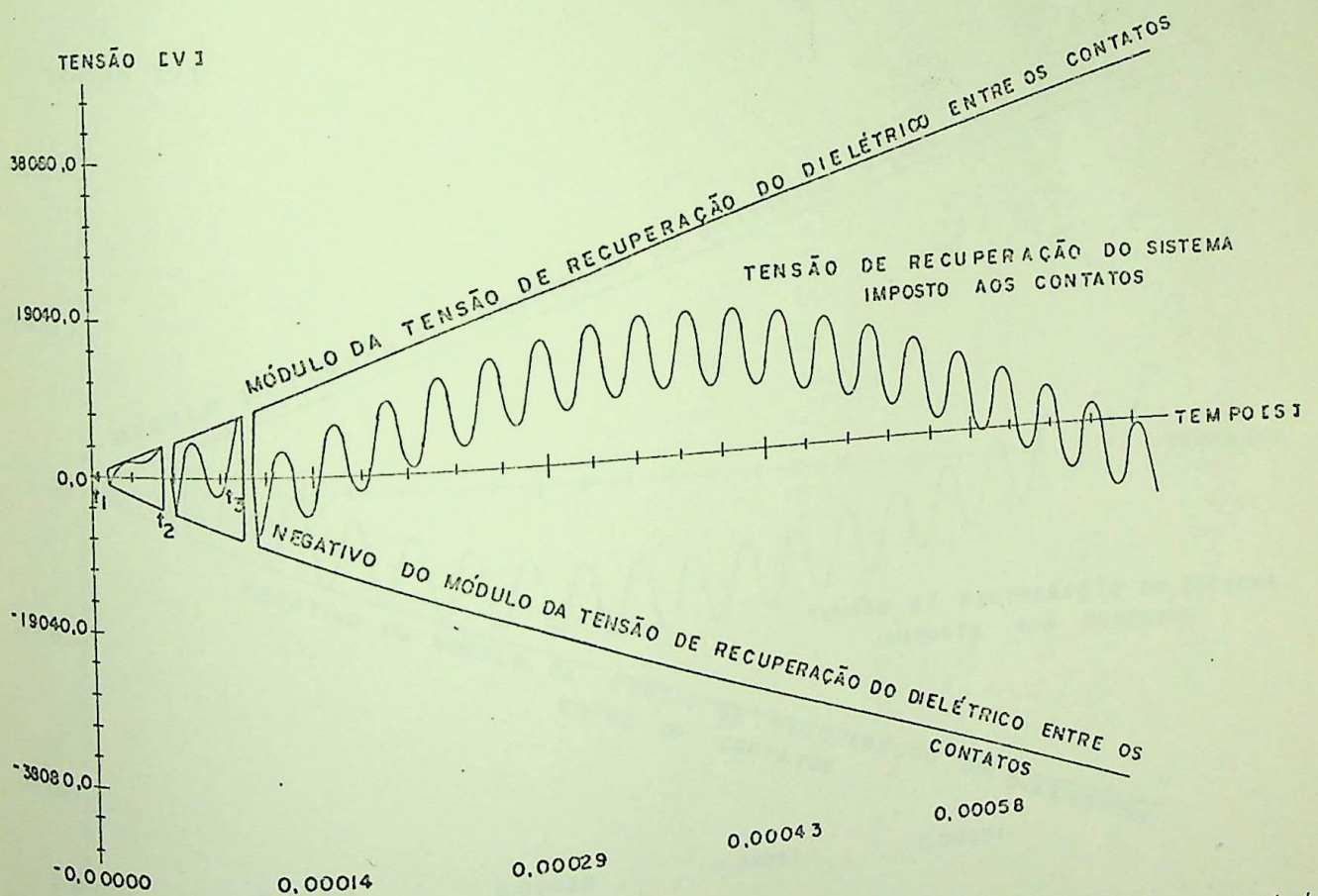
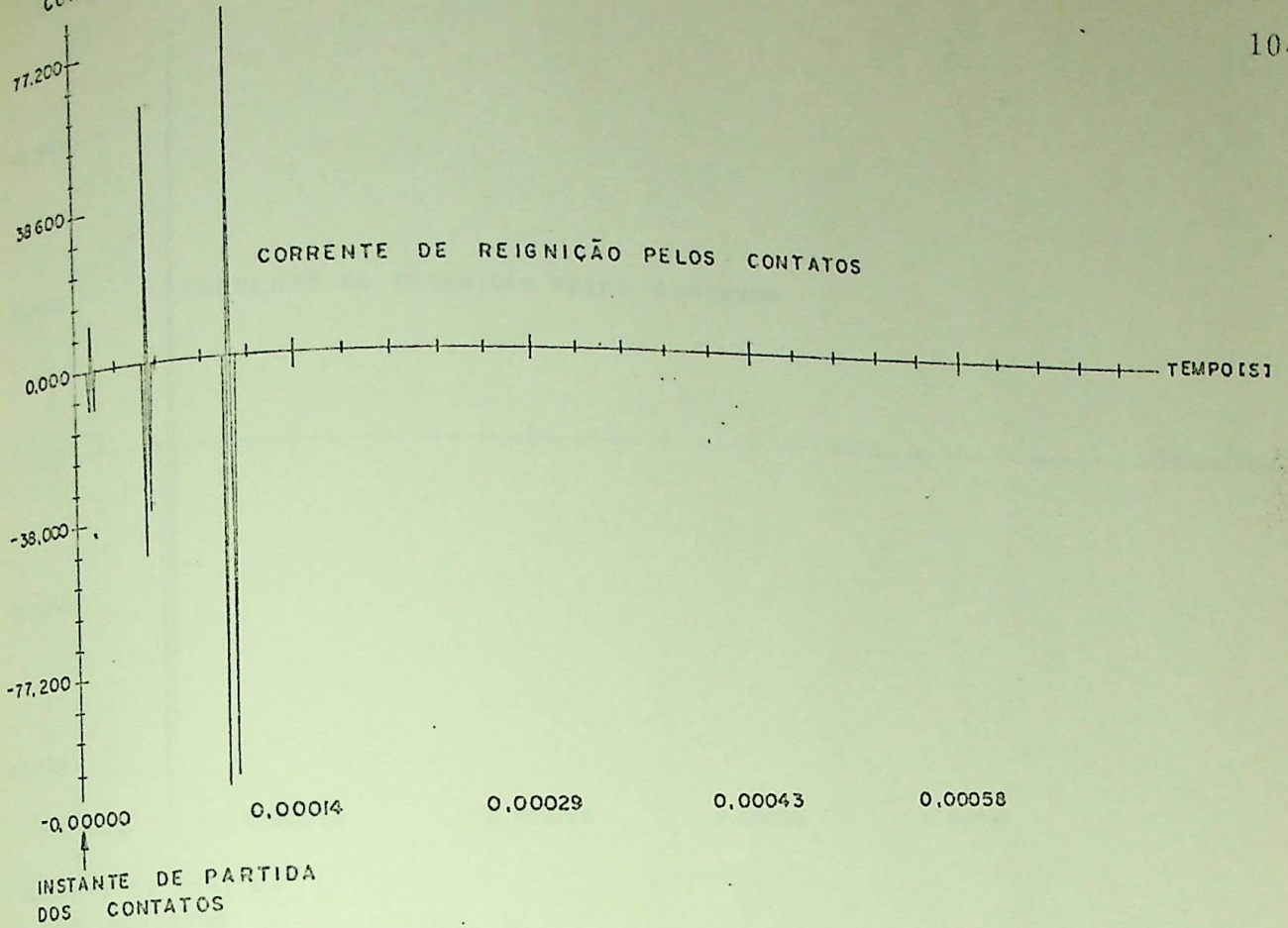


FIG. 4.8b - Número de reignições como função da distância entre os contatos. Curvas de corrente e tensão sobre o disjuntor após um corte de corrente de 2,8A, quando a distância entre os contatos alcançava 0,002 mm no momento do corte de corrente. Observa-se nas curvas,  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  as reignições dos contatos (instante  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$ ).

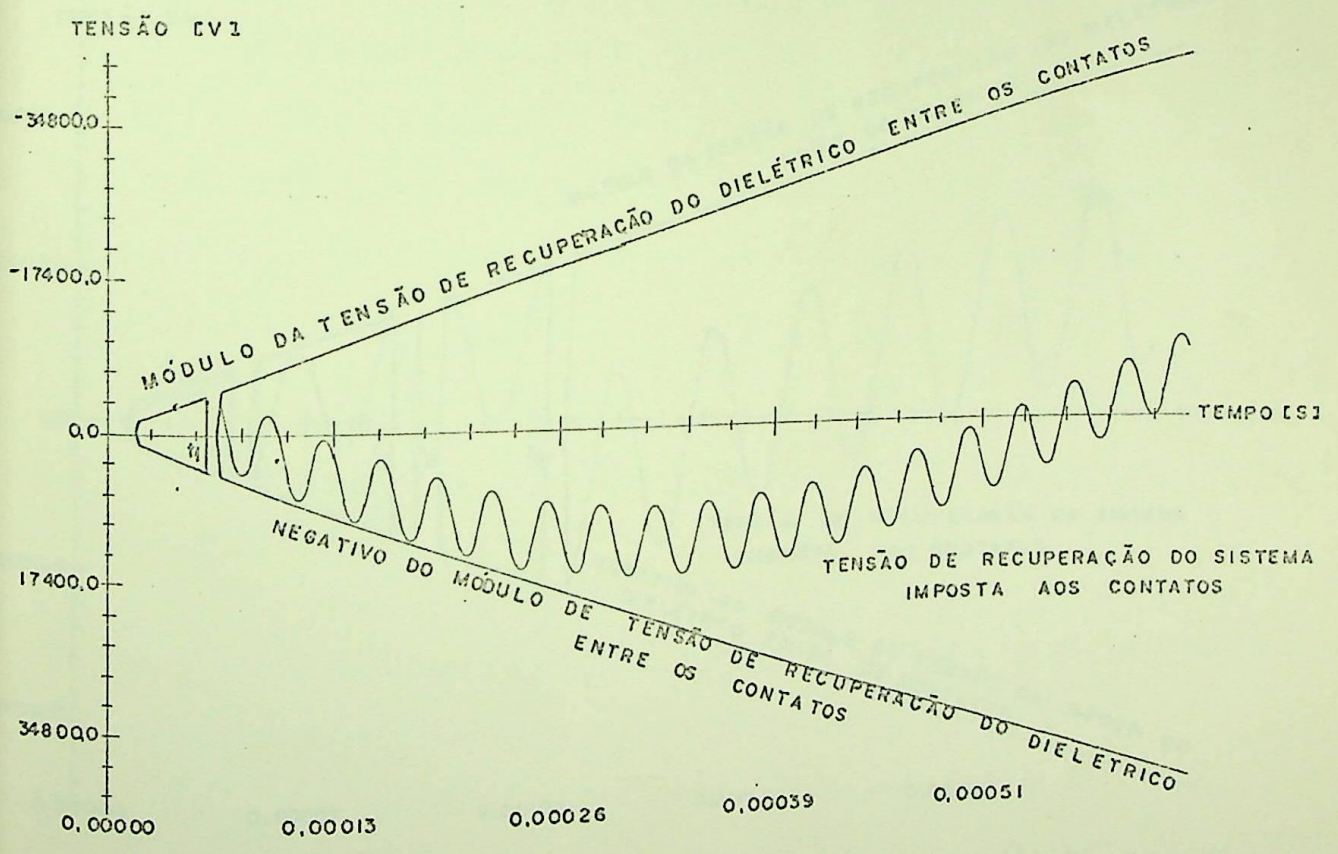
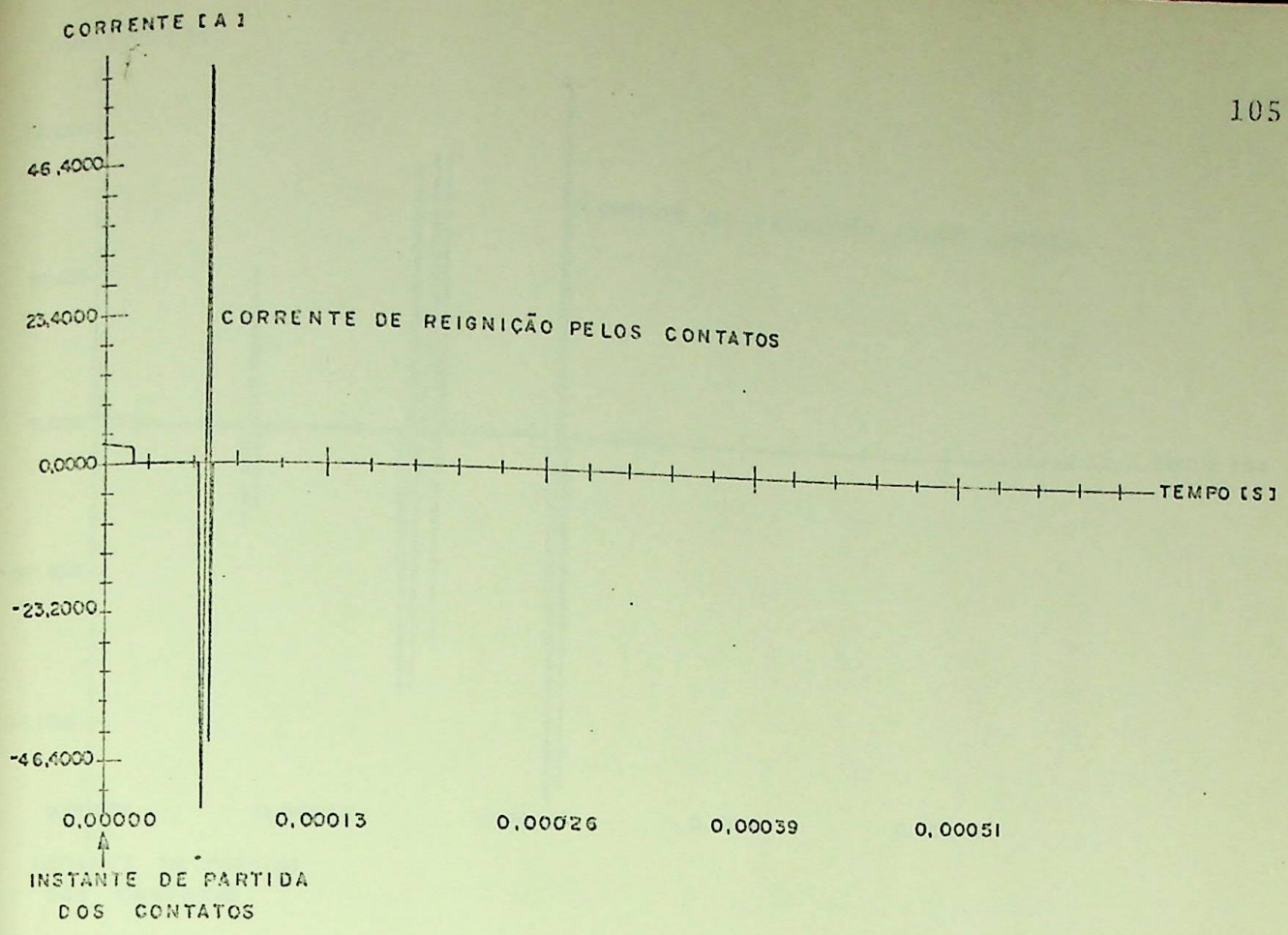


FIG. 4.9a - Número de reignições como função do nível de corte de corrente.

Curvas de corrente e tensão sobre o disjuntor, após um corte de corrente de 2,5 quando a distância entre os contatos era de 0,016 mm no momento de corte de corrente. Observa-se nas curvas que houve apenas uma reignição dos contatos (instante  $t_1$ )

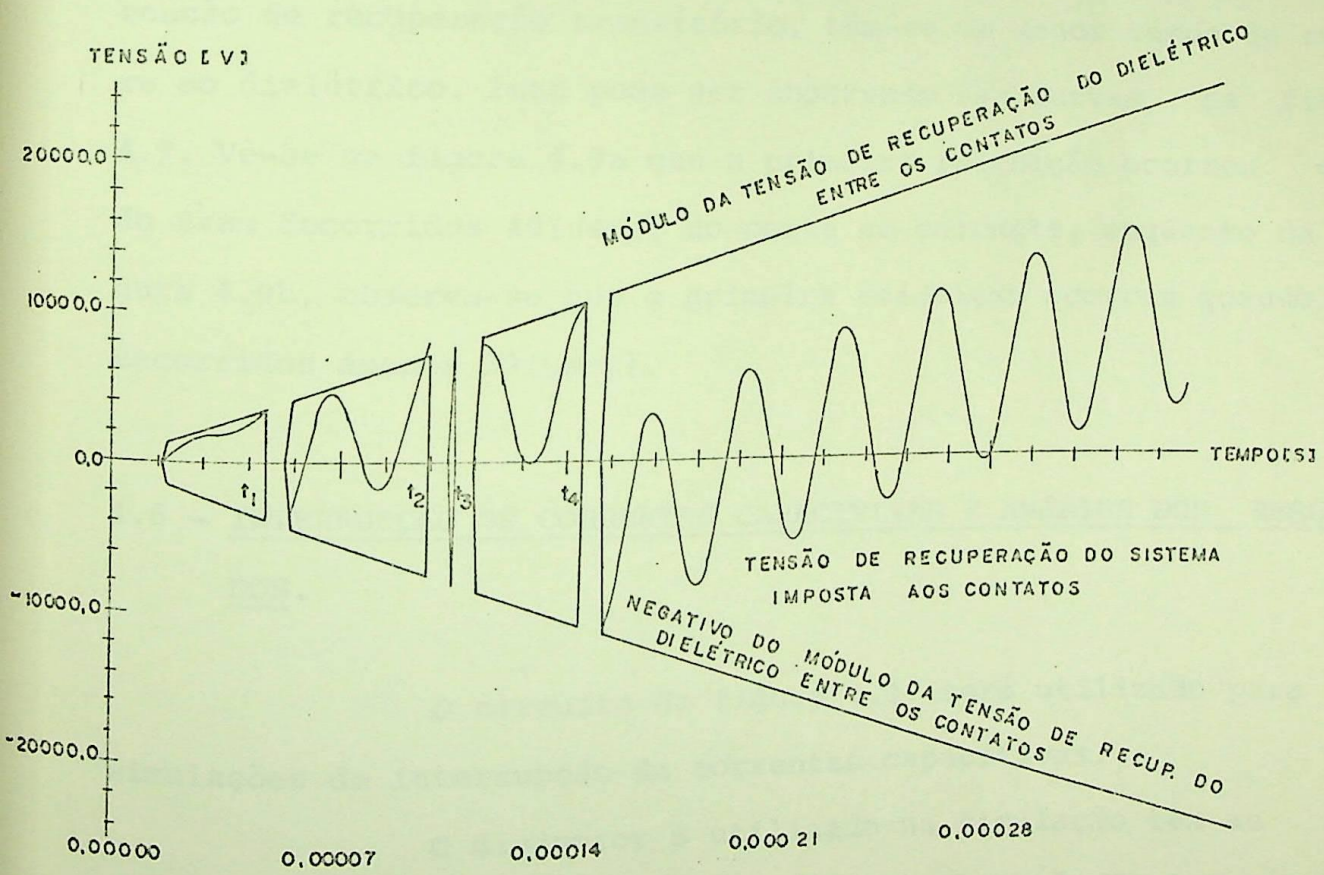
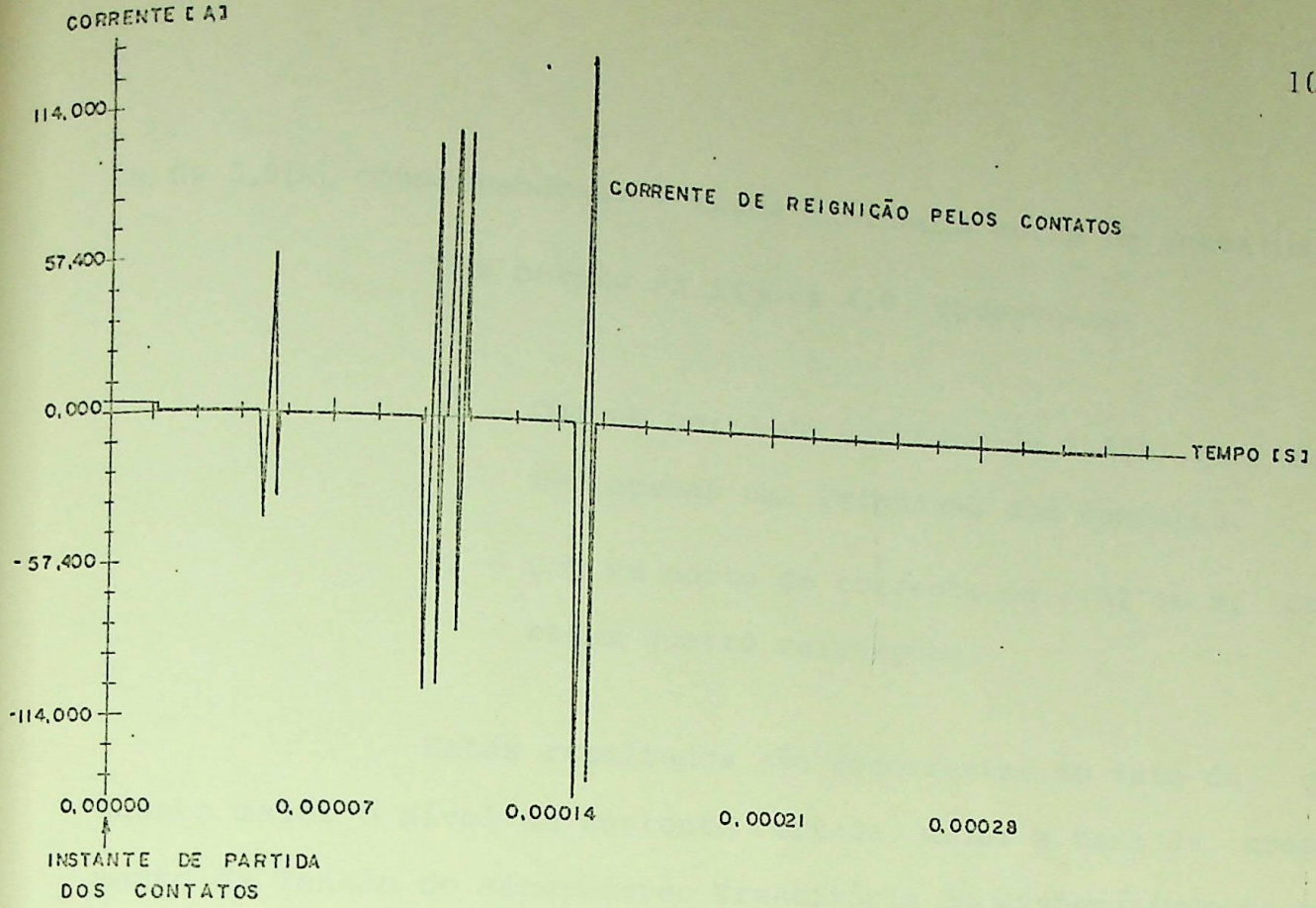


FIG. 4.9b - Número de reignições como função do nível de corte de corrente. Curvas de corrente e tensão sobre o disjuntor, após um corte de corrente de 3,0A. Quando a distância entre os contatos alcançava 0,016 mm no momento do corte de corrente, observa-se nas curvas, que houve quatro reignições dos contatos (instante  $t_1, t_2, t_3$  e  $t_4$ ).

te de 3,0[A], conservando-se a mesma distância entre os contatos.

Nas curvas da figura 4.9, observa-se:

- a) - Com um corte de corrente de 2,5[A] em a, ocorreu apenas uma reignição dos contatos.
- b) - Com um corte de corrente de 3[A] em b, ocorreram quatro reignições.

Estes resultados são decorrentes do fato de que quanto maior o nível da corrente cortada, maior a taxa de crescimento da Tensão de Recuperação Transitória do sistema imposta aos contatos. Como consequência desta maior taxa de crescimento da tensão de recuperação transitória, têm-se um menor tempo de ruptura do dielétrico. Isto pode ser observado nas curvas da figura 4.9. Vê-se na figura 4.9a que a primeira reignição ocorreu quando eram decorridos 40[μseg] do corte de corrente, enquanto na figura 4.9b, observa-se que a primeira reignição ocorreu quando eram decorridos apenas 30[μseg].

#### 4.6 - INTERRUPÇÃO DE CORRENTES CAPACITIVAS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.

O circuito da figura 4.10 será utilizado para as simulações de interrupção de correntes capacitivas.

O disjuntor S utilizado na simulação tem as mesmas características daquele utilizado na simulação de interrupção de correntes indutivas.



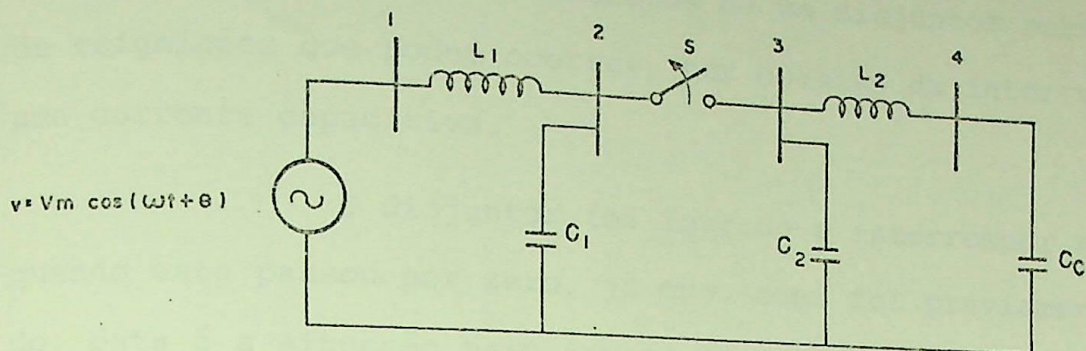


FIG. 4.10 - Circuito Simples para simulação de interrupção de correntes indutiva.

Os valores no circuito são:

$v$  = Tensão da fonte

$v_m$  = Tensão máxima fase-terra da fonte = 11.268 v

$\omega$  = Frequência angular da fonte = 377 rad/seg

$L_1$  = Indutância da fonte = 1 mH

$L_2$  = Indutância de cabo = 10 mH

$C_1$  = Capacitância do lado da fonte do disjuntor = 0,025  $\mu$ F

$C_2$  = Capacitância do lado da carga do disjuntor = 0,025  $\mu$ F

$C_c$  = Capacitância da carga = 20  $\mu$ F

#### 4.6.1 - EFEITO DA DISTÂNCIA ENTRE CONTATOS SOBRE O NÚMERO DE REIGNIÇÕES

Os gráficos da figura 4.11 servem para ilustrar o efeito da proximidade dos contatos de um disjuntor sobre o número de reignições que podem ocorrer, por ocasião da interrupção de uma corrente capacitiva.

O disjuntor foi forçado a interromper a corrente, quando esta passou por zero, já que, como foi previamente comentado, esta é a situação mais severa de interrupção de corrente capacitiva.

As curvas da figura 4.11 mostram a corrente e a tensão na chave, a partir do instante de separação dos contatos. Na fig. 4.11a, a corrente foi interrompida após decorridos  $12[\mu\text{s}]$  de partida dos contatos (distância entre contatos =  $0,012[\text{mm}]$ ) enquanto na figura 4.11b, a corrente foi interrompida após decorridos  $8[\mu\text{s}]$  (distância entre contatos =  $0,008[\text{mm}]$ ).

Os resultados mostram que no caso a, não houve reignição dos contatos, enquanto no caso b, houve duas reignições. Isto decorre do fato de que, quanto menor a distância entre contatos, no momento da interrupção de corrente, maior é a possibilidade de recondução de corrente pelos mesmos.

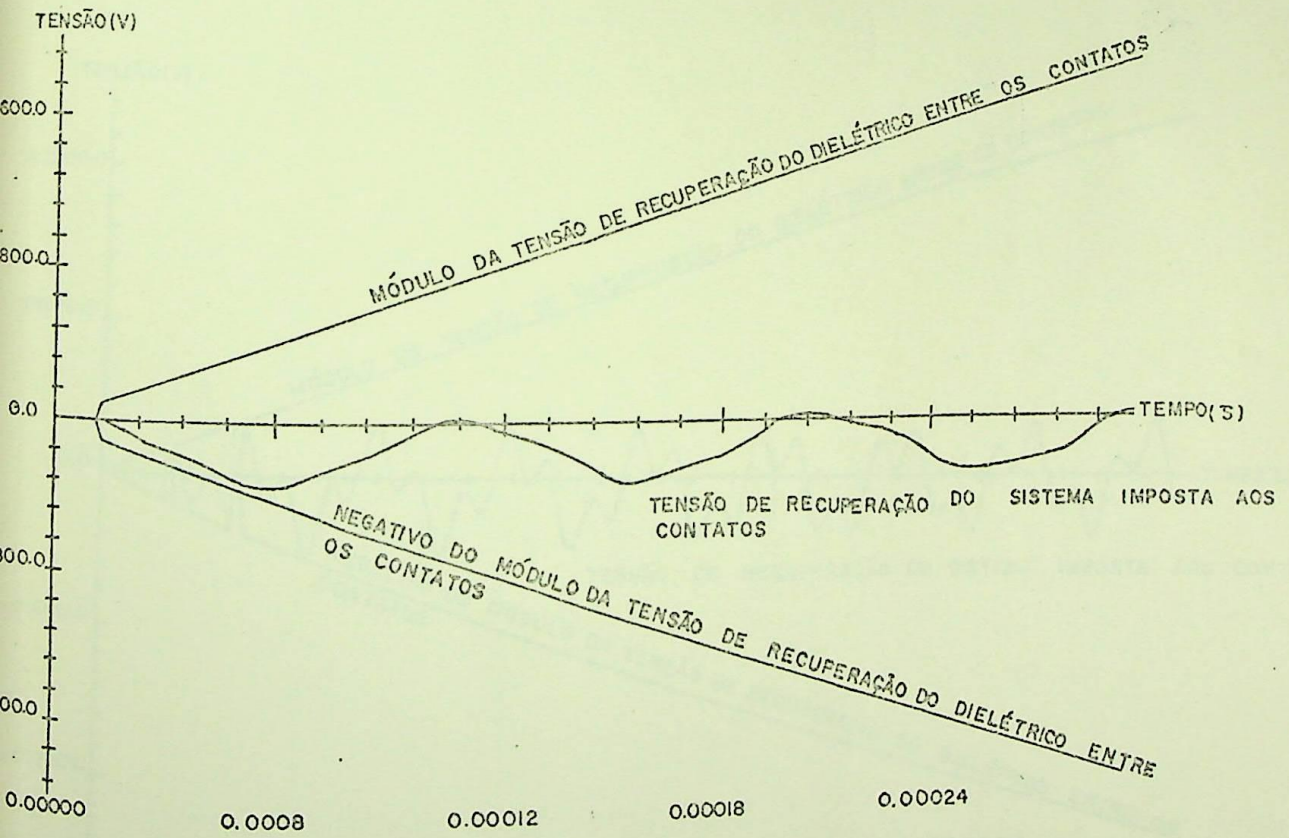
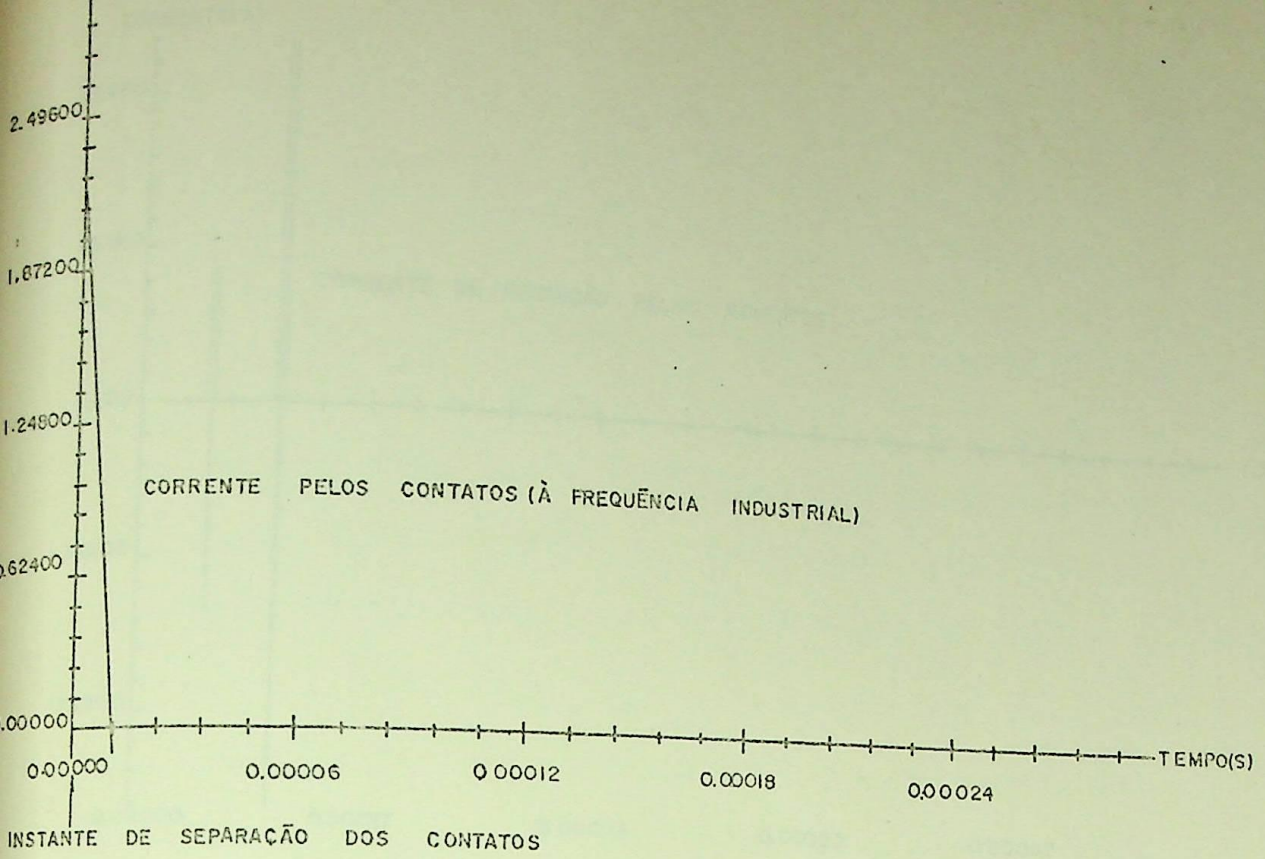


FIG. 4.11a- Número de reignições como função da distância entre os contatos.  
Neste caso, observa-se que não houve reignição dos contatos.

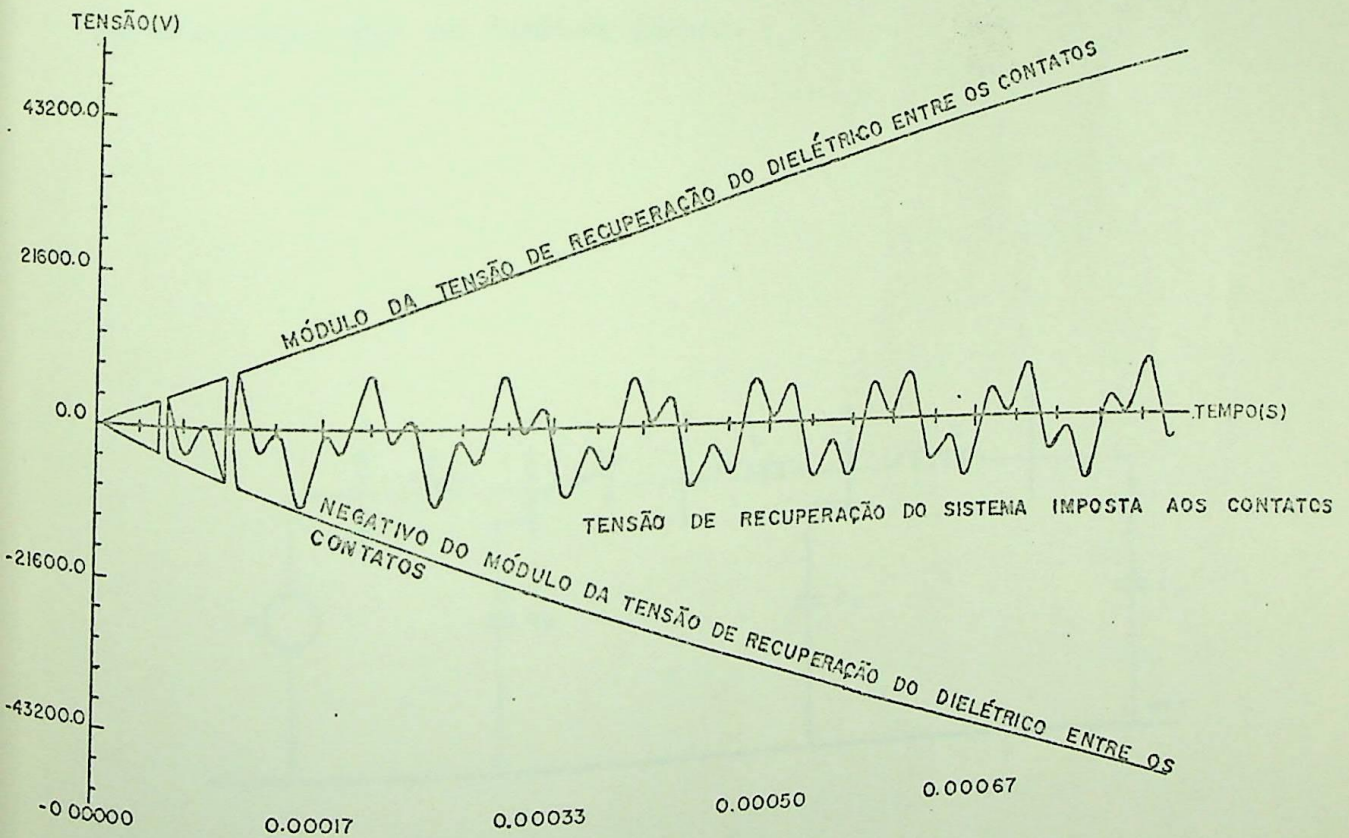
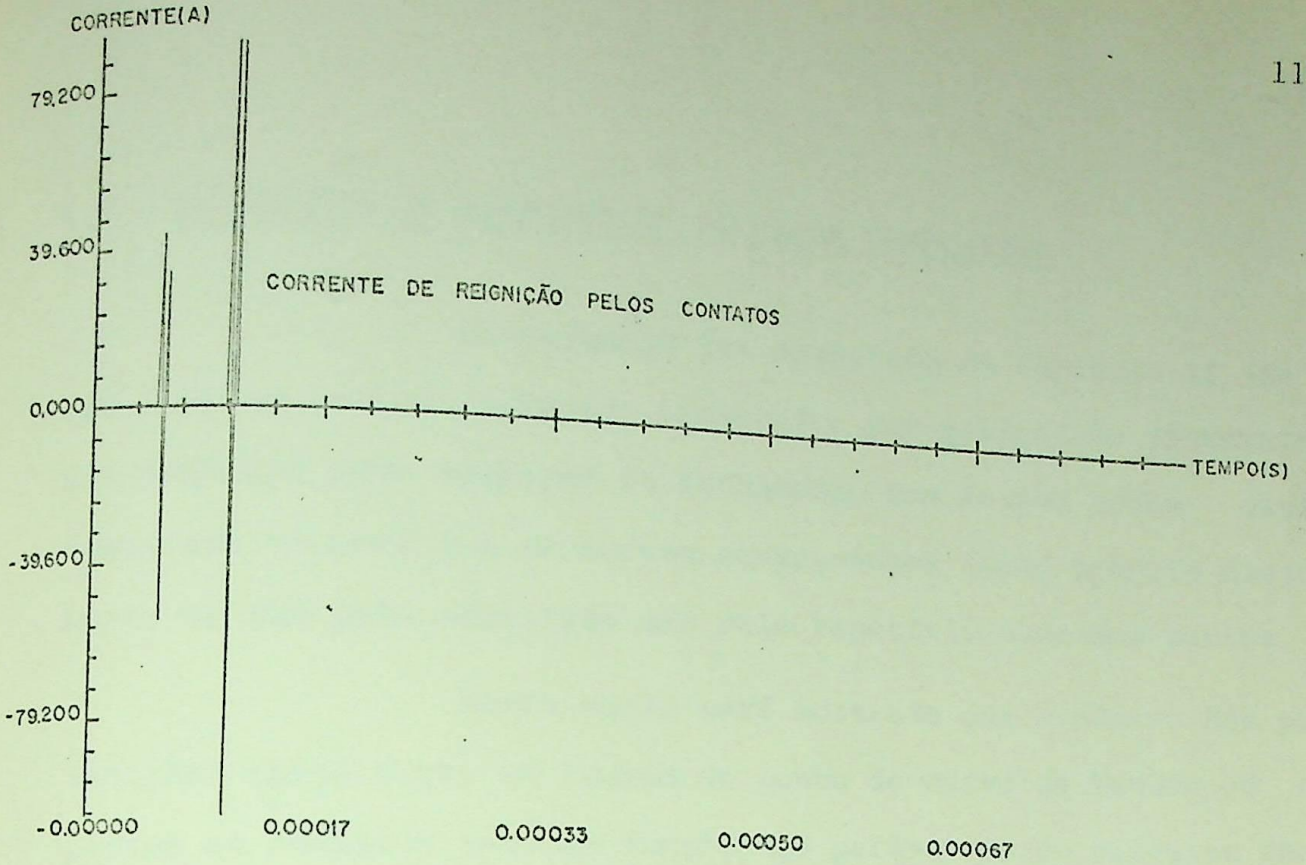


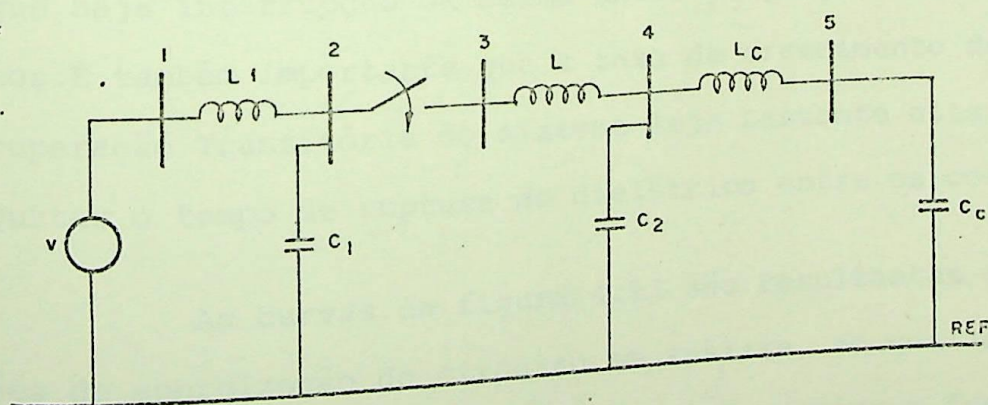
FIG. 4.11b - Número de reignições como função da distância entre os contatos.  
Neste caso, observa-se duas reignições.

#### 4.7 - SIMULAÇÃO DE ENERGIZAÇÃO DE CARGA CAPACITIVA

Conforme já foi comentado no Capítulo II (Seção 2.6) os surtos de Tensão provocados por preignição (PRESTRIKE) dos contatos numa operação de fechamento dos mesmos podem causar danos aos isolamentos de certos equipamentos (como próprio disjuntor); se não pela amplitude mas pela repetitividade dos surtos.

Nesta seção será mostrado que o número dos preignições varia tanto em função do ponto de curva de Tensão em que partem os contatos como em função dos parâmetros do circuito chaveado.

O circuito simples da figura 4.12 é adequado para o estudo que se deseja fazer.



$$v = 11268 \text{ sen } \omega t \text{ [y ]}$$

$$L_1 = \text{Indutância da fonte} = 1\text{mH}$$

$$L_c = \text{Indutância de cabo} = 10\text{mH}$$

$$C_c = \text{Capacitância de carga} = 20\mu\text{F}$$

$$L = \text{Indutância de dispersão} = 0,2 \text{ mH}$$

$$C_1 \text{ e } C_2 = \text{Capacitâncias de dispersão (serão os parâmetros a serem variados nos estudos).}$$

#### 4.7.1 - NÚMERO DE PREIGNIÇÕES COMO FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO

O disjuntor utilizado nas simulações deste trabalho é capaz de suportar Tensões de ordem de 60 [KV] para cada milímetro de distância entre os contatos. Portanto, para o nível da Tensão do circuito em análise, haverá preignição dos contatos quando estes estiverem muito próximos. Como consequência, para possibilitar mais de uma preignição (PRESTRIKE), é necessário que a corrente que flui pelos contatos tenha frequência muito elevada para que haja interrupção da mesma antes da junção metálica dos contatos. É também importante que a taxa de crescimento da Tensão de recuperação Transitória do sistema seja bastante alta, a fim de encurtar o tempo de ruptura do dielétrico entre os contatos.

As curvas da figura 4.13 são resultantes das simulações de energização do circuito em análise, no qual os valores de  $C_1$  e  $C_2$  foram alterados, com o fim de variar a frequência da corrente de preignição. A frequência de oscilação desta corrente, vale lembrar, é determinada pelos parâmetros  $L$ ,  $C_1$  e  $C_2$ ,

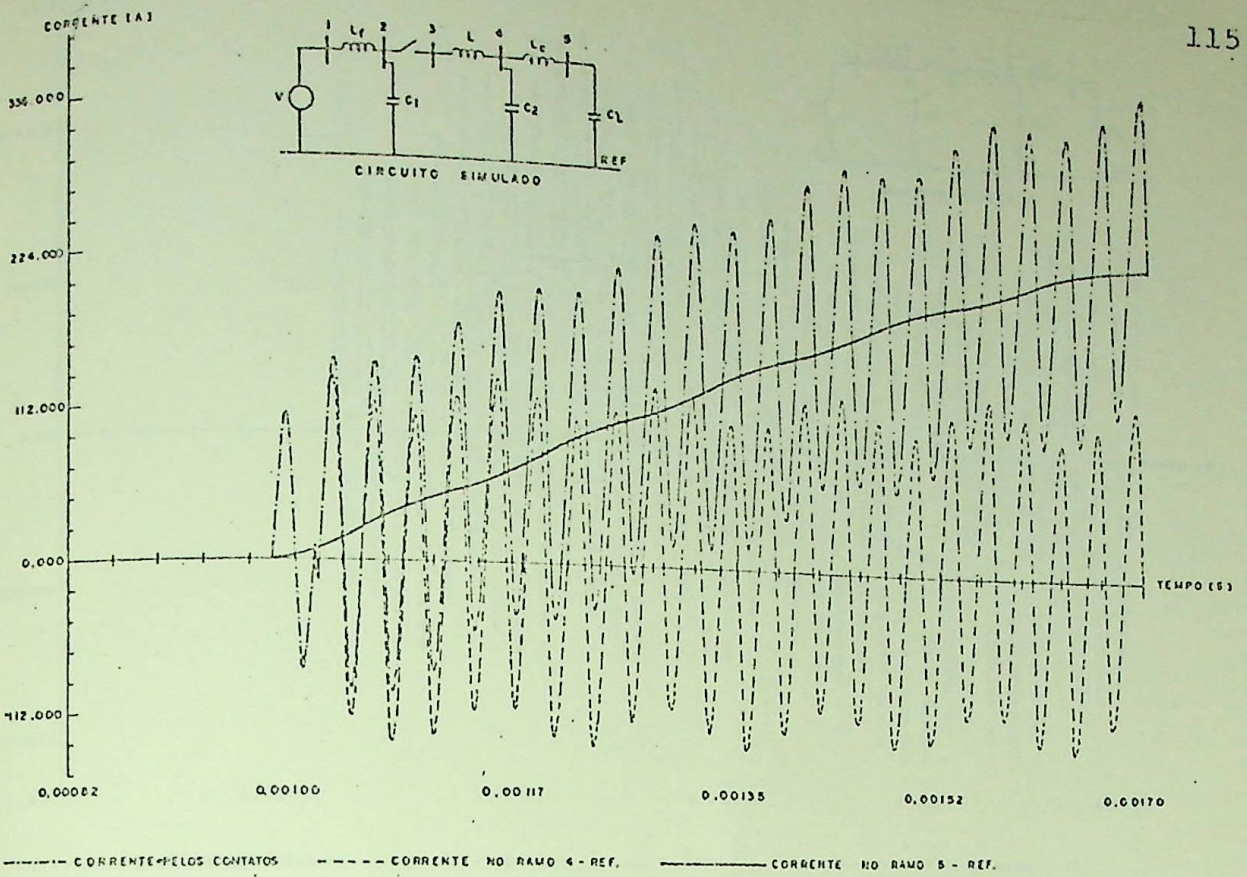
e é dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}}$$

As curvas da figura 4.13a foram obtidas fazendo-se  $C_1 = C_2 = 0,25$  [ $\mu\text{F}$ ], com partida dos contatos para fechamento, no instante de Tempo correspondente a  $209^\circ$  na curva de Tensão. A primeira preignição ocorreu quando faltava aproximadamente  $50$  [ $\mu\text{seg}$ ] para a junção metálica dos contatos. A frequência de oscilação  $f$ , neste caso, vale  $31$  [ $\text{kHz}$ ], enquanto o período correspondente,  $T$ , vale  $31$  [ $\mu\text{seg}$ ].

A segunda preignição desta simulação ocorreu quando faltavam  $16$  [ $\mu\text{seg}$ ] para a junção metálica dos contatos. Como a próxima segunda passagem por zero de corrente só ocorreu  $31$  [ $\mu\text{seg}$ ] após a preignição, neste instante os contatos já estavam juntos, de modo que não houve mais interrupção e fechamento do arco elétrico.

As curvas da figura 4.13b foram obtidas fazendo-se  $C_1 = C_2 = 2,0$  [ $\mu\text{F}$ ] com partida dos contatos no mesmo ponto do caso a. A frequência de oscilação, neste caso, é de aproximadamente  $11,3$  [ $\text{kHz}$ ] e período,  $T$ , de  $89$  [ $\mu\text{seg}$ ]. Ocorreu preignição dos contatos quando faltavam  $48$  [ $\mu\text{seg}$ ] para a junção dos mesmos. Como o segundo zero da corrente de preignição só ocorreu  $89$  [ $\mu\text{seg}$ ] depois, neste instante os contatos já estavam mecanicamente unidos, de maneira que apenas uma preignição foi observada.



Importante observação a ser feita nas curvas de corrente é que a corrente pelos contatos, seguindo imediatamente a preignição, é praticamente igual à corrente pelo ramo "4-REF" que é justamente a componente de alta frequência.

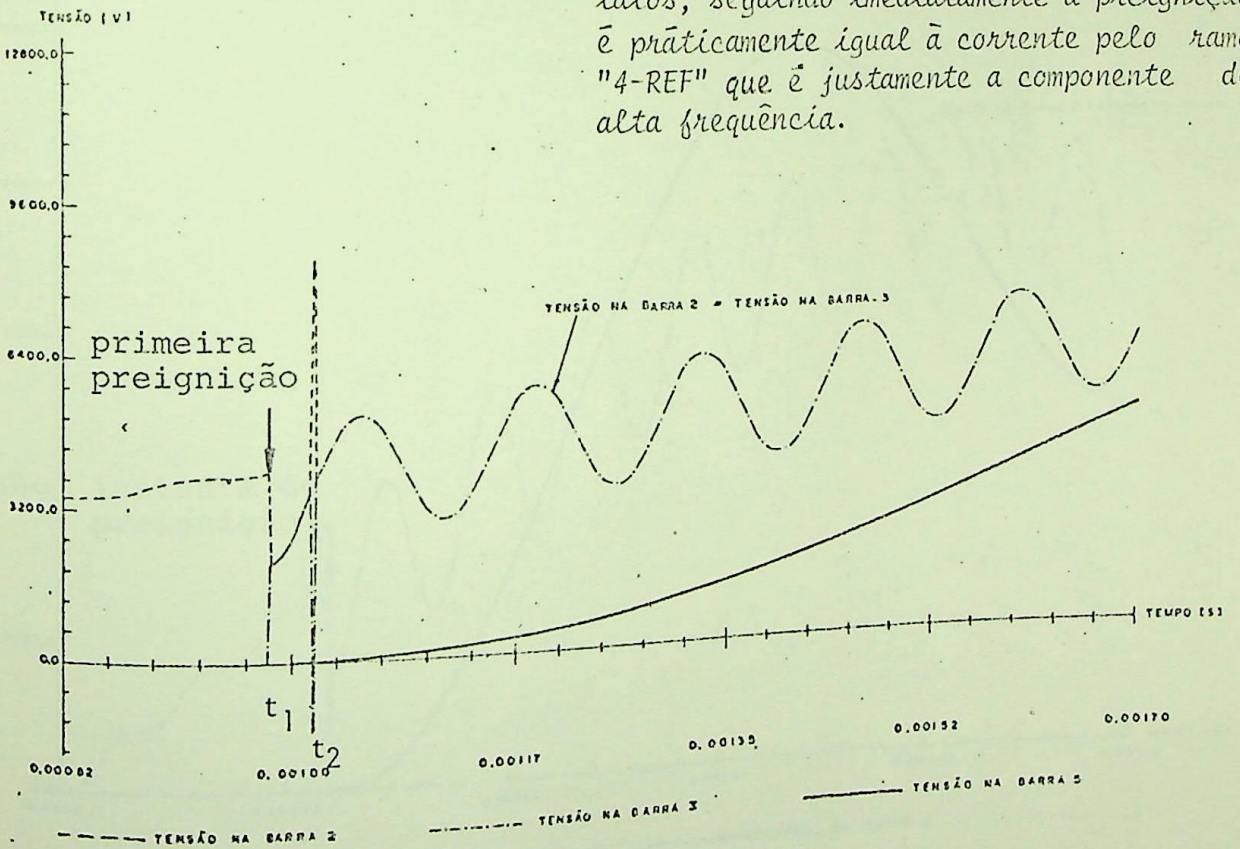


FIG. 4.13a - Número de preignições como função dos parâmetros do circuito. Observa-se nas curvas que ocorreram duas preignições dos contatos (instantes  $t_1$  e  $t_2$ ).



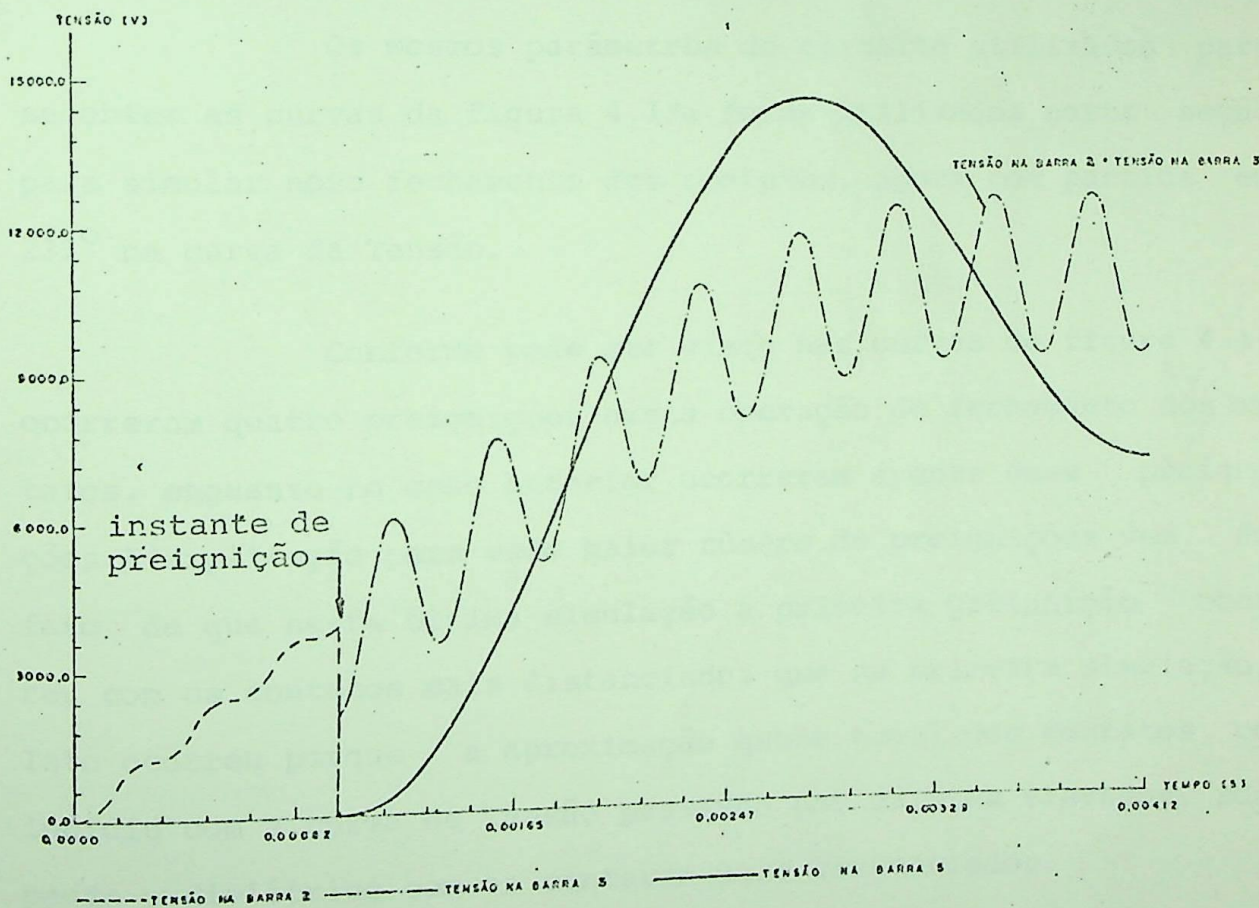
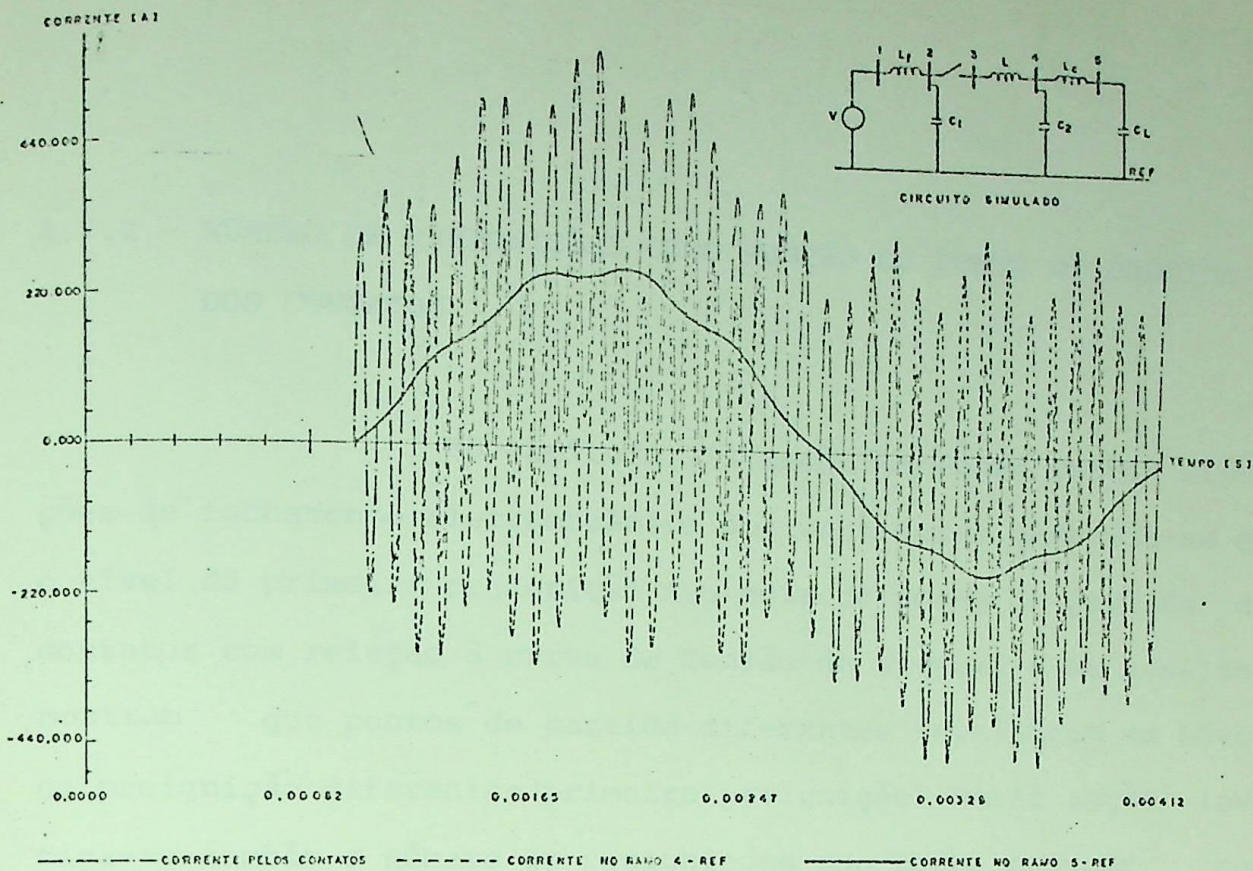


FIG. 4.13b - Número de preignições como função dos parâmetros do circuito.

Neste caso, pode ser visto que houve apenas uma preignição dos contatos. A frequência da corrente de preignição é tal que os contatos se uniram mecânicamente, antes da passagem (2 vezes) da corrente de preignição por zero.

#### 4.7.2 - NÚMERO DE PREIGNIÇÕES COMO FUNÇÃO DO PONTO DE PARTIDA DOS CONTATOS

No capítulo III (Seção 3.4) foram feitas simulações de fechamento eletromecânico dos contatos e observou-se que o nível da primeira preignição dependia do ponto de partida dos contatos com relação à curva de Tensão do sistema e os resultados mostram que pontos de partida diferentes resultaram em níveis de preignição diferentes (primeira preignição). Nesta seção, investiga-se também o número de preignições que podem ocorrer como função do ponto de partida dos contatos.

Os mesmos parâmetros de circuito utilizados para se obter as curvas da figura 4.13a foram utilizados nesta seção para simular novo fechamento dos contatos, agora com partida em  $231^{\circ}$  na curva da Tensão.

Conforme pode ser visto nas curvas da figura 4.14 ocorreram quatro preignições nesta operação de fechamento dos contatos, enquanto no caso anterior ocorreram apenas duas preignições. A explicação para este maior número de preignições vem do fato de que nesta última simulação a primeira preignição ocorreu com os contatos mais distanciados que na primeira simulação. Isto ocorreu porque a aproximação quase total dos contatos coincidiu com a curva de Tensão passando por valores elevados, rompendo o dielétrico com os contatos mais distanciados.

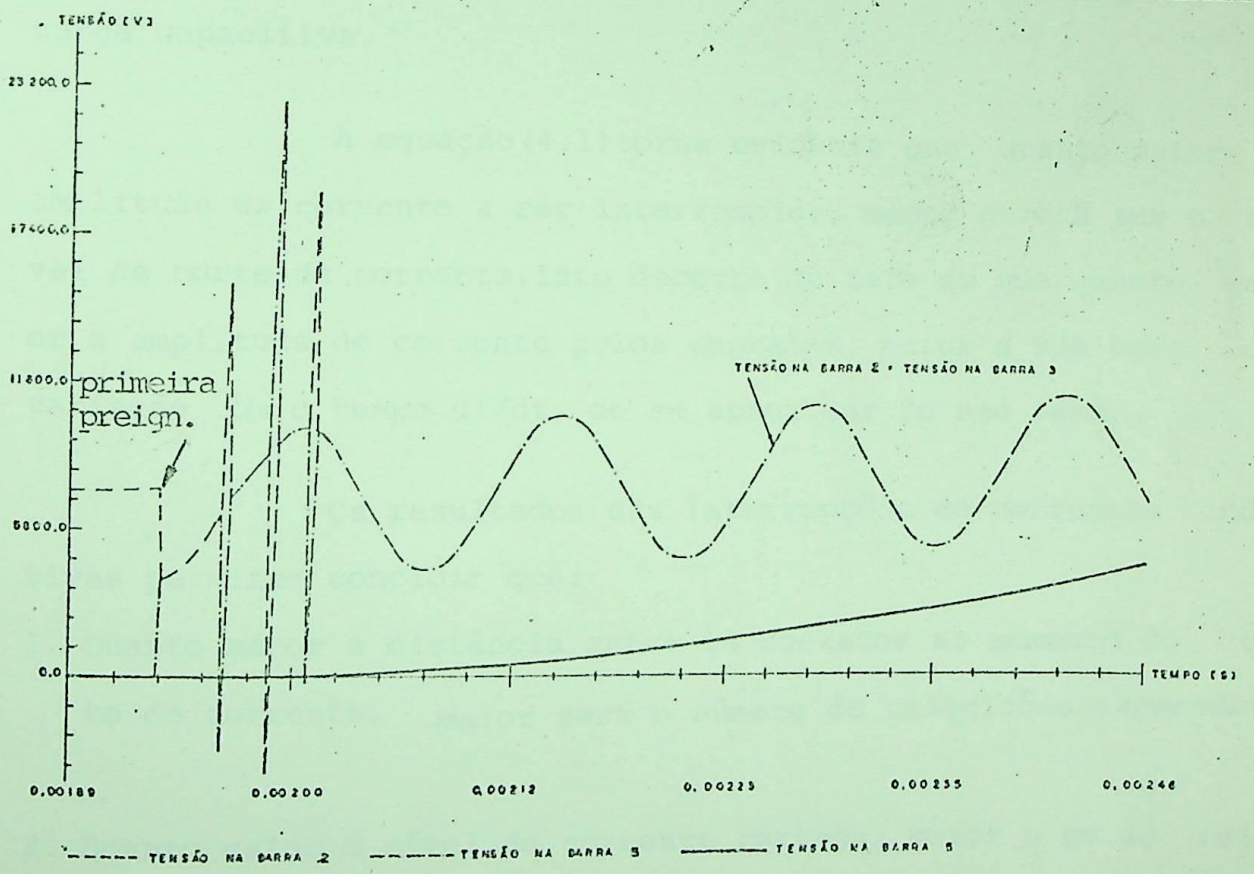
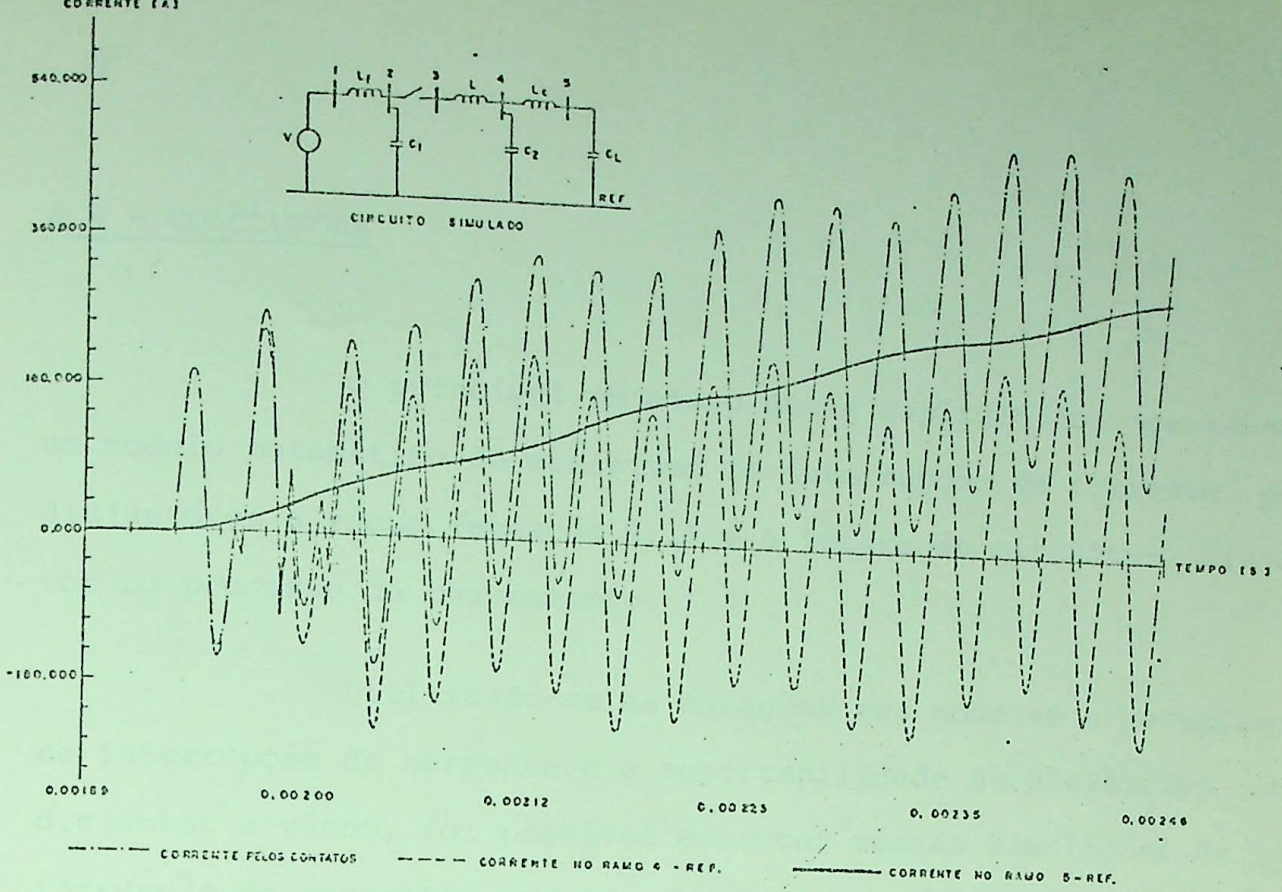


FIG. 4.14 - Número de preiuições como função do ponto de partida dos contatos com relação à onda de tensão.

Neste caso, pode-se observar a ocorrência de quatro preiuições enquanto no caso da figura 4.13a, observou-se apenas duas preiuições.

#### 4.8 - CONCLUSÕES

O principal objetivo deste capítulo foi apresentar um modelo matemático de mecanismo de interrupção de corrente por disjuntores a vácuo (equação 4.1) e a interação circuito- disjuntor no processo de chaveamento.

Utilizando-se as equações que modelam o mecanismo de interrupção de corrente e a suportabilidade do dielétrico do disjuntor a vácuo, foi possível executar várias simulações de interrupção de correntes indutivas e capacitivas e a energização de carga capacitiva.

A equação (4.1) torna evidente que, quanto maior a amplitude da corrente a ser interrompida, menor deverá ser o nível de corte da corrente. Isto decorre do fato de que quanto maior a amplitude de corrente pelos contatos, maior a sua taxa de variação com o tempo  $di/dt$ , ao se aproximar do seu zero.

Os resultados das interrupções de correntes indutivas permitem concluir que:

1. Quanto menor a distância entre os contatos no momento do corte de corrente, maior será o número de reignições esperadas e,
2. Quanto maior o nível da corrente cortada, maior o n<sup>o</sup> de reignições esperadas. Em ambos os casos, a Tensão de recuperação da suportabilidade do dielétrico entre os contatos é menor que a taxa de crescimento da Tensão de recuperação Transitória, permitindo as reignições observadas. As reignições ocorrem até o

instante em que a Tensão suportável pelos contatos situar-se acima da Tensão imposta pelo sistema. Este fato pode ser observado nas curvas das figuras 4.8 e 4.9 onde se mostra estas duas tensões.

Também na interrupção de correntes capacitivas, verificou-se que, quanto menor a distância entre os contatos no momento de interrupção, maior o número de reignições esperadas.

Quanto à energização da carga capacitiva, observou-se que tanto a distância entre os contatos no momento da primeira reignição como os parâmetros do circuito, particularmente os parâmetros  $L$ ,  $C_1$  e  $C_2$  do circuito simulado, foram responsáveis pelo número de reignições ocorridas. Os resultados mostraram que mantendo fixos os parâmetros  $L$ ,  $C_1$  e  $C_2$  e variando-se o ponto de partida dos contatos com relação à onda de tensão, um maior nº de reignições é esperado naquele caso onde os contatos encontram-se mais distanciados no momento da primeira reignição. Por outro lado, fixando-se o ponto de partida dos contatos e variando-se os parâmetros  $L$ ,  $C_1$  e  $C_2$ , o maior número de reignições é esperado naquele caso onde a frequência de oscilação determinada por estes parâmetros for maior. Em ambos os casos, no entanto, o nº de reignições está relacionada à frequência de oscilação da corrente pela chave e à distância entre contatos, simultaneamente. A explicação para este fato, é que a distância entre os contatos, no momento da primeira reignição é sempre muito pequena, de tal forma que se a corrente de reignição não tiver frequência muito elevada, os contatos se unirão mecânicamente antes da passagem (duas vezes) da corrente por zero, não permitindo a extinção desta corrente de

preignição.

Ainda com relação às preignições, embora não se tenha feito um estudo visando mostrar a geração de surtos transitórios, deve ser lembrado que, dependendo dos valores dos parâmetros e da configuração do circuito capacitivo chaveado, quanto maior o número de preignições, maiores sobretensões poderão ser, teoricamente, esperadas.

Uma observação a ser feita com relação às curvas das figuras 4.13a e 4.14 é que as tensões de preignição, seguindo a primeira preignição, são superiores a esta última, devido à alta frequência de recuperação das tensões impostas aos contatos, fazendo com que em um intervalo de integração estas tensões já superem a tensão suportável pelo dielétrico. Na prática, no entanto, isto nem sempre ocorre, uma vez que o dielétrico poderia ser rompido com uma tensão inferior.

# CAPÍTULO V

## DISCUSSÕES - CONCLUSÕES GERAIS

Os trabalhos de pesquisa desenvolvidos nesta dissertação dividiram-se fundamentalmente em três partes. A primeira parte constou de estudos onde se procurou mostrar as causas básicas e os mecanismos de geração das sobretensões transitórias originadas nas operações de chaveamento em circuitos com características indutiva e capacitiva. A segunda parte constou do desenvolvimento de um modelo matemático do perfil de recuperação dinâmica da suportabilidade do dielétrico entre os contatos dos interruptores a vácuo, seguindo a extinção do arco elétrico. No modelo matemático ficou implícita a recuperação dielétrica como função das propriedades termofísicas do material dos eletrodos de contato e das dimensões físicas do espaçamento entre os contatos. Ainda nesta parte da pesquisa foi desenvolvido um modelo matemático do crescimento da suportabilidade de um interruptor a vácuo com eletrodos de CLR. Como se viu, qualquer interruptor a vácuo pode ser modelado matematicamente, desde que se disponha de todas as características necessárias para tal. A terceira parte da pesquisa consistiu da obtenção de um modelo matemático do mecanismo de interrupção de corrente, com previsão de corte (Chopping), por disjuntores a vácuo, e do desenvolvimento de duas rotinas que, incorporadas a um programa para cálculo de transitórios eletromagnéticos já existentes, permitem as simulações de interrupção

de corrente e energização de cargas, considerando os problemas de restabelecimento de corrente por meio de arco elétrico e preignição dos contatos, também por meio de arco elétrico.

Os estudos realizados na primeira parte da pesquisa detiveram-se basicamente na abordagem dos problemas das sobretensões causadas por corte de correntes indutivas, por reacendimento do arco elétrico na interrupção de correntes capacitivas, e por preignições sucessivas dos contatos nas operações de energização de cargas capacitivas.

Os trabalhos de pesquisa realizados a cerca dos problemas transitórios causados pela interrupção, com corte (Chopping), de correntes indutivas têm se detido, quase sempre, na interrupção de pequenas correntes indutivas, onde o corte verdadeiro de corrente é o corte normalmente referido. Neste trabalho, no entanto, teve-se a oportunidade de mostrar o fenômeno do "corte virtual de corrente", o qual pode promover o corte de corrente em níveis bem elevados e, dependendo do tipo de carga desconectada, altos valores de sobretensões transitórias são esperados.

Uma outra operação de interrupção de corrente indutiva que mereceu atenção foi aquela onde as múltiplas reignições dos contatos ao invés de dissiparem a energia indutiva armazenada na carga, no momento do corte de corrente, promovem o armazenamento de mais energia, fazendo com que a tensão na carga, conseqüentemente sobre os contatos, após a interrupção, escale, com picos esperados de tensão cada vez maiores. Este fenômeno de escalamento de tensão, a exemplo do corte virtual de corrente, requer condições muito resritas para ocorrência, tais como os valores dos parâmetros do circuito, e a configuração do circuito.



Com relação aos transitórios que podem ocorrer por ocasião da interrupção de correntes capacitivas, conclui-se que a causa fundamental é o reacendimento do arco elétrico após a interrupção de corrente. Este reacendimento de corrente capacitiva no disjuntor a vácuo pode ser particularmente grave, uma vez que, pela própria definição de reacendimento de corrente, quando este vier a ocorrer os contatos já estarão bastante afastados, o que significa que será necessário um alto valor de tensão para romper o dielétrico entre estes.

Nos estudos relativos à determinação da tensão de suportabilidade dielétrica dos interruptores a vácuo foi feito um estudo simples para determinar o nível da primeira preignição durante a operação de fechamento dos contatos do interruptor a vácuo tomado como exemplo. Os resultados do estudo mostraram que o nível da primeira preignição depende, simultaneamente, da tensão do sistema, do ângulo de partida dos contatos e velocidade de fechamento destes.

A simulações realizadas na terceira parte deste trabalho comprovaram a efetiva interação do disjuntor a vácuo com o sistema chaveado e importantes resultados foram obtidos nas simulações. Com relação ao problema das reignições dos contatos pode-se afirmar que o número de reignições que podem ocorrer é função, principalmente:

- a) - Na interrupção de correntes indutivas:
- do nível da corrente cortada e
  - da distância entre os contatos no momento do corte de corrente.

b) - Na interrupção de correntes capacitivas:

- da distância entre os contatos no momento da interrupção.

Com relação às preignições, verificou-se que o número de ocorrências é função, principalmente:

- do nível da tensão da primeira preignição; consequentemente da distância entre os contatos e,

- dos parâmetros que determinam a frequência da corrente seguindo imediatamente a preignição.

Visto que os contatos do disjuntor a vácuo encontram-se normalmente muito próximos no momento da primeira preignição, os parâmetros do circuito são os elementos de maior influência no número de preignições.

Embora não tenham sido feitas simulações para determinar o número de preignições como função da velocidade de fechamento dos contatos, está implícito que também este parâmetro merece considerações.

O que de mais importante se pode destacar nesta fase final do trabalho foi tornar possível as simulações executadas. A partir deste ponto dispõe-se de uma ferramenta apta a auxiliar no estudo das sobretensões geradas pelo chaveamento de disjuntores a vácuo.

Ainda com relação às rotinas desenvolvidas, deve ser lembrado que qualquer elemento de chaveamento cujas decisões de abertura e de fechamento dependam da corrente que flui pelo mesmo e da tensão imposta, respectivamente, pode ser introduzido no programa em substituição ao disjuntor a vácuo.

Encerrando estas discussões, deve ficar claro que o disjuntor à vácuo é um dispositivo de chaveamento que, como outro qualquer, pode interagir com o sistema nas operações de chaveamento de cargas e dar origem ao aparecimento de surtos transitórios. Cabe frizar, no entanto, que medidas de proteção podem ser utilizadas para sanar tais problemas. Deve-se destacar ainda uma importante característica no disjuntor à vácuo, que é o pequeno desgaste dos seus contatos, face ao curto tempo de arcamamento a que ficam expostos, e à condensação do vapor de metal sobre os mesmos, o que permite a sua utilização em locais onde o número de chaveamentos possa ser considerado alto, ou ainda em situações onde a retirada do dispositivo de chaveamento para manutenção deve ser evitada; por exemplo, em locais geograficamente de difícil acesso.

Embora se tenha mencionado, ao longo deste trabalho, a necessidade de se instalar dispositivos capazes de controlar os surtos transitórios gerados nas operações de chaveamento, não se entrou em detalhes a este respeito, por fugir ao fim a que se propôs este trabalho. Fica, pois, como sugestão de pesquisa dentro deste assunto, um estudo comparativo do desempenho dos diversos dispositivos controladores de surtos transitórios, nas instalações chaveadas por disjuntores à vácuo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - KURTZ, D.R., SIMPSON, J.H.  
General Guidelines for Vacuum Circuit Breaker Application  
IEEE Trans., pp.412-417, july/aug. 1971.
- [2] - LEE, T.H., GREENWOOD, A.N., POLINKO, G., Jr.  
Design of Vacuum Interrupters to Eliminate Abnormal Over-Voltage . AIEE Trans., PAS-81. 1962, pp. 376-381
- [3] - MURANO, M., FUJJI, T., NISHIKAWA, H., NISHIWAKI, S., OKAWA, M.  
Voltage Escalation in Interrupting Inductive Current by Vacuum Switches - IEEE Trans. PAS-93, 1974, pp. 264-271.
- [4] - MURANO. M., FUJJI, T., NISHIKAWA, H., NISHIWAKI, S., OKAWA, M.  
Three-phase Simultaneous Interrrption in Interrupting Inductive Current Using Vacuum Switches.  
IEEE Trans., PAS-93, Nº 1, 1974, pp. 272-280.
- [5] - BOEHNE, E.W., LOW, S.S.  
Shunt Capacitor Energization With Vacuum Interrupters -A Possible Source of Over-Voltage.  
IEEE Trans., PAS-88, Nº 9, 1969, pp. 1424-1443
- [6] - PANEK, J., FEHRLE, K.G.  
Over-Voltage Phenomena Associated With Virtual Current Chopping in Three-Phase Circuits.  
IEEE Trans., PAS-94, 1975, pp. 1317-1325.

- [7] - ITOH, T., MURAI, Y., OHKURA, T., TAKAMI, T.  
Voltage Escalation in the Switching of the Motor Control  
Circuit by Vacuum Contactor.  
IEEE Trans., PAS-91, 1972, pp. 1897-1903
- [8] - MURANO, M., YANABU, S., OHASHI, H., ISHIZUKA, H., OKAZAKI, T.  
Current Chopping Phenomena of Medium Voltage Circuit Breakers  
IEEE Trans., PAS-96, No 1, January 1977, pp. 143-149
- [9] - MURAI, Y., NITTA, T., TAKAMI, T., ITOH, T.  
Protection of Motor from Switching Surge by Vacuum Switch  
IEEE Trans., PAS-93, No 5, 1974, pp. 1472-1477
- [10] - COBINE, J.D., FARRAL, G.A.  
Recovery Characteristics of Vacuum Arcs  
IEEE Trans. on Communication and Electronics  
Vol. 82, 1963, pp. 246-253
- [11] - DAMSTRA, G.C.  
Influence of Circuit Parameters on Current Chopping and Over-  
Voltage in Inductive M.V. Circuits.  
CIGRE Report 13-08, August 1976.
- [12] - KIMBLIN, C.W.  
Dielectric Recovery and Shield-Currents in Vacuum-Arcs Inter-  
rupters.  
IEEE Trans., PAS-90, May/June 1971, pp. 1261-1270

- [13] - BLOWER, R.W., KORNICK, K.J., REECE, M.P.  
The Use of Vacuum Switchers for the Control of Motors and  
Transformers in Industrial Systems.  
IEEE London, November 20-22, 1978
- [14] - GREENWOOD, A.N.  
Electrical Transient in Power Systems  
Wiley-Interscience, Book, 1971.
- [15] - ISMAIL, A.B.  
Simulation and Analysis of Switching Transients in Motor Cir  
cuits Controlled by Vacuum - Circuit-Breakers  
Tese de Doutorado - The Victoria Univ. of Manchester
- [16] - DOMMEL, H.W.  
Transient Program - User's Manual  
(Versão EFEI - 1983)
- [17] - OLIVEIRA, A.R.C.  
Programa para Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos  
Tese de Mestrado-1984 (Tese em fase de Desenvolvimento).
- [18] - ALVARADO, F.L.  
Trapezoidal Integration  
Apostila do Curso de Sobretensões - EFEI
- [19] - ABNT - NBR 5459 - Nos. 4.5.39 e 4.5.40

- [20] - RICH, J.A., FARRAL, G.A.  
Vacuum Arc Recovery Phenomena  
Proc. IEEE (USA), Vol. 52, 1964, pp. 1293
- [21] - SLAMECKA, E.  
Interruption of Small Inductive Currents: Caps. 1 e 2  
CIGRE Report 13-02, October 1980
- [22] - MOORE, A.H., BLALOCK, T.J.  
Extensive Field Measurements Support New Approach to Protection  
of Arc Furnace Transformers Against Switching Transients.  
IEEE Trans., PAS-94, N° 2, march/april 1975, pp. 473-481
- [23] - KOPAINSKY, J., RUOSS, E.  
Interruption of Low Inductive and Capacitive Currents in High  
-Voltage Systems - Brown Boveri Review, april 1979, Vol. 66 ,  
pp. 255-261
- [24] - THALER, R., HEINEMANN, Th., MARTY, J., S.A. Sprecher et Schun  
Surtensions Dues a la Coupure de Petits Courants Inductives  
in Laboratoire et en Réseau.  
CIGRE Report 117, Part II, 1964.
- [25] - TUOHY, E.J., PANEK, J.  
Chopping of Transformer Magnetizing Currents.  
Part I: Single Phase Transformers  
IEEE Trans., PAS-97, N° 1, jan./febr. 1978, pp. 261-268

- [26] - GREENWOOD, A.N., KURTZ, D.R., SOFIANEK, J.C.  
A Guide to Application of Vacuum Circuit Breakers  
IEEE Trans., PAS-90, 1971, 1589-1597.
- [27] - OHASHI, H., MIZUNO, T., YANABU, S.  
Application of Vacuum Circuit Breaker to Dry Type Transformer Switching - IEEE PES Winter Meeting, New York, USA.  
Paper A 76 174-3, january 1976.
- [28] - SLAMECKA, E.  
Interruption of Small Inductive Currents: Cap. 3 - Part A  
CIGRE Report 13-02, marh 1981.
- [29] - YOKOKURA, K., MASUDA, S., NISHIKAWA, H., OKAWA, M. OHASHI, H.  
Multiple Restrike Voltage Effect in a Vacuum Circuit Breaker  
on Motor Insulation  
IEEE Trans, PAS-100, No 4, april 1981, pp. 1940-1948
- [30] - PFLANZ, H.M.  
Generation of High Voltages on Energizing Capacitive Circuits  
IEEE Proceedings International Symposium on High Voltage Technology, Munich, march 1972.
- [31] - BOEHNE, E.W.  
Energization Surges in Capacitive Circuits  
IEEE - Conference Paper 70 - CP 235 - PWR  
Winter Power Meeting, New York City  
january, 1970.



- [32] - Manual ITEL - Capacitores de Potência
- [33] - Transitórios de Chaveamento em Bancos de Capacitores.  
Tese de Mestrado - jun/83  
Regina C.A. Campos
- [34] - SOEWARD, O.  
Inrush Prediction in Transformers  
Tese de Mestrado - The Victoria Univ. of Manchester - Dec/1978
- [35] - LEE, T.H., KURTZ, D.R., PORTER, J.W.  
Vacuum Arcs and Vacuum Circuit Interrupters  
CIGRE - The International Conference on Large Electric Systems  
Vol. II - 1966
- [36] - LEE, T.H., GREENWOOD, A.N.  
Theory and Application of the Communication Principle for  
HVDC Circuit Breakers  
IEEE Trans., PAS-91, jul/aug 1972, pp. 1570-1574
- [37] - GREENWOOD, A.N., BARCAN, P., KRACHT, W.C.  
HVDC Vacuum Circuit Breakers  
IEEE Trans., PAS-91, jul/aug 1972, pp.1575-1582.
- [38] - GREENWOOD, A.N.  
Electrical Transients in Power Systems  
Wiley - Interscience

# APÊNDICE A

## MANUAL DE USO DO PROGRAMA

### A.1 - COMENTÁRIOS:

O programa pode ser usado para simular operação de chaveamento tanto em circuitos monofásicos como em circuitos polifásicos (até 06 fases).

Os elementos que compõem o sistema em simulação são:

- . Fontes de Tensão e de Corrente
- . Resistências
- . capacitâncias, indutâncias e
- . chaves.

Os elementos passivos de circuito (resistência, indutâncias e capacitâncias) são considerados concentrados e invariantes com a frequência e a corrente.

Os elementos mínimos necessários para comporem um sistema a simular são: uma fonte e um dos elementos passivos conectados à fonte.

Os resultados que podem ser fornecidos pelo programa são:

- (a) Tensões de barra

(b) correntes de ramo

(c) Tensões de ramo

## A.2 - ENTRADA DE DADOS

Os dados de entrada para simular uma operação de chaveamento devem obedecer à seguinte ordem de entrada:

1. Cartão de identificação do caso a ser executado.
2. Cartão de tempo contendo o tempo total requerido para estudo do fenômeno transitório e o intervalo de tempo de integração.
3. Cartões de ramo contendo os elementos lineares: resistências, indutâncias e capacitâncias.
4. Um cartão em branco.
5. Cartões de chaves (até 24 chaves), onde cada chave necessita de três cartões contendo suas características eletromecânicas e termofísicas.
6. Um cartão em branco.
7. Cartões de fontes .
8. Um cartão em branco.
9. Cartão contendo as barras que se deseja imprimir suas tensões.
10. Cartão contendo as barras que se deseja plotar suas tensões.
11. Cartão contendo os ramos que se deseja imprimir suas correntes.
12. Cartão contendo os ramos que se deseja plotar suas tensões
13. Cartão contendo os ramos que se deseja imprimir suas tensões.

- 14. Cartão contendo os ramos que se deseja plotar suas tensões.
- 15. Um cartão em branco (indicador do fim do arquivo de dados).

A.3 - FORMATO DOS DADOS DE ENTRADA

A.3.1- CARTÃO DE IDENTIFICAÇÃO DO CASO

TÍTULO DO CASO	FREQUÊNCIA	L	C
	D 10.4		

TÍTULO DO CASO: Qualquer texto alfanumérico para identificar o caso.

FREQUÊNCIA: Frequência nominal do sistema

LOPT=1 : Todos os valores de indutâncias nos cartões de ramo são lidos como reatâncias  $X_L$  em ohms.

=0 : Todos os valores de indutâncias nos cartões de ramo são interpretados como indutâncias L em mH.

LOPT=1 : Todos os valores de capacitâncias nos cartões de ramo são lidos como reatâncias  $X_C$  em ohms.

= 0 :

Todos os valores de capacitâncias nos cartões de ramo são interpretados como capacitâncias C em  $\mu\text{f}$ .

Todos os valores de indutâncias e capacitâncias lidos são convertidos pelo programa em indutâncias Henry e capacitâncias em Faraday.

### A.3.2 - CARTÃO DE TEMPOS

DEL TAT	T MÁX	I RESUL	
D10.4	D10.4	I 2	
0	0	0	0
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
0	0	0	0
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
0	0	0	0
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
0	0	0	0
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9

DELTAT |

Intervalo de integração. Os transitórios serão simulados intervalo por intervalo, começando de zero. Uma operação de chaveamento será executada em determinado instante de tempo correspondente a um número múltiplo inteiro de intervalos.

TMAX |

Tempo total de estudo do fenômeno transitório

IRESUL |

Este parâmetro diz respeito à impressão dos dados de saída.

= 0:

Todo os pontos serão impressos

= N:

Os pontos serão impressos de N em N pontos

<0 : São impressos apenas os valores máximos de Tensão e corrente e os instantes de ocorrência destes máximos.

OBS: Parâmetro em branco é lido como zero.

A.3.3 - CARTÃO DE RAMO

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
BE	BR	R (Ω)	L (mH) ou X <sub>L</sub> (Ω)	C (μF) ou X <sub>C</sub> (Ω)																																			
I2	I3	I3	D 10.4	D 10.4	D 10.4																																		

TIPO = 01 - Parâmetro que identifica um ramo R,L,C.

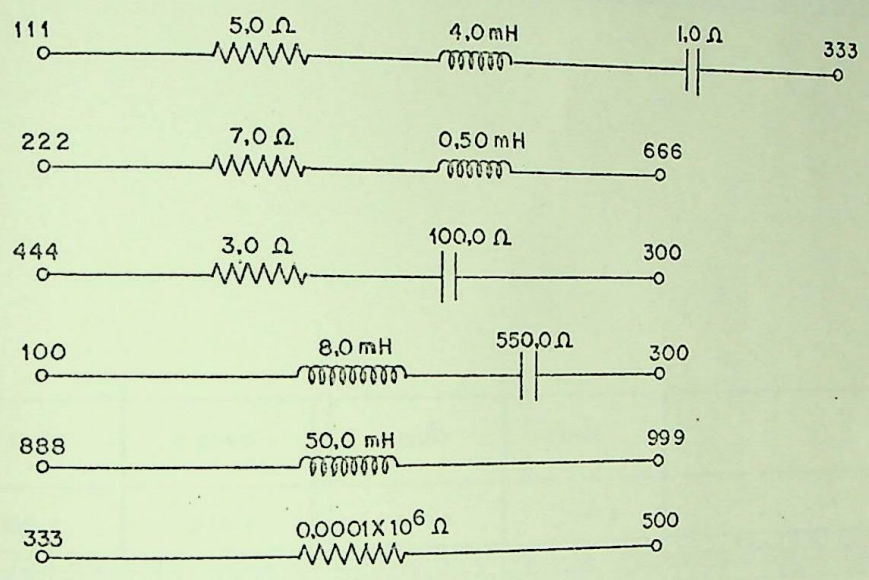
BE: Barra emissora de um ramo.É identificada por um número.

BR: Barra receptora de um ramo.É identificada por um número.

um ou outro parâmetro deixado em branco significa que uma barra está aterrada,ou seja, o ramo está entre uma barra e a terra.

R,L,C: Resistência R em Ω, indutância L em mH ou Ω e capacitância C em μF ou Ω.Pelo menos um destes parâmetros deve ser diferente de zero.

EXEMPLO: Suponha-se optou-se por  $LOPT=0$  e  $COPT=1$  no cartão de identificação do caso.



	5	10	15	20	25	30	35	40 75	80
1 1 1 1 1	3 3 3		5 . 0		4 . 0		1 . 0		
1 2 2 2 2	6 6 6		7 . 0		5 . 0				
1 4 4 4 4	3 0 0		3 . 0				1 0 0 . 0		
1 1 0 0 0	3 0 0				8 . 0		5 0 0 . 0		
1 8 8 8 8	9 9 9				5 0 . 0				
1 3 3 3 3	5 0 0 0	0 0 0 0	1 0 0 6						





TIPO = 04 - Tipo de chave utilizada na simulação. Este programa prevê mais três tipos de chaves, além deste; entretanto, as três chaves fogem ao escopo do presente trabalho.

BE - Barra Emissora da chave, identificada por um número.

BR - Barra receptora da chave, identificada por um número.

TFECHA - Tempo no qual a chave deve iniciar a aproximação dos contatos, em segundos. Qualquer número menor ou igual a zero, atribuído a este parâmetro significa que a chave está inicialmente fechada. O fechamento da chave ocorre quando a Tensão do sistema for igual ou maior que a Tensão suportável pela chave em determinado instante, ou houve a junção metálica dos eletrodos.

TABRE - Tempo no qual a chave deve iniciar a separação dos contatos, em segundos. A abertura elétrica da chave ocorre quando forem satisfeitas as condições para interrupção de corrente descritas no Capítulo IV.

Deve ser observado, portanto, que, se se deseja abrir a chave, TFECHA deve ser menor ou igual a zero e TABRE menor ou igual ao tempo TMAX de observação do fenômeno transitório. Se a operação a ser executada for de fechamento da chave, TFECHA deve ser maior que

zero e menor que  $T_{MAX}$ , enquanto  $T_{ABRE}$  deve ser maior que  $T_{MAX}$

- NCCM** - Nível de corte característico máximo da chave, em A.
- DIDTM** - Taxa de variação máxima da corrente para que haja corte de corrente fora do zero natural, em A/ $\mu$ seg.
- DIDTC** - Taxa de variação crítica da corrente do disjuntor para interrupção, em A/ $\mu$ seg.
- IMARGE** - Margem de corrente tomada como referência  $I_{ref}$ , em amperes. Este parâmetro é utilizado no processo de interrupção de correntes de reignição ou de preignição descrito no capítulo IV\*.
- VTERM** - Velocidade Térmica média das partículas que formam o gás entre os contatos, em cm/s.
- VMOVE** - Velocidade de deslocamento dos contatos, em cm/segundo.
- CCOND** - Coeficiente de condensação das partículas envolvendo o volume do espaçamento entre os contatos (é adimensional).

---

\* No Capítulo IV foi visto que no processo de interrupção de correntes de reignição e de preignição, não se compara a corrente, em determinado instante, com zero e sim com um valor pequeno tomado como referência  $I_{ref}$ . Estes valor é o IMARGE.

- TC - Parâmetro que indica em qual zero deve ser interrompida a corrente de reignição ou de preignição.
- ACONT - Área total das superfícies de junção dos contatos, em  $\text{cm}^2$ .
- GMAX - Distância máxima entre contatos.
- PA, PB, PC, PD, PE - Coeficientes do polinômio de quinta ordem, |equação 3.9| que representa a curva de ruptura estática do disjuntor tomado como exemplo para simulação. PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG, PH são parâmetros que podem ser utilizados para outros fins neste processo de chaveamento. Como exemplo, um outro disjuntor poderia ser modelado matematicamente por um polinômio de oitava ordem ou outra equação que pudesse envolver estes parâmetros.

OBS: A formulação matemática para o perfil da Tensão de recuperação do dielétrico foi feito para interruptor com contatos cilíndricos, de tal forma que, para outros tipos de contatos, deve ser alterado o modelo.

EXEMPLO: Suponha-se que se deseja fechar a chave com as características abaixo em  $t = 5,0\text{ms}$ , onde  $T_{\text{max}} = 10\text{ms}$ .

TIPO =	04
BE =	222
BR =	333



### A.3.5 - CARTÃO DE FONTES

TIPO	BARRA	COD	A	B	TO	TI	0°	ADIC																																																																							
12	13	11																																																																													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80

TIPO = 12

Fonte de Tensão

TIPO = 11

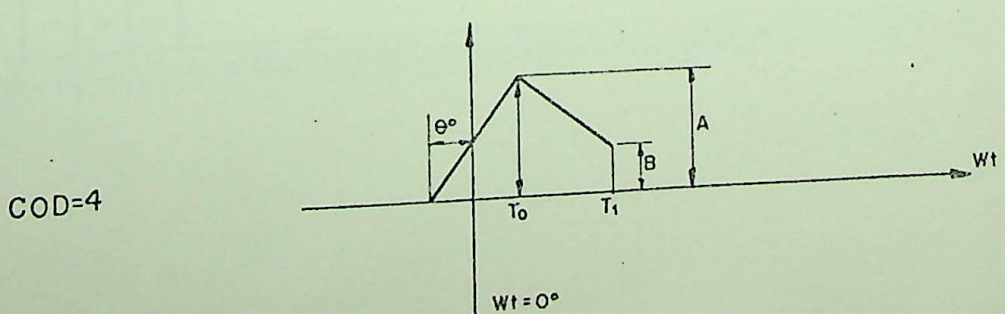
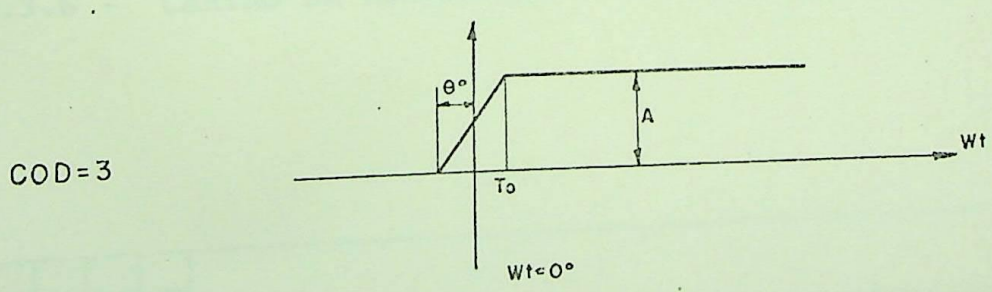
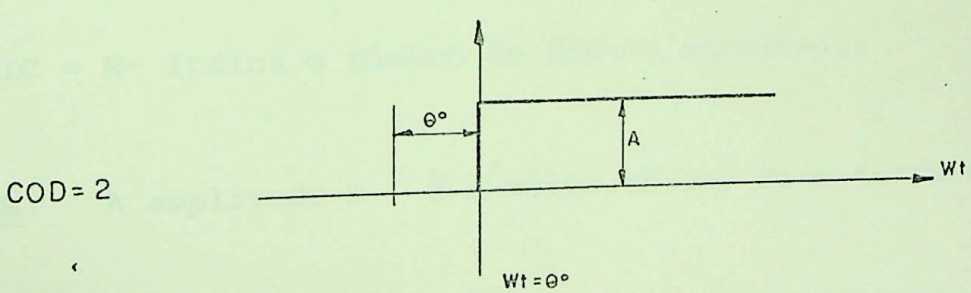
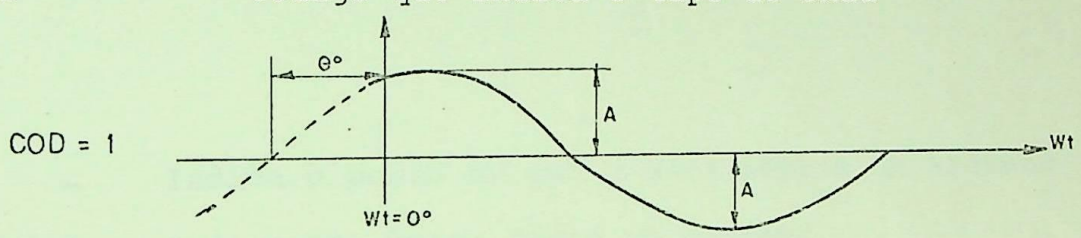
Fonte de corrente

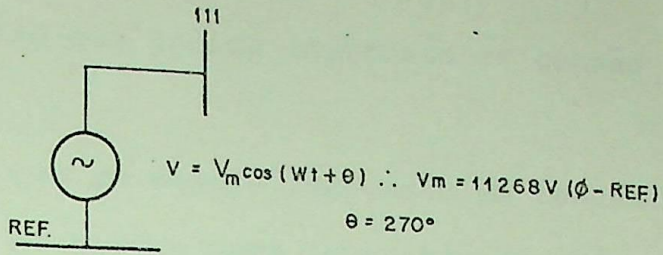
BARRA -

Barra em que está conectada a fonte

COD -

Código que indica o tipo de onda





TIPO	BARRA	ADIC	A	B	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	0	ADIC
12	13	11						
1	2	1	1	1	1	1	1	1

- $\theta$  -- Indica o ponto em que a onda entrou no sistema
  - ADIC=0 - Indica uma única fonte no sistema
  - ADIC = N- Indica o número de fontes adicionais
- OBS: A amplitude A é o valor máximo fase-terra da onda.

A.3.6 - CARTÃO DE TENSÕES DE BARRA PARA IMPRESSÃO

BARRA	BARRA	BARRA	BARRA	BARRA	BARRA
13	13	13	13	13	13







COD = 3 - Parâmetro que indica impressão de Tensões de ramo

BE - Barra Emissora de um ramo.

BR - Barra receptora de um ramo

O número máximo de ramo é seis.

A.3.11 - CARTÃO DE TENSÕES DE RAMO PARA PLOTAGEM

BE	BR	BE	BR	BE	BR	BE	BR	BE	BR	BE	BR	
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61
62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74
75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

BE - Barra emissora de um ramo

BR - Barra receptora de um ramo

o número máximo de ramos é seis.

## A.4 - OBSERVAÇÃO

### A.4.1 - QUANTO AO TEMPO DE OBSERVAÇÃO DO FENÔMENO TRANSITÓRIO

Devido ao curto tempo de recuperação das características dielétricas do disjuntor a vácuo e à rápida variação dos valores de correntes e Tensões Transitórias de chaveamento, é necessário o uso de intervalos de integração muito pequenos, para que não se perca informações no processo de chaveamento.

O estudo do fenômeno Transitório começa a partir do instante de conexão da fonte ao sistema. Por isso, para que se execute uma operação de chaveamento de um estado permanente, é necessário que o sistema já o tenha alcançado após a entrada da fonte. Portanto, há situações em que é necessário escolher um ponto da curva da fonte que leve a um menor tempo de estabilidade do sistema. A seguir, é dado um exemplo de chaveamento de uma carga indutiva onde, embora não haja transitório, desejando-se interromper a corrente em zero, o melhor ponto de chaveamento da onda é no seu máximo.

EXEMPLO: Considere-se o circuito composto por uma fonte de tensão  $v$ , (Fig. A.1)

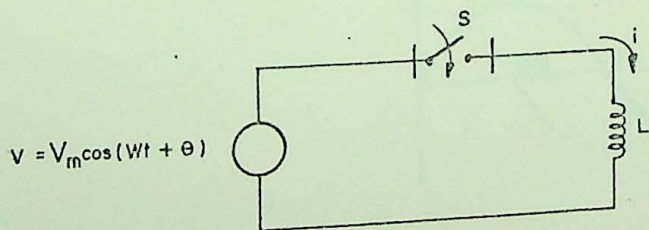


FIG A.1 - Circuito para ilustrar o tempo de observação do fenômeno transitório.

e uma indutância  $L$  a ser energizada pela fonte, através da chave  $s$ .  $\theta$  é o ângulo da curva de tensão em que será fechada a chave. Supondo-se que a chave fechou efetivamente em  $\theta = 0^\circ$ , tem-se a seguinte equação do circuito :

$$V_m \cos \omega t = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

onde se deseja encontrar a corrente por  $L$ . No domínio da frequência, tem-se:

$$V_m \frac{s}{s^2 + \omega^2} = L s I(s) - Li(0), \text{ onde } i(0) = 0.$$

isolando-se  $I(s)$ , vem: 
$$I(s) = \frac{V_m}{L} \frac{1}{s^2 + \omega^2} \quad (2)$$

Anti-transformando-se (2), vem  $i(t) = \frac{V}{\omega L} \text{sen } \omega t$ , onde  $\omega \approx 377 \text{ rad/s}$ .

A curva de  $i(t)$  está mostrada na figura A.2

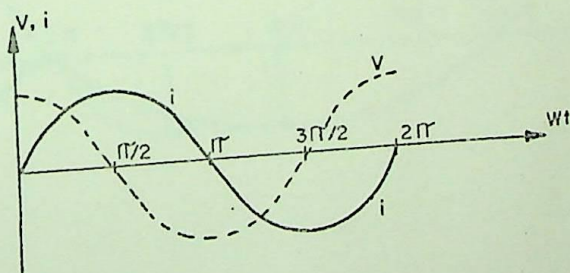


FIG. A.2 - Curvas de corrente e tensão na carga  $L$  do circuito da Figura A.1-

Supondo-se, agora, que a chave fechou em  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , tem-se a seguinte equação do circuito:

$$V_m \cos(\omega t + \pi/2) = L \frac{di}{dt}$$

ou  $V_m \sin \omega t = L \frac{di}{dt}$  (3)

No domínio da frequência, vem:

$$-V_m \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} = L SI(s), \text{ que resulta em:}$$

$$I(s) = \frac{V_m}{L} \frac{\omega}{s(s^2 + \omega^2)} \quad (4)$$

Anti-transformando-se (4) vem:

$$i(t) = -\frac{V_m}{\omega L} (1 - \cos \omega t)$$

A curva para  $i(t)$  está mostrada na figura A.3

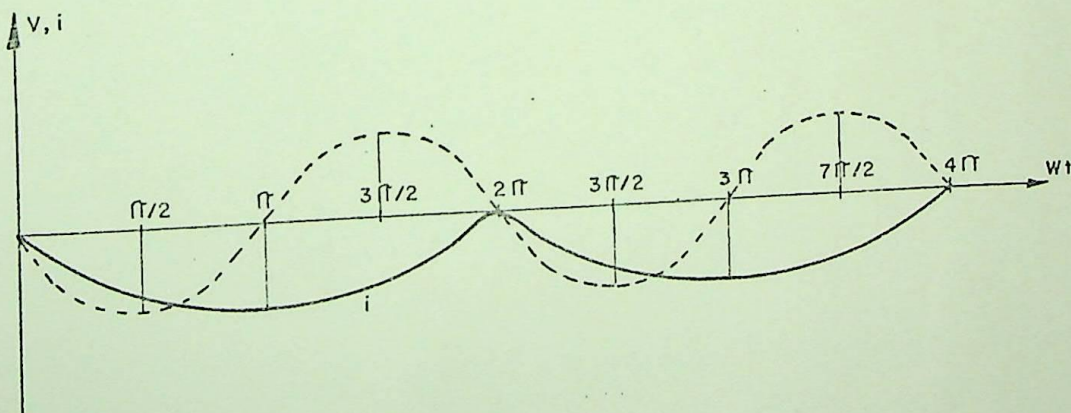


FIG A.3

Observando-se as curvas de corrente resultantes do chaveamento nos pontos máximo e mínimo da curva de tensão, verifica-se que no primeiro caso, a corrente encontra seu zero em  $\omega t = \pi$ , portanto, para  $\omega = 377$ , em  $t \approx 8,3$  ms (milissegundos). No segundo caso, este tempo sobe para  $t \approx 16,6$  ms. Conclui-se, portanto que, se se deseja uma interrupção em torno do primeiro zero de corrente, o primeiro caso conduz a um menor tempo de observação, com conseqüente menor tempo de computação.

## PROCEDIMENTO PARA EXECUÇÃO DO PROGRAMA

Em primeiro lugar, deve-se criar um arquivo, nos termos de exemplo a seguir, e guardar com um nome.

### EXEMPLO:

```

1      NOME1 NOME2
2      BUILD CAVBI;REC=-120,3,F,ASCII;DISC=5000
3      BUILD CAVBP;REC=-120,3,F,ASCII;DISC=5000
4      BUILD CAIRI;REC=-120,3,F,ASCII;DISC=5000
5      BUILD CAIRP;REC=-120,3,F,ASCII;DISC=5000
6      BUILD CAVRI;REC=-120,3,F,ASCII;DISC=5000
7      BUILD CAVRP;REC=-120,3,F,ASCII;DISC=5000
8      FILE FTN01=CAVBI,OLD
9      FILE FTN02=CAVBP,OLD
10     FILE FTN03=CAIRI,OLD
11     FILE FTN04=CAIRP,OLD
12     FILE FTN05=CAVRI,OLD
13     FILE FTN06=CAVRP,OLD
14     FILE FTN05=INOME2,OLD
15     FILE FTN06;DEV=LP
16     RUN CASTRO1
17     **
18     LIMPA
19     PURGE CAVBI
20     PURGE CAVBP
21     PURGE CAIRI
22     PURGE CAIRP
23     PURGE CAVRI
24     PURGE CAVRP
25     **

```

Após sair do editor, deve teclar SETCATALOG  
(nome do arquivo). Os nomes no arquivo exemplo acima são:  
NOME1,NOME2 : São nomes quaisquer atribuídos pelo usuário.

- CAVBI - Arquivo contendo tensões de barra para impressão.
- CAVBP - Arquivo contendo tensões de barra para plotagem.
- CAIRI - Arquivo contendo correntes de ramo para impressão.
- CAIRP - Arquivo contendo correntes de ramo para plotagem
- CAVRI - Arquivo contendo tensões de ramo para impressão
- CAVRP - Arquivo contendo tensões de ramo para plotagem
- CASTRO 1 - Programa objeto a ser executado.
- LIMPA: - Comando que deve ser teclado para limpar os arquivos para impressão e plotagem, a fim de se executar um novo caso.

Para se executar o programa, basta teclar NO

MEL, NOME DO ARQUIVO DE DADOS

# APÊNDICE B

## PROCEDIMENTO PARA SIMULAÇÃO DE CHAVEAMENTO TRIFÁSICO

### B.1 - INTERRUPTÃO DE CORRENTE

O processo de interrupção de corrente trifásica deve obedecer a três etapas (três execuções) como será explicado a seguir:

Como é sabido, os modelos matemáticos de interrupção de corrente e da recuperação da suportabilidade do dielétrico são válidos para cada interruptor individualmente. O problema que pode ocorrer nas simulações trifásicas de interrupção de corrente é que a corrente em um ou dois polos possa ser levada a zero antes do nível de corte de corrente\*.

Pela entrada de dados, sabe-se qual o primeiro polo a interromper a sua corrente. Logicamente, este polo irá obedecer ao modelo de interrupção (com ou sem corte) a 60 Hz. Como não se sabe o que pode ocorrer a partir da interrupção da corrente deste polo, no que se refere à reignição dos seus contatos e possível injeção de corrente nos dois outros polos, em uma primeira e

---

\* Pode ocorrer uma reignição do primeiro polo a interromper sua corrente de carga, com injeção de correntes de alta frequência nas duas fases restantes, provocando zero forçado de corrente.



execução, apenas o primeiro polo deve interromper sua corrente, com nível de corte determinado de experimentos. Os outros dois polos recebem na entrada de dados um nível de corte característico máximo próximo de zero, o que permite que se observa seus dados de saída o comportamento da corrente nos mesmos. Esta primeira execução informa ainda o nível de corrente cortada e o instante, na curva de corrente, em que esta ocorreu, e sabe-se que a mesma coisa é esperada nas duas fases restantes.

Se, nesta primeira execução, as correntes nos dois polos em observação não forem forçadas a zero antes do instante determinado na primeira simulação, então o segundo polo cuja corrente passará por zero, recebe nos dados de entrada o nível de corte verdadeiro (idêntico ao primeiro polo), de forma que na segunda execução sua corrente será interrompida segundo o modelo desenvolvido. Os resultados desta segunda simulação permitem observar se o terceiro polo não teve sua corrente forçada a zero em nível maior que o esperado (determinado desde a primeira execução). Se isto não ocorrer, também este polo receberá na entrada de dados o seu verdadeiro "nível de corte característico máximo" e executa-se o programa pela terceira vez. Ficou claro, então, que as interrupções de corrente seguiram o modelo desenvolvido nos três polos.

Agora, se a interrupção do primeiro polo fizer com que a corrente em qualquer dos dois polos vá a zero antes do instante esperado, o primeiro em que isto ocorrer deve interromper esta corrente quando a mesma passar por zero. O outro continua em observação na segunda execução. Se os resultados des

ta segunda execução mostrarem que também o terceiro polo teve sua corrente levada a zero antes do instante esperado, também este deverá interromper esta corrente quando a mesma passar por zero.

A maneira de se fazer a corrente de alta frequência (corrente forçada a zero) ser interrompida ao passar por zero é fazer a variável  $RESTRIKE = 1$  quando esta é solicitada na execução do programa. Enquanto a interrupção por um polo a seguir o modelo, esta variável deve receber o valor zero\*

## B.2 - FECHAMENTO DOS CONTATOS DO DISJUNTOR

Neste caso, o processo segue o mesmo procedimento do fechamento monofásico, ou seja, os contatos irão fechar eletricamente quando a Tensão imposta pelo sistema vencer o dielétrico ou quando houver junção metálica dos eletrodos. Deve ser lembrado que a interrupção da corrente de reignição não segue o modelo desenvolvido para a frequência industrial, por se tratar, evidentemente de uma corrente de alta frequência. Portanto, a variável  $RESTRIKE$ , neste caso tem valor fixo igual a  $1^{**}$ .

---

\* Havendo reignição do polo, a variável  $RESTRIKE$  assume valor 1 dentro da própria rotina, significando que a corrente é de alta frequência e deverá ser interrompida ao passar por zero.

\*\* Esclarecimentos adicionais para este tipo de execução devem ser solicitados ao autor deste trabalho.