

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA



1210000999

Nº 04

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO
FLASHOVER EM ISOLADORES DE ALTA TENSÃO
POLUÍDOS.

ALUNO: AFONSO JOSÉ DO PRADO

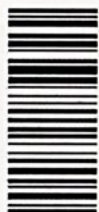
ORIENTADOR: OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA

Te. 999

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE
ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA



1210000999

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM AUTOMAÇÃO

LINHA DE PESQUISA : ANÁLISE DE SEGURANÇA DE SISTEMAS DE
ENERGIA ELÉTRICA

TÍTULO : Análise do comportamento dinâmico do flashover em
isoladores de alta tensão poluídos.

ALUNO : Afonso José do Prado

ORIENTADOR : Prof. Dr. Oscar Armando Maldonado Astorga

mp-26869

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA" SERVIÇO TÁC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA <i>Reposição</i> 30.10.95	DATA DE TOMBO 29.02.96
REGISTRO <i>Ilha</i>	TOMBO <i>Te 999</i>
AQUISIÇÃO <i>Ilha</i> Prof. Antônio A. Ugulim R\$ 10,00	CLASSIFICAÇÃO

Dissertação de Mestrado submetida à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
(UNESP), como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Ilha Solteira, junho de 1995.

A minha família, apoio em todos os momentos, fossem eles alegres ou tristes. Presença marcante durante o desenvolvimento deste trabalho.

A Heloiza, pelos cinco anos de namoro.

A Cristian.



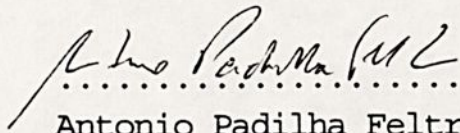
"Eis que estou convosco
todos os dias, até o fim do
mundo". (Mt 28,20a).



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO FLASHOVER EM
ISOLADORES DE ALTA TENSÃO POLUÍDOS

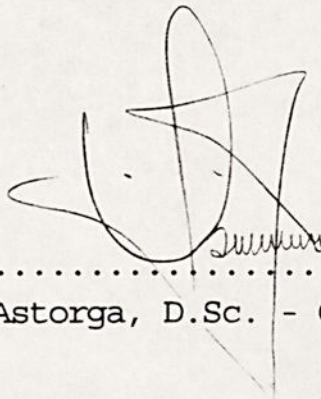
Afonso José do Prado

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (DEE/FEIS/UNESP) como parte integrante dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.



.....
Antonio Padilha Feltrin, D.Sc. - Coordenador

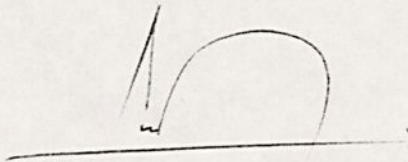
BANCA EXAMINADORA



.....
Oscar Armando Maldonado Astorga, D.Sc. - Orientador



.....
José Pissolato Filho, D.Sc.



.....
Luis Carlos Origa de Oliveira, D.Sc.

RESUMO

Correntes de fuga superficiais, em isoladores de alta e baixa tensão, contribuem com as perdas na transmissão e distribuição de energia elétrica. Em regiões poluídas, as correntes de fuga aumentam, provocando descargas elétricas superficiais que, eventualmente, podem gerar o fenômeno de flashover. Tal fenômeno é a ocorrência de arco voltaico entre condutores, ou partes energizadas e partes aterradas do sistema elétrico, através da camada de poluição depositada na superfície dos isoladores. Este assunto tem merecido muitos estudos, porém, não há ainda uma explicação física definitiva para tal fenômeno. A maioria desses estudos são baseados no modelo físico de um isolador de alta tensão poluído, desenvolvido por Obenaus [01]. No entanto, este simula uma camada de poluição com espessura constante. Desta forma, este trabalho sugere um modelo com alterações no perfil da profundidade. O objetivo é simular variações na espessura da camada de poluição depositada sobre o isolador real.



ABSTRACT

Superficial currents, on high and low voltage insulators, cause some losses during the transmission and distribution of electrical power. In polluted regions, there is an increase in these currents, producing superficial electrical discharges. Sometimes, it can occur the flashover phenomenon. This phenomenon is an electrical arc through layer pollution that is accumulated on the insulator surface. The flashover phenomenon has been researched by many researchers, but there is not a good theory about this phenomenon. Most of these research works uses Obenaus' model [01]. Obenaus' model is an experimental model of a polluted high voltage insulator. However, Obenaus' model can simulate a layer pollution with a constant thickness. This research work presents a model with variable thickness. The objective is to collaborate with researches that seeks a better theory about the flashover phenomenon.



ÍNDICE GERAL

I - Introdução	01
II - Análises sobre o fenômeno de flashover	04
III - O modelo físico com espessura variável do isolador de alta tensão poluído	17
1 - O modelo matemático	21
2 - Valores críticos para a ocorrência do flashover	24
3 - Critério para ocorrência do flashover	27
4 - Mecanismos físicos para a propagação da descarga	29
A) Distribuição de correntes no pé da descarga	29
B) Força elétrica desencadeadora	29
5 - O equacionamento das alterações na profundidade	31
IV - O programa computacional	39
1 - O funcionamento do programa computacional sem modificação no perfil da profundidade	39
2 - O funcionamento do programa computacional com alteração no perfil da profundidade	42
3 - Resultados obtidos	43
V - Montagem experimental	54
1 - O modelo físico do isolador poluído	54
2 - O circuito de alimentação e de controle da descarga elétrica	55
3 - O circuito de visualização da descarga	57
4 - Os circuitos de obtenção da corrente e da tensão do fenômeno	58
VI - Resultados experimentais	60
1 - Mecanismos físicos da propagação da descarga (constatação experimental)	60
2 - Os dados experimentais (tensão em função do tempo)	63
3 - Os dados experimentais (velocidade em função da alongação da descarga)	83

<i>Análise do comportamento dinâmico do flashover em isoladores de alta tensão poluídos</i>	<i>ii</i>
VII - Conclusões	100
1 - Propostas para trabalhos futuros	101
2 - Conclusão final	103
Referências bibliográficas	104
Apêndice	109



RELAÇÃO DE SÍMBOLOS

- U - tensão aplicada entre o eletrodo de alta tensão e o eletrodo de aterramento;
- V - tensão envolvida no fenômeno de flashover;
- ρ - resistividade superficial do eletrólito;
- L - comprimento do canal;
- x - elongação da descarga;
- i - corrente da descarga elétrica;
- A - constante experimental dependente do meio ambiente;
- n - constante experimental dependente do meio ambiente;
- a - largura do canal do modelo de Obenaus;
- h - profundidade do canal do modelo de Obenaus;
- b - distância entre o ponto atingido pela descarga e o ponto de aterramento;
- σ - condutividade volumétrica da solução eletrolítica;
- v - velocidade da descarga;
- μ - mobilidade iônica no pé da descarga sob pressão atmosférica constante;
- E - campo elétrico médio no eletrólito;
- c - calor específico do eletrólito;
- K - constante de Boltzmann;
- T - temperatura absoluta do eletrólito;
- f - fator de forma para análises de superfícies circulares;
- τ - constante de tempo (100 μ s);
- N - variável estática do arco voltaico;
- α - inclinação da rampa do modelo físico do isolador poluído;
- V_d - queda de tensão na descarga elétrica;
- V_p - queda de tensão na camada de poluição;
- V_e - queda de tensão nos eletrodos;
- E_a - campo elétrico na coluna da descarga elétrica;
- r_d - raio da descarga elétrica;
- σ_o - condutividade inicial da solução;
- W_o - energia de ativação;
- V_m - tensão mínima para que a descarga elétrica atinja um determinado comprimento;
- i_m - corrente mínima para que a descarga elétrica atinja



um determinado comprimento;

dV - diferencial de tensão;

dx - diferencial de comprimento;

dP - diferencial de potência;

di - diferencial de corrente;

x_m - ponto onde ocorre a alteração na profundidade;

R_p - resistência por unidade de comprimento do canal do modelo de Obenaus;

R_a - resistência do arco voltaico;

R_s - resistência interna do sistema de alimentação da descarga;

E_{pr} - campo elétrico na camada de poluição;

x_{cf} - comprimento crítico para ocorrência do flashover;

i_{cf} - corrente crítica para ocorrência do flashover;

V_{cf} - tensão crítica para ocorrência do flashover;

P_{fi} - profundidade inicial do canal antes da introdução da rampa ou do degrau;

P_{ff} - profundidade final do canal após a introdução da rampa ou do degrau;

dR_a - diferencial da resistência do arco voltaico;

R_{pol} - resistência da camada de poluição depositada sobre o isolador de alta tensão.



CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A demanda por energia, nas suas diversas formas, aumenta com o crescimento populacional e o desenvolvimento sócio-econômico das várias regiões do país. A energia elétrica não é exceção a esta constatação e, além do aumento da produção da mesma, deve-se buscar a diminuição das perdas no processo de geração, transmissão e distribuição deste tipo de energia.

Um dos fatores que contribui para perdas na transmissão e distribuição de energia elétrica é a existência de correntes de fuga nos isoladores de alta e baixa tensão. Em isoladores que trabalham em regiões sujeitas à poluição atmosférica, as correntes de fuga intensificam-se, provocando o surgimento de descargas elétricas superficiais, que eventualmente, podem levar à ocorrência do fenômeno de flashover. O fenômeno de flashover é a ocorrência de arco voltaico entre os condutores, ou partes energizadas, e partes aterradas da estrutura de sustentação das linhas de energia elétrica, através da camada de poluição depositada na superfície dos isoladores.

Muitos estudos têm sido desenvolvidos sobre o fenômeno de flashover, porém, não se conseguiu uma explicação física definitiva para tal fenômeno. A maioria desses trabalhos têm utilizado o modelo físico de um isolador de alta tensão poluído desenvolvido por Obenaus [01]. Este modelo, no entanto, simula uma camada de poluição com espessura constante.

O trabalho, apresentado nos próximos capítulos, contribui para um melhor entendimento do fenômeno de flashover, sugerindo um modelo com alterações no perfil da profundidade que simula variações na espessura da camada de poluição depositada sobre o isolador real.

O capítulo II deste trabalho apresenta as mais recentes pesquisas sobre o fenômeno de flashover em isoladores poluídos de alta tensão.

No capítulo III, apresentam-se as alterações propostas no modelo físico de isolador de alta tensão poluído, o seu circuito elétrico equivalente e o equacionamento matemático que

permitirá a análise computacional do fenômeno.

O capítulo IV apresenta o desenvolvimento de um programa computacional em linguagem PASCAL, para a simulação matemática do fenômeno de flashover. Utilizou-se a linguagem PASCAL, pois se conhecia detalhadamente rotinas de programação e rotinas gráficas desta linguagem. Assim, conseguiu-se uma boa agilidade e eficiência no desenvolvimento do programa computacional. Apresenta-se, também, gráficos obtidos pela utilização desse programa computacional.

O capítulo V apresenta a montagem experimental utilizada para a realização de ensaios no modelo físico proposto do isolador de alta tensão poluído. O modelo físico é composto, principalmente, de um canal retangular com alterações na sua profundidade, contendo uma solução eletrolítica. Ligados ao modelo físico proposto, há circuitos de medição baseados em um osciloscópio de memória que registram os sinais de tensão, de corrente e a velocidade das descargas elétricas. Essas descargas são geradas por um transformador de alta tensão acoplado a um circuito de retificação e a um circuito de controle das mesmas, que são equipamentos presentes no Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (DEE/FEIS/UNESP), local onde se realizaram os ensaios cujos resultados são apresentados no capítulo VI.

No capítulo VI, então, apresentam-se os resultados experimentais obtidos no Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. São apresentados os resultados do modelo físico sem alteração na profundidade e, também, do modelo físico proposto com alterações na profundidade do mesmo. Para se chegar a esses resultados, foram utilizadas diversas fotos da tela do osciloscópio de memória e este capítulo contém alguns exemplos importantes das mesmas.

O capítulo VII apresenta as conclusões deste trabalho. Elas são baseadas na análise de várias fotos, inúmeras repetições de ensaios, comparações entre os resultados do modelo original, sem alteração na profundidade, e do modelo proposto, com alterações na profundidade. Após esse intenso trabalho e baseando-se em resultados de outros autores, pode-se



afirmar que para simular o fenômeno de flashover em isoladores de alta tensão poluídos, o modelo com alterações na profundidade apresenta melhor desempenho e eficiência do que o modelo sem alterações na profundidade.



CAPÍTULO II

ANÁLISES SOBRE O FENÔMENO DE FLASHOVER

Neste capítulo são apresentados os mais recentes trabalhos de pesquisa sobre descargas elétricas em isoladores poluídos. Essas pesquisas buscam um melhor conhecimento sobre o fenômeno de flashover, pois o mesmo gera perdas de energia nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, podendo até prejudicar, de forma grave, o funcionamento dos mesmos.

Sundararajan e Gorur [02], [03], a partir do modelo de Obenaus [01], modificam o equacionamento da resistência da poluição do fenômeno de flashover, introduzindo na simulação matemática do mesmo, a geometria circular da superfície de um isolador real. Este fator torna-se importante quando os dados experimentais para comparação são colhidos de ensaios com isoladores reais. Assim, a resistência da poluição fica:

$$R_{pol} = \frac{1}{\sigma} \cdot f \quad (1)$$

onde: f - fator de forma para superfície circular.

O fator de forma da equação anterior é o seguinte:

$$f = \int_{L-x}^L \frac{dx}{2\pi r} \quad (2)$$

onde: dx - incremento do comprimento da descarga.

Neste trabalho, ainda, a resistência por unidade de comprimento ($[\Omega/\text{cm}]$) tem a seguinte equação:

$$R_p = \frac{R_{pol}}{x} \quad (3)$$

Além disso, o campo elétrico no pé da descarga tem a

seguinte equação:

$$E_{pr} = A \frac{1}{n+1} \cdot R_p \frac{n}{n+1} \quad (4)$$

Segundo Hampton [04] para a descarga elétrica caminhar sobre a camada de poluição, atingindo o comprimento crítico para a ocorrência do flashover, o campo no pé da descarga deve ser maior que o campo na coluna da descarga. Sundararajan e Gorur [02], [03] utilizam este mesmo critério para a propagação da descarga e escrevem o incremento das grandezas elétricas através de técnicas numéricas de diferenciação da resistência dinâmica do arco:

$$\frac{dR_a}{dt} = \frac{R_a}{\tau} - \frac{R_a^2 \cdot i^{n+1}}{\tau \cdot N} \quad (5)$$

onde: R_a - resistência do arco;
 τ - constante de tempo (100 μ s);
 N - variável estática do arco.

Tem-se que:

$$N = V \cdot A^{0,8} \quad (6)$$

Baseando-se nas equações (3) e (4), o valor da resistência do arco será:

$$R_{a(novo)} = R_{a(anterior)} + dR_a \quad (7)$$

A alteração nos valores das outras grandezas elétricas torna-se evidente ao analisar a equação da tensão proposta por Sundararajan e Gorur [02], [03]:

$$V = V_e + R_s \cdot (L-x) \cdot i + (R_{pol} + R_g) \cdot i \quad (8)$$

onde: R_s - resistência interna do sistema de alimentação da descarga.



Sundararajan e Gorur [02], [03] introduzem a não-uniformidade da distribuição da poluição sobre a superfície do isolador. Para isso, divide-se o isolador em várias zonas, utilizando para cada uma delas um nível de contaminação. Utiliza-se um nível de contaminação geral que é alterado por um fator multiplicador. A introdução da não-uniformidade na simulação matemática e computacional é consequência da distribuição irregular da camada de poluição sobre o isolador real. A tabela 2.1 mostra os valores multiplicadores adotados pelos autores do trabalho citado. A figura 2.1 mostra o esquema das zonas em que foram divididos os isoladores estudados (tipo comercial).

Demonstra-se que a introdução de valores diversificados para os níveis de contaminação das seis zonas do isolador, não altera profundamente os resultados das simulações quando comparados com os resultados gerados pelo equacionamento matemático sem a introdução da não-uniformidade. Como o equacionamento com contaminação uniforme apresenta boa aproximação com os resultados experimentais (valores de tensão de flashover em função da condutividade da solução eletrolítica), Sundararajan e Gorur [02], [03] concluem que a utilização da não-uniformidade depende do grau de complexidade desejado para simulação do fenômeno de flashover. Isto porque as alterações propostas para o equacionamento matemático já aproximaram bastante os resultados matemáticos e os experimentais.

Sundararajan e Gorur [05] relacionam o modelo da camada de poluição com aplicações práticas de isoladores. Após análises de dados laboratoriais, adequam-se as equações desenvolvidas para a escolha do tipo e do tamanho de isoladores para um conjunto determinado de condições ambientes, sob as quais este equipamento irá trabalhar. Busca-se, então, uma melhor utilização das características de cada tipo de isolador, ou seja, pretende-se obter a especificação correta do equipamento a ser utilizado.

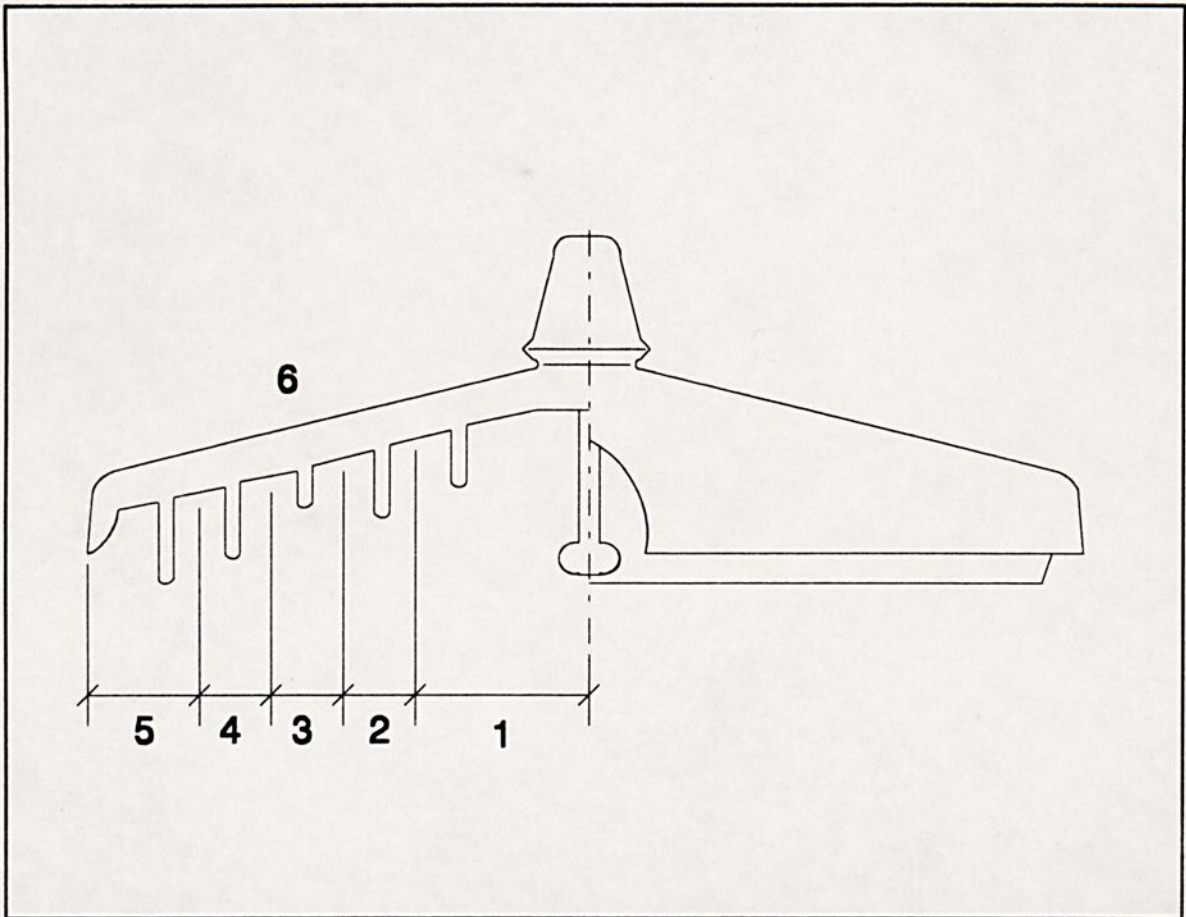


Figura 2.1 - Esquema das zonas de um isolador típico.

Tabela 2.1 - Multiplicadores do nível de poluição para as seis zonas do isolador tipo A sugeridos por Sundararajan e Gorur [02], [03].

ZONA	TESTE DE NÃO-UNIFORMIDADE					
	01	02	03	04	05	06
01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
05	0.10	0.25	0.50	0.75	2.50	5.00
06	0.10	0.25	0.50	0.75	2.50	5.00

Watson, Kho, Samuels, Ma e Chiu [06], estudaram a trajetória de um arco voltaico em função da tensão aplicada e do comprimento do gap. Este gap separava o eletrodo de alta tensão de uma placa circular de metal aterrada. Constatou-se que com o aumento do gap, aumenta-se a tensão necessária para a ocorrência do flashover e aumenta-se a probabilidade do arco voltaico atingir pontos distantes do centro da placa de metal. Esta placa de metal era centralizada em relação à posição do eletrodo de alta tensão. Ou seja, quanto menor o comprimento do gap, menor a distância atingida pelo arco voltaico em relação ao eletrodo de alta tensão. A figura 2.3 mostra essa relação em forma de gráfico e a figura 2.2 mostra um esquema da montagem experimental utilizada para a coleta desses dados.

Além de reduzir o tamanho do gap, um outro procedimento recomendável é trabalhar com um gap de proporções desprezíveis em relação ao comprimento do modelo utilizado. Isso faz com que o desvio do arco voltaico tenha efeito desprezível no fenômeno estudado.

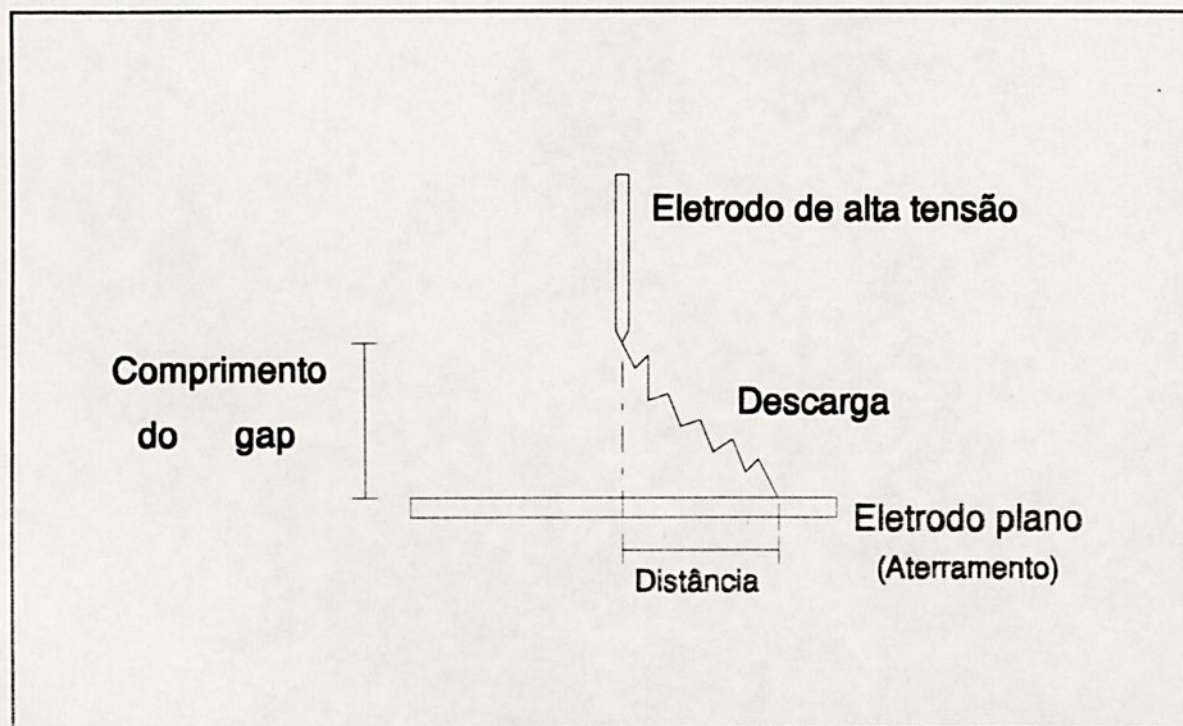


Figura 2.2 - Montagem experimental para estudo da influência do gap no fenômeno de flashover.

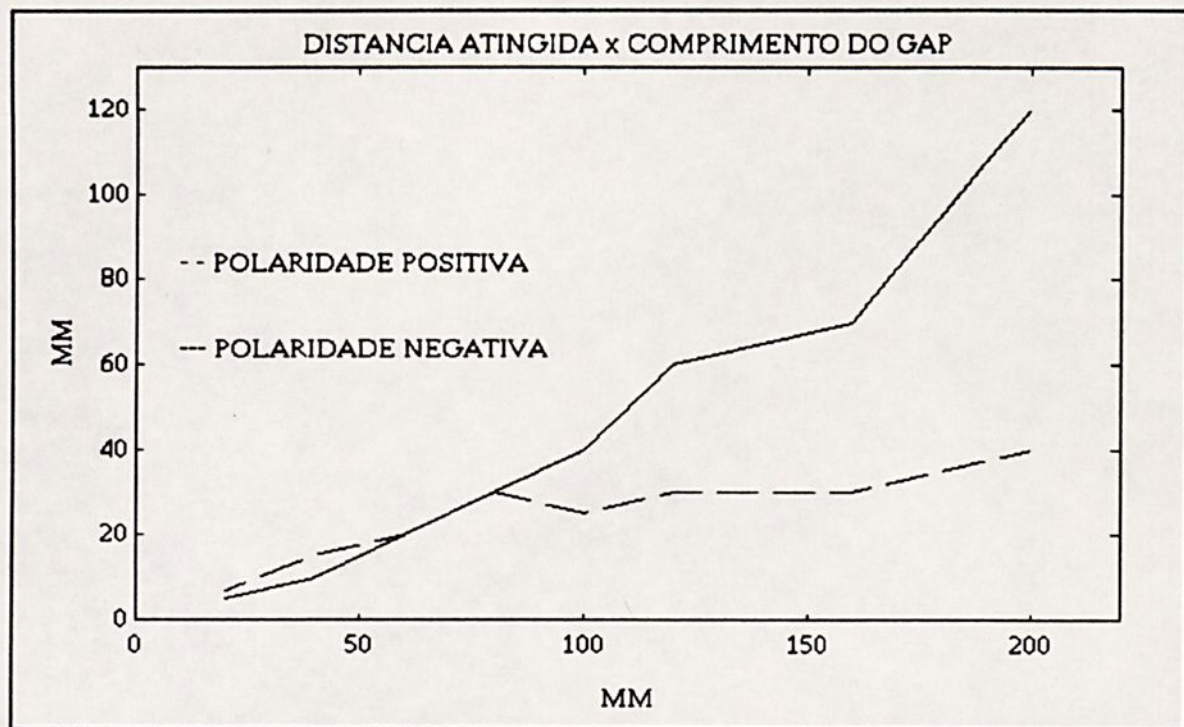


Figura 2.3 - Tensão de flashover em função do comprimento do GAP entre o eletrodo de alta tensão e o aterramento.

O problema de flashover apresenta-se também em corrente alternada, em sistemas de isolação de condutores e isoladores com partes metálicas. Exemplos disso são as buchas de capacitores e transformadores de alta tensão, como também, a extremidade de cabos de alta tensão isolados. Segundo Yamano [07], correntes de pré-ionização apresentam-se em maior proporção nos sistemas de isolação contendo partes metálicas do que em isoladores sem partes condutoras (espaçador para condutores de alta tensão, por exemplo). No primeiro caso, essas correntes conseguem percorrer distâncias maiores, diminuindo a tensão necessária para a ocorrência do fenômeno de flashover.

Em sua pesquisa, Yamano [07] prova que isoladores ociosos têm um melhor comportamento que aqueles sem espaços vazios, quando ambos contêm partes metálicas ou condutores. A causa disso é a tripla junção (isolador, condutor de alta tensão e o ar). As configurações utilizadas para estas conclusões estão

esquemáticas na figura 2.4. No esquema 2.4(a), mostra-se a configuração oca e o esquema 2.4(b) mostra o similar sem espaços ociosos.

A configuração oca diminui a grave distorção do campo elétrico causada pela tripla junção. Assim, elimina-se, quase completamente, as correntes de pré-ionização, pois suaviza-se a distorção do campo elétrico na superfície do isolador. A figura 2.5 mostra as dimensões (d), (h) e (t) relacionadas com os dados experimentais colhidos para análise dos tipos de isoladores estudados. A figura 2.6 mostra o comportamento da tensão de flashover em função da distância entre o eletrodo de descarga e o isolador (d) para dois valores de altura (h) e comprimento (t). São comparados os valores para o isolador oco e para o isolador normal.

O artigo de Yamano [07] finaliza-se demonstrando qual a relação ideal das dimensões do isolador oco e demonstrando que há um número menor de problemas por causa da menor quantidade de correntes de pré-ionização na superfície isolante. Segundo este autor, essas correntes são quase totalmente eliminadas pela configuração oca.

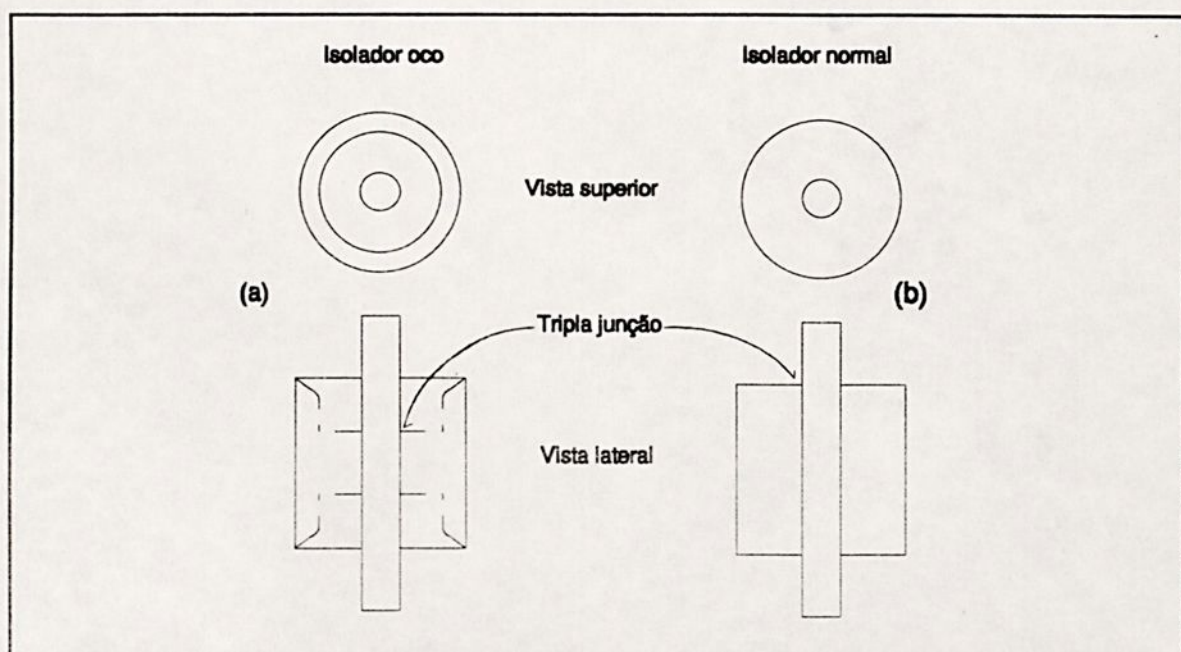


Figura 2.4 - Estruturas analisadas por Yamano [07] para a eliminação da tripla junção.

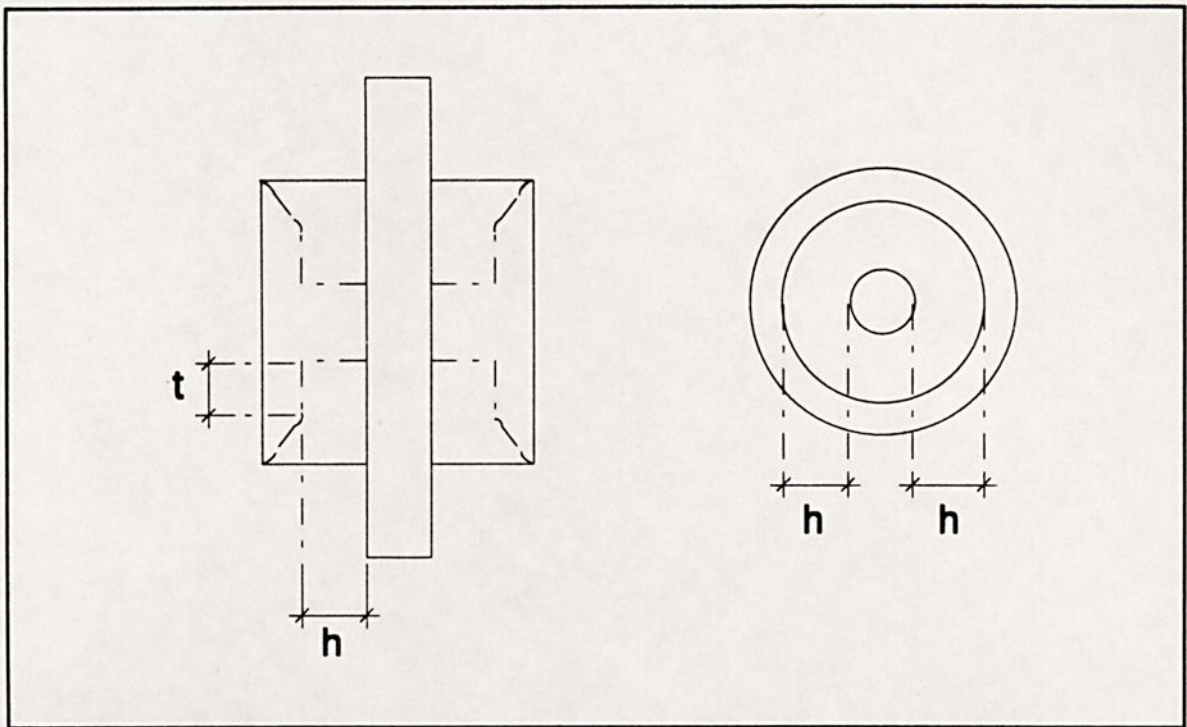


Figura 2.5 - Principais dimensões para análise do comprimento do isolador oco proposto por Yamano [07].

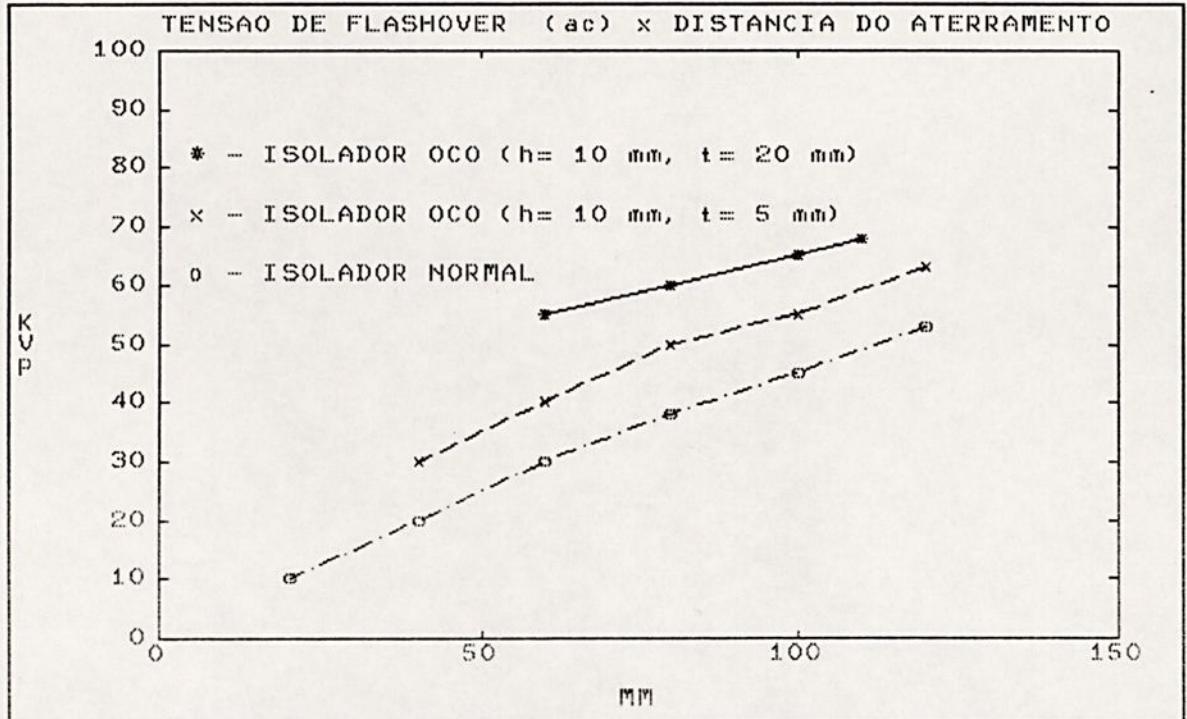


Figura 2.6 - Tensão de flashover em função da distância entre o eletrodo de descarga e o isolador analisado.

O problema da contaminação de isoladores em território saudita é bem complexo. Com a industrialização crescente, combinada com o clima inóspito da região, os problemas causados pela deposição de partículas sobre a superfície dos isoladores tornam-se críticos. Evitar esses problemas torna-se um fator importante para os sistemas de transmissão de energia. Além disso, estes sistemas passam por regiões litorâneas, somando a influência da salinidade às condições adversas já citadas. Farag, Zedan e Cheng [08] apresentam aspectos teóricos de análises de isoladores de alta tensão em território saudita. Esse estudo baseia-se no uso de computadores digitais para a simulação das condições, às quais são submetidas as cadeias de isoladores de alta tensão. Determinadas as condições de trabalho da cadeia de isoladores (temperatura, deposição de material poluente, etc), estuda-se a variação das características elétricas com o aumento do número de isoladores. A finalidade principal é o dimensionamento da cadeia de isoladores que atenda determinadas características, sob condições ambientais adversas (no caso, as condições específicas da Arábia Saudita). Segundo os autores, o uso de computadores é importante na análise do problema proposto, aumentando a versatilidade na aplicação do modelo teórico desenvolvido.

Schei e Larsen [09] estudam o fenômeno de flashover que atinge os pára-raios de descargas de sub-estações, presentes em locais em que há partículas poluentes ou salinidade na atmosfera. Assim, em regiões litorâneas e grandes centros industriais, esses equipamentos sofrem alterações em suas características de funcionamento por causa de partículas depositadas na superfície externa dos mesmos. Desta forma, os pára-raios podem apresentar problemas, diminuindo sua vida útil ou até sofrer danos irreparáveis. Na superfície externa dos pára-raios há uma distribuição radial de tensão não uniforme. Ou seja, há diferenciais de tensão entre regiões diferentes da superfície isolante. Em condições normais, os pára-raios suportam tais diferenciais de tensão.

A camada de poluição aumenta as correntes de fuga na



superfície externa do pára-raios, que vão interferir nos resistores internos de descarga desse equipamento. Um corte de um pára-raios de descarga com seu circuito equivalente está colocado na figura 2.7, mostrando um esquema desses resistores. Semelhante ao modelo de Obenaus [01], a resistência da poluição está ligada a um gap, que deve ser vencido para a ocorrência do fenômeno de flashover na superfície do pára-raios. Este modelo acrescenta, ainda, capacitores que caracterizam a interferência das correntes de fuga externas nos componentes internos do pára-raios.

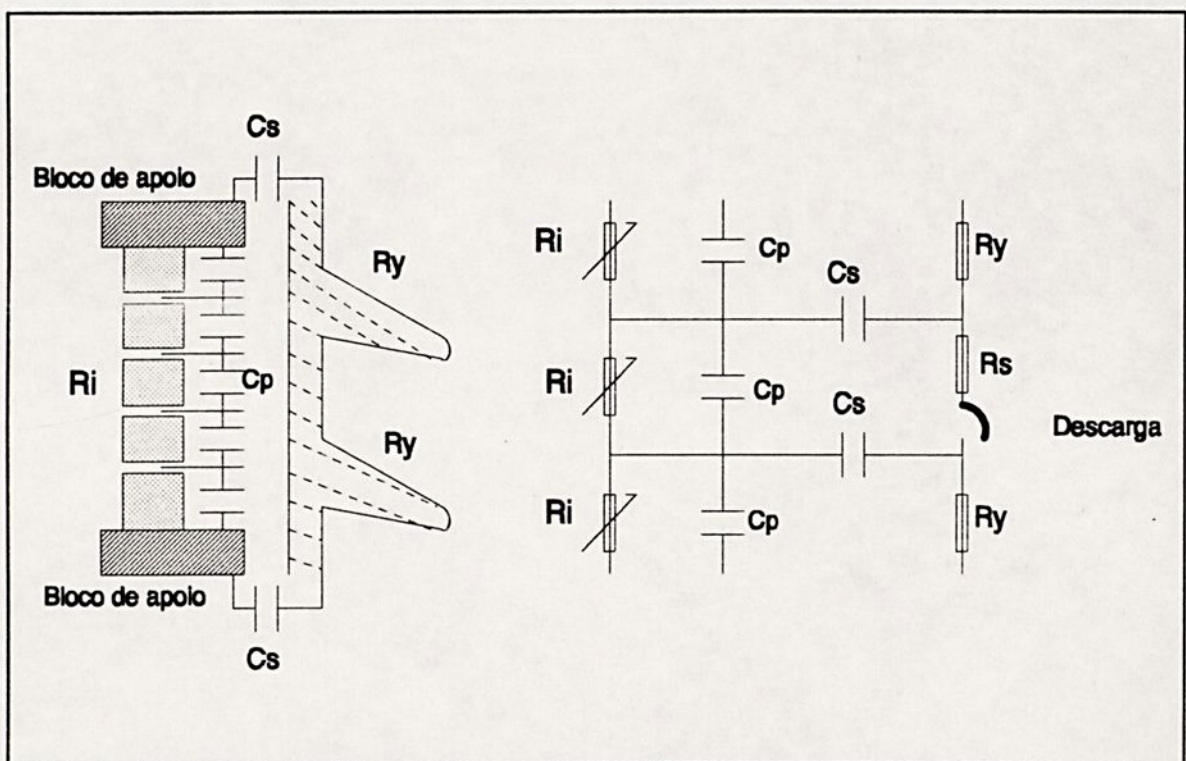


Figura 2.7 - Corte de um pára-raios de descarga de óxido de zinco e seu circuito equivalente.

Asokan e Sudarshan [10], [11] analisam o espectro luminoso associado com o fenômeno de flashover em superfícies planas. Concluem que o início da emissão luminosa antecede o rompimento dielétrico dos materiais analisados. Além disso, os resultados demonstram que esse espectro luminoso está

relacionado com o principal material componente da superfície analisada. Porém, a intensidade luminosa não está diretamente associada aos níveis de corrente e de tensão de flashover. Esses autores conseguiram valores diferentes de intensidade luminosa para um mesmo valor de tensão. Há casos, em que o maior valor da intensidade luminosa é o dobro do menor valor obtido.

Al-Arainy, Malik e Qureshi [12] analisam o fenômeno de flashover em gaps com a presença de partículas de poeira, utilizando tensões impulsivas. São utilizados um eletrodo de alta tensão com pontas arredondadas e um eletrodo de aterramento plano. Para a polaridade positiva, a probabilidade de ocorrência do fenômeno de flashover, para um determinado valor de tensão, não se altera com a presença de partículas de poeira no ar, se a umidade permanecer constante. Isso em relação aos mesmos valores para ensaios sem a presença de poeira no ar. A presença de partículas de poeira no gap diminui valor do tempo do fenômeno analisado. Já para polaridade negativa, a probabilidade de ocorrência do flashover em função da tensão aplicada, com a presença de poeira no gap, pode ser igual, maior ou menor do que no caso sem partículas de poeira. A definição será dada pela distância entre o eletrodo de alta tensão e o eletrodo de aterramento. Assim, a probabilidade de ocorrência do flashover em função da tensão aplicada tem um comportamento variado, dependente da polaridade da tensão e no caso de polaridade negativa, dependente da distância entre o eletrodo de alta tensão e o eletrodo de aterramento. A única característica que pode ser generalizada para ambas as polaridades, segundo os autores, é a diminuição do valor do tempo do fenômeno de flashover no gap analisado quando a concentração de partículas de poeira aumenta.

Sundararaman e Sudarshan [13] estudam a influência do polimento superficial na rigidez dielétrica de materiais cerâmicos de isoladores. Geralmente, esse polimento é feito com o objetivo, entre outros, de evitar o acúmulo de material poluente sobre isoladores cerâmicos. São feitos ensaios em isoladores cilíndricos de óxido de alumínio que sofrem um



processo de polimento desenvolvido pelos autores. Esse processo altera a capacidade de isolamento da superfície de óxido de alumínio, alterando a tensão necessária para a ocorrência do fenômeno de flashover sobre a mesma. O polimento do óxido de alumínio pode diminuir a tensão crítica de flashover do isolador analisado através dos seguintes fenômenos:

- diminui a emissão fotoelétrica do material;
- diminui a dissipação de gases na superfície do material;
- aumenta a condutividade superficial do material;
- aumenta a quantidade de bolhas na superfície do material.

Nos ensaios feitos por esses autores, pulsos de alta tensão são aplicados nos isoladores cilíndricos e os resultados são obtidos através de um espectrômetro, uma câmera fotográfica de alta velocidade e um osciloscópio digital de quatro canais. Em testes sucessivos, realizados durante três dias consecutivos, criaram-se caminhos condutivos na superfície de alguns isoladores, diminuindo, durante esse período, a capacidade de isolamento dos mesmos. Já em outros casos, houve a uma diminuição permanente na capacidade de isolamento total dos isoladores analisados. Esse comprometimento permanente da isolamento pode ser constatado através da espectrometria da radiação luminosa do flashover, que apresentou alterações em determinados comprimentos de onda, relacionadas com a degradação do óxido de alumínio.

Skopec, Wankowicz e Sikorshi [14] utilizam métodos clássicos de integração para determinar a distribuição do campo eletrostático em um isolador coberto por uma fina camada de poluição. Apresentam, ainda, cálculos de potencial elétrico e campo elétrico em modelos de isoladores com camadas de poluição uniformes e não-uniformes. O modelo com camada de poluição não-uniforme é constituído por várias partes, cada uma dessas partes é formada por uma pequena camada uniforme. Ou seja, em cada uma dessas divisões assume-se valores constantes para a espessura da camada da poluição e para a resistividade superficial da mesma. O método desenvolvido aplica-se em

isoladores simétricos axialmente, ou seja, isoladores cilíndricos, cônicos ou discóides. O método pode ser utilizado, também, em isoladores mais complexos que possam ser divididos em partes cilíndricas, cônicas ou discóides, mantendo-se a simetria axial.



CAPÍTULO III

O MODELO FÍSICO COM ESPESSURA VARIÁVEL DO ISOLADOR DE ALTA TENSÃO POLUÍDO

O maior problema nas linhas de transmissão, segundo Pavlik [15], são os isoladores de suspensão. Apesar da evolução tecnológica de materiais para a fabricação desses equipamentos, não houve grandes modificações em seu projeto original. Como os isoladores não acompanharam o rápido crescimento das tensões das linhas de transmissão, a ferragem passou a desempenhar funções do sistema de isolação e proteção, tais como: proteção contra arco de potência, alteração na distribuição de potencial elétrico dos isoladores, eliminação do efeito corona e redução do nível de rádio-interferência. Muito provavelmente, o pouco desenvolvimento dos isoladores foi consequência da padronização dos engates e esforços mecânicos nas linhas de transmissão, como também, pelos custos envolvidos na criação e desenvolvimento de novos modelos de isoladores, mais sofisticados.

Desta forma, priorizou-se os fatores econômicos nos projetos de linhas de transmissão, relegando-se a segundo plano, problemas como o fenômeno de flashover em isoladores poluídos. Segundo Pavlik [15], a característica dielétrica do ar é bastante influenciada pela umidade relativa do ar. Em alguns casos, há condensação de vapores nas saias e na superfície dos isoladores, diminuindo sua capacidade de isolação. A poluição agrava mais esse quadro, pois pode conter sais solúveis em água. Esses sais, em contato com a umidade, formam uma película condutiva na superfície do isolador, diminuindo ainda mais o nível de isolamento. Mesmo em locais distantes de grandes centros industriais, períodos prolongados de estiagem provocam problemas nos isoladores, quando as primeiras chuvas umedecem a superfície dos mesmos. Assim, o fenômeno de flashover pode apresentar-se, por exemplo, em regiões agrícolas sujeitas a constantes queimadas, como grandes extensões de plantações de cana-de-açúcar.

O modelo físico com espessura variável do isolador de



alta tensão poluído foi desenvolvido a partir do modelo experimental de Obenaus [01] e consiste de um canal retangular onde é colocada uma solução eletrolítica formada por água destilada e sal comum (cloreto de sódio). A solução representa a camada de poluição que se deposita na superfície de isoladores de alta tensão, submetidos a ambientes poluídos. A resistividade da solução salina representaria o nível de poluição: quanto menor a resistividade, maior será o nível de poluição simulado. Pissolato [16] e Maldonado [17], [18] trabalham com resistividades superficiais entre 2 [K Ω /cm] e 15 [K Ω /cm], representando altos e baixos níveis de poluição, respectivamente. Completa o modelo um eletrodo de alta tensão responsável pela aplicação das descargas elétricas que podem levar ao fenômeno de flashover e um eletrodo de aterramento. A figura 3.1 mostra um esquema simplificado desse modelo e a figura 3.2 mostra seu circuito elétrico equivalente.

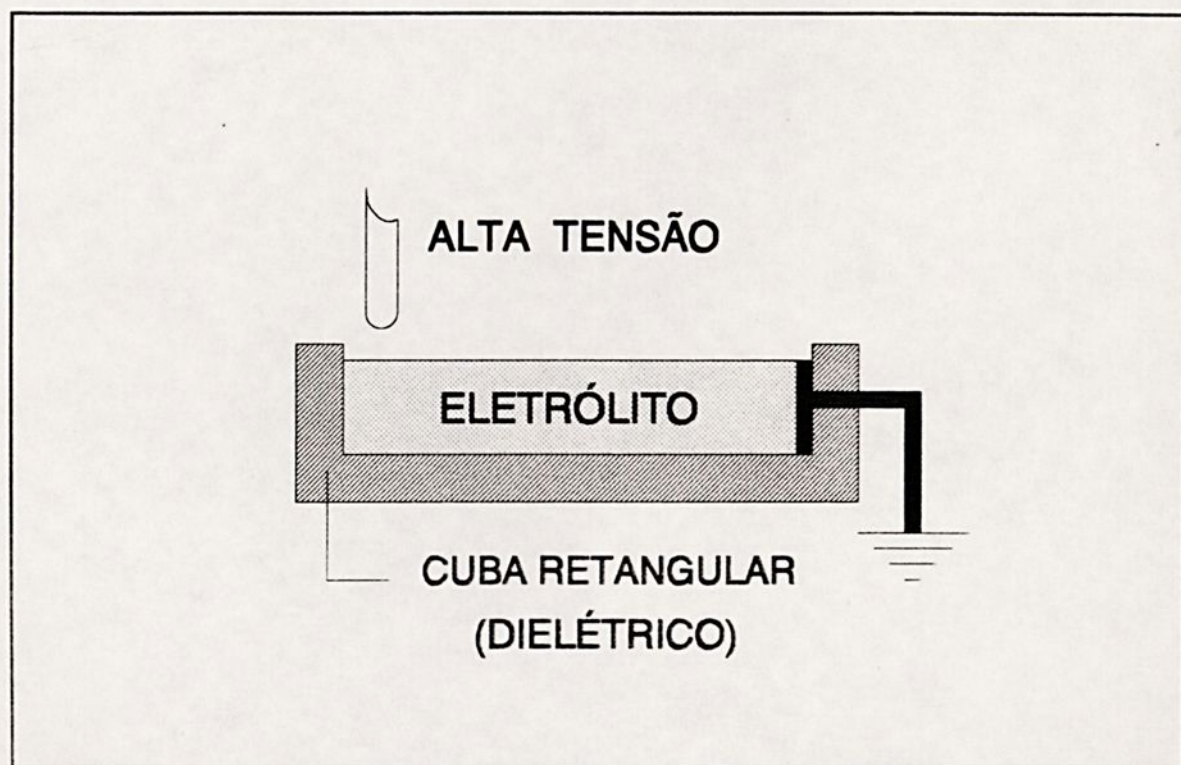


Figura 3.1 - Esquema simplificado do modelo de isolador de alta tensão poluído.

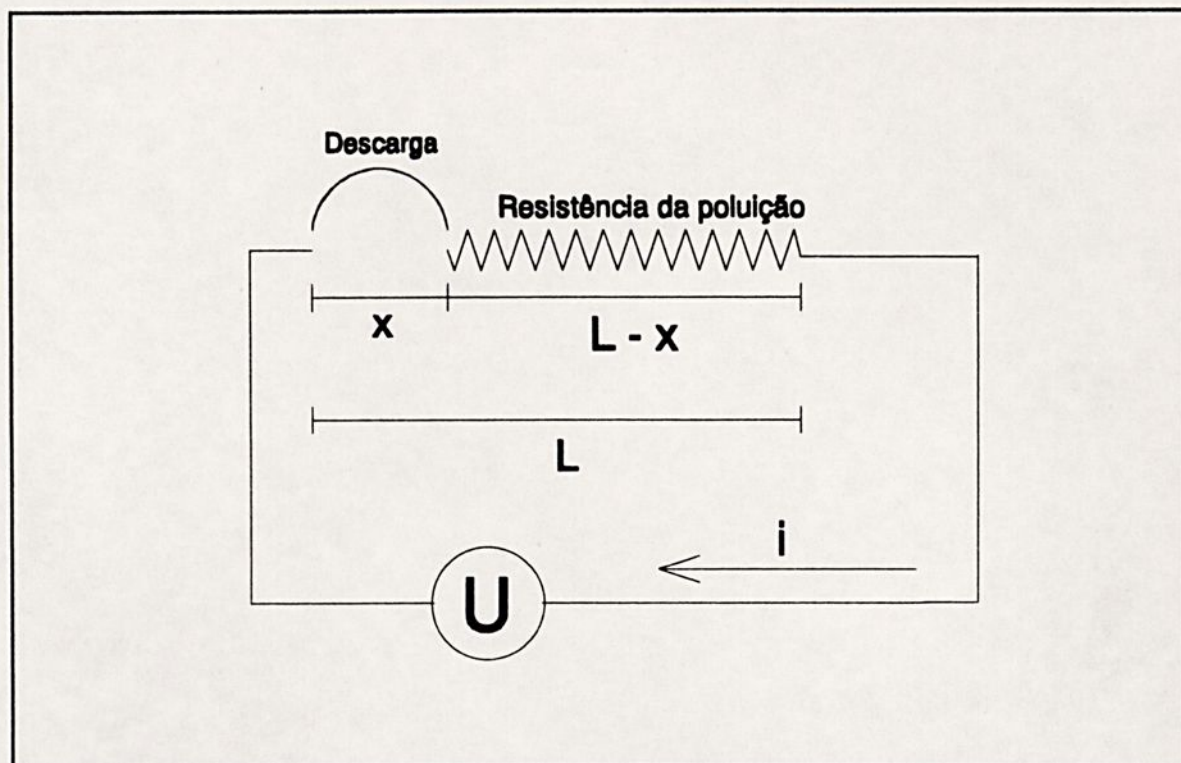


Figura 3.2 - Circuito elétrico equivalente do modelo de Obenaus [01].

A vantagem do modelo proposto é a simulação da variação da espessura da camada de poluição depositada sobre um isolador real. Neste trabalho são sugeridas duas formas de alteração na profundidade do modelo. Uma delas, é discreta e é representada pela introdução de um degrau no caminho a ser percorrido pela descarga elétrica. A figura 3.3 esquematiza essa alteração na profundidade do canal do modelo proposto.

A outra forma de simulação da variação da espessura da camada de poluição é contínua. Essa alteração é representada pela introdução de uma rampa no caminho a ser percorrido pela descarga elétrica. Próximo ao eletrodo de aterramento, então, há uma diminuição constante da profundidade inicial, até se atingir a profundidade final. A figura 3.4 apresenta a introdução da rampa no perfil da profundidade do modelo proposto.

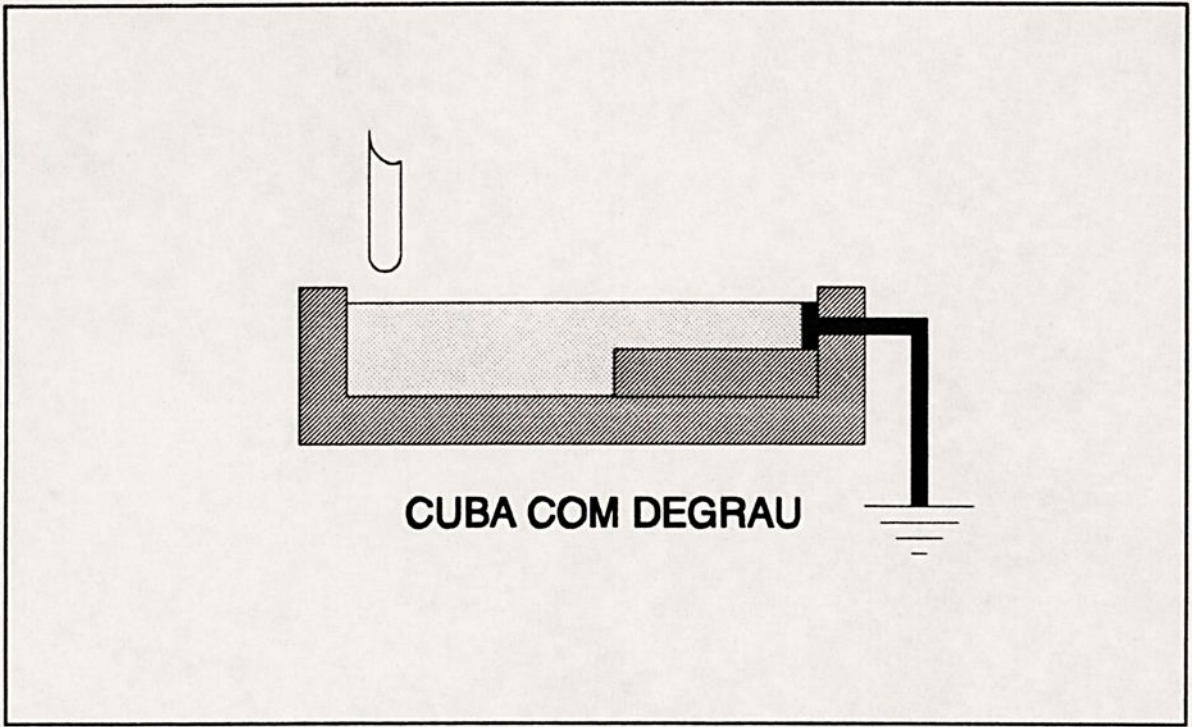


Figura 3.3 - Introdução de um degrau no perfil do modelo de Obenaus [01].

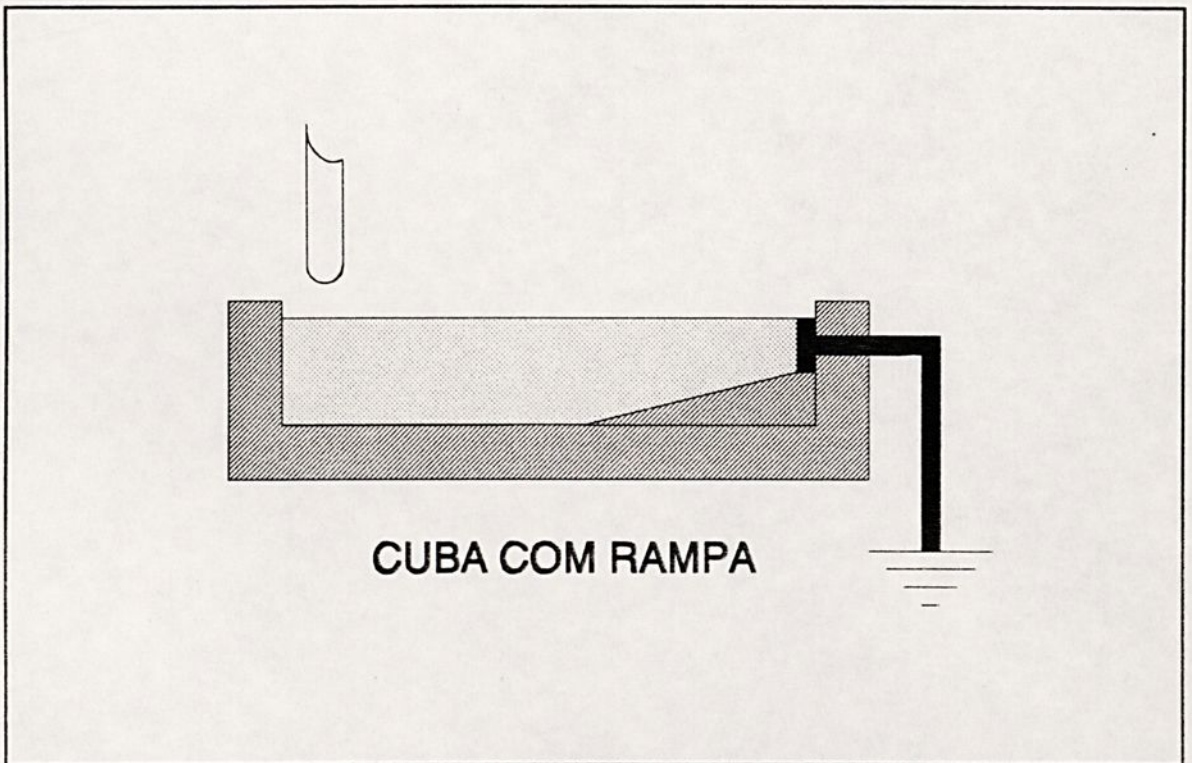


Figura 3.4 - Introdução de uma rampa no perfil do modelo de Obenaus [01].

1 - O modelo matemático

Numa primeira análise do circuito equivalente do modelo experimental, tem-se:

$$U = V_d + V_p \quad (9)$$

onde: U - tensão aplicada entre os eletrodos;
 V_d - queda de tensão na descarga;
 V_p - queda de tensão na camada de poluição.

Analisando novamente o circuito equivalente, obtem-se:

$$V_p = (L-x) \cdot \rho \cdot i \quad (10)$$

onde: ρ - resistividade do eletrólito;
 L - comprimento do canal;
 x - elongação da descarga;
 i - corrente da descarga.

Segundo Maldonado [17], para uma descarga capaz de produzir luminescência ou arco voltaico, a diferença de potencial pode ser descrita por:

$$V_d = x \cdot E_a + V_e \quad (11)$$

onde: E_a - campo elétrico na coluna da descarga;
 V_e - queda de tensão nos eletrodos.

O campo elétrico na coluna da descarga tem o seguinte equacionamento:

$$E_a = A \cdot i^{-n} \quad (12)$$

Nesta última equação, A e n são constantes experimentais que dependem do meio em que a descarga se desenvolve.

Substituindo-se as equações (10), (11) e (12) na equação

(9), tem-se:

$$U = x.A.i^{-n} + (L-x) \cdot \rho.i + V_0 \quad (13)$$

Considerando a queda de tensão V_0 constante, a tensão efetivamente responsável pela descarga será:

$$V = U - V_0 = x.A.i^{-n} + (L-x) \cdot \rho.i \quad (14)$$

Wilkins [19] introduz a influência das características geométricas do canal nas grandezas elétricas do fenômeno, alterando o cálculo da resistência superficial da solução eletrolítica da seguinte forma:

$$R = \rho \left[(L-x) + \frac{a}{2\pi} \cdot \ln \frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2} \right] \quad (15)$$

onde: a - largura do canal;
 r_d - raio da descarga.

A equação da tensão será modificada como descrito abaixo:

$$V = x.A.i^{-n} + \rho \left[(L-x) + \frac{a}{2\pi} \cdot \ln \frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2} \right] \cdot i \quad (16)$$

Isolando-se a variável x na equação anterior, tem-se:

$$x = \frac{V - L \cdot \rho \cdot i - \rho \cdot i \cdot \frac{a}{2\pi} \cdot \ln \frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2}}{A \cdot i^{-n} - \rho \cdot i} \quad (17)$$

Ainda em seu trabalho, Wilkins [19] faz um desenvolvimento da tensão aplicada entre os eletrodos em função da elongação da descarga. Assim, tem-se:

$$U = \frac{-i}{2\pi\sigma h} \cdot \ln \frac{1}{4} \left[\cosh \left(\frac{2\pi}{a} (x-b) \right) - 1 \right] \cdot \left[\cosh \left(\frac{2\pi}{a} (x+b) \right) - 1 \right] \quad (18)$$

Utilizando esta última equação obtém-se o equacionamento do campo elétrico no pé da descarga (E_{pr}).

$$E_{pr} = \frac{i}{2\sigma ah} \left[\frac{\sinh\left(\frac{2\pi r_d}{a}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi r_d}{a}\right) - 1} + 1 \right] \quad (19)$$

onde: h - profundidade do canal retangular;

b - distância entre a origem da descarga e o aterramento;

σ - condutividade volumétrica da solução eletrolítica;

a - largura do canal;

r_d - raio da descarga.

Segundo Wilkins [19], baseando-se no nível de correntes encontradas para o fenômeno do flashover, a densidade de corrente é constante ($1,45 \text{ A/cm}^2$). Ou seja:

$$\frac{i}{\pi r_d^2} = 1,45 \quad (20)$$

Ou ainda:

$$r_d = \sqrt{\frac{1,45\pi}{i}} \quad (21)$$

A condutividade volumétrica da solução eletrolítica é dada por:

$$\sigma = \frac{1}{\rho \cdot a \cdot h} \quad (22)$$

Peyregne [20] postula que a velocidade de propagação da descarga elétrica na solução é proporcional ao campo elétrico no pé da descarga. Pissolato [16] completa esse estudo, mostrando que a velocidade depende da diferença entre o campo elétrico no pé da descarga (E_{pr}) e o campo elétrico na coluna

da descarga (E_a). Tem-se, então:

$$v = \mu \cdot (E_{pr} - E_a) \quad (23)$$

onde: v - velocidade da descarga;

μ - mobilidade iônica no pé da descarga sob pressão atmosférica constante.

A variação da temperatura em função do tempo será dada pela seguinte expressão:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{E^2}{\rho \cdot c} \quad (24)$$

onde: E - campo elétrico médio na solução;

c - calor específico da solução.

Como consequência, segundo Maldonado [17], a condutividade elétrica tem o seguinte equacionamento em função da temperatura:

$$\sigma(T) = \sigma_o \cdot e^{\frac{-W_o}{K \cdot T}} \quad (25)$$

onde: σ_o - condutividade inicial da solução;

K - constante de Boltzmann;

W_o - energia de ativação;

T - temperatura absoluta da solução eletrolítica.

2 - Valores críticos para a ocorrência do flashover

São chamados de valores críticos do fenômeno de flashover, os valores mínimos de tensão, corrente e elongação da descarga que permitem a ocorrência do flashover. A partir da equação (16), é obtida a característica da tensão em função da

corrente para valores de elongação constantes, como demonstram Pissolato [16] e Maldonado [17]. Estas características são mostradas na figura 3.5, obtida através de análise computacional. Os pontos mínimos de tensão são dados pela equação (26) e a corrente elétrica correspondente a estes valores de tensão é dada pela equação (27).

Os pontos V_m e i_m são os valores mínimos necessários para que a descarga atinja um determinado comprimento (valor constante de x). Unindo estes pontos, obtém-se uma curva que tem o seu máximo valor no ponto c , comum a todas as características.

$$V_m = (n+1) \cdot (A \cdot x)^{\frac{1}{n+1}} \cdot \left[\frac{\rho \cdot \left[(L-x) + \frac{a}{2\pi} \cdot \ln \frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2} \right]}{n} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (26)$$

$$i_m = \left[\frac{n \cdot x \cdot A}{\rho \left[(L-x) + \frac{a}{2\pi} \cdot \ln \frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2} \right]} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (27)$$

Transportando os valores de V_m em função das características x , obtém-se a figura 3.6. Analisando-a, observa-se que a ocorrência do flashover só é possível se forem atingidos os valores de V_{cf} e x_{cf} . Se a tensão estiver abaixo desse valor (V_1), a descarga atinge um comprimento menor que x_{cf} (x_1) e não se observa o fenômeno do flashover.

Os valores V_{cf} e x_{cf} são os valores críticos para a ocorrência do flashover e partindo das equações (26) e (27),

Pissolato [16] e Maldonado [17] demonstram que:

$$x_{cf} = \frac{L}{(1+n)} \quad (28)$$

$$i_{cf} = \left(\frac{A}{\rho}\right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (29)$$

$$V_{cf} = L \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot \rho^{\frac{n}{n+1}} \quad (30)$$

Wilkins [19] altera a equação (30), através da introdução das grandezas geométricas do modelo:

$$V_{cf} = \left(L + \frac{a}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2} \right] \right) \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot \rho^{\frac{n}{n+1}} \quad (31)$$

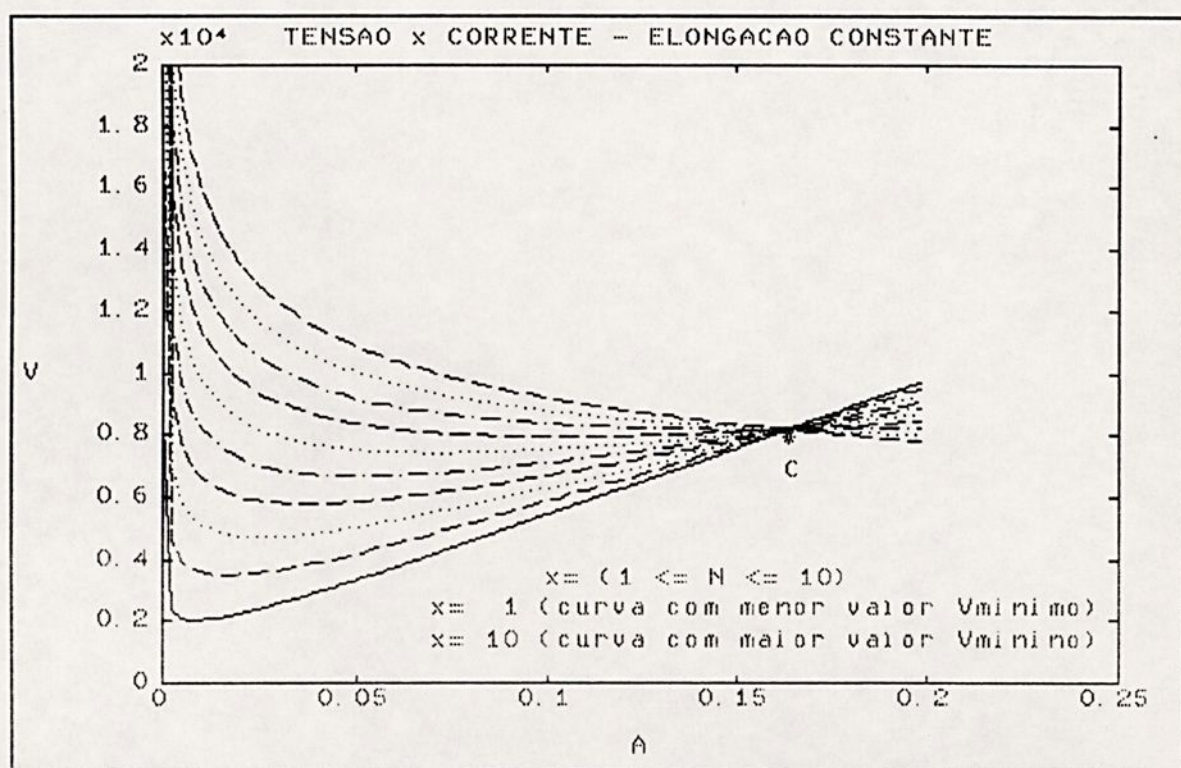


Figura 3.5 - Tensão em função da corrente para valores constantes de x.

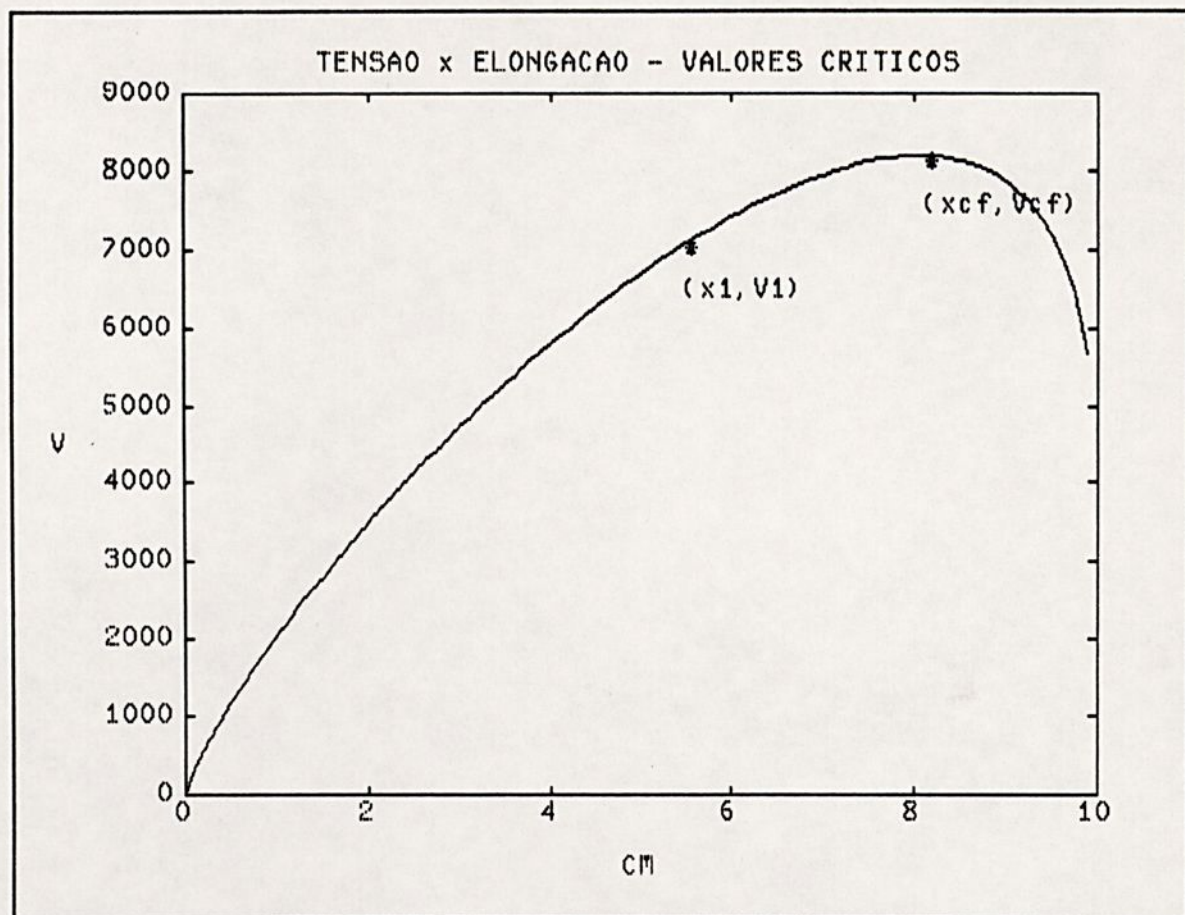


Figura 3.6 - Tensão crítica em função da elongação da descarga.

3 - Critério para a ocorrência do flashover

Este critério baseia-se em estudos experimentais de Hampton [04]. Ele analisa uma descarga que se propaga numa solução eletrolítica com escoamento vertical e observa, então, a necessidade de que o gradiente de tensão da solução seja maior que o gradiente na coluna da descarga. Wilkins [19] traduz esta idéia na seguinte relação:

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (32)$$

onde: P - potência média dissipada durante o desenvolvimento do fenômeno de flashover.

Considerando a variação da tensão desprezível durante o desenvolvimento da descarga, a equação (32) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{di}{dx} > 0 \quad (33)$$

É possível considerar a tensão como sendo um valor constante, pois uma grande variação da mesma ocorre somente após a ocorrência do flashover. Ou seja, no início do processo e do desenvolvimento da descarga a tensão é praticamente constante. Isso pode ser demonstrado pela foto da tela do osciloscópio obtida durante a realização dos ensaios experimentais e mostrada na figura 3.7.

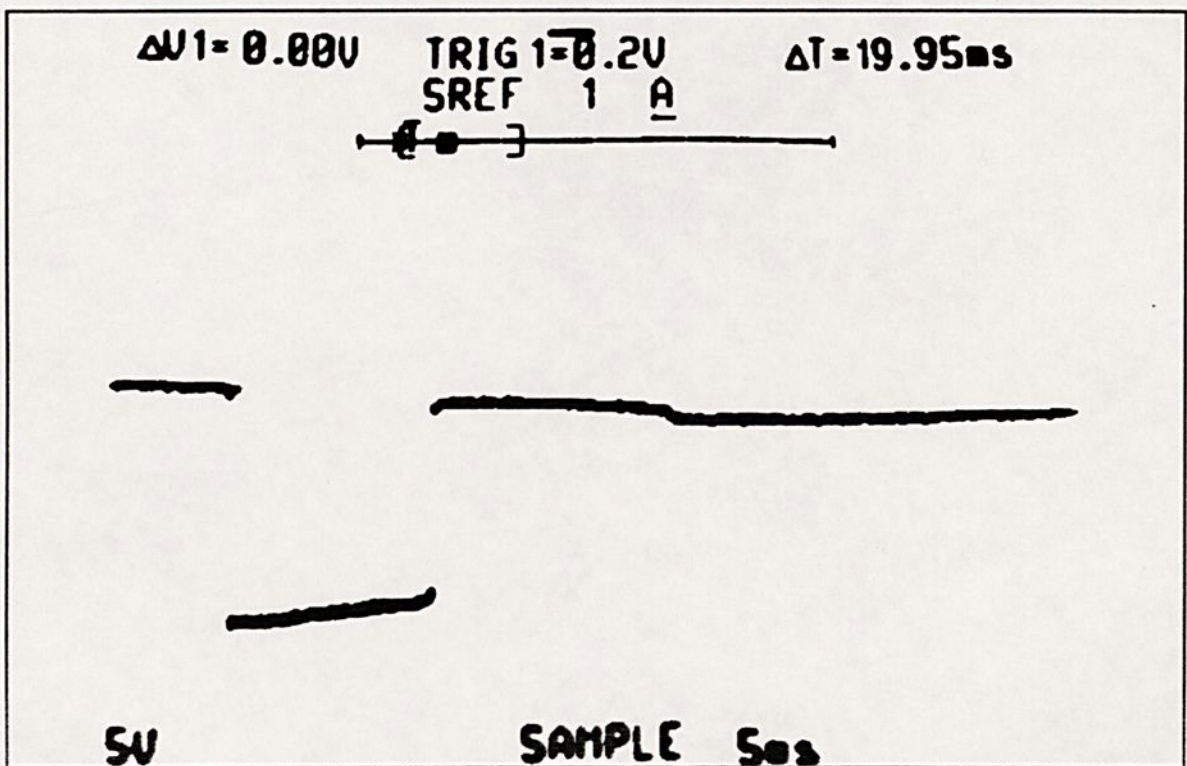


Figura 3.7 - Sinal de tensão (polaridade negativa) obtido pelo osciloscópio de memória.

4 - Mecanismos físicos para a propagação da descarga

Há dois mecanismos físicos principais propostos para explicar o desenvolvimento da descarga elétrica na camada de poluição, formada na superfície de isoladores. O primeiro baseia-se na pré-ionização do meio onde se desenvolve a descarga, e o segundo baseia-se na existência de uma força elétrica capaz de desencadear o processo da descarga. Pissolato [16] e Maldonado [17] descrevem de forma mais detalhada esses mecanismos físicos que serão comentados rapidamente, a seguir.

A) Distribuição de correntes no pé da descarga

Este mecanismo é semelhante ao efeito de uma descarga líder em uma descarga atmosférica. Assim, descargas ou arcos ocorrendo à frente da raiz, formam um canal ionizado, ou seja, formam o caminho ideal para a extensão da descarga. O processo descrito irá se repetir até o curto-circuito total do eletrodo de alta tensão com o eletrodo de terra. No caso da não ocorrência do flashover, o processo se repete até que o campo elétrico na origem (ou raiz) da descarga não seja suficiente para provocar novos arcos à frente da descarga.

Wilkins e Al-Baghdadi [21], baseados em resultados experimentais, postulam a existência de uma corrente elétrica no interior da solução eletrolítica, paralela à corrente da descarga. A hipótese sugerida é que o mecanismo responsável pela propagação da descarga é a ionização sucessiva à frente do pé da descarga. O alto gradiente de tensão e a elevada temperatura são os fatores responsáveis pela ionização citada.

B) Força elétrica desencadeadora

A sugestão do mecanismo da força é feita através de duas propostas. A primeira proposta sugere a existência de uma força

capaz de desencadear e manter a propagação da descarga. A segunda proposta combina a existência dessa força com a pré-ionização causada pelo intenso campo elétrico existente no pé da descarga (Swift [22]).

A primeira proposta é estudada por Rahal [23]. Teoricamente, a força elétrica desencadeadora é uma força eletrostática que tem origem na assimetria do campo elétrico no pé da descarga. A assimetria do campo elétrico no pé da descarga provoca uma curvatura no arco voltaico entre o eletrodo de alta tensão e a solução eletrolítica. A influência de forças magnéticas na curvatura do arco voltaico é desprezível, pois as correntes envolvidas no desenvolvimento do flashover são pequenas. A figura 3.8 apresenta um esquema simplificado da curvatura do arco e a figura 3.9 apresenta uma foto da tela do osciloscópio, comprovando que a corrente só atinge altos valores no momento da ocorrência do flashover.

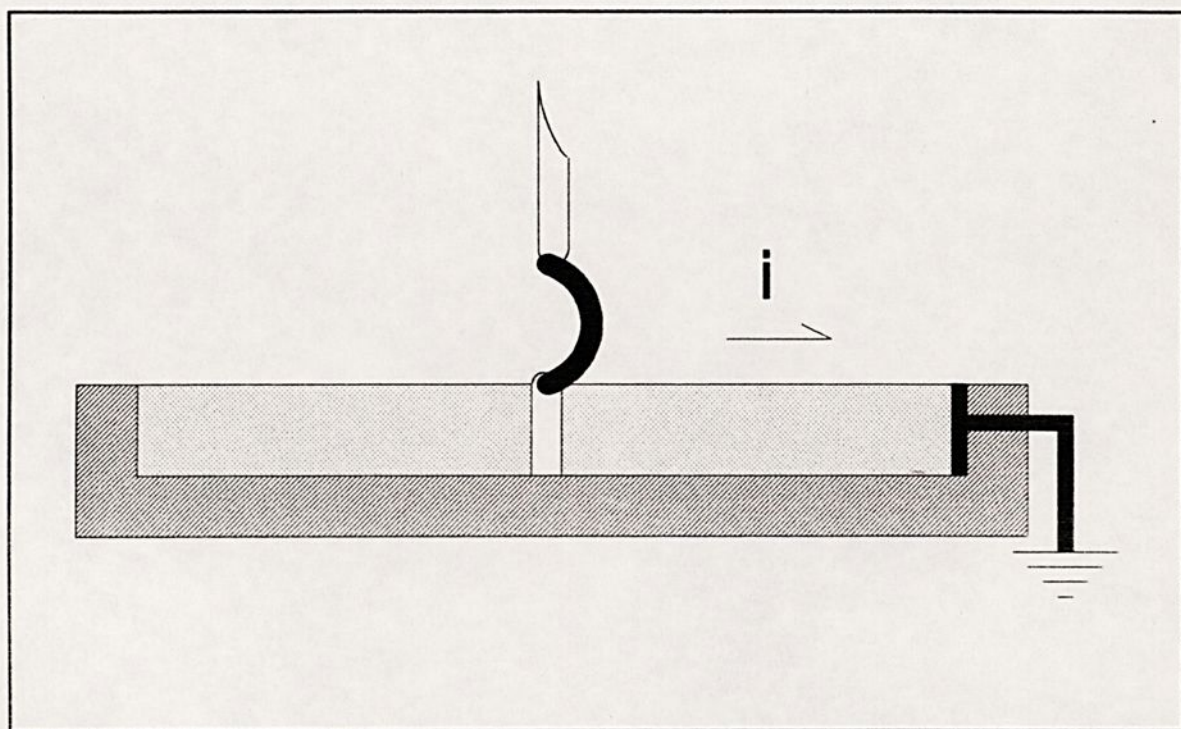


Figura 3.8 - Curvatura do arco voltaico estudada por Rahal [23].

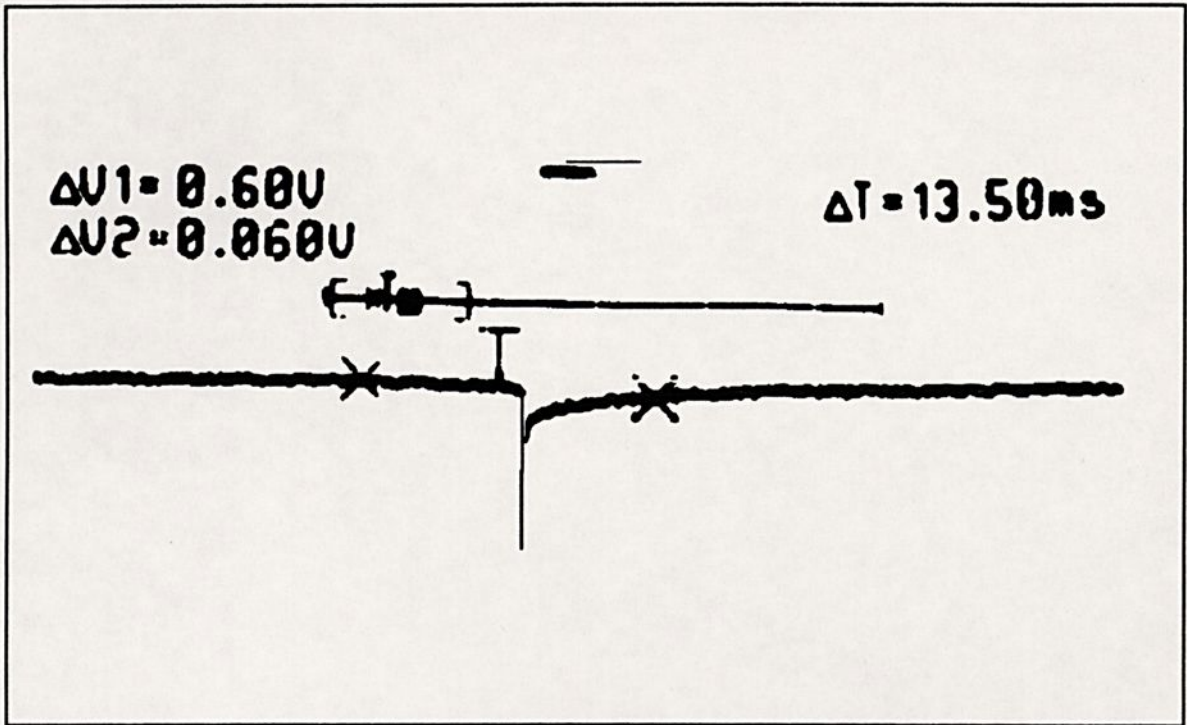


Figura 3.9 - Sinal de corrente durante o desenvolvimento do fenômeno de flashover.

5 - O equacionamento das alterações na profundidade

Flazi [24] propõe a montagem esquematizada na figura 3.10, cujo circuito equivalente, sugerido por este autor, está colocado na figura 3.11. Tal montagem simula um isolador em que a camada de poluição recobriu toda a superfície do isolador, não havendo um gap bem definido entre o eletrodo de alta tensão e o início da camada de poluição. A descarga elétrica, então, escoar de duas maneiras: uma parte escoar através de um pequeno gap, e a outra, escoar por um ténue contato entre o eletrodo de alta tensão e a camada de poluição. Sugere-se, para esse modelo físico, um circuito equivalente com duas resistências em paralelo. Os resultados obtidos pelo autor levam-no a conclusão de que esse modelo tem aplicação restrita, sendo o principal exemplo de aplicação, a simulação de isoladores cilíndricos submetidos a altos níveis de poluição.

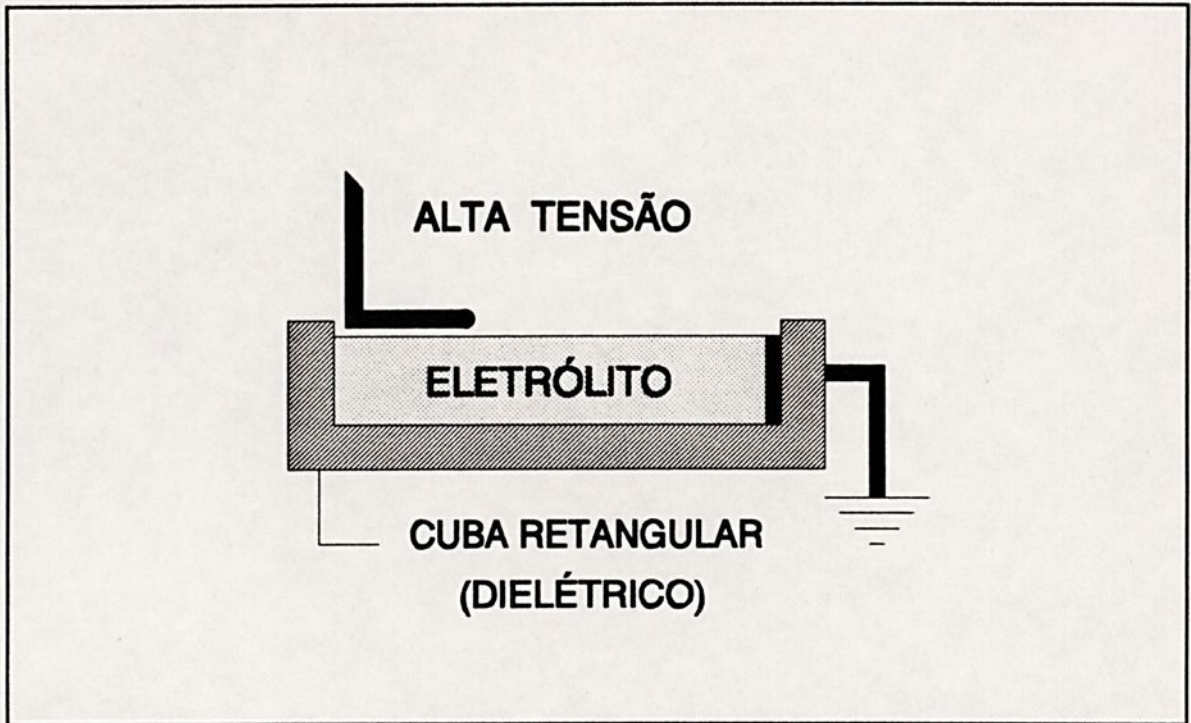


Figura 3.10 - Modelo físico com um pequeno contato entre o eletrólito e o eletrodo de alta tensão.

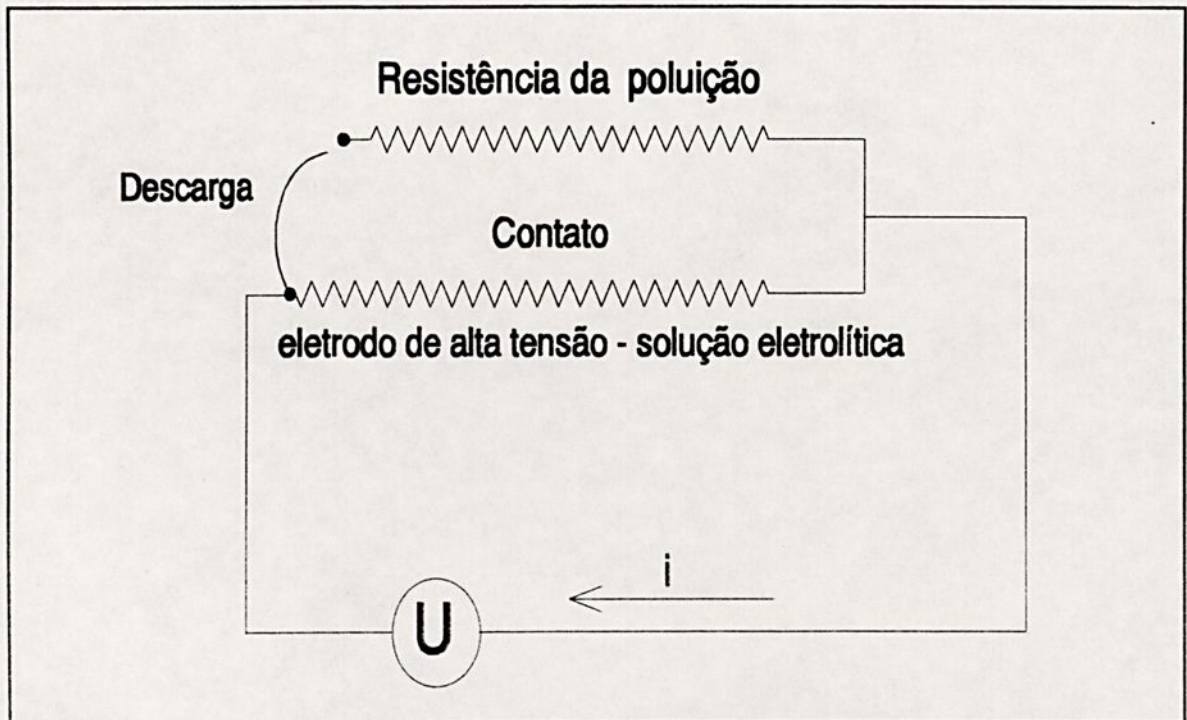


Figura 3.11 - Circuito equivalente para o modelo físico com contato entre o eletrólito e o eletrodo de alta tensão.

Flazi [25] propõe outro modelo físico, cujo esquema simplificado está colocado na figura 3.12. O circuito equivalente para tal modelo físico é composto, também, por duas resistências em paralelo, como mostra a figura 3.13.

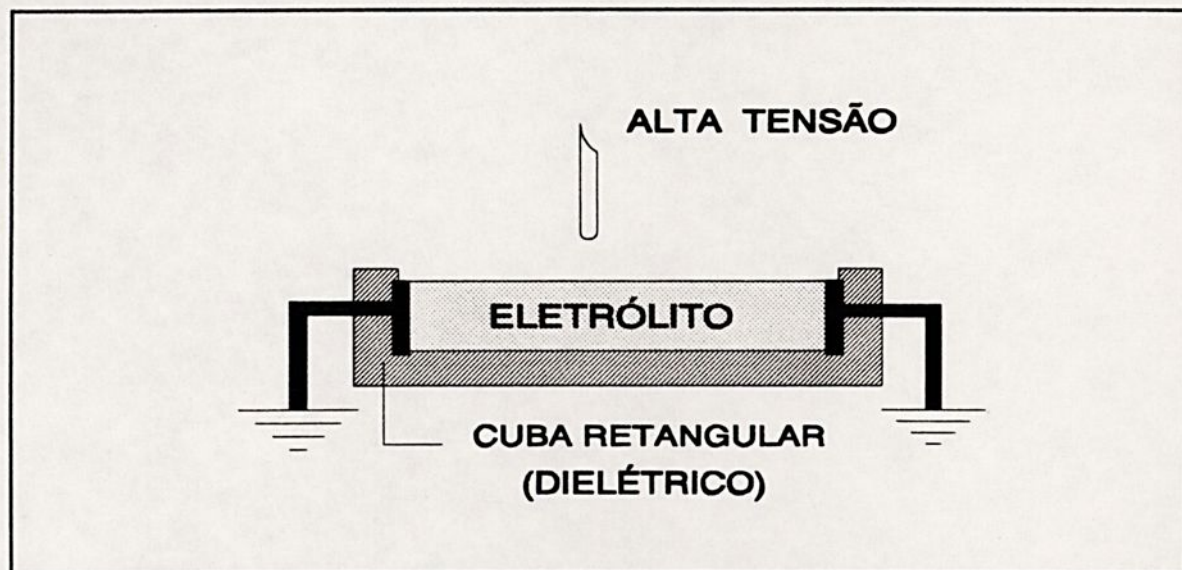


Figura 3.12 - Modelo físico com a introdução de dois eletrodos de aterramento.

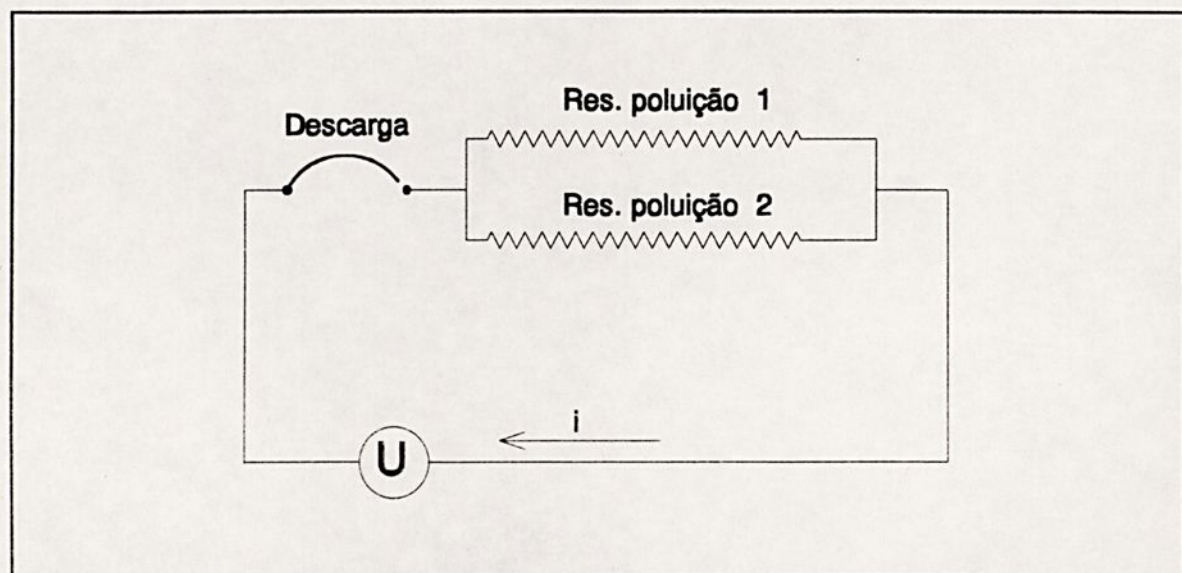


Figura 3.13 - Circuito equivalente para o modelo físico com dois eletrodos de aterramento.

Além da introdução de dois eletrodos de aterramento, são introduzidas alterações na profundidade e na largura do canal utilizado. Assim, imaginando-se uma divisão na metade do canal, desse ponto até um dos eletrodos, o canal tem uma largura diferente da outra metade do canal. Isso pode ser visto na figura 3.14. Nesta figura o modelo é mostrado em vista superior, facilitando a observação das larguras diferentes utilizadas por Flazi [25].

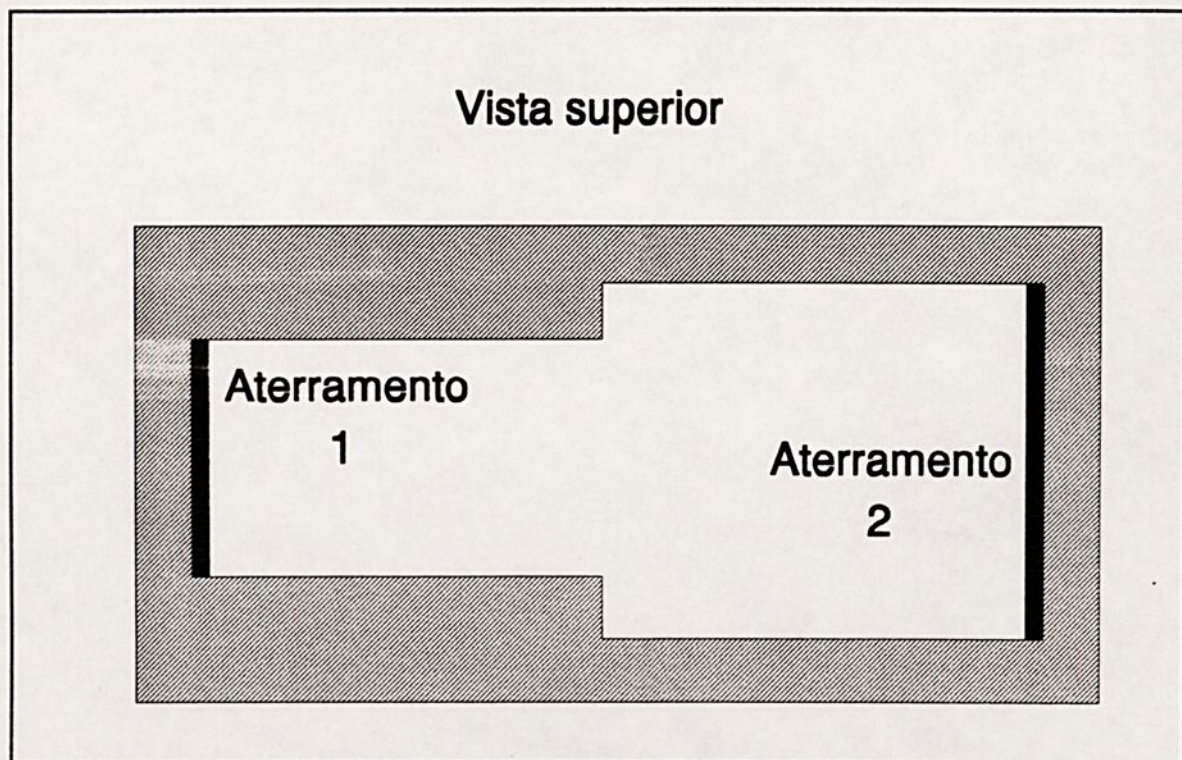


Figura 3.14 - Modelo físico com larguras diferentes e dois eletrodos de aterramento.

Num outro experimento, Flazi [25] utiliza um modelo com profundidades diferentes. São utilizadas duas regiões com valores de profundidade diferentes. Cada uma delas, é submetida a uma mesma tensão, já que em ambas as extremidades do modelo, existem eletrodos de aterramento. Tudo isso é esquematizado na figura 3.15 que mostra o modelo de perfil.

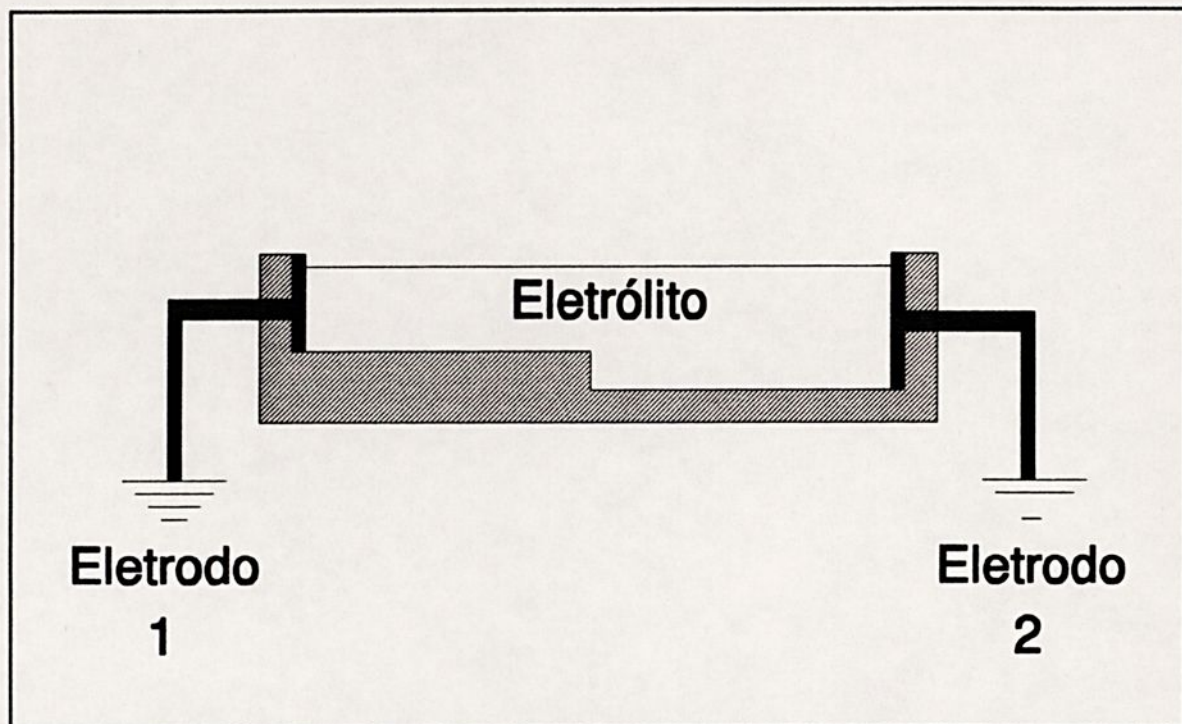


Figura 3.15 - Modelo físico com alteração na profundidade e dois eletrodos de aterramento.

Tanto no modelo da figura 3.14 como no modelo da figura 3.15, foram realizados ensaios com o eletrodo de alta tensão em várias posições e os resultados experimentais, bem como o equacionamento matemático, mostram que o autor desenvolveu uma proposta própria para os critérios de ocorrência do flashover. Desta forma, torna-se um estudo restrito, dificultando a comparação com os critérios para o fenômeno de flashover que são utilizados na maioria das pesquisas analisadas.

No desenvolvimento do modelo físico com profundidade variável, buscou-se não restringir a sua aplicação a casos específicos, como no caso dos estudos desenvolvidos por Flazi [24], [25]. Assim, manteve-se o gap bem definido entre o eletrodo de alta tensão e a solução eletrolítica, sendo que o circuito elétrico equivalente, com resistências elétricas em paralelo, não é aplicável neste caso. Isso é explicado pelo fato de que as duas regiões com profundidades diferentes não são submetidas a mesma diferença de potencial. Como a corrente, que percorre essas duas regiões, é a mesma, o circuito elétrico

equivalente desenvolvido tem duas resistências elétricas em série. Uma delas, simula a parte do canal em que a profundidade inicial permanece constante. A outra, simula a introdução das alterações na profundidade inicial. A figura 3.16 esquematiza o circuito elétrico equivalente do modelo físico com profundidade variável.

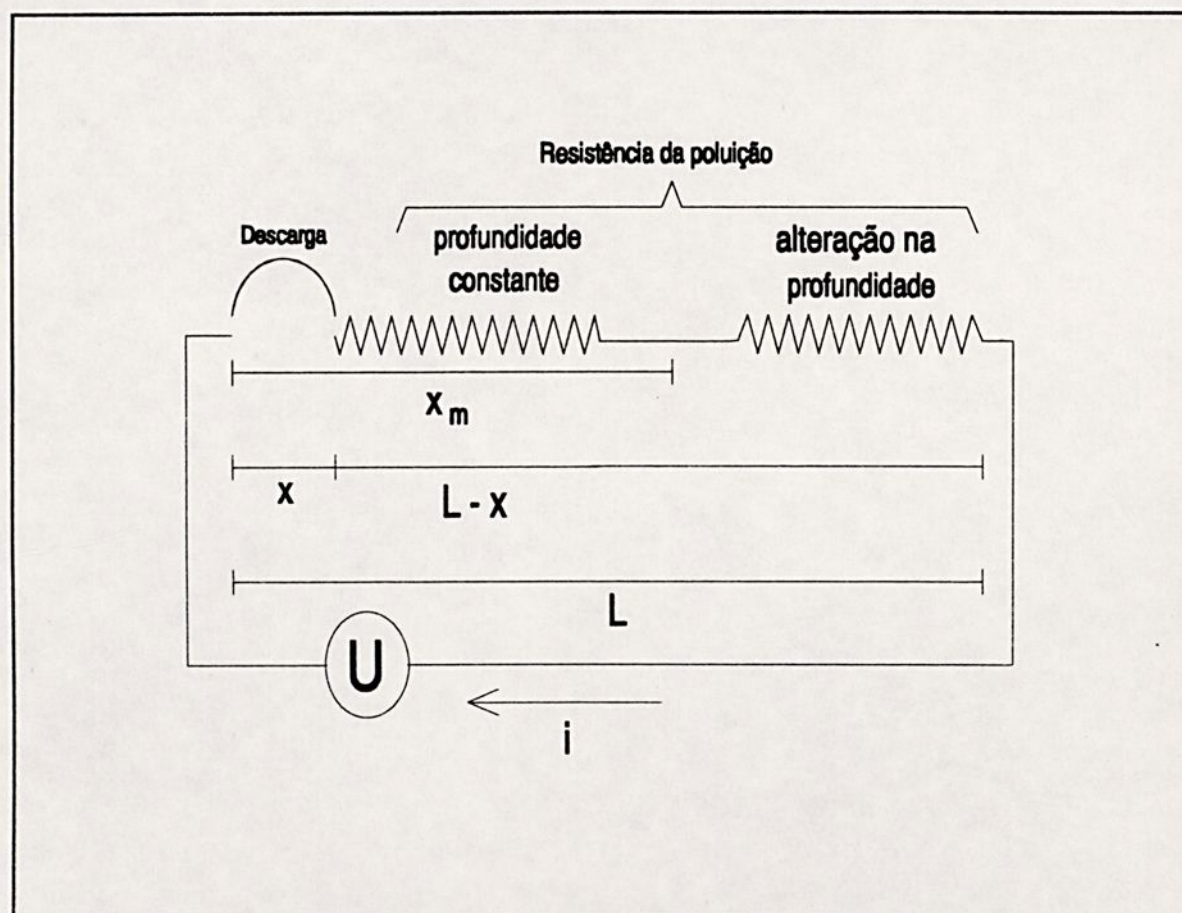


Figura 3.16 - Circuito equivalente com a introdução de alterações no perfil da profundidade inicial.

Todas as dimensões geométricas do canal do modelo físico, com exceção da profundidade, permanecem constantes nas duas regiões em que foi dividido o mesmo. A resistividade superficial do eletrólito tem valor constante em toda a

extensão do canal. Assim, os fatores que alteram o valor da resistência da solução eletrolítica, neste caso particular, são as alterações na profundidade do canal. Wilkins [19] desenvolve um equacionamento matemático do fenômeno de flashover com a influência das grandezas geométricas do modelo físico. Desta forma, equacionando-se as alterações na profundidade do modelo físico, introduz-se as alterações desejadas no equacionamento matemático do fenômeno de flashover.

A variação da profundidade do canal do modelo físico, realizada de forma brusca, através da introdução de um degrau no final do canal a ser percorrido pela descarga, é mostrada na equação (34).

$$\begin{aligned} h &= P_{fi} , \text{ se } x \leq x_m \\ h &= P_{ff} , \text{ se } x > x_m \end{aligned} \quad (34)$$

onde: P_{fi} - profundidade inicial do canal;

P_{ff} - profundidade final do canal;

x_m - ponto onde ocorre a alteração na profundidade.

Partindo-se da profundidade inicial do modelo físico (P_{fi}) a introdução do degrau, após o ponto de alteração (x_m), gera um novo valor para a profundidade do canal (P_{ff}), menor que o inicial.

A variação contínua na profundidade do modelo físico é feita através da introdução de uma rampa, o que é mostrado na equação 35.

$$\begin{aligned} h &= P_{fi} , \text{ se } x \leq x_m \\ h &= \frac{P_{ff} - P_{fi}}{L - x_m} \cdot (x - x_m) + P_{fi} , \text{ se } x > x_m \end{aligned} \quad (35)$$

Antes do ponto de início de sua alteração (x_m), a profundidade permanece com seu valor inicial (P_{fi}). Após o ponto de alteração, o valor da profundidade sofre uma variação

contínua que depende da inclinação da rampa. Esta inclinação tem o seguinte equacionamento:

$$\alpha = \frac{P_{ff} - P_{fl}}{L - x_m} \quad (36)$$

onde: α - inclinação da rampa introduzida no modelo físico de isolador de alta tensão poluído.

A equação (35), então, pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} h &= P_{fl}, \text{ se } x \leq x_m \\ h &= \alpha \cdot (x - x_m) + P_{fl}, \text{ se } x > x_m \end{aligned} \quad (37)$$



CAPÍTULO IV

O PROGRAMA COMPUTACIONAL

O equacionamento matemático do capítulo anterior é a base para o desenvolvimento do programa computacional. Esse programa é utilizado para simular, matematicamente, a dinâmica de uma descarga elétrica sobre a superfície de um isolador de alta tensão poluído.

A maioria dos autores que trabalham com o fenômeno de flashover utilizam um modelo físico sem alteração na profundidade. Assim, apresenta-se uma versão do programa, que trabalha sem a introdução das equações (34), (35), (36) e (37), que parametrizam as alterações na profundidade do modelo físico. Isso é feito para se conseguir uma comparação entre o modelo original (sem alteração na profundidade) e o modelo com modificação no perfil de profundidade do canal que contém a solução eletrolítica. Um avanço significativo na simulação computacional foi introduzir a influência da polaridade da tensão de flashover na simulação computacional.

O programa computacional foi desenvolvido em linguagem PASCAL. Utilizou-se essa linguagem de programação, pois já havia um contato, através de pesquisas, de mais de um ano com a mesma. Desta forma, conhecia-se satisfatoriamente as rotinas de programação em PASCAL. Além disso, as principais referências de simulação computacional (Maldonado [17], [18]) apresentavam-se em PASCAL.

1 - O funcionamento do programa computacional sem modificação no perfil da profundidade

O fluxograma da versão do programa computacional que simula, matematicamente, o fenômeno de flashover através do modelo sem modificação no perfil da profundidade está colocado na figura 4.1.

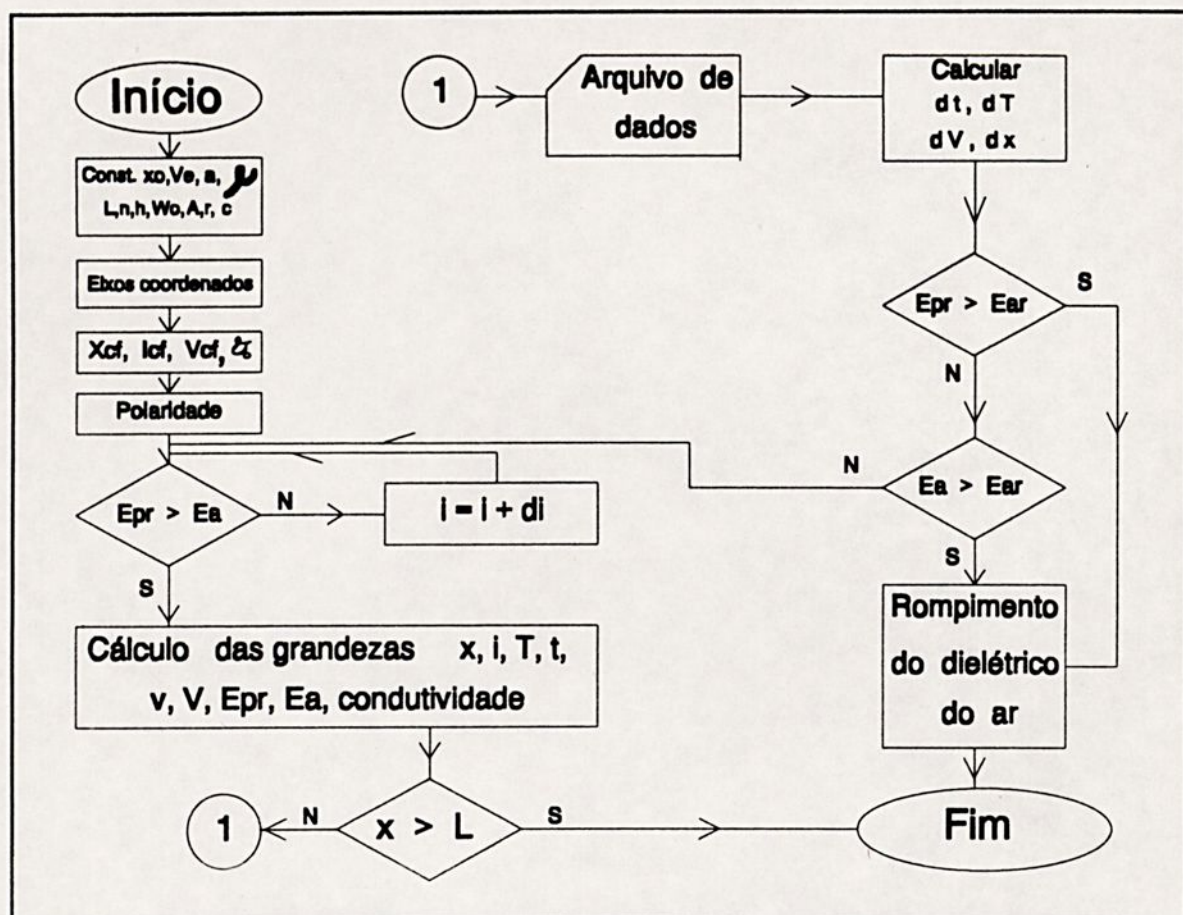


Figura 4.1 - Fluxograma da versão do programa computacional sem modificação no perfil da profundidade do modelo físico

No início do programa são mostradas as constantes do fenômeno de flashover, ou seja: o ponto de início da descarga (x_0); a queda de tensão nos eletrodos (V_e); a largura do canal (a); o comprimento do canal (L); a profundidade inicial do canal (h); a energia de ativação do fenômeno (W_0); as constantes que dependem do meio onde se desenvolve a descarga elétrica (A, n); a resistividade da solução eletrolítica (ρ); o calor específico dessa mesma solução eletrolítica (c); e a mobilidade das cargas elétricas durante o desenvolvimento do fenômeno de flashover (μ). Mostra-se as constantes do fenômeno, pois há a possibilidade de alteração desses valores, segundo a necessidade da simulação desejada.

Após a definição das constantes, escolhe-se quais as variáveis formarão o gráfico a ser analisado. Ou seja, é

definida qual variável do fenômeno de flashover formará o eixo das coordenadas e qual variável formará o eixo das abscissas do gráfico a ser construído. Em seguida são calculados os valores críticos do flashover (x_{cf} , i_{cf} , V_{cf}) e a condutividade inicial da solução eletrolítica (σ_0). São utilizadas, neste ponto, as equações (28), (29), (30) e (22). Há a necessidade de definição, também, da polaridade da descarga elétrica a ser simulada: positiva ou negativa.

Após todas essas definições, calcula-se os valores dos campos elétricos no pé da descarga (E_{pr}) e na coluna da descarga (E_a), através das equações (19) e (12), respectivamente. Compara-se, então, os dois valores calculados e se o valor de E_{pr} for menor que E_a , a corrente sofre pequenos incrementos até que o valor de E_{pr} torne-se maior do que E_a . Essa condição é necessária para a ocorrência do flashover, pois sem ela, o fenômeno não se desenvolve. São calculadas, então, todas as variáveis do equacionamento matemático do capítulo III: comprimento da descarga (x), corrente elétrica (i), temperatura do eletrólito (T), tempo do fenômeno de flashover (t), velocidade desse mesmo fenômeno (v), tensão durante o desenvolvimento da descarga (V), a condutividade do eletrólito (σ), os campos elétricos no pé da descarga e na coluna da descarga (E_{pr} e E_a). No próximo passo do fluxograma, se o comprimento da descarga atingir o comprimento total do canal, o programa encerra-se. Caso contrário, são gravados em um arquivo de dados os valores das variáveis escolhidas para a formar o gráfico a ser analisado. Depois disso, são calculados os incrementos de tempo, temperatura e comprimento, bem como o decréscimo da tensão da descarga. Caso, o campo elétrico no ar seja maior que os campos elétricos no pé da descarga ou na coluna da descarga, o programa encerra-se, avisando através de mensagem específica que houve rompimento dielétrico do ar.

Se não houver rompimento do dielétrico do ar, repete-se o teste de continuidade da descarga ($E_{pr} > E_a$) e calcula-se os novos valores das variáveis do fenômeno de flashover até que o comprimento da descarga atinja o comprimento total do canal do modelo físico utilizado.



2 - O funcionamento do programa computacional com alteração no perfil da profundidade

O fluxograma da versão do programa computacional, capaz de simular o modelo físico do fenômeno de flashover com alterações no perfil da profundidade, é mostrado na figura 4.2.

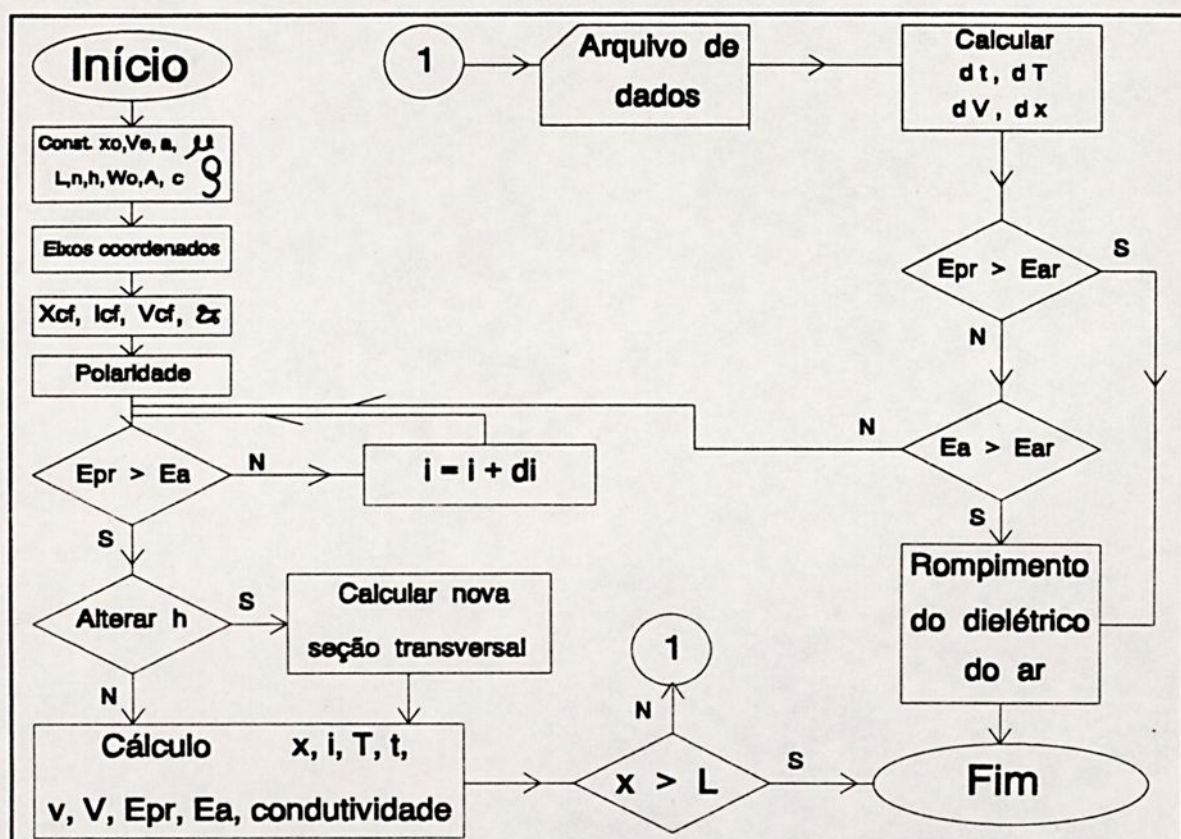


Figura 4.2 - Fluxograma da versão do programa computacional com alteração no perfil da profundidade do modelo físico.

Semelhante à versão anterior, no início do programa são definidos os valores das constantes do fenômeno de flashover. São definidas, também, as variáveis que formarão o eixo das coordenadas e o eixo das abcissas do gráfico a ser construído. São calculados os valores críticos para ocorrência do flashover e é escolhida a polaridade deste fenômeno. Verifica-se a condição necessária para o desenvolvimento da descarga ($E_{pr} > E_a$) e se ela não for atendida, aumenta-se aos poucos a corrente

até que o campo elétrico no pé da descarga seja maior que o campo elétrico na coluna da descarga.

Constata-se, então, se o comprimento da descarga já atingiu o ponto de alteração da profundidade inicial. Caso a descarga já tenha atingido esse ponto, calcula-se o novo valor da seção transversal do caminho que está sendo percorrido pela descarga. A alteração na profundidade do modelo físico é feita pela equação (34), se for discreta e realizada através da introdução do degrau. Se a alteração for contínua e realizada através da introdução da rampa, serão utilizadas as equações (36) e (37). Os próximos passos do fluxograma são semelhantes aos do fluxograma que analisa o fenômeno de flashover sem alteração no perfil da profundidade do modelo físico (figura 4.1). São calculadas as variáveis do fenômeno e gravadas em um arquivo de dados, aquelas escolhidas para serem analisadas no gráfico desejado. Isso ocorre até que a descarga atinja o eletrodo de aterramento ou haja rompimento dielétrico do ar.

3 - Resultados obtidos

Os gráficos apresentados neste item, foram obtidos através do programa computacional desenvolvido para simular, matematicamente, o fenômeno de flashover. A resistividade superficial utilizada para a obtenção desses gráficos foi de 5 [K Ω /cm]. Deseja-se a comparação de resultados entre o modelo sem alteração na profundidade e o modelo com alteração na profundidade e para isso, trabalha-se com o maior valor de tensão atingido. No caso, esse maior valor de tensão de flashover foi obtido com a alteração brusca no perfil da profundidade, gerada através da introdução do degrau.

Nas figuras apresentadas a seguir, denomina-se cada conjunto de dados da seguinte forma:

- na simulação sem alteração no perfil da profundidade, os dados foram denominados como OBENAUS, em referência ao primeiro modelo físico do isolador de alta tensão poluído;
- na simulação com uma variação contínua na profundidade

do modelo físico, gerada pela introdução de uma rampa, os dados foram denominados como RAMPA;

- na simulação com uma variação discreta na profundidade do modelo físico, gerada pela introdução do degrau, os dados foram denominados como DEGRAU.

As figuras 4.3 e 4.4 mostram as curvas de resistividade superficial da solução eletrolítica em função do tempo do fenômeno de flashover, para as três versões do programa computacional. A figura 4.3 mostra os gráficos obtidos para polaridade positiva e a figura 4.4 mostra os resultados obtidos para polaridade negativa, respectivamente. Nas duas figuras, a tendência ao curto-circuito ocorre num tempo menor para os dados sem alteração no perfil da profundidade. Como as alterações no perfil da profundidade, neste trabalho, diminuem a seção transversal do canal, quanto mais acentuada a alteração na profundidade, maior será o tempo para a ocorrência do fenômeno de flashover. Isso se deve ao aumento da resistência total da solução eletrolítica.

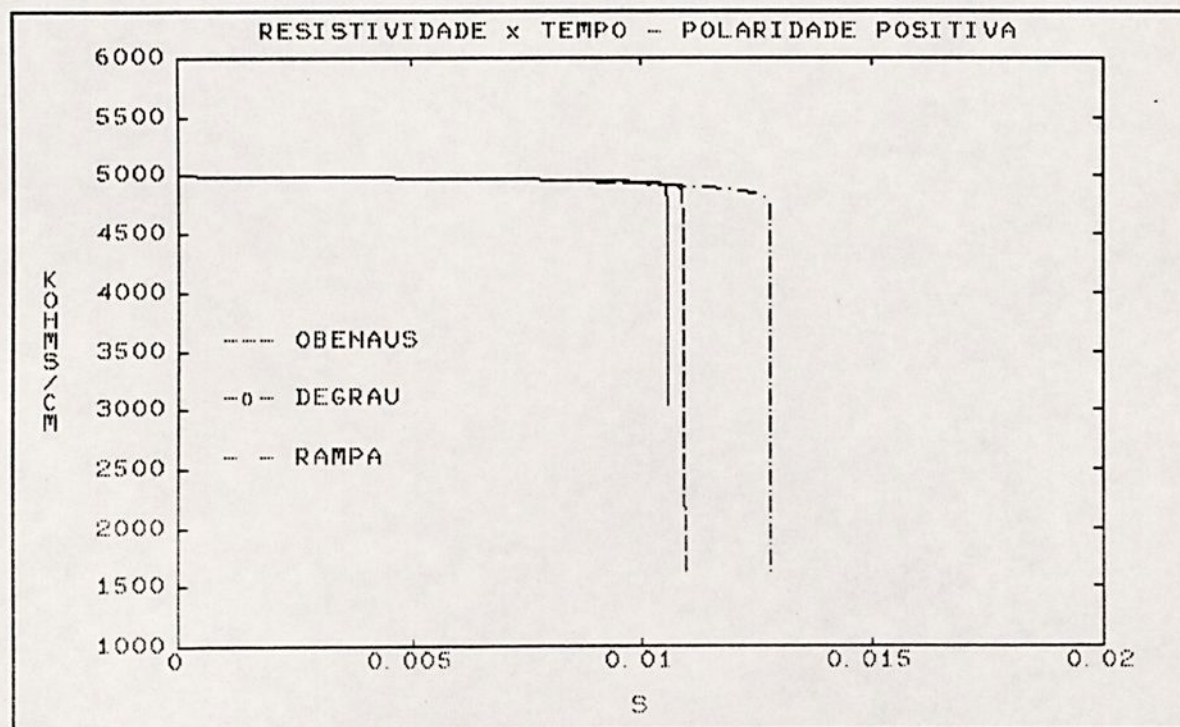


Figura 4.3 - Resistividade superficial do eletrólito em função do tempo do fenômeno (polaridade positiva).

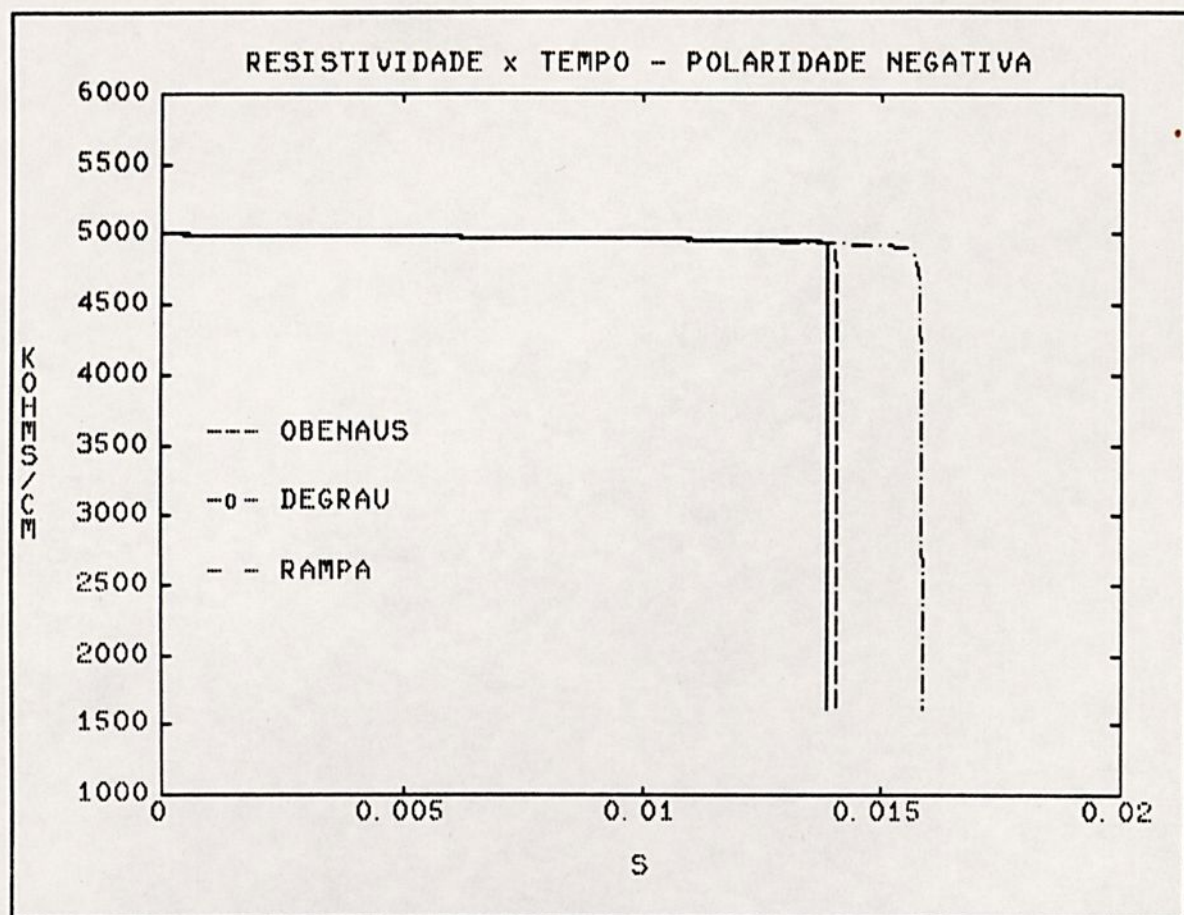


Figura 4.4 - Resistividade superficial do eletrólito em função do tempo do fenômeno (polaridade negativa).

A diferença de tempo do fenômeno entre as curvas de polaridade positiva e de polaridade negativa pode ser explicada pela análise das figuras 4.5 e 4.6. Tais figuras contêm os gráficos da tensão do fenômeno de flashover em função do tempo deste fenômeno. Para cada uma das duas figuras seguintes, utilizou-se um mesmo valor inicial de tensão de flashover, com o objetivo de facilitar a análise da influência das alterações na profundidade do modelo utilizado, sem a interferência de valores diferentes de tensão. O valor inicial de tensão utilizado é o valor da tensão crítica com a introdução do degrau no modelo físico, que era o maior entre as três situações analisadas.

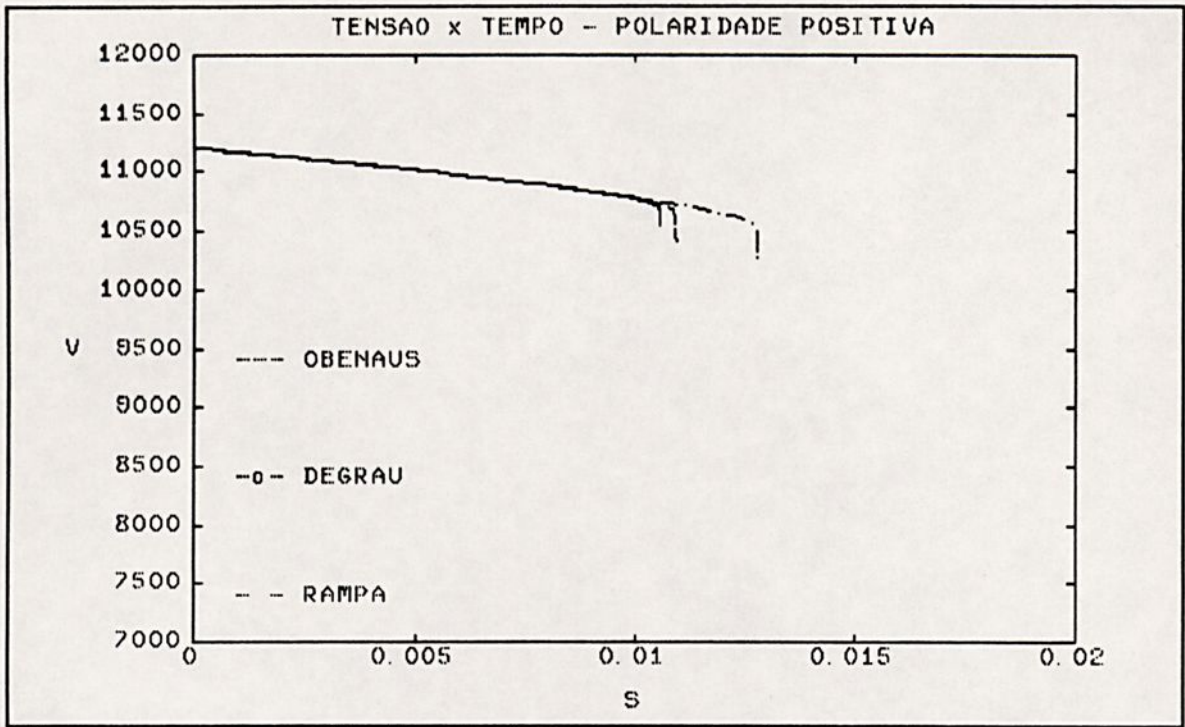


Figura 4.5 - Tensão de flashover em função do tempo do fenômeno (polaridade positiva).

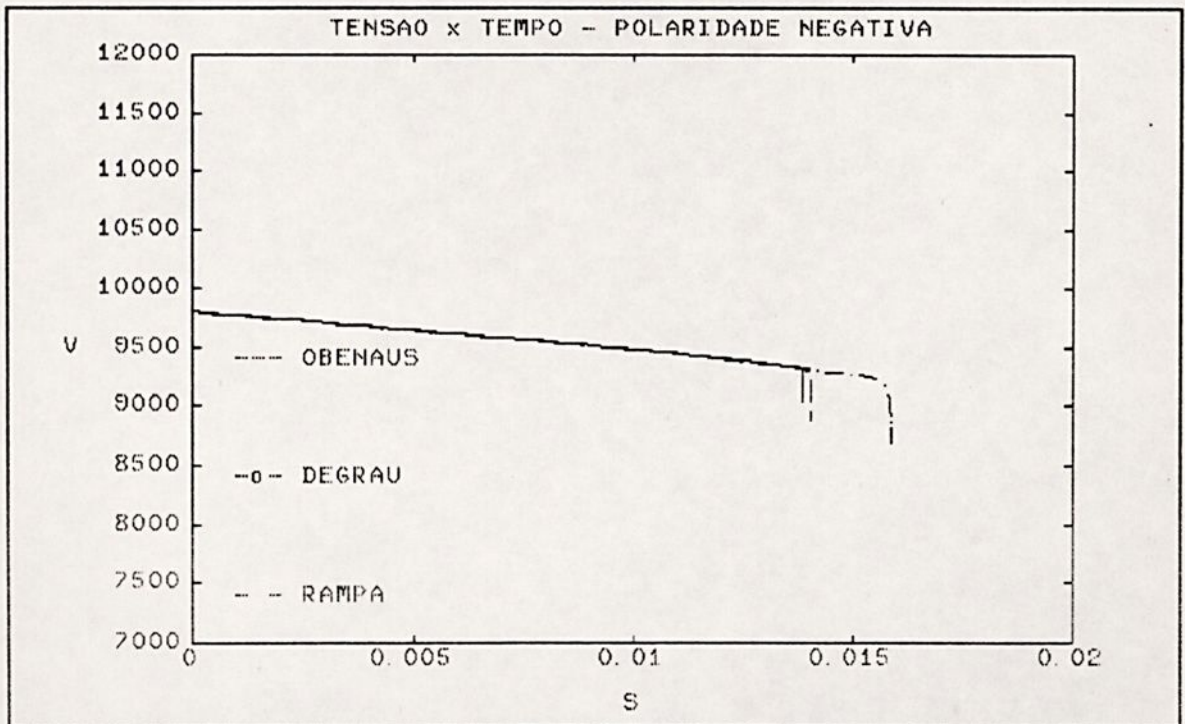


Figura 4.6 - Tensão de flashover em função do tempo do fenômeno (polaridade negativa).

O aumento acentuado da corrente do fenômeno caracteriza o instante de ocorrência do arco voltaico entre o eletrodo de alta tensão e o eletrodo de aterramento, através da solução eletrolítica. Matematicamente, o valor da corrente de flashover, no instante da ocorrência do arco voltaico, tende a um valor infinito. Deste modo para não ultrapassar a capacidade numérica da memória do microcomputador utilizado (linha PC), é estabelecido um limite para o valor da corrente de flashover, acima do qual, a simulação computacional é encerrada. Assim, as curvas das figuras 4.7 e 4.8 mostram os gráficos para a corrente durante o desenvolvimento do fenômeno de flashover em função do tempo deste fenômeno. Nessas figuras, pode-se observar que a corrente tem um valor pequeno durante o desenvolvimento do flashover, em comparação com os valores atingidos durante a ocorrência do mesmo.

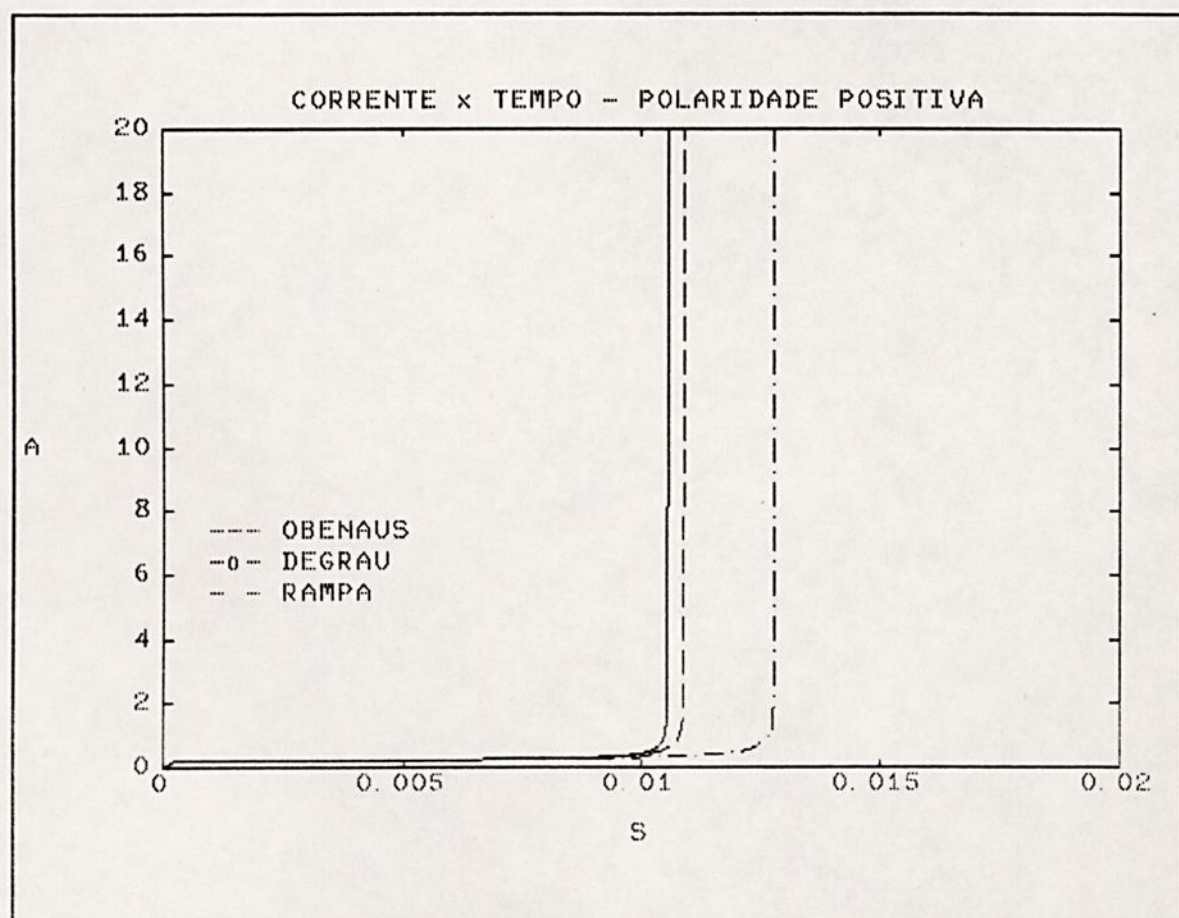


Figura 4.7 - Corrente de flashover em função do tempo do fenômeno (polaridade positiva).

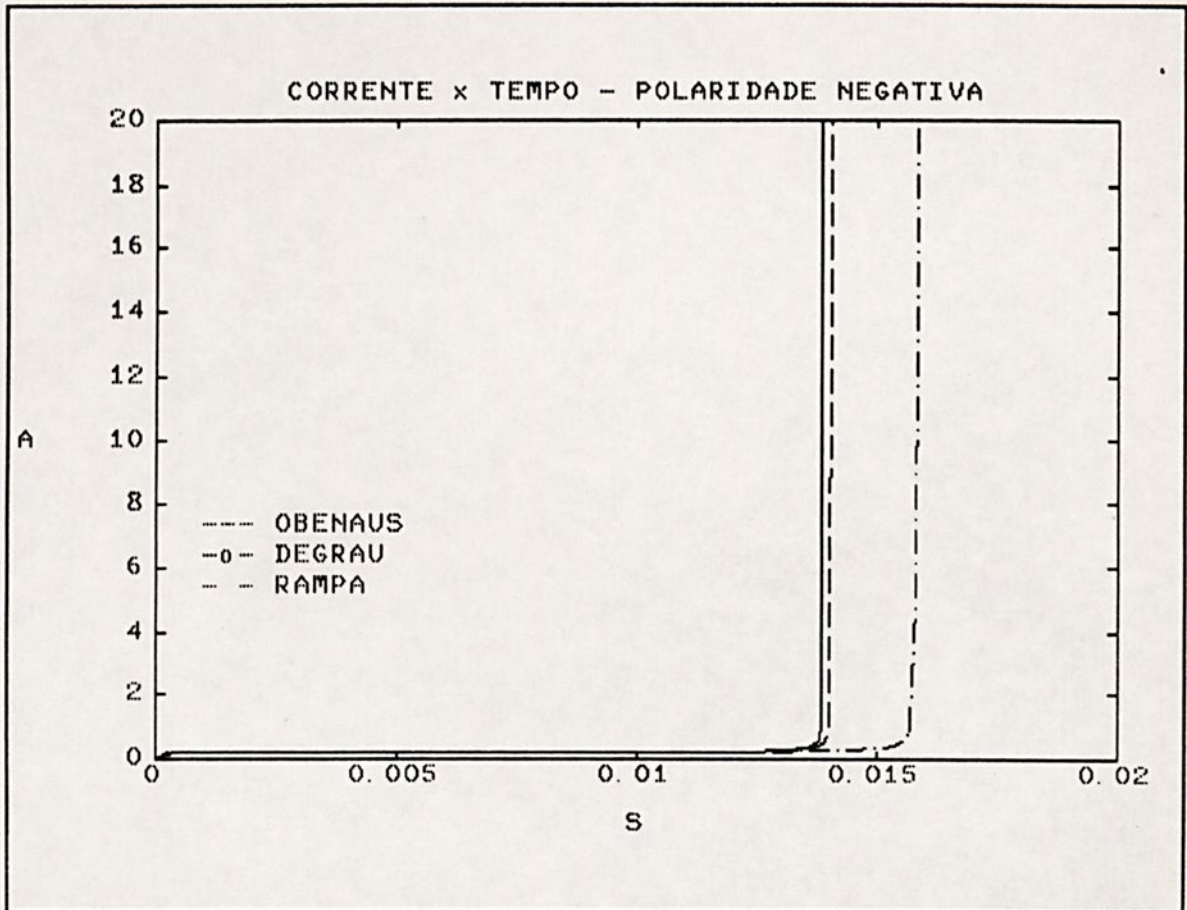


Figura 4.8 - Corrente de flashover em função do tempo do fenômeno (polaridade negativa).

As figuras 4.9 e 4.10 mostram as curvas da temperatura da solução eletrolítica em função do tempo do fenômeno de flashover. Para polaridade positiva, a introdução de alterações na profundidade do modelo físico, gera um aumento do valor final da temperatura do eletrólito, em relação ao modelo sem modificações na profundidade. Ou seja, com a diminuição da seção transversal do modelo, a quantidade de solução no mesmo diminui. Assim, há um aquecimento mais rápido da solução eletrolítica utilizada.

No caso da polaridade negativa, como o fenômeno é mais lento, o valor final da temperatura do eletrólito é o mesmo para as três situações analisadas. Ou seja, o tempo do fenômeno tem uma influência maior na temperatura da solução do que as alterações na seção transversal do modelo físico.

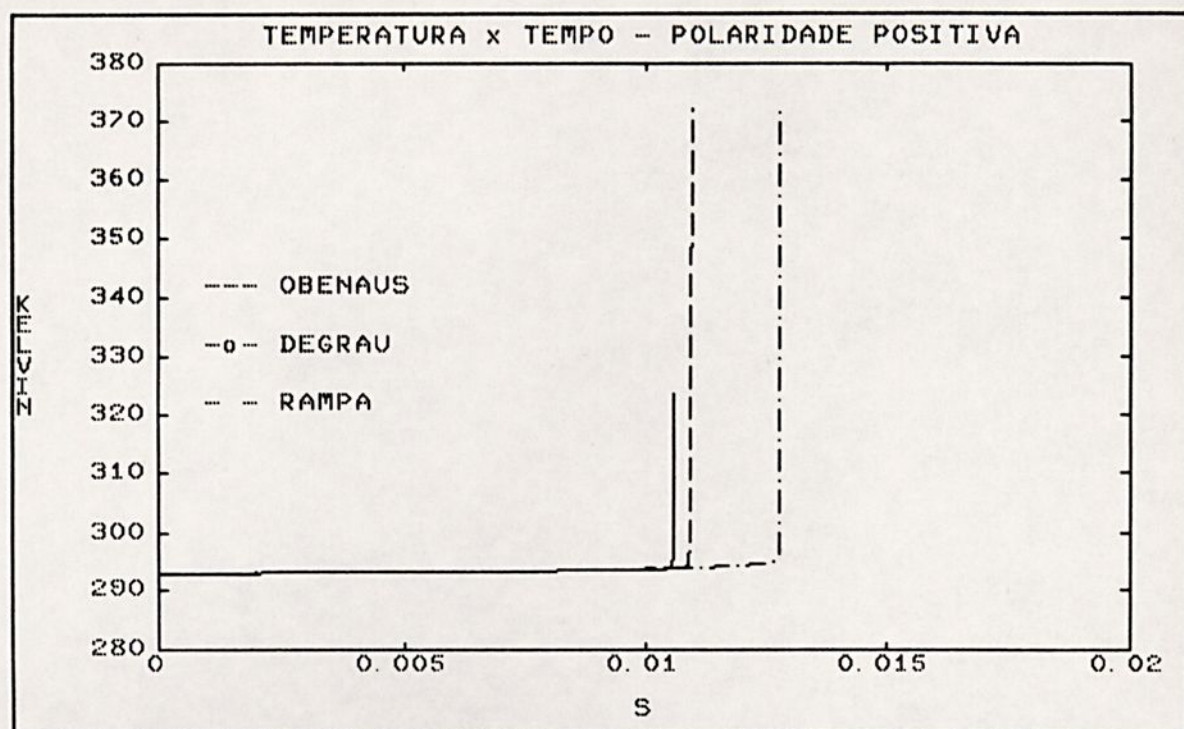


Figura 4.9 - Temperatura do eletrólito em função do tempo do fenômeno (polaridade positiva).

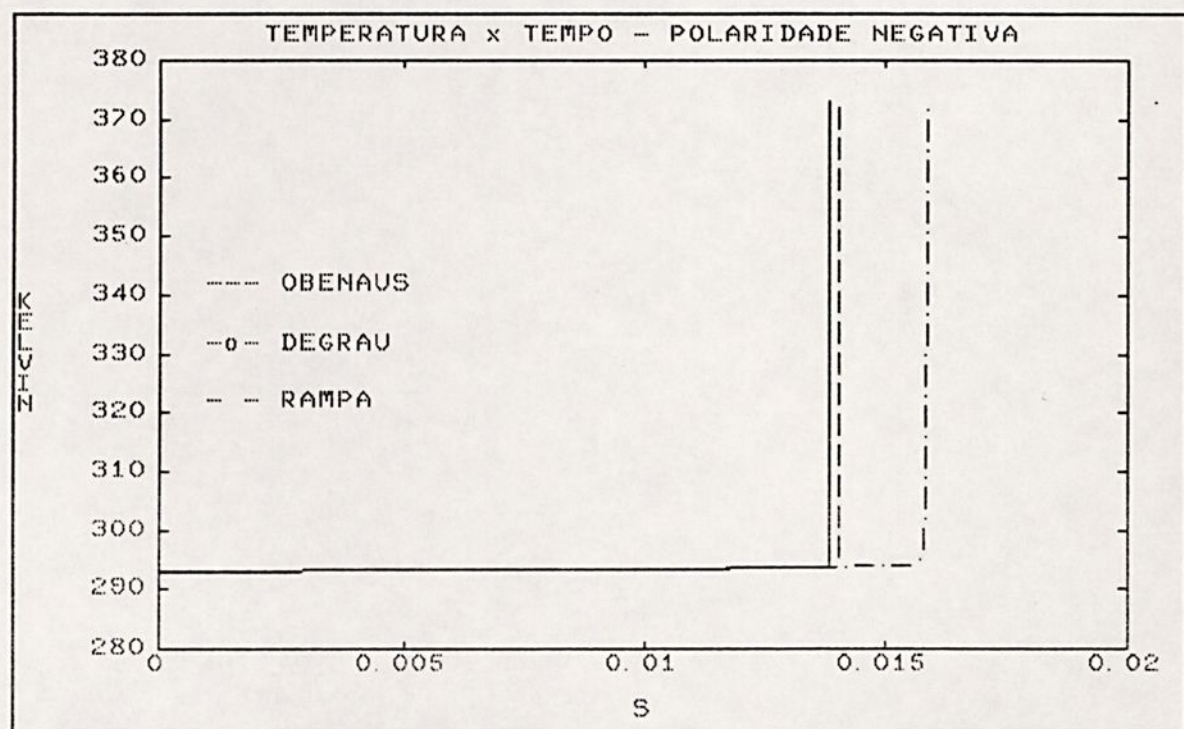


Figura 4.10 - Temperatura do eletrólito em função do tempo do fenômeno (polaridade negativa).

As figuras 4.11 e 4.12 mostram as curvas de alongação da descarga em função do tempo do fenômeno de flashover. Os gráficos apresentados nessas figuras têm comportamento semelhante, até que a alongação da descarga atinja o valor de 5 [cm]. A partir desse ponto, nota-se diferenças no comportamento dos três gráficos que compõem cada uma das figuras. Isso se explica, porque as alterações na profundidade do modelo físico iniciam-se a 5 [cm] do eletrodo de alta tensão.

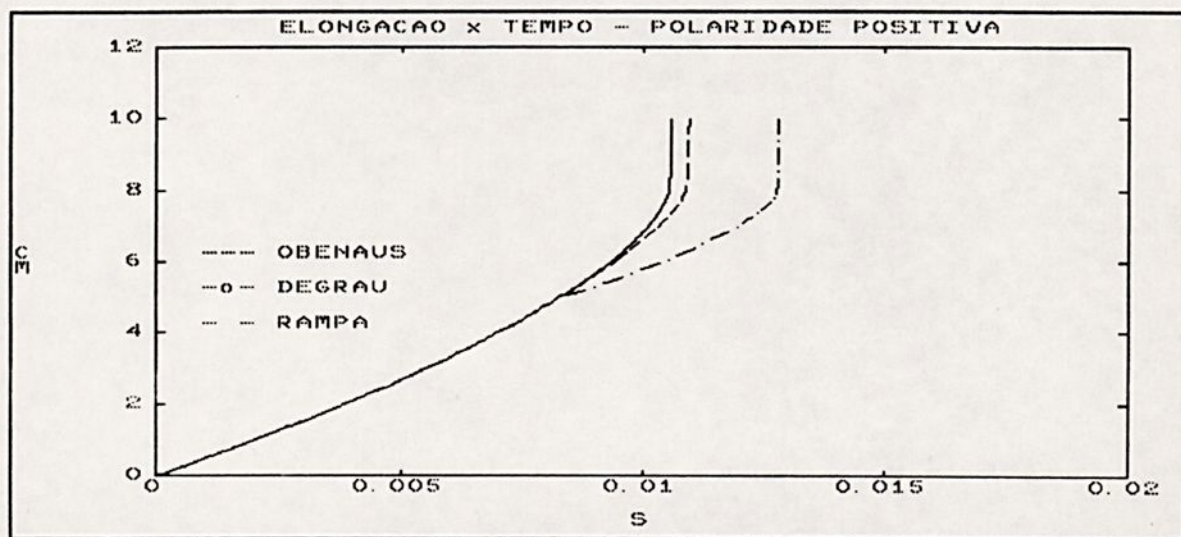


Figura 4.11 - Elongação da descarga em função do tempo do fenômeno de flashover (polaridade positiva).

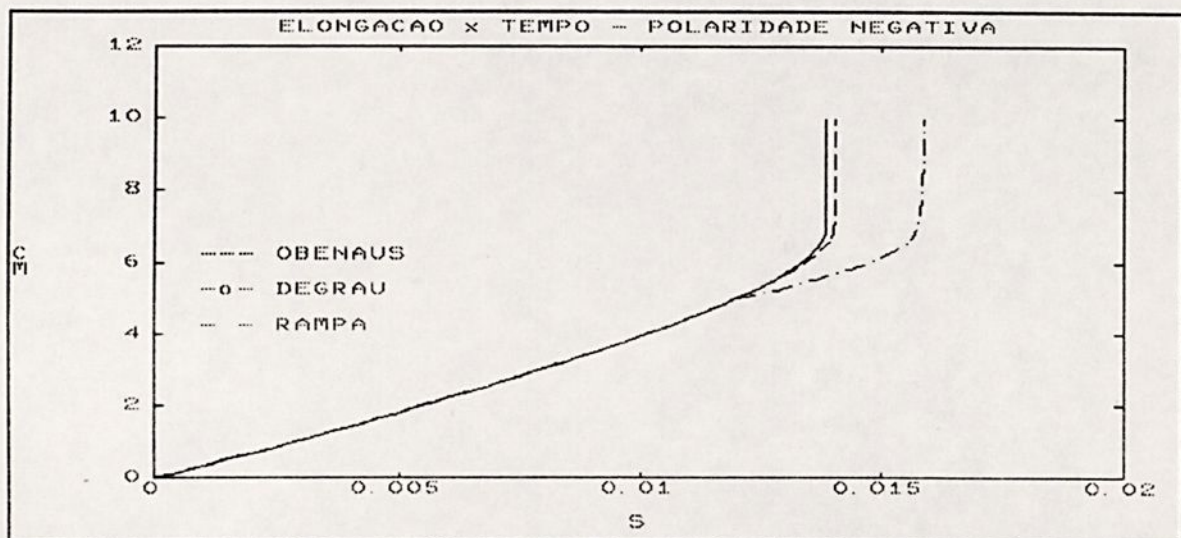


Figura 4.12 - Elongação da descarga em função do tempo do fenômeno de flashover (polaridade negativa).

As figuras 4.13 e 4.14 mostram as curvas de velocidade da descarga em função do tempo do fenômeno de flashover. A velocidade tem um aumento acentuado no momento da ocorrência do fenômeno de flashover, permanecendo com valores pequenos durante o desenvolvimento da descarga. Esse comportamento é semelhante ao comportamento da corrente do fenômeno de flashover, pois os campos elétricos, utilizados para calcular a velocidade da descarga (E_{pr} e E_a), são proporcionais à corrente do fenômeno. Destacam-se, também, nas curvas apresentadas, a pequena diminuição da velocidade do fenômeno no ensaio com a introdução do degrau, consequência da diminuição brusca da seção transversal do canal do modelo físico simulado.

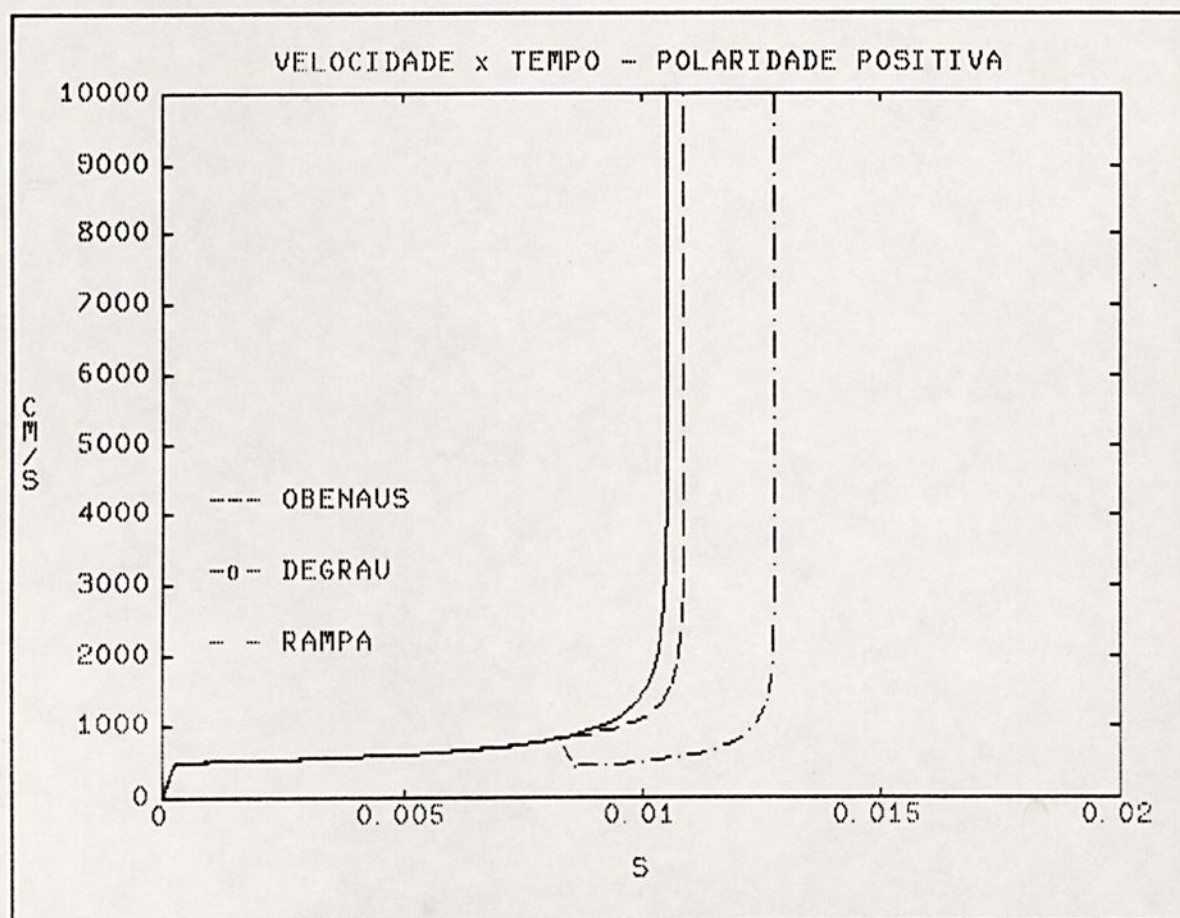


Figura 4.13 - Velocidade da descarga em função do tempo do fenômeno de flashover (polaridade positiva).

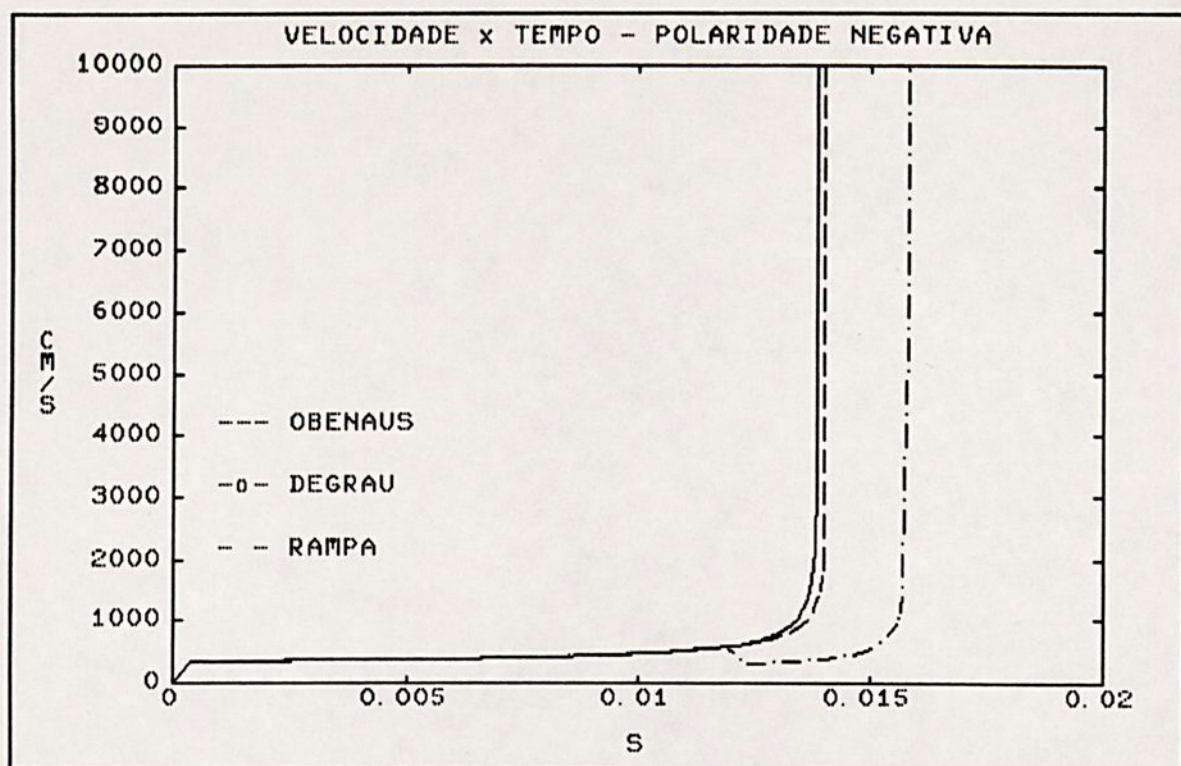


Figura 4.14 - Velocidade da descarga em função do tempo do fenômeno de flashover (polaridade negativa).

A tendência do campo elétrico no pé da descarga é aumentar acentuadamente, e a tendência do campo elétrico na coluna da descarga é diminuir de forma acentuada, também. As figuras 4.15 e 4.16 mostram as curvas desses campos elétricos em função da corrente do fenômeno. A curva do campo elétrico no pé da descarga cresce segundo um comportamento aproximadamente retilíneo. Já a curva do campo elétrico na coluna da descarga apresenta um comportamento exponencial decrescente. Essas curvas são utilizadas para a determinação gráfica do valor da corrente crítica do fenômeno de flashover. A corrente crítica, então, é determinada pela intersecção da curva do campo elétrico no pé da descarga em função da corrente com a curva do campo elétrico na coluna da descarga em função da corrente de flashover. A corrente crítica determinada por esse processo gráfico tem o mesmo valor para os três casos simulados, pois os valores das constantes, utilizadas na simulação computacional, foram os mesmo para os três casos analisados.

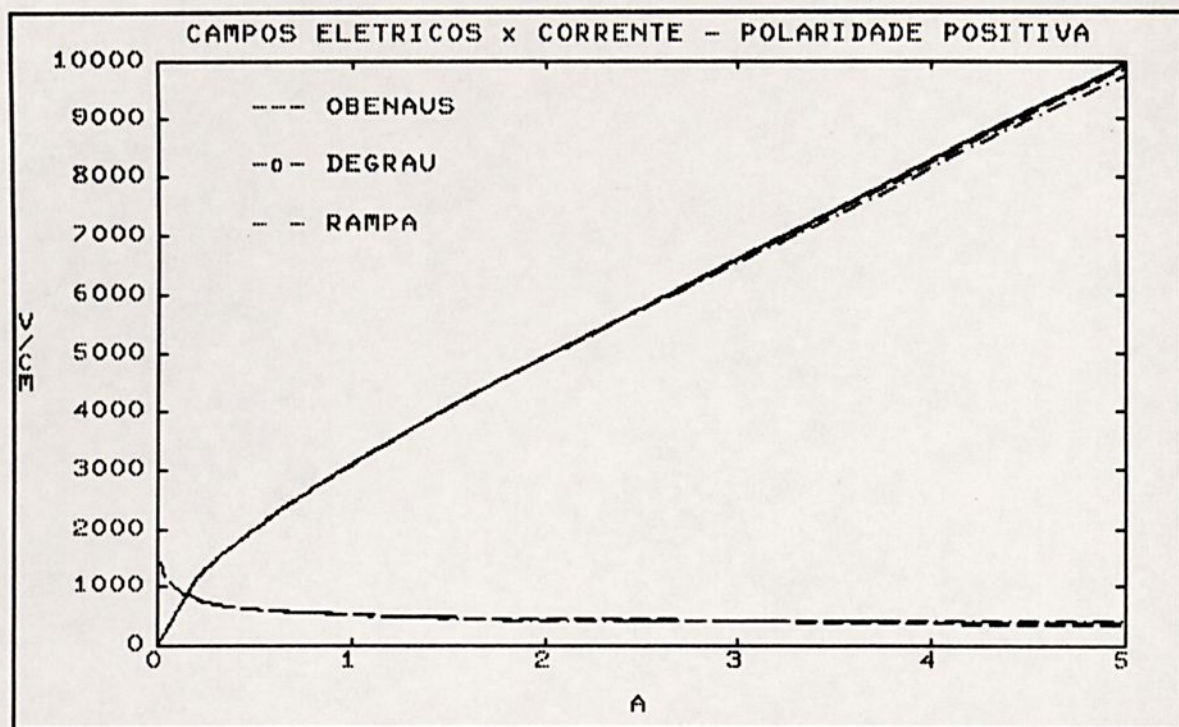


Figura 4.15 - Campos elétricos do fenômeno em função da corrente de flashover (polaridade positiva).

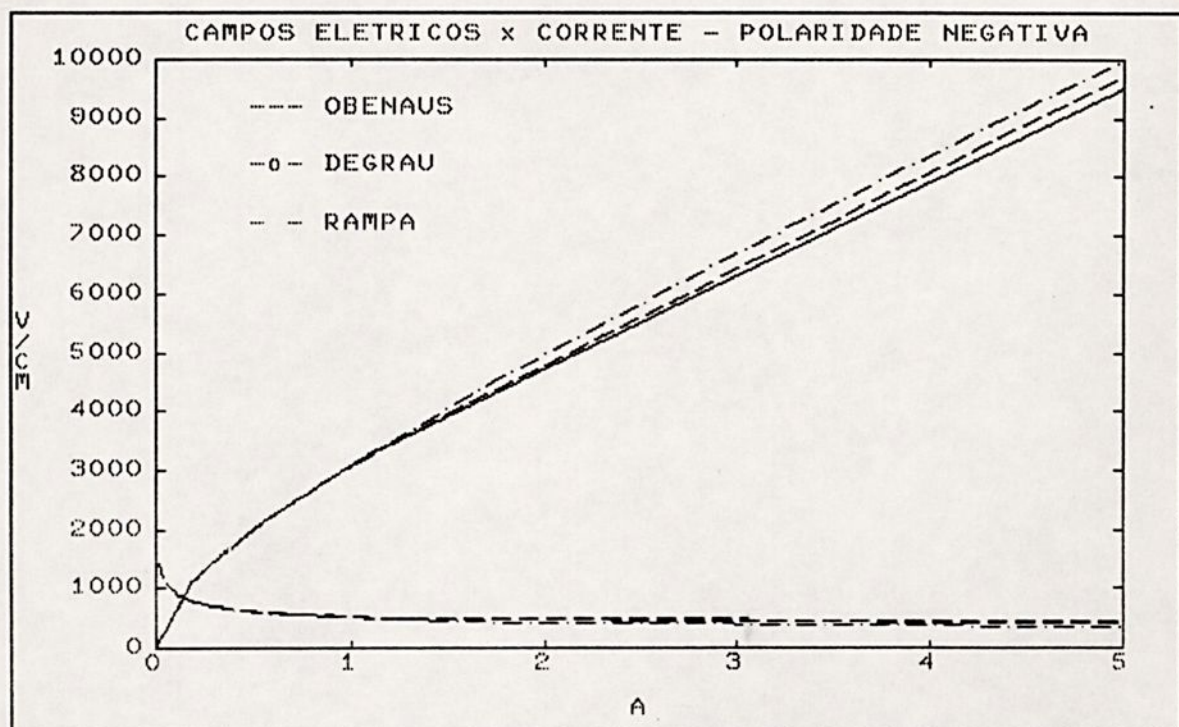


Figura 4.16 - Campos elétricos do fenômeno em função da corrente de flashover (polaridade negativa).

CAPÍTULO V

MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem experimental, realizada no Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (DEE/FEIS/UNESP), possibilitou a coleta de dados experimentais para a comparação e confirmação do equacionamento matemático proposto no capítulo III. A seguir, descreve-se as principais partes dessa montagem experimental.

1 - O modelo físico do isolador poluído

O modelo físico, construído em baquelite, possui um canal com comprimento de 20 [cm], largura de 4 [cm] e profundidade inicial de 3 [mm]. Possui, ainda, pés reguláveis para nivelamento de toda a estrutura, mantendo assim, a solução eletrolítica distribuída igualmente por todo o canal do modelo físico proposto. Interligados a essa estrutura estão o eletrodo de alta tensão e o eletrodo de aterramento.

O eletrodo de alta tensão é composto por aço de alta dureza. A distância entre o eletrodo de alta tensão e a solução eletrolítica é mantida abaixo de 50 [mm] para diminuir a influência do gap sobre o fenômeno de flashover. Esse cuidado é fundamentado nos resultados de Watson, Kho, Samuels, Ma e Chiu [06].

O eletrodo de aterramento é uma pequena chapa de cobre que se encaixa numa das extremidades do canal a ser percorrido pela descarga. Esse eletrodo fica imerso na solução eletrolítica e é ligado à malha de aterramento do Laboratório de Alta Tensão através de condutor apropriado. A distância entre o eletrodo de alta tensão e o eletrodo de aterramento é de 10 [cm].

No trecho de 10 [cm] entre o eletrodo de alta tensão e o eletrodo de aterramento, existem pequenas janelas de 2 a 1 [mm²], localizadas nas seguintes posições, em relação ao centro do canal do modelo (em relação ao eletrodo de alta



tensão): 2 [cm], 4 [cm], 6 [cm], 7 [cm], 8 [cm], 9 [cm] e 9,5 [cm]. Há, também, uma janela logo abaixo do eletrodo de alta tensão. A finalidade dessas janelas é servir de encaixe para os cabos de fibra óptica do circuito de análise da velocidade da descarga elétrica.

A figura 5.1 mostra um esquema simplificado do modelo físico do isolador de alta tensão poluído.

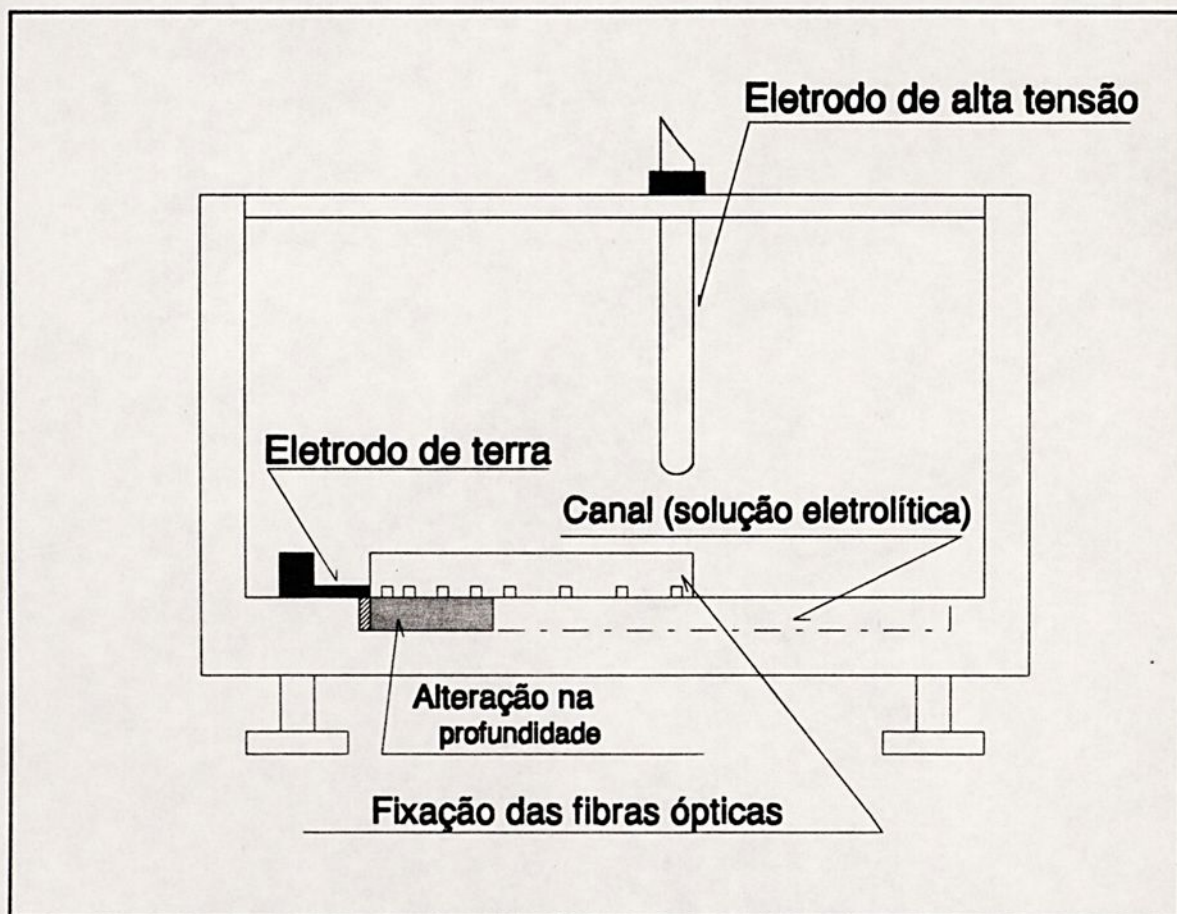


Figura 5.1 - Modelo físico do isolador de alta tensão poluído.

2 - O circuito de alimentação e de controle da descarga elétrica

O circuito que alimenta a descarga elétrica a ser estudada deve atender algumas características básicas, tais como: suportar altas tensões (por volta de 15 [KV]), permitir

a troca de polaridade e ter uma capacidade de descarregamento rápido. Para atender essas características utilizou-se um circuito cujos componentes principais são um transformador de alta tensão, uma ponte retificadora e um banco de capacitores.

O transformador utilizado na produção das descargas tem uma tensão máxima nominal de 80 [KV] e 3 [KVA] de potência. É ligado a uma ponte retificadora de tensão nominal de 80 [KV]. O transformador e a ponte retificadora são unidos a uma mesa de comando e controle de tensão. A troca de polaridade é feita com a inversão da posição da ponte retificadora.

A ponte retificadora carrega um banco de capacitores que tem a capacidade de descarregamento rápido necessária para a alimentação da descarga elétrica. Utiliza-se um banco de capacitores formado por dois capacitores de 3,0 [μ F] por unidade e tensão de 30 [KV]. Para a formação do banco, os dois capacitores são ligados em paralelo.

O carregamento e o descarregamento do banco de capacitores são realizados através de um relé de alta tensão imerso em óleo mineral isolante. O carregamento se processa através do contato normalmente fechado e o descarregamento, através do contato normalmente aberto. O comando de atuação desse relé é feito por uma fonte de tensão contínua de 24 [V].

A tensão máxima utilizada no Laboratório de Alta Tensão (DEE/FEIS/UNESP) foi de 11 [KV], pois acima desse valor a rapidez da descarga elétrica fazia com que o circuito de proteção do osciloscópio atuasse, não permitindo o armazenamento do sinal desejado. Assim, a tensão de 11 [KV] era o limite de tensão da montagem experimental.

A figura 5.2 mostra um esquema simplificado do circuito de alimentação e controle da descarga elétrica.

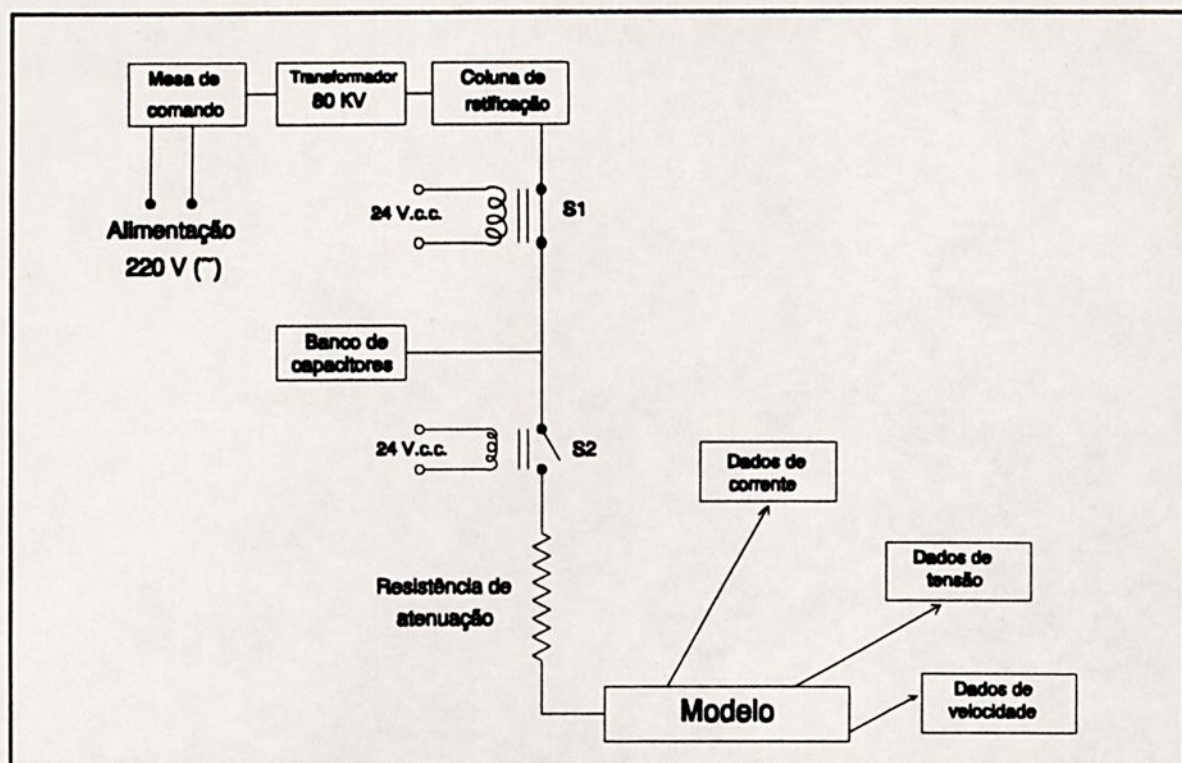


Figura 5.2 - Alimentação da descarga para simulação do fenômeno de flashover.

3 - O circuito de visualização da descarga

Este circuito é composto por dois fotomultiplicadores do modelo 931-A da RCA, com aplicação para comprimento de onda de luz entre 300 e 600 [nm]. Para o funcionamento dos fotomultiplicadores, Maldonado [17], [18] desenvolveu um circuito de excitação constituído de um divisor resistivo de tensão. Alimenta-se, então, com uma tensão de 800 [Vcc] (polaridade negativa), os vários diodos do circuito que é formado, ainda, por capacitores em paralelo, conforme a figura 5.3. A constituição indicada nessa figura é a que melhor se aplica para análise de pulsos rápidos.

Segundo Maldonado [17], [18], há distorções na forma de onda de resposta do fotomultiplicador que, no entanto, não prejudicam a análise dos resultados obtidos. Pois, a velocidade da descarga é obtida pela diferença de tempo entre os picos de luminosidade registrados pelos fotomultiplicadores.

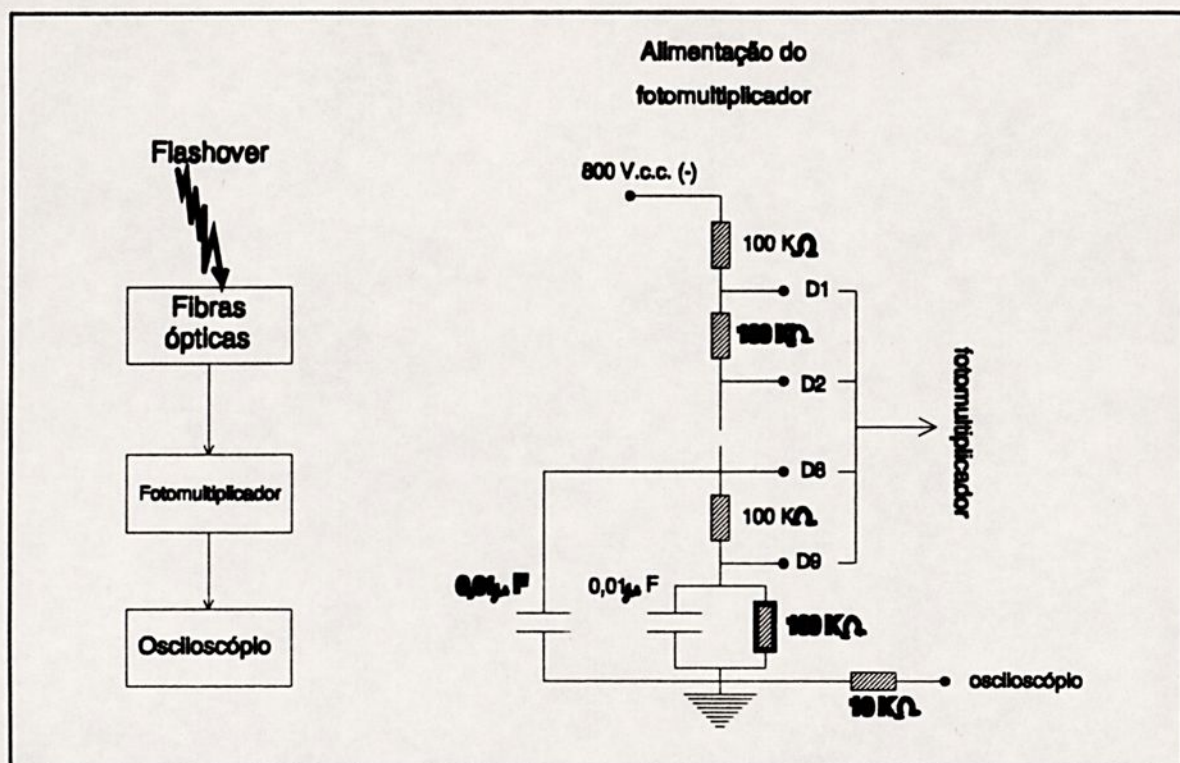


Figura 5.3 - Circuito para análise da luminosidade produzida pelo fenômeno de flashover.

4 - Os circuitos de obtenção da corrente e da tensão do fenômeno

Além da velocidade da descarga, são coletados os sinais de tensão e corrente, durante o desenvolvimento do fenômeno de flashover. Consegue-se, também, o valor da tensão através de um voltímetro da mesa de comando do transformador e da ponte retificadora.

O sinal e valor da tensão é coletado através de uma sonda de tensão com a relação 100:1. Essa sonda é, basicamente, um circuito resistivo divisor de tensão. O sinal de corrente foi obtido através do circuito elétrico esquematizado na figura 5.4. O ponto A e o ponto de terra são ligados ao osciloscópio de memória para a obtenção do perfil da onda de corrente. Os diodos zener protegem o osciloscópio do rápido crescimento da corrente durante o fenômeno de flashover.

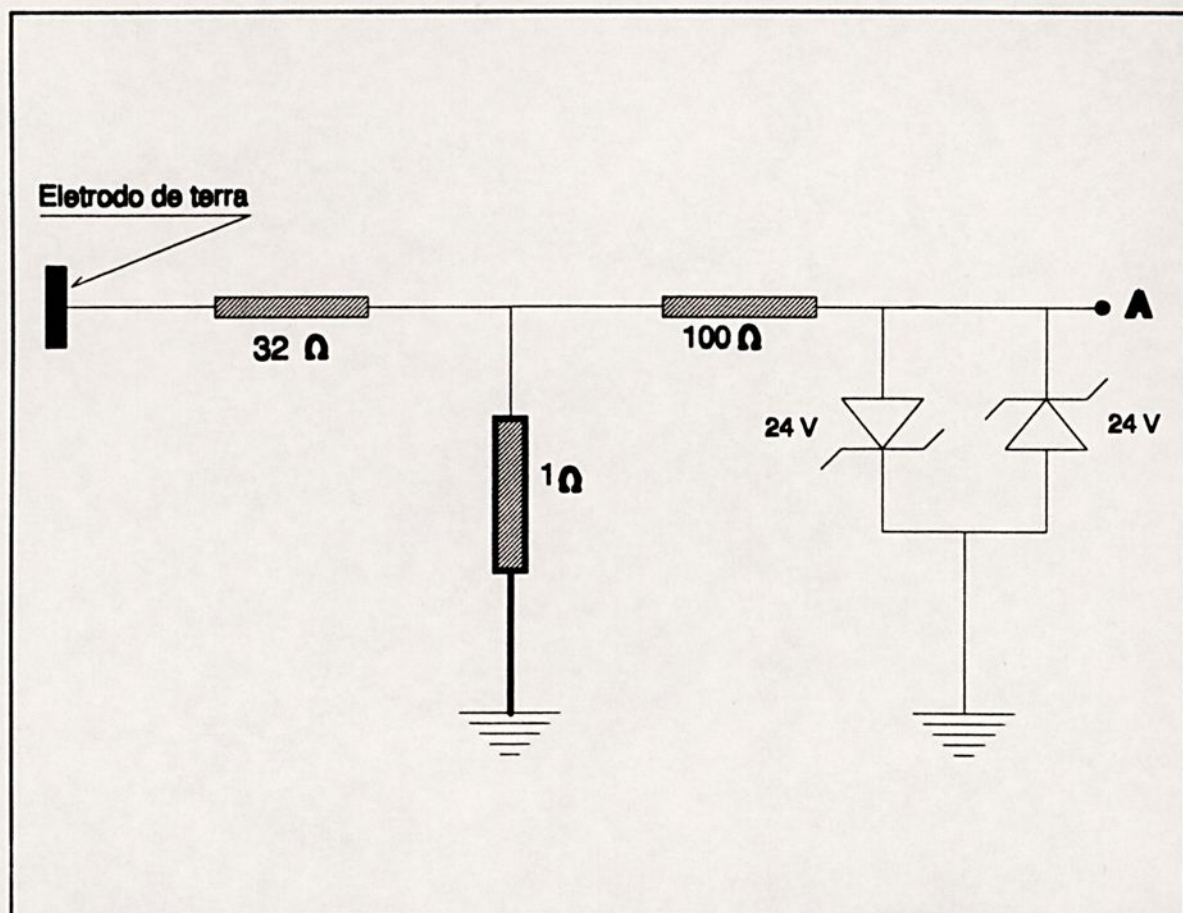


Figura 5.4 - Circuito elétrico para obtenção do sinal de corrente do fenômeno de flashover.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais, realizados no Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (DEE/FEIS/UNESP), foram repetidos várias vezes com o objetivo de minimizar erros na interpretação dos dados coletados. A cada novo ensaio, a solução, contida no canal do modelo físico, era trocada. Evitava-se, assim, a utilização de uma solução previamente ionizada e aquecida pela passagem de várias descargas elétricas. Os dados coletados foram analisados por um programa computacional que fazia uma interpolação exponencial com os mesmos. A equação exponencial, obtida pela interpolação, gerava uma curva de setenta pontos para cada conjunto de dados. Utilizou-se a interpolação exponencial, pois resultados obtidos por outros autores (Flazi [24], [25]; Pissolato [11], [26], [27]; Maldonado [17], [18], [28]) confirmam ser esta a melhor aproximação.

1 - Mecanismos físicos da propagação da descarga (constatação experimental)

No início das coletas de dados, observou-se um fenômeno que interferia no funcionamento do osciloscópio de memória. Esse aparelho não conseguia gravar o sinal de tensão e de corrente, pois o disparo do mesmo ocorria antes da descarga. Quando o relé de alta tensão era acionado, o osciloscópio disparava e devido à diferença de tempo entre o acionamento do relé e a descarga, não era possível obter o sinal desejado. A diferença de tempo citada era da ordem de milissegundos, mas em termos percentuais era aproximadamente o dobro do tempo do fenômeno a ser observado. O problema foi resolvido, construindo-se uma gaiola de Faraday, dentro da qual foi colocado o osciloscópio.

Dados coletados para polaridade positiva podem ser usados como prova da ocorrência da pré-ionização da solução



eletrolítica, antes da ocorrência do flashover. Na figura 6.1 há um exemplo dos sinais coletados. No sinal de corrente (sinal superior), há picos antes da ocorrência do flashover. No sinal de tensão (sinal inferior), constata-se variações bruscas antes da ocorrência do fenômeno.

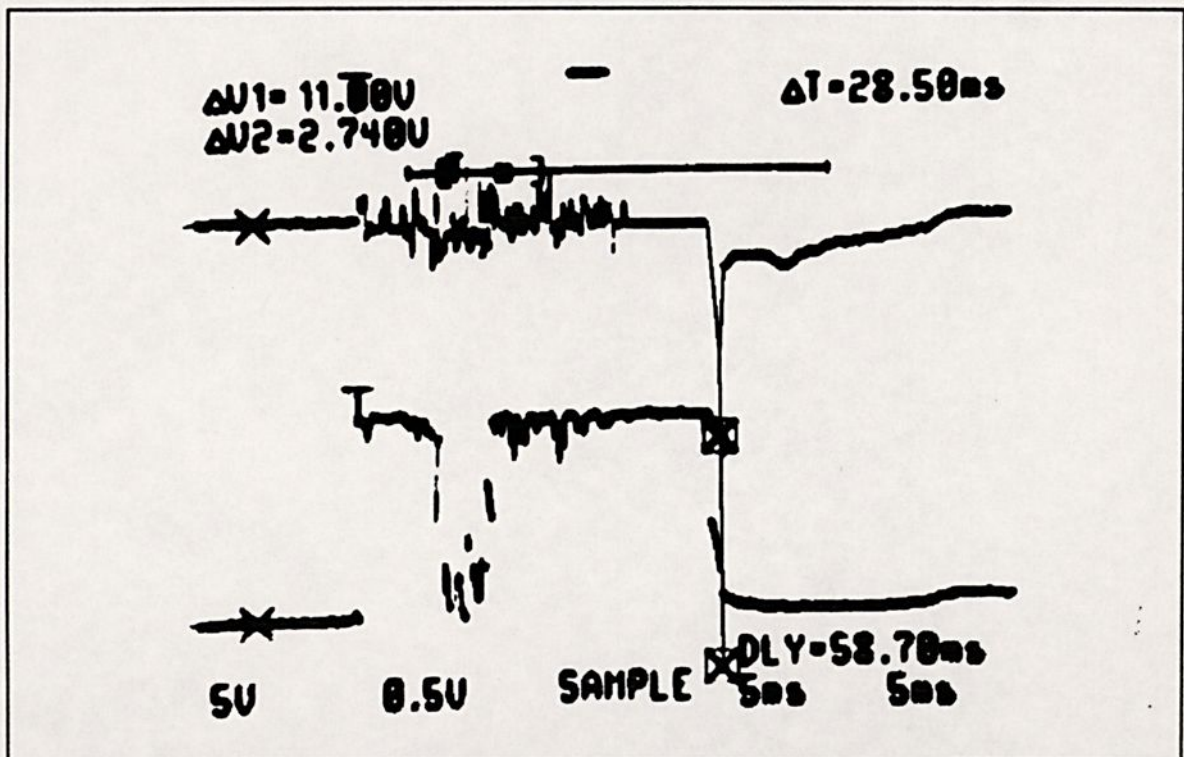


Figura 6.1 - Sinais de corrente (invertido) e tensão de flashover para polaridade positiva (2 [K Ω /cm], 10 [KV]).

Nas figuras 6.2, 6.3 e 6.4 são mostrados sinais de ensaios em que não ocorreu o fenômeno de flashover. Ou seja, ocorrem variações bruscas nos sinais de tensão até que a energia fornecida pela banco de capacitores não seja suficiente para a descarga continuar desenvolvendo-se sobre a solução eletrolítica. Pode-se comparar esse comportamento com o comportamento de uma descarga atmosférica, onde a pré-ionização antecede o rompimento dielétrico do ar (Jolly [29], Mercure e Drouet [30]).

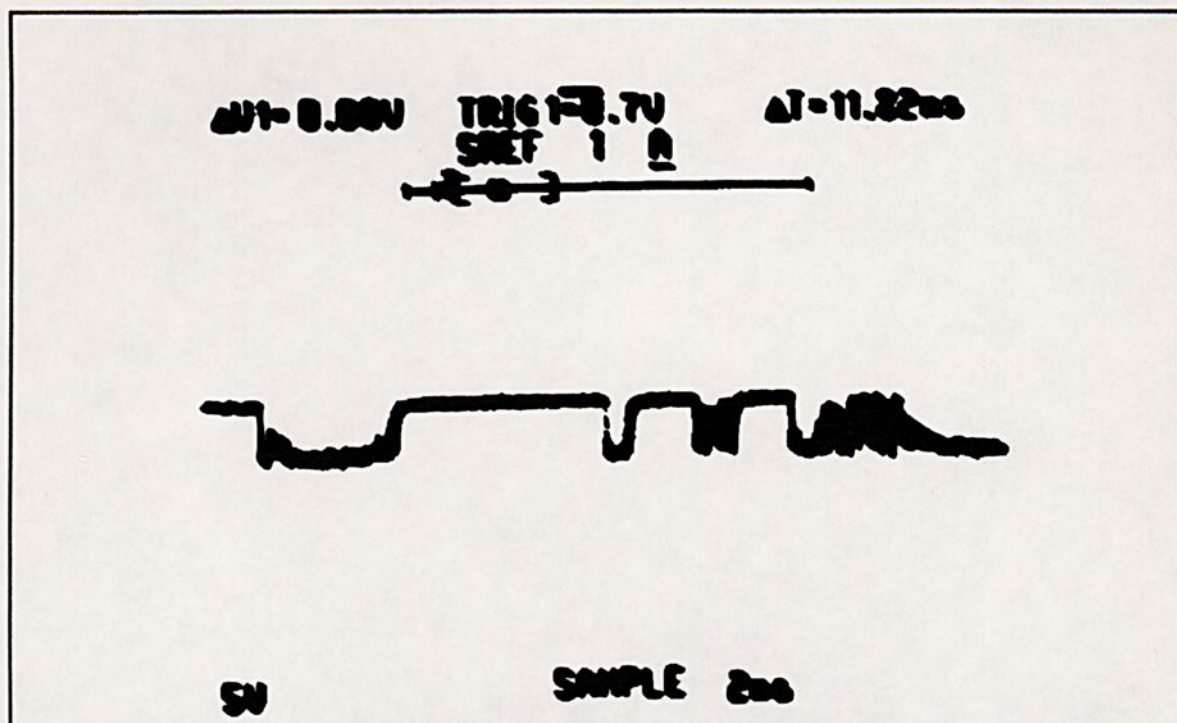


Figura 6.2 - Sinal de tensão para polaridade negativa sem alteração na profundidade do modelo (2 [KΩ/cm], 2 [KV]).

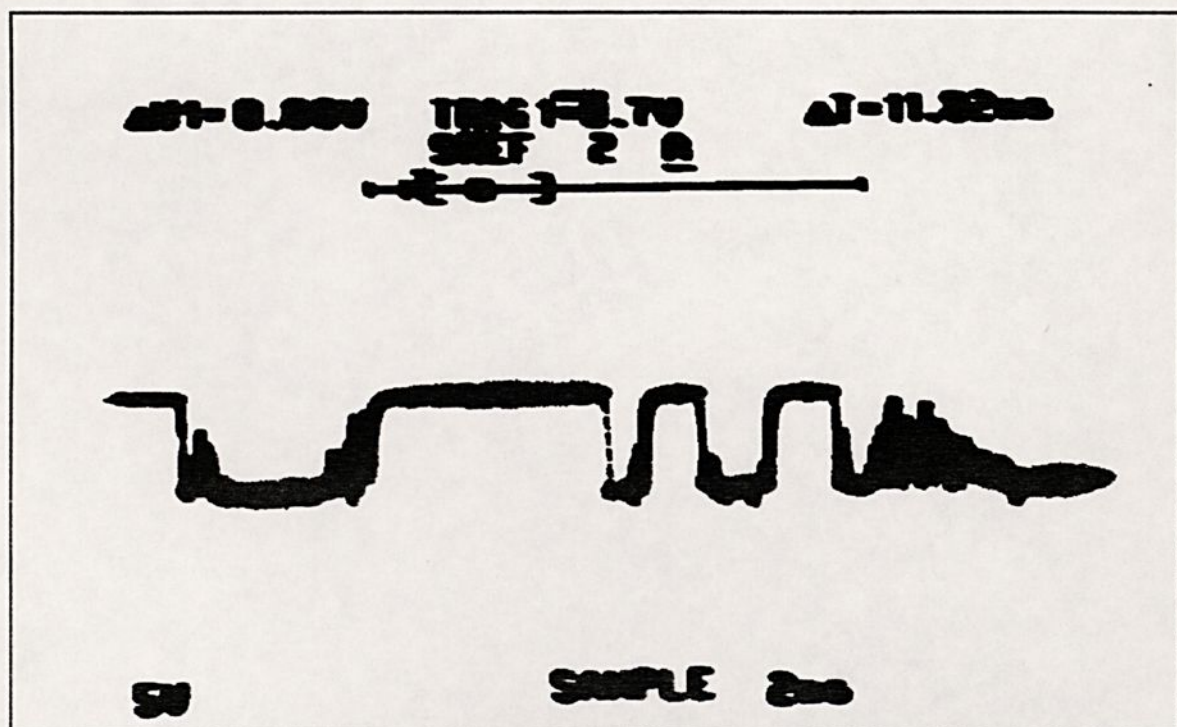


Figura 6.3 - Sinal de tensão para polaridade negativa sem alteração na profundidade do modelo (2 [KΩ/cm], 4 [KV]).

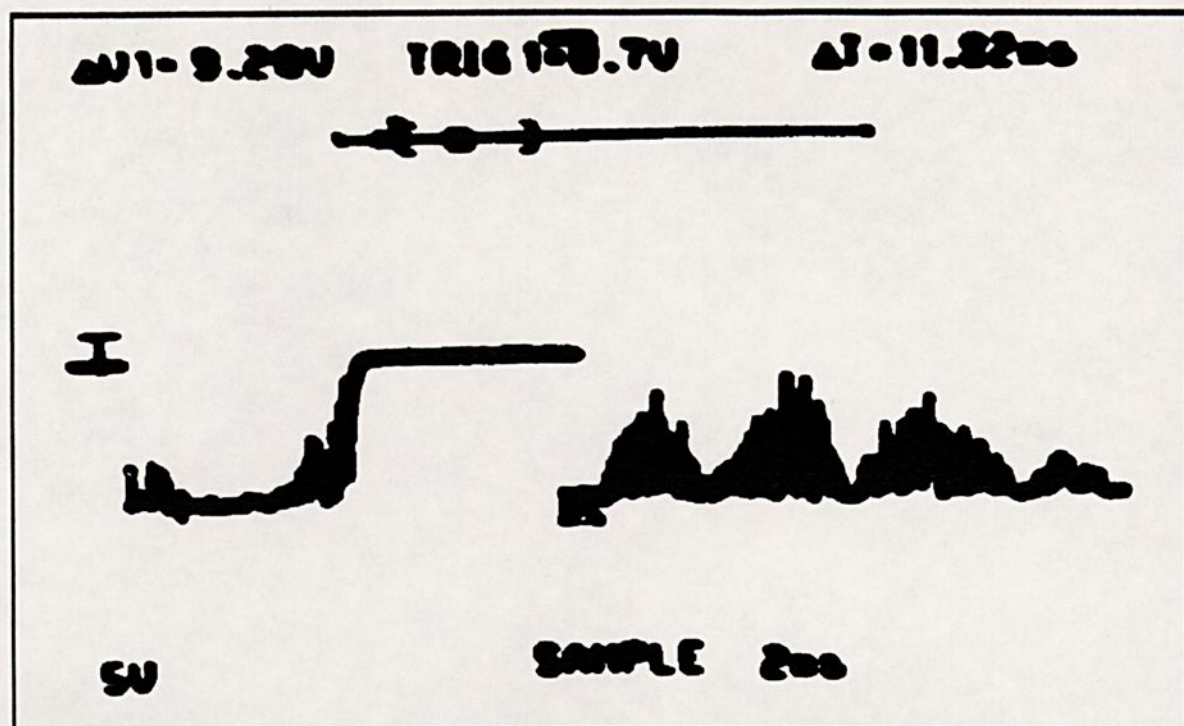


Figura 6.4 - Sinal de tensão para polaridade negativa sem alteração na profundidade do modelo (2 [KΩ/cm], 6 [KV]).

Os resultados apresentados nas figuras anteriores, bem como os problemas com o disparo do osciloscópio de memória, baseados nos resultados e conclusões de Yamano [07], podem levar à conclusão de que a descarga elétrica tem sua origem na pré-ionização da solução eletrolítica e na não-uniformidade do campo elétrico sobre a superfície do eletrólito.

2 - Os dados experimentais (tensão em função do tempo)

Neste item são apresentados, então, os valores de tempo do fenômeno de flashover em função da tensão aplicada. Esses valores foram obtidos para quatro valores de resistividade superficial (2, 3, 4 e 5 [KΩ/cm]), utilizando-se tanto a polaridade positiva como a negativa. Nos ensaios realizados para este trabalho, o degrau utilizado tinha as seguintes

dimensões: 5 [cm] de comprimento; 4 [cm] de largura e espessura de 2,5 [mm]. Já, a rampa tinha as seguintes dimensões: 5 [cm] de comprimento; 4 [cm] de largura e espessura final de 2,5 [mm]. Ou seja, a profundidade final do modelo físico, com a introdução do degrau ou da rampa, é de 0,5 [mm].

Em algumas tabelas, são observados valores bem diferentes de tempo do fenômeno para um mesmo valor de tensão. Peyregne [20] afirma ser esse fato uma consequência da existência de dois mecanismos físicos para a propagação da descarga elétrica, que segundo Yamano [07], são a não-uniformidade do campo elétrico na superfície da solução eletrolítica e a pré-ionização do meio onde se processará o fenômeno de flashover. Assim, para cada tabela que apresentou valores discrepantes de tempo para um mesmo valor de tensão, foram realizados duas interpolações exponenciais. Cada uma delas, trabalhou com valores de tempo de uma mesma ordem de grandeza e a curva final é o resultado da união dessas duas interpolações.

Não foram obtidos dados com tensões superiores a 11 [KV], pois acima desse valor, a descarga ocorria de forma muito rápida, dissipando a energia armazenada nos capacitores em um tempo muito curto. O sistema de proteção do osciloscópio de memória não permitia que esse sinal fosse armazenado, evitando a inutilização permanente desse equipamento. Além disso, houve casos de queima dos condutores de aterramento e da resistência de atenuação do montagem experimental, quando a tensão ultrapassava o valor de 11 [KV]. No entanto, devido à interpolação exponencial realizada com os dados coletados, os gráficos de tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, foram estendidos até o valor de 15 [KV]. A finalidade disso, foi padronizar a apresentação das curvas, facilitando a comparação dos resultados obtidos.

Em alguns ensaios não foi possível obter o fenômeno de flashover com tensão de até 11 [KV]. Nesses ensaios, ocorreram pequenos faiscamentos entre o eletrodo de alta tensão e a solução eletrolítica. A figura 6.5 apresenta um sinal de tensão para um ensaio em que não ocorreu o flashover comparado com um ensaio em que ocorreu o flashover.



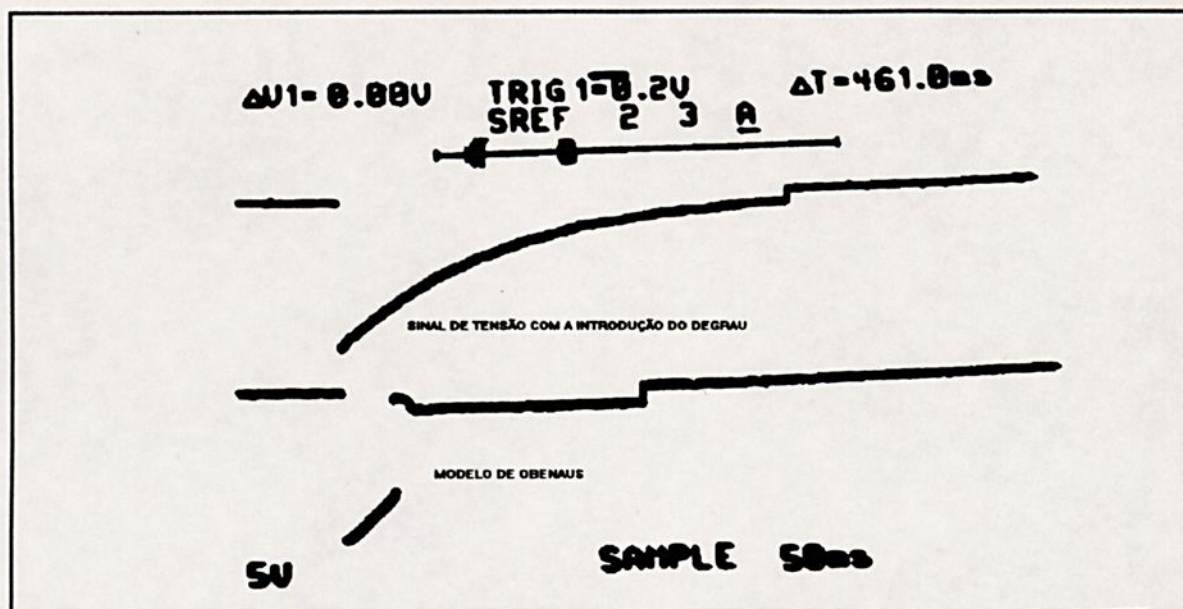


Figura 6.5 - Sinal tensão em que não ocorreu o flashover comparado a um sinal de tensão em que ocorreu o fenômeno.

Os dados, apresentados a seguir, foram obtidos com resistividade superficial da solução eletrolítica de 2 [KΩ/cm] e polaridade positiva. Utilizando-se o modelo sem alterações na profundidade, observa-se na tabela 6.1, que a tensão mínima para a ocorrência do flashover, para esse caso, é de 9 [KV]. Ocorrem, também, valores de tempo de ordens de grandeza diferentes para um mesmo valor de tensão de flashover (valores de 10 [KV] e 11 [KV]).

Com a introdução do degrau no modelo físico, a tensão mínima, para a ocorrência do flashover, eleva-se para 10 [KV] (tabela 6.2). O degrau foi colocado a uma distância de 5 [cm] do eletrodo de alta tensão, estando em contato com o eletrodo de aterramento e submerso na solução eletrolítica. Utilizando-se a rampa nessas mesmas condições, a tensão mínima para a ocorrência do flashover tem o valor de 9 [KV] (tabela 6.3). Este valor é igual ao obtido para o modelo sem alteração na profundidade, sendo que os valores de tempo do fenômeno são menores para o modelo com a introdução da rampa, quando se mantém o mesmo valor de tensão.

Tabela 6.1 - Dados experimentais sem alteração na profundidade do modelo físico, polaridade positiva - 2 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
9,0	39,50	37,60	37,80	38,65	38,90
10,0	33,15	34,15	35,15	34,50	33,90
10,0	1,05	5,65			
11,0	18,60	19,05	20,25	20,21	18,95
11,0	0,45				

Tabela 6.2 - Dados experimentais com a introdução do degrau no modelo físico, polaridade positiva - 2 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
10,0	22,00	22,25	24,10	24,60	23,00
11,0	7,79	7,94	8,93	8,26	8,22

Tabela 6.3 - Dados experimentais com a introdução da rampa no modelo físico, polaridade positiva - 2 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
9,0	34,50	29,30	28,70	29,40	33,20
10,0	19,45	20,80	19,00	21,25	20,30
10,0	2,95				
11,0	17,90	16,45	16,05	17,05	16,20

A figura 6.6. apresenta os gráficos obtidos dos dados coletados para a resistividade superficial de 2 [KΩ/cm] e polaridade positiva. São gráficos do tempo do fenômeno em função da tensão de flashover. As curvas apresentadas são o resultado da interpolação exponencial dos dados das três

tabelas anteriores (6.1, 6.2 e 6.3). Duas curvas (OBENAU e RAMPA) apresentam descontinuidades nos valores de tempo do fenômeno para a tensão de 10 [KV]. Isso é consequência de duas interpolações exponenciais para cada tabela que apresentou valores de tempo do fenômeno de ordens de grandeza diferentes para um mesmo valor de tensão. Cada interpolação trabalhou com uma dessas ordens de grandeza.

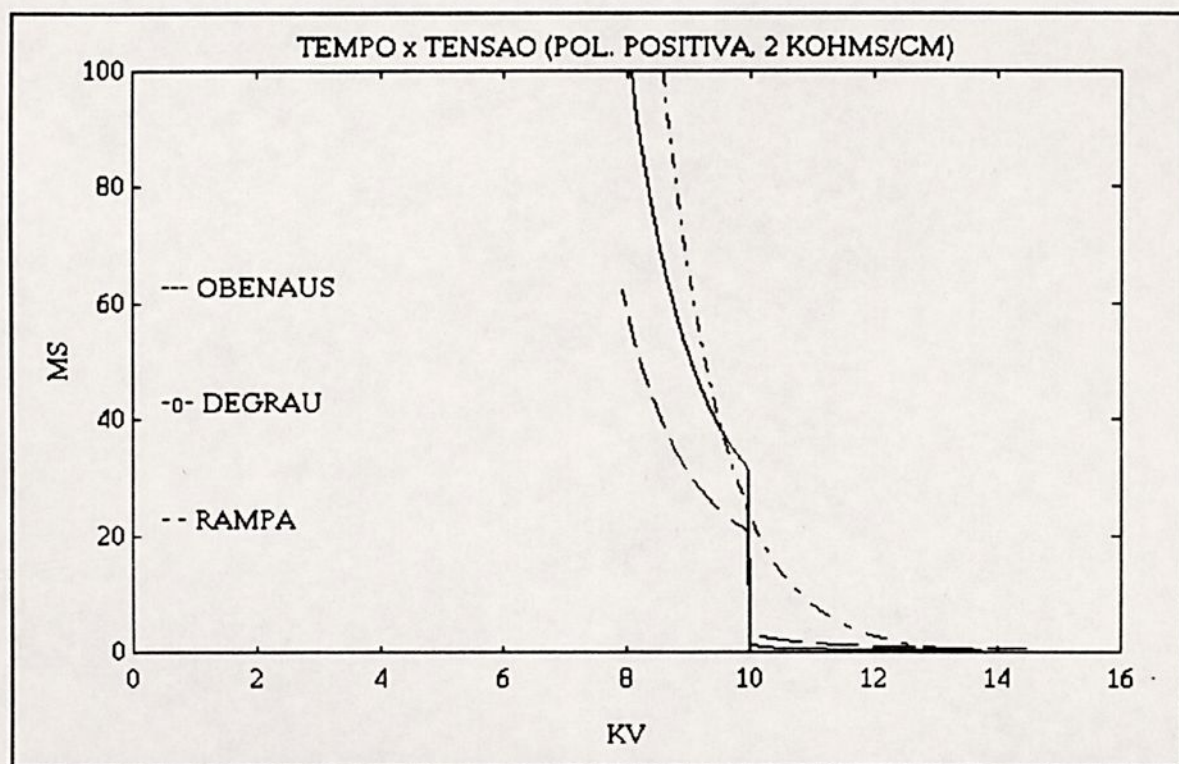


Figura 6.6 - Tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, 2 [KΩ/cm], polaridade positiva.

Conservando-se a resistividade superficial do eletrólito no valor de 2 [KΩ/cm] e utilizando polaridade negativa, foram obtidos os dados apresentados nas tabelas 6.4, 6.5 e 6.6. Para o modelo sem alteração na profundidade, a tensão mínima para a ocorrência do flashover é de 8 [KV], menor que no caso semelhante com polaridade positiva (9 [KV]). Com a diminuição da seção transversal, aumenta-se o valor da tensão necessário para a ocorrência do flashover. Assim, com a introdução do degrau no modelo físico, essa tensão atinge o valor de 10 [KV],

e no caso da introdução da rampa, esse valor é de 9 [KV]. Os dados, apresentados nas últimas três tabelas, confirmam conclusões de Maldonado [17], [18], que afirmam que os valores de tempo de ordens de grandeza diferentes para um mesmo valor de tensão são característicos da polaridade positiva.

Tabela 6.4 - Dados experimentais sem alteração na profundidade do modelo físico, polaridade negativa - 2 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
8,0	30,00	27,50	28,00	28,00	29,00
9,0	18,10	16,55	16,60	16,20	16,50
10,0	9,95	9,12	9,56	9,06	9,00
11,0	5,58	5,12	6,24	4,74	4,84

Tabela 6.5 - Dados experimentais com a introdução do degrau no modelo físico, polaridade negativa - 2 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
10,0	22,90	22,40	22,00	22,80	23,00
11,0	17,70	18,05	17,70	18,15	18,75

Tabela 6.6 - Dados experimentais com a introdução da rampa no modelo físico, polaridade negativa - 2 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
9,0	26,40	26,30	26,50	23,40	23,90
10,0	21,00	17,85	18,05	19,05	19,00
11,0	12,85	12,90	12,45	12,00	12,05

Na figura 6.7 fica evidente que para polaridade negativa,

não ocorrem valores de tempo discrepantes para um mesmo valor de tensão de flashover. Os gráficos dessa figura foram obtidos das três tabelas anteriores, que trazem dados de tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, para resistividade superficial do eletrólito de 2 [K Ω /cm] e polaridade negativa.

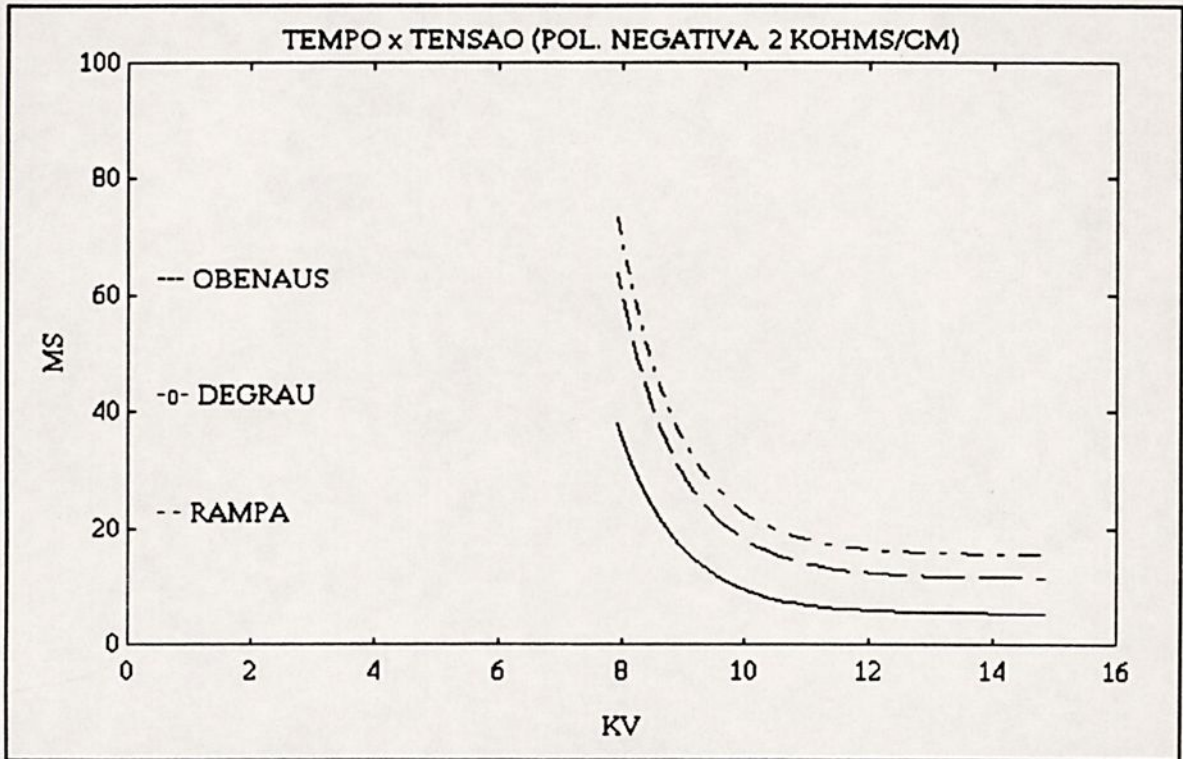


Figura 6.7 - Tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, 2 [K Ω /cm], polaridade negativa.

Utilizando-se resistividade superficial da solução eletrolítica de 3 [K Ω /cm] e polaridade positiva, o modelo físico, sem alteração na profundidade, apresenta tensão mínima de 9 [KV] para a ocorrência do flashover. Apresenta, também, valores discrepantes de tempo do fenômeno para a tensão de 11 [KV].

Com a introdução de degrau a 5 [cm] do eletrodo de alta tensão, a tensão mínima de flashover eleva-se para 11 [KV]. Como a montagem experimental permite ensaios com tensões até esse valor, obteve-se dados apenas para um valor de tensão.

Colocando-se a rampa na mesma posição em que estava o

degrau, a tensão mínima de flashover, atinge o valor de 10 [KV]. Sendo que para esse valor de tensão, os valores do tempo do fenômeno são menores do aqueles que foram obtidos para o modelo físico sem alteração em sua profundidade.

Todas essas considerações foram baseadas nas tabelas 6.7, 6.8 e 6.9, apresentadas a seguir.

Tabela 6.7 - Dados experimentais sem alteração na profundidade do modelo físico, polaridade positiva - 3 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
9,0	40,70	43,50	40,70	43,00	43,30
10,0	30,95	32,35	30,00	31,25	31,00
11,0	22,90	24,58	22,92	22,82	23,10
11,0	1,25	1,04	0,68		

Tabela 6.8 - Dados experimentais com a introdução do degrau no modelo físico, polaridade positiva - 3 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
11,0	13,14	8,50	10,12	12,48	10,24

Tabela 6.9 - Dados experimentais com a introdução da rampa no modelo físico, polaridade positiva - 3 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
10,0	24,00	26,30	25,10	24,30	25,60
11,0	20,25	19,35	21,30	19,15	20,30

Os gráficos de tempo do fenômeno em função da tensão de

flashover, com resistividade superficial do eletrólito de 3 [K Ω /cm] e polaridade negativa, são mostrados na figura 6.8. As duas curvas, apresentadas nessa figura, demonstram que abaixo do valor de 11 [KV], o tempo do fenômeno é menor com a introdução da rampa do que para o modelo sem alteração na profundidade. Acima de 11 [KV], essa situação se inverte, por causa da descontinuidade nos valores de tempo do fenômeno para o modelo físico sem alteração na profundidade.

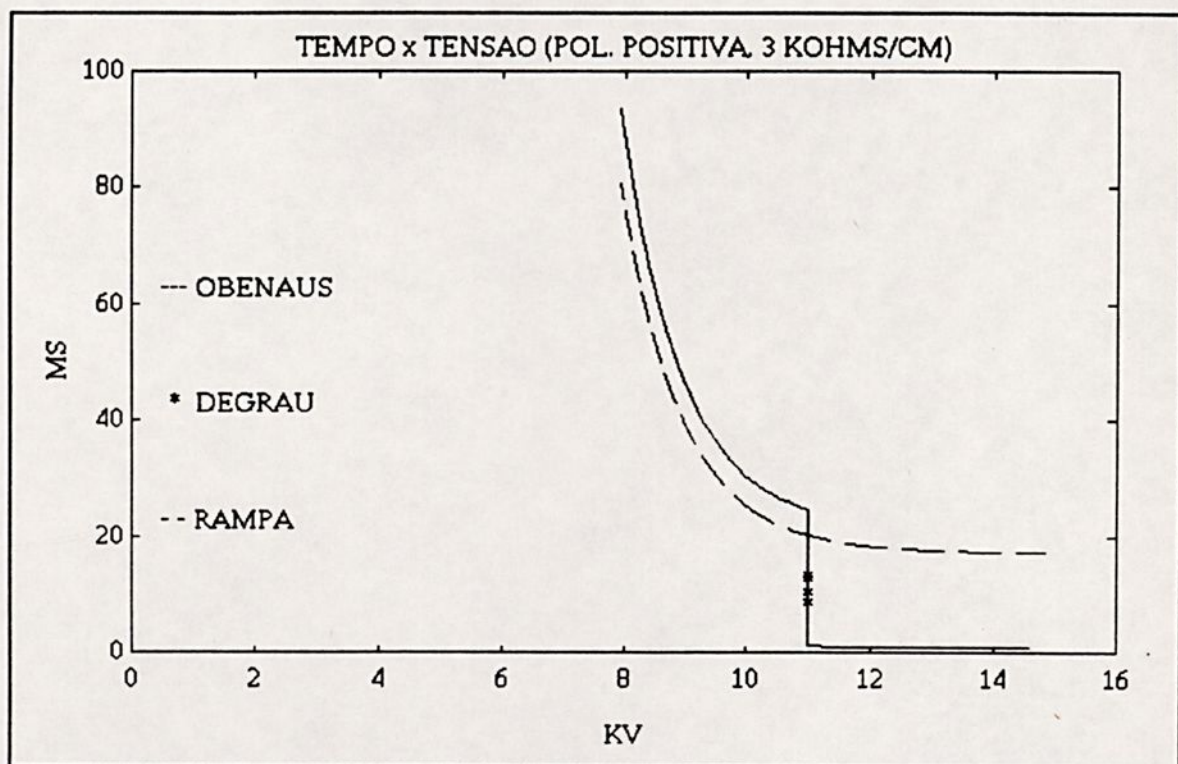


Figura 6.8 - Tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, 3 [K Ω /cm], polaridade positiva.

Para polaridade negativa e resistividade 3 [K Ω /cm], a diminuição da seção transversal do modelo físico provoca o aumento da tensão mínima de flashover. No caso da introdução do degrau no modelo físico, obtêm-se valores de tempo do fenômeno com variações percentuais grandes, para a tensão de 10 [KV]. Assim, por causa da alteração brusca na profundidade, obtém-se resultados com características observadas, anteriormente, por outros autores (Pissolato [16] e Maldonado [17], [18]), somente para polaridade positiva.

Tabela 6.10 - Dados experimentais sem alteração na profundidade do modelo físico, polaridade negativa - 3 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
8,0	33,00	33,30	31,20	33,00	33,90
9,0	18,80	18,15	20,25	18,55	20,15
10,0	10,80	11,00	11,60	10,65	11,40
11,0	6,31	6,10	6,80	6,58	6,76

Tabela 6.11 - Dados experimentais com a introdução do degrau no modelo físico, polaridade negativa - 3 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
10,0	68,50				
10,0	36,50	31,50	37,00	37,50	36,80
11,0	19,10	19,10	17,00	21,80	17,05

Tabela 6.12 - Dados experimentais com a introdução da rampa no modelo físico, polaridade negativa - 3 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
10,0	31,50	28,50	28,10	30,10	29,50
11,0	15,00	14,55	15,05	14,50	14,75

A figura 6.9 apresenta os gráficos, das três situações analisadas com resistividade superficial do eletrólito de 3 [KΩ/cm] e polaridade negativa. Observa-se uma descontinuidade nos valores de tempo do fenômeno para a tensão de 10 [KV], na curva do modelo físico com a introdução do degrau. Para o modelo sem alteração na profundidade, esse comportamento só havia sido observado para polaridade positiva (Pissolato [16] e Maldonado [17], [18]).

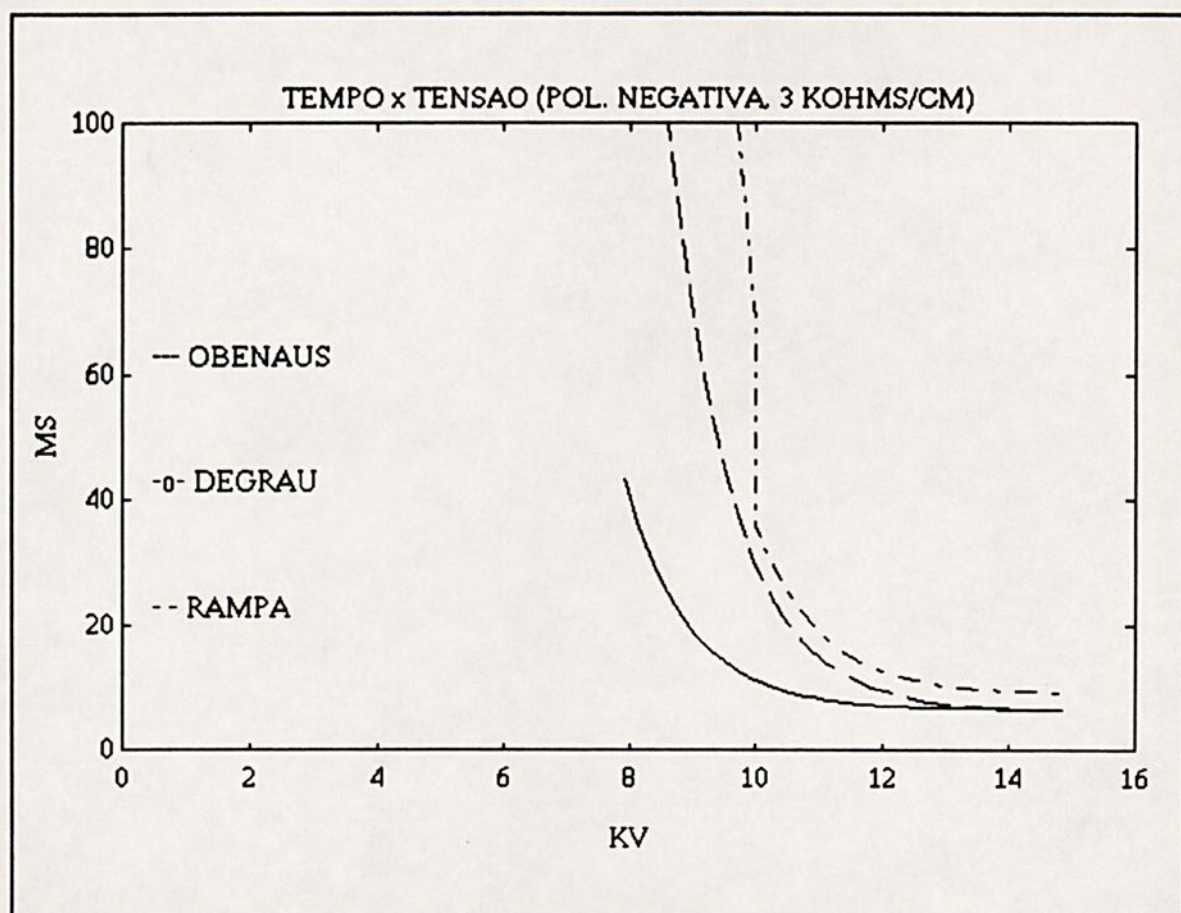


Figura 6.9 - Tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, 3 [KΩ/cm], polaridade negativa.

Utilizando-se a resistividade superficial do eletrólito de 4 [KΩ/cm] e polaridade positiva, o fenômeno de flashover não ocorre para o modelo físico com a introdução de degrau, quando se utiliza valores de tensão abaixo ou iguais a 11 [KV]. Como esse é o limite de tensão imposto pela montagem experimental, não foi possível elevar o valor da tensão, buscando-se obter dados do fenômeno para esse caso. Nos outros dois casos (modelo sem alteração na profundidade e modelo com a introdução da rampa), a tensão mínima para a ocorrência do flashover é de 10 [KV]. Também, para esses dois casos, há grandes variações percentuais nos valores de tempo do fenômeno para a tensão de 11 [KV].

Esses comentários foram baseados nas informações contidas nas tabelas 6.13 e 6.14 apresentadas a seguir.

Tabela 6.13 - Dados experimentais sem alteração na profundidade do modelo físico, polaridade positiva - 4 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
10,0	33,10	32,50	33,25	33,00	32,80
11,0	7,90	7,35	7,30	7,40	7,50
11,0	2,30	0,95	1,35	1,36	

Tabela 6.14 - Dados Experimentais com a introdução da rampa no modelo físico, polaridade positiva - 4 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
10,0	26,50	28,00	26,60	28,60	27,70
11,0	23,30	22,80			
11,0	4,45	4,78	3,58	3,44	4,60

A figura 6.10 mostra os gráficos do tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, para polaridade positiva e resistividade superficial do eletrólito de 4 [KΩ/cm]. Essas curvas apresentam descontinuidades nos valores do tempo do fenômeno para a tensão de 11 [KV]. Abaixo de 10 [KV], o tempo do fenômeno é menor para o modelo com a introdução da rampa, do que para o modelo físico sem alteração na profundidade.

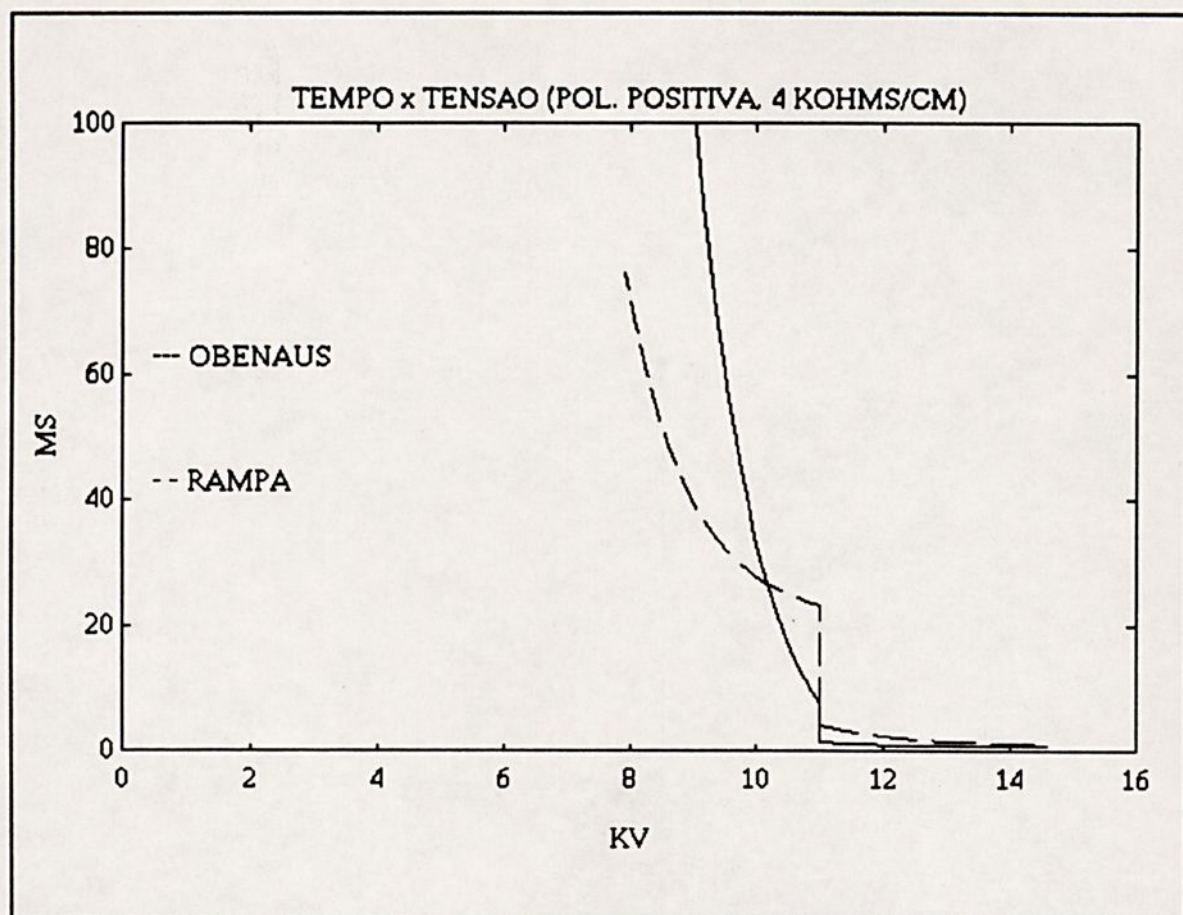


Figura 6.10 - Tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, 4 [KΩ/cm], polaridade positiva.

As tabelas 6.15, 6.16 e 6.17 apresentam valores de tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, para polaridade negativa e resistividade superficial do eletrólito de 4 [KΩ/cm]. O destaque desses dados, apresentados a seguir, são aqueles referentes ao modelo físico com a introdução do degrau. Nesse caso, para a tensão de 11 [KV], os valores de tempo do fenômeno tem uma grande variação percentual. Aliás, esse foi o único valor de tensão da tabela 6.16, mas tem grande importância por apresentar um comportamento semelhante aos ensaios realizados, com polaridade negativa e resistividade superficial de 3 [KΩ/cm], no modelo com a introdução do degrau.

Tabela 6.15 - Dados experimentais sem alteração na profundidade do modelo físico, polaridade negativa - 4 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
9,0	21,00	21,80	22,00	21,70	21,60
10,0	14,20	14,90	15,00	13,05	13,25
11,0	8,25	7,55	7,15	7,85	7,80

Tabela 6.16 - Dados experimentais com a introdução do degrau no modelo físico, polaridade negativa - 4 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
11,0	66,00				
11,0	26,50	25,00	31,30	26,20	27,00

Tabela 6.17 - Dados experimentais com a introdução da rampa no modelo físico, polaridade negativa - 4 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
10,0	32,50	31,50	32,10	33,20	33,50
11,0	19,50	17,25	19,55	19,20	19,60

A figura 6.11 apresenta os gráficos do tempo do fenômeno em função da tensão de flashover. As duas curvas apresentadas não têm descontinuidades, sendo este comportamento semelhante a resultados obtidos por Maldonado [17], para polaridade negativa. Para o modelo com a introdução do degrau, são apresentados apenas alguns pontos, para a tensão de 11 [KV]. Isso ocorreu porque essa era a tensão mínima de flashover nesse

caso, e ao mesmo tempo a tensão máxima permitida pela montagem experimental utilizada. Esses pontos, porém, apresentam variação percentual muito grande para os valores de tempo com a tensão de 11 [KV]. Assim, a introdução do degrau, nesse caso, alterou o comportamento dos resultados obtidos em relação às outras duas situações apresentadas (OBENSAUS e RAMPA).

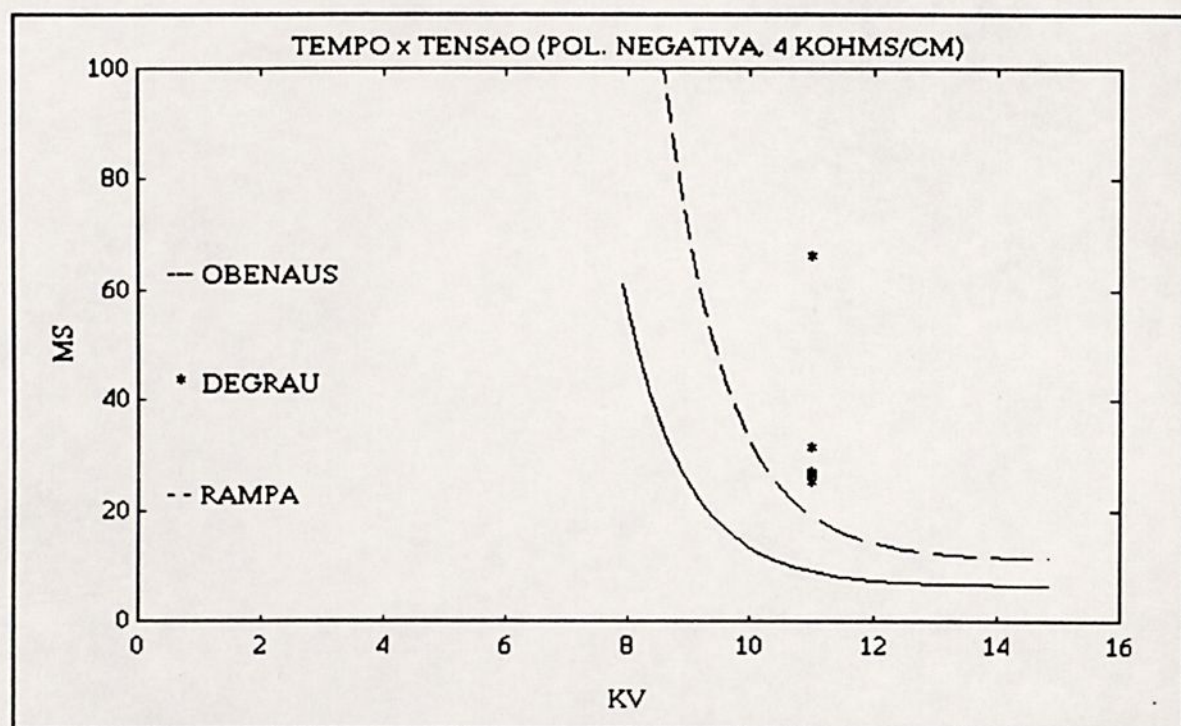


Figura 6.11 - Tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, 4 [k Ω /cm], polaridade negativa.

Com o aumento da resistividade superficial do eletrólito, aumenta a tensão mínima de flashover. Assim, utilizando-se resistividade superficial de 5 [k Ω /cm] e polaridade positiva, a tensão mínima de flashover, para o modelo sem alteração na profundidade, é de 10 [KV]. Com a introdução da rampa, essa tensão atinge o valor de 11 [KV]. E com a utilização do degrau, ela supera o valor de 11 [KV], superando, também, o limite máximo de tensão permitido pela montagem experimental. Novamente, observa-se grandes variações percentuais nos valores de tempo do fenômeno para um mesmo valor de tensão, característica marcante desses dados para polaridade positiva.

Tabela 6.18 - Dados experimentais sem alteração na profundidade do modelo físico, polaridade positiva - 5 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
10,0	30,00	30,25	29,75	31,35	30,50
11,0	21,50	22,10	21,65	22,35	22,30
11,0	1,55				

Tabela 6.19 - Dados experimentais com a introdução da rampa no modelo físico, polaridade positiva - 5 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
11,0	26,30	26,65			
11,0	14,05	14,70	9,25	3,20	4,25

A figura 6.12 apresenta resultados para resistividade superficial do eletrólito de 5 [KΩ/cm] e polaridade positiva. Com o aumento da resistividade superficial, aumenta a tensão mínima de flashover. Por causa disso, para o modelo com a introdução da rampa, são obtidos somente alguns pontos dos valores de tempo do fenômeno em função da tensão de flashover. Esses pontos foram conseguidos para a tensão de 11 [KV], tendo diferenças percentuais grandes nos valores de tempo apresentados. Para o modelo sem alteração na profundidade, obtém-se uma curva, cuja característica principal é uma descontinuidade para a tensão de 11 [KV]. Pode-se afirmar que a ocorrência de descontinuidades nos valores de tempo do fenômeno, para um determinado valor de tensão, é uma característica marcante dos gráficos do tempo do fenômeno em função do flashover, quando a polaridade é positiva. Na maioria dos casos, mesmo com alterações na profundidade do modelo físico, essa característica continua presente.

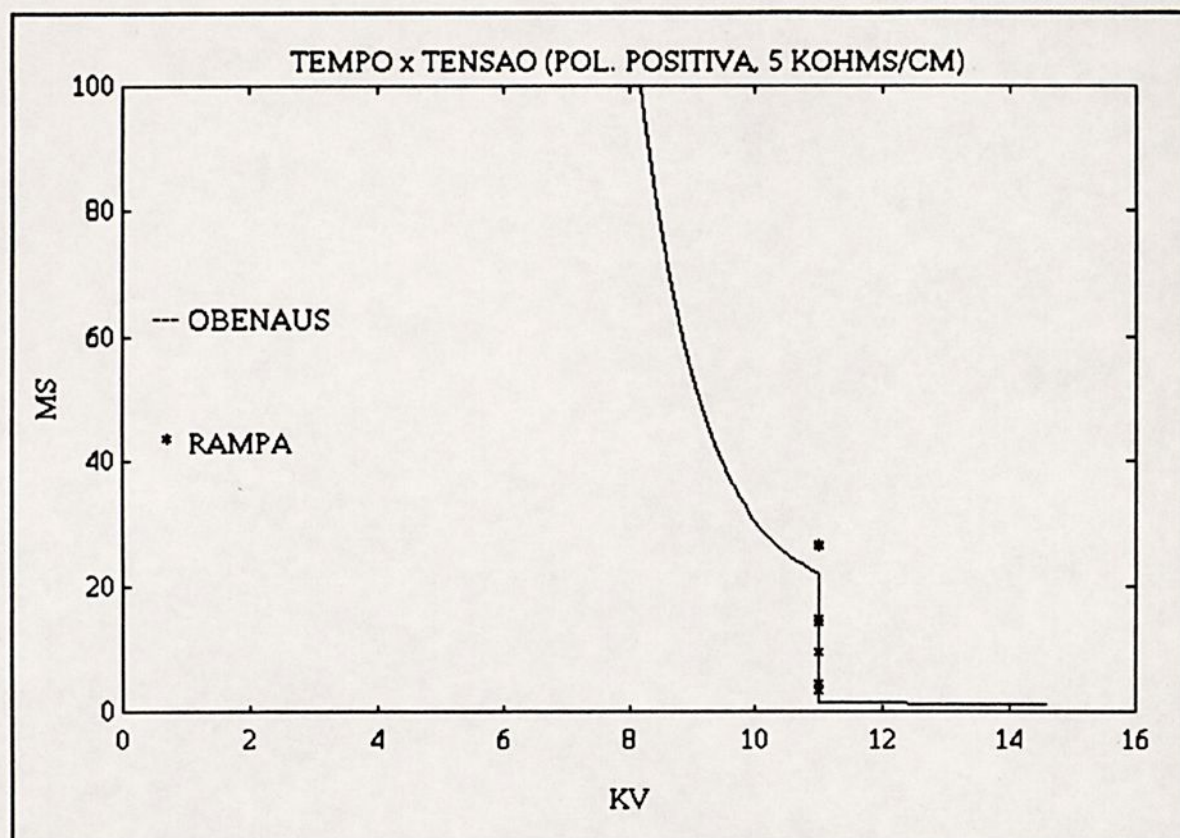


Figura 6.12 - Tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, 5 [KΩ/cm], polaridade positiva.

As próximas duas tabelas foram obtidas com resistividade superficial do eletrólito de 5 [KΩ/cm] e polaridade negativa. Os resultados, para o modelo sem alteração na profundidade, são mostrados na tabela 6.20. Nesse caso, a tensão mínima de flashover é de 9 [KV], e os valores de tempo apresentam pequenas variações percentuais, para um mesmo valor de tensão. Com a introdução da rampa, os valores de tempo do fenômeno, para um mesmo valor de tensão, apresentam, também, pequenas variações percentuais (em torno de 6%). Porém, a tensão mínima de flashover atinge o valor de 11 [KV], fazendo com que se obtenha dados do tempo do fenômeno, somente para esse valor de tensão. No caso da introdução do degrau, não foi possível analisar o fenômeno de flashover, pois a tensão mínima ultrapassou o valor de 11 [KV], limite da montagem experimental.

Tabela 6.20 - Dados experimentais sem alteração na profundidade do modelo físico, polaridade negativa - 5 KΩ/cm.

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
9,0	25,00	24,50	26,60	26,50	27,00
10,0	19,80	19,50	20,40	19,20	19,40
11,0	12,40	11,95	12,55	12,40	12,40

Tabela 6.21 - Dados experimentais com a introdução da rampa no modelo físico, polaridade negativa - 5 [KΩ/cm].

<u>TENSÃO (KV)</u>	<u>TEMPO DO FENÔMENO (ms)</u>				
11,0	29,20	30,10	29,15	30,80	29,50

A apresentação, em forma de gráficos, dos resultados das tabelas 6.20 e 6.21, é feita através da figura 6.13. Assim, utilizando-se o modelo com a introdução da rampa, obtém-se alguns pontos agrupados em torno do valor de 30 [ms], para a tensão de 11 [KV].

Para o modelo sem alteração na profundidade, obtém-se uma curva de formato exponencial, sem descontinuidade nos valores de tempo para um determinado valor de tensão.

Com a utilização da polaridade negativa, a maioria das curvas do tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, apresentam um comportamento exponencial. Isso só é alterado pela introdução do degrau, pois isso faz com que as curvas apresentem descontinuidades em valores de tempo do fenômeno, para um mesmo valor de tensão. Assim, com esse tipo de alteração brusca da seção transversal do modelo físico, obtém-se resultados com características diferentes das outras duas situações analisadas (OBENAUS e RAMPA).

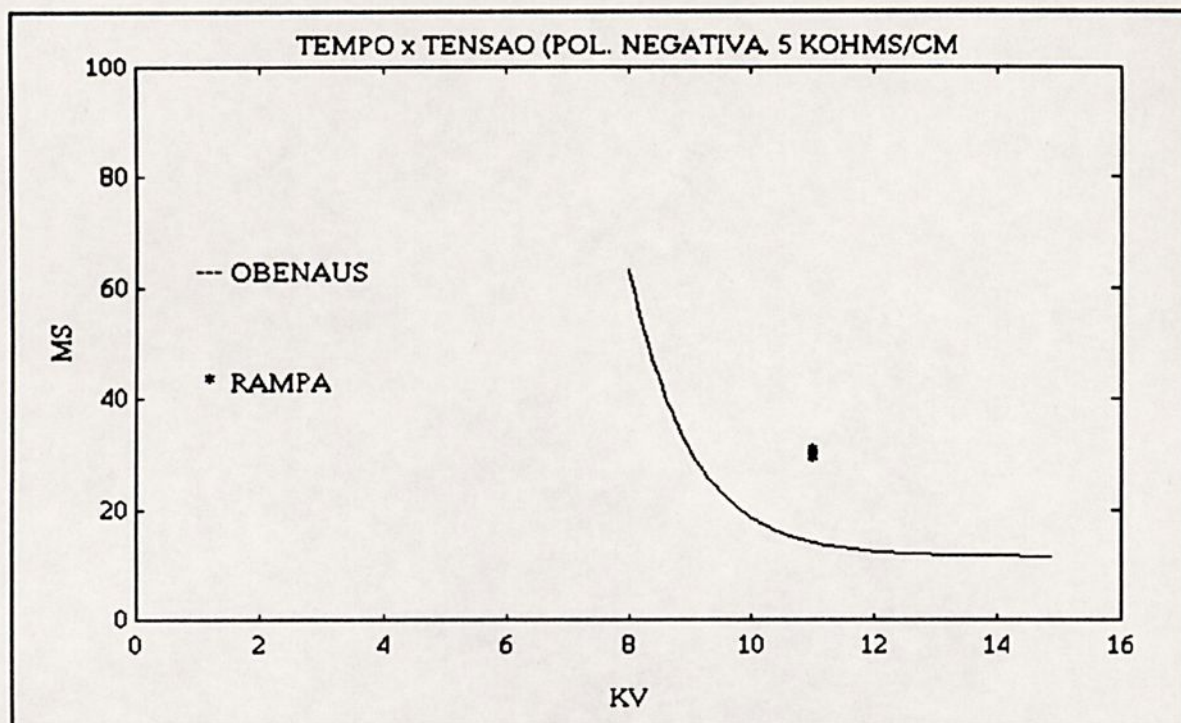


Figura 6.13 - Tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, 5 [KΩ/cm], polaridade negativa.

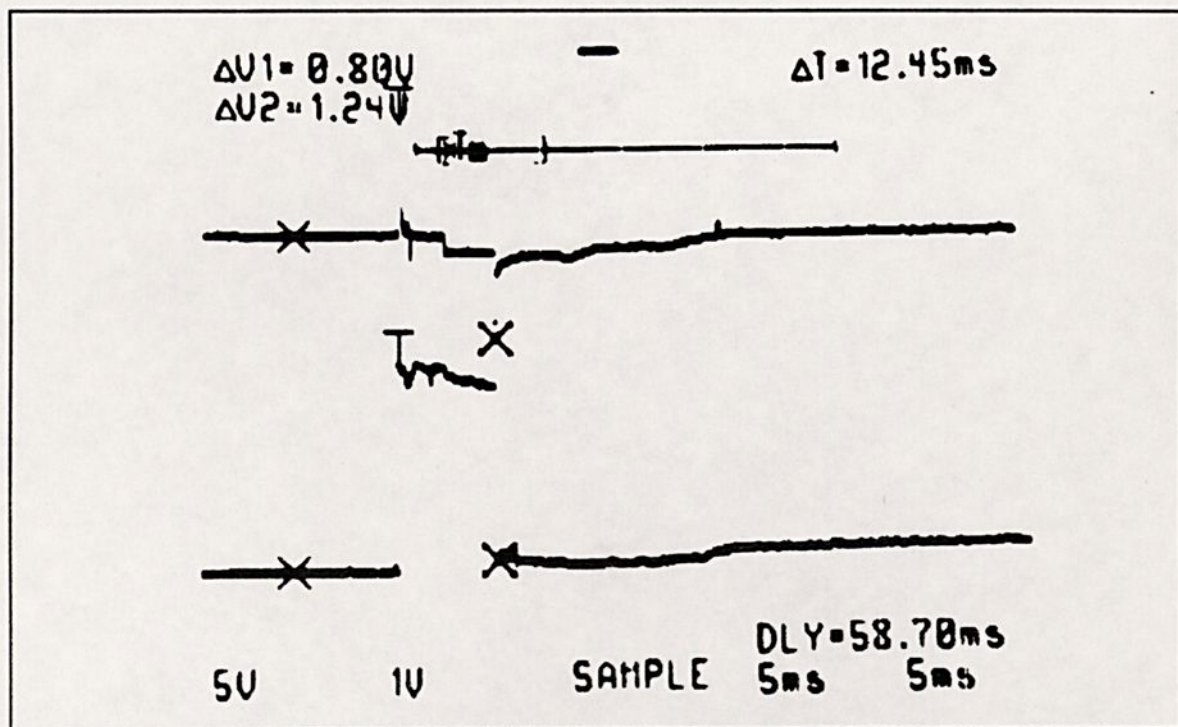


Figura 6.14 - Sinais de corrente (invertido) e tensão que gerou descontinuidade em gráficos do tempo em função da tensão.

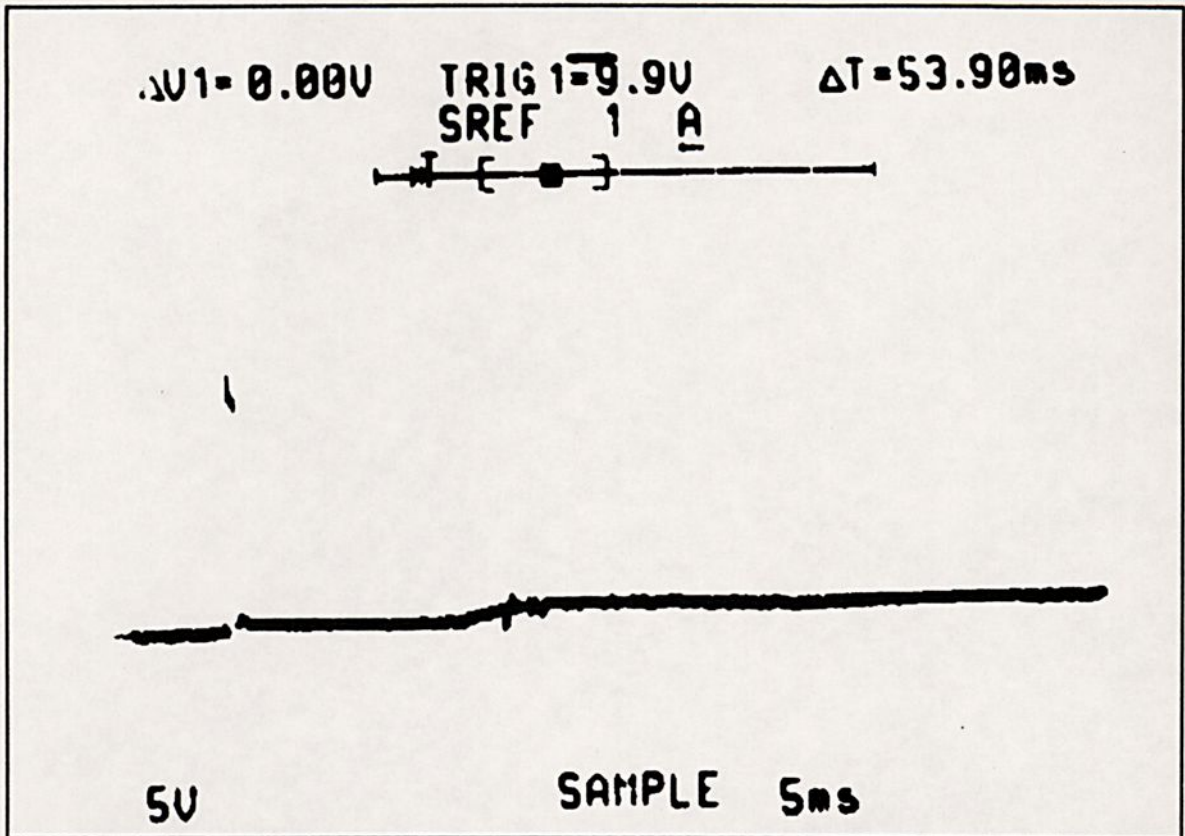


Figura 6.15 - Sinal de tensão que provocou descontinuidade em gráfico do tempo em função da tensão.

As duas últimas figuras (6.14 e 6.15) apresentam sinais que provocaram descontinuidades em gráficos do tempo do fenômeno em função da tensão de flashover, para polaridade positiva. A figura 6.14 mostra os sinais de corrente e de tensão com um valor de tempo de, aproximadamente, 5 [ms], para uma resistividade superficial do eletrólito de 3 [K Ω /cm], com a introdução do degrau. Os outros valores de tempo para esse caso, são da ordem de 10 [ms]. A tensão, utilizada nesse ensaio, foi de 11 [KV].

A figura 6.15 mostra o sinal de tensão de flashover para a resistividade superficial do eletrólito de 2 [K Ω /cm], com a introdução do degrau no modelo físico. Nesse ensaio, para a tensão de 11 [KV], o valor do tempo do fenômeno é de 0,45 [ms], enquanto para os outros sinais, para essa tensão, o tempo tem ordem de grandeza de 20 [ms].

3 - Os dados experimentais (velocidade em função da elongação da descarga)

Os dados de velocidade em função da elongação da descarga foram coletados com o uso dos fotomultiplicadores através das janelas existentes no modelo físico. As fibras ópticas instaladas nas janelas citadas registravam o sinal luminoso do fenômeno de flashover. Os fotomultiplicadores transformavam os sinais luminosos em sinais elétricos que eram registrados pelo osciloscópio de memória. Assim, conseguia-se obter a diferença de tempo entre os picos de luminosidade para duas janelas adjacentes. Como as distâncias entre as janelas são conhecidas, a velocidade era obtida facilmente. Os dados de velocidade em função da elongação também sofreram uma interpolação exponencial, pois Maldonado [17], [18] e Pissolato [26], [28], descrevem este mesmo comportamento nos seus resultados experimentais.

Para análise da velocidade do fenômeno, utilizou-se três valores de resistência superficial: 2, 3 e 5 [K Ω /cm]. Para cada valor de resistência superficial foram feitos ensaios com o modelo sem alteração na profundidade, com a introdução do degrau e com a introdução da rampa. Nestes ensaios foram utilizadas a polaridade positiva e a polaridade negativa. A tensão aplicada em todos os ensaios foi de 10 [KV]. Com esse valor de tensão, obteve-se uma quantidade de casos suficiente para a análise da velocidade da descarga nas três situações propostas neste trabalho (OBENAUS, DEGRAU e RAMPA). Foi possível utilizar o valor de 10 [KV], porque retirou-se da montagem experimental, a sonda resistiva, necessária para a obtenção do sinal de tensão. Assim, apresenta-se a seguir os dados de velocidade coletados e as curvas obtidas desses dados.

Os resultados obtidos, para polaridade positiva e resistividade superficial do eletrólito de 2 [K Ω /cm], são apresentados nas tabelas 6.22, 6.23 e 6.24. A velocidade da descarga, no início do percurso, para o modelo com a introdução do degrau, tem o maior valor entre as três situações analisadas. O modelo sem alteração na profundidade tem o menor

valor inicial de velocidade da descarga. Assim, conforme a alteração da seção transversal torna-se mais brusca, aumenta-se a velocidade da descarga no início do percurso (entre a janela logo abaixo do eletrodo de alta tensão, e a janela a 2 [cm] desse mesmo eletrodo). Com isso, no modelo sem alteração na profundidade, a velocidade tem um aumento mais acentuado, pois nos três casos analisados, ela atinge o valor de 50000 [cm/s] no final do percurso.

Tabela 6.22 - Velocidade do fenômeno, 2 [KΩ/cm], polaridade positiva, sem alteração na profundidade do modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	324,68	337,84	289,02	314,47	277,01
2-4	469,48	440,53	480,77	432,90	452,49
4-6	943,40	854,70	854,70	925,93	1030,93
6-7	4545,45	3571,43	5555,56	6250,00	7142,86
7-8	16666,67	12500,00	16666,67	16666,67	12500,00
8-9	25000,00	16666,67	25000,00	25000,00	25000,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Tabela 6.23 - Velocidade do fenômeno, 2 [KΩ/cm], polaridade positiva, introdução do degrau no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	452,89	452,89	413,22	256,41	221,73
2-4	531,91	495,05	343,64	518,13	487,80
4-6	909,09	884,96	787,40	1041,67	980,39
6-7	3333,33	3125,00	2777,77	3125,00	5000,00
7-8	8333,33	12500,00	7142,86	7142,86	12500,00
8-9	16666,67	25000,00	16666,67	25000,00	25000,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Tabela 6.24 - Velocidade do fenômeno, 2 [KΩ/cm], polaridade positiva, introdução da rampa no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	404,04	380,23	221,24	387,60	312,50
2-4	392,16	374,53	429,18	418,41	436,68
4-6	1149,43	961,54	800,00	900,00	892,86
6-7	8333,33	3846,15	3125,00	2631,58	2941,18
7-8	12500,00	7148,86	8333,33	10000,00	10000,00
8-9	16666,67	12500,00	12500,00	12500,00	12500,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

A figura 6.16 apresenta os gráficos da velocidade da descarga em função da elongação dessa descarga. Observa-se, claramente, o crescimento mais acentuado da velocidade para o modelo físico sem alteração na profundidade. Já para as outras situações, as duas curvas se confundem, tendo comportamentos semelhantes.

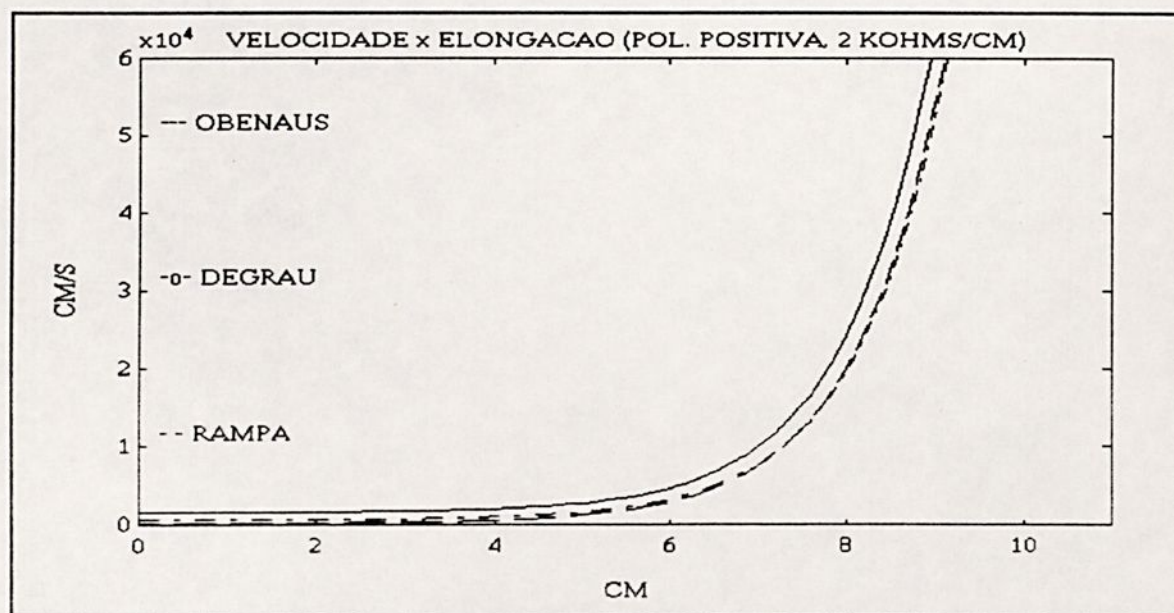


Figura 6.16 - Velocidade do fenômeno, 2 [KΩ/cm], polaridade positiva.

Para polaridade negativa e resistividade do eletrólito de 2 [KΩ/cm], os resultados obtidos apresentam comportamento inverso àquele apresentado para polaridade positiva, com o mesmo valor de resistividade superficial. Ou seja, o modelo sem alteração na profundidade apresenta os maiores valores iniciais de velocidade, apresentando o crescimento menos acentuado das três situações estudadas. Desta forma, o modelo com a introdução do degrau apresenta os menores valores iniciais de velocidade e o crescimento mais acentuado das três situações. Tudo isso pode ser comprovados nas tabelas 6.25, 6.26 e 6.27.

Tabela 6.25 - Velocidade do fenômeno, 2 [KΩ/cm], polaridade negativa, sem alteração na profundidade do modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	164,61	163,27	149,25	171,67	186,92
2-4	281,69	291,55	312,50	222,22	248,45
4-6	666,67	606,06	689,66	588,24	615,38
6-7	2173,91	3846,15	1851,85	3125,00	3125,00
7-8	8333,33	8333,33	7142,86	7142,86	8333,33
8-9	12500,00	16666,67	25000,00	25000,00	25000,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Tabela 6.26 - Velocidade do fenômeno, 2 [KΩ/cm], polaridade negativa, introdução do degrau no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	83,61	114,68	105,26	117,65	116,28
2-4	218,58	233,92	248,45	243,90	243,90
4-6	975,61	1030,93	1408,45	1136,36	1250,00
6-7	1470,59	1315,79	1785,71	1388,89	1666,67
7-8	12500,00	7142,86	10000,00	10000,00	8333,33
8-9	50000,00	25000,00	25000,00	25000,00	50000,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Tabela 6.27 - Velocidade do fenômeno, 2 [KΩ/cm], polaridade negativa, introdução da rampa no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	84,57	85,65	115,61	117,30	117,65
2-4	213,90	243,90	250,00	222,22	243,90
4-6	440,53	471,70	534,76	564,97	505,05
6-7	4545,45	2777,78	3846,15	3125,00	2941,18
7-8	6250,00	10000,00	10000,00	5555,56	8333,33
8-9	50000,00	50000,00	50000,00	25000,00	50000,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

A figura 6.17 mostra que, para os modelos com alteração na profundidade, o crescimento da velocidade é mais acentuado, do que para a situação sem alteração na profundidade. Os gráficos dessa figura, foram construídos através de interpolações exponenciais, feitas com os dados das três tabelas, para resistividade superficial do eletrólito de 2 [KΩ/cm] e polaridade negativa.

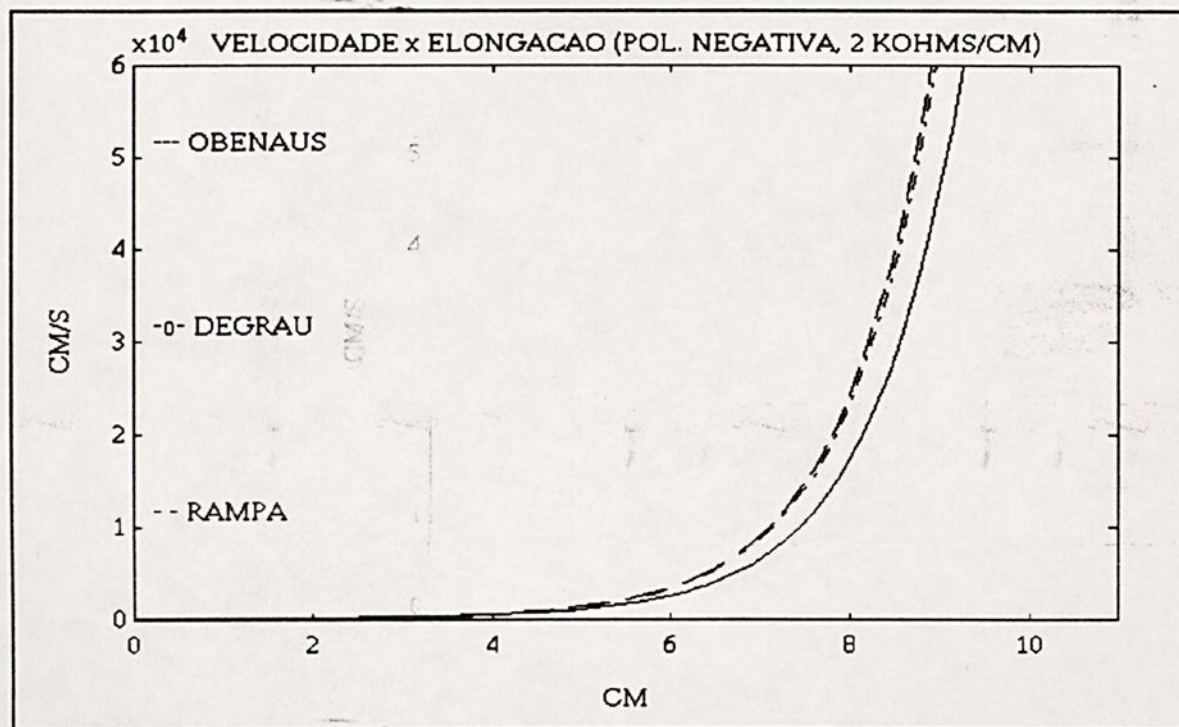


Figura 6.17 - Velocidade do fenômeno, 2 [KΩ/cm], polaridade negativa.

As próximas três tabelas (6.28, 6.29 e 6.30) apresentam os dados da velocidade da descarga em função da elongação dessa descarga, com resistividade superficial do eletrólito de 3 [K Ω /cm] e polaridade positiva. Como a velocidade final tem o mesmo valor para as três situações apresentadas, o modelo sem alteração na profundidade, tem o crescimento menos acentuado, pois seus valores iniciais são os maiores entre as três tabelas. O modelo com a introdução do degrau tem o crescimento mais acentuado, para o conjunto de dados analisados, sendo que o modelo com a introdução da rampa tem um comportamento intermediário entre as outras duas situações.

Tabela 6.28 - Velocidade do fenômeno, 3 [K Ω /cm], polaridade positiva, sem alteração na profundidade do modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	330,58	307,69	312,50	320,00	317,46
2-4	597,01	588,24	625,00	597,01	615,38
4-6	1000,00	1025,64	1052,63	1111,11	1142,86
6-7	3333,33	3333,33	4000,00	4000,00	4000,00
7-8	6666,67	6666,67	6666,67	6666,67	6666,67
8-9	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Tabela 6.29 - Velocidade do fenômeno, 3 [K Ω /cm], polaridade positiva, introdução do degrau no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	127,80	152,09	129,03	124,22	130,72
2-4	219,78	220,99	181,00	178,57	186,92
4-6	555,55	563,38	547,95	454,54	465,12
6-7	2222,22	1818,18	2000,00	1666,67	1538,46
7-8	5000,00	5000,00	5000,00	6666,67	6666,67
8-9	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Tabela 6.30 - Velocidade do fenômeno, 3 [KΩ/cm], polaridade positiva, introdução da rampa no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	158,73	157,48	158,73	160,00	194,17
2-4	289,86	281,69	312,50	307,69	285,71
4-6	1666,67	1481,48	1600,00	1428,57	1379,31
6-7	2000,00	1666,67	1666,67	2000,00	2500,00
7-8	5555,56	5555,56	5000,00	5000,00	4000,00
8-9	25000,00	16666,67	25000,00	16666,67	16666,67
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

No entanto, as diferenças de crescimento da velocidade, entre as três tabelas anteriores, são observadas para os três primeiros valores de alongação. Ou seja, no início do caminho a ser percorrido pela descarga.

Por causa disso, na figura 6.18, a velocidade da descarga, acima de 4 [cm], apresenta valores maiores para o modelo sem alteração na profundidade, do que para as outras duas situações. Nesse caso ainda, os menores valores de velocidade, para um mesmo valor de alongação, estão na curva referente ao modelo com a introdução da rampa.

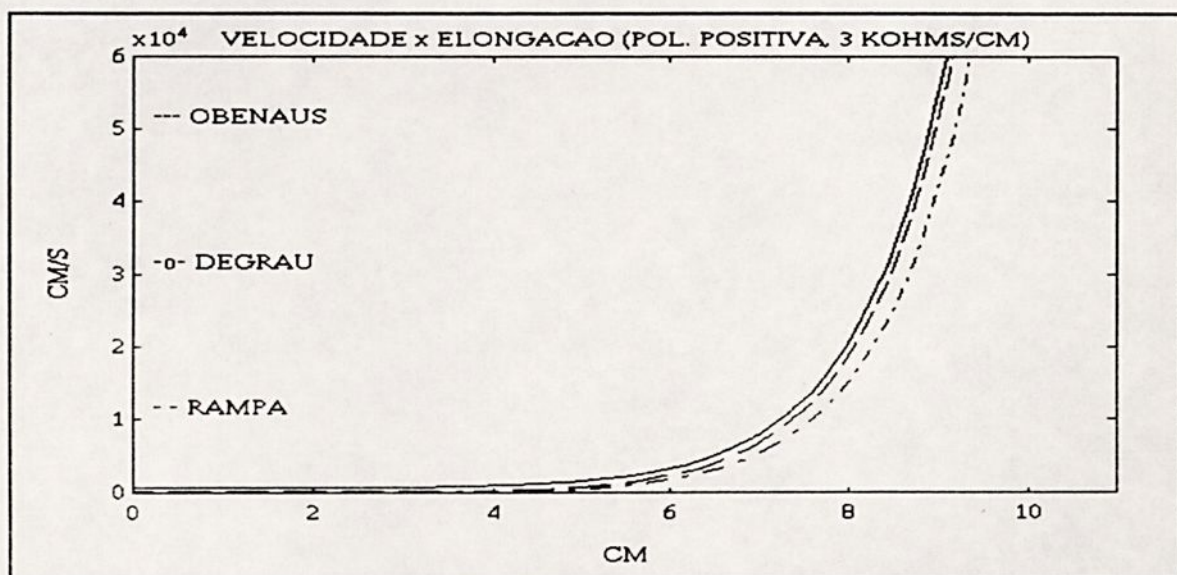


Figura 6.18 - Velocidade do fenômeno, 3 [KΩ/cm], polaridade positiva

As tabelas 6.31, 6.32 e 6.33 trazem os valores de velocidade de descarga em função da elongação, para a resistividade do eletrólito de 3 [KΩ/cm] e polaridade negativa. Os valores finais da velocidade, nessas três tabelas, são iguais. Já os valores iniciais e intermediários apresentam diferenças, que definem qual das três tabelas, terá um crescimento mais acentuado. Assim, o modelo físico sem alteração na profundidade apresenta o crescimento menos acentuado da velocidade da descarga. E o modelo com a introdução do degrau, o crescimento mais acentuado.

Tabela 6.31 - Velocidade do fenômeno, 3 [KΩ/cm], polaridade negativa, sem alteração na profundidade do modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	160,64	159,36	155,04	156,86	164,61
2-4	305,34	296,30	289,86	294,12	303,03
4-6	689,66	714,29	701,75	701,75	769,23
6-7	2857,14	2857,14	2222,22	2222,22	2222,22
7-8	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00
8-9	16666,67	16666,67	16666,67	16666,67	16666,67
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Tabela 6.32 - Velocidade do fenômeno, 3 [KΩ/cm], polaridade negativa, introdução do degrau no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	95,69	96,15	93,90	94,34	91,32
2-4	218,58	217,39	238,10	235,29	217,39
4-6	400,00	400,00	421,05	421,05	425,53
6-7	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
7-8	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00
8-9	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Tabela 6.33 - Velocidade do fenômeno, 3 [KΩ/cm], polaridade negativa, introdução da rampa no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	114,94	114,61	127,39	127,39	116,62
2-4	272,11	270,27	281,69	277,78	272,11
4-6	615,38	606,06	597,01	606,06	588,24
6-7	1538,46	1428,57	1666,67	1538,46	1428,57
7-8	6666,67	6666,67	6666,67	6666,67	6666,67
8-9	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

A figura 6.19 mostra que as alterações na seção transversal do modelo físico, provoca um crescimento mais acentuado, do que para o modelo sem alteração na profundidade. Assim, para um mesmo valor de alongação, acima de 4 [cm], a velocidade tem valores menores, para o modelo sem alteração do que para os outros dois casos. Esse comportamento é semelhante ao apresentado pela figura 6.17 (resistividade superficial de 2 [KΩ/cm] e polaridade negativa).

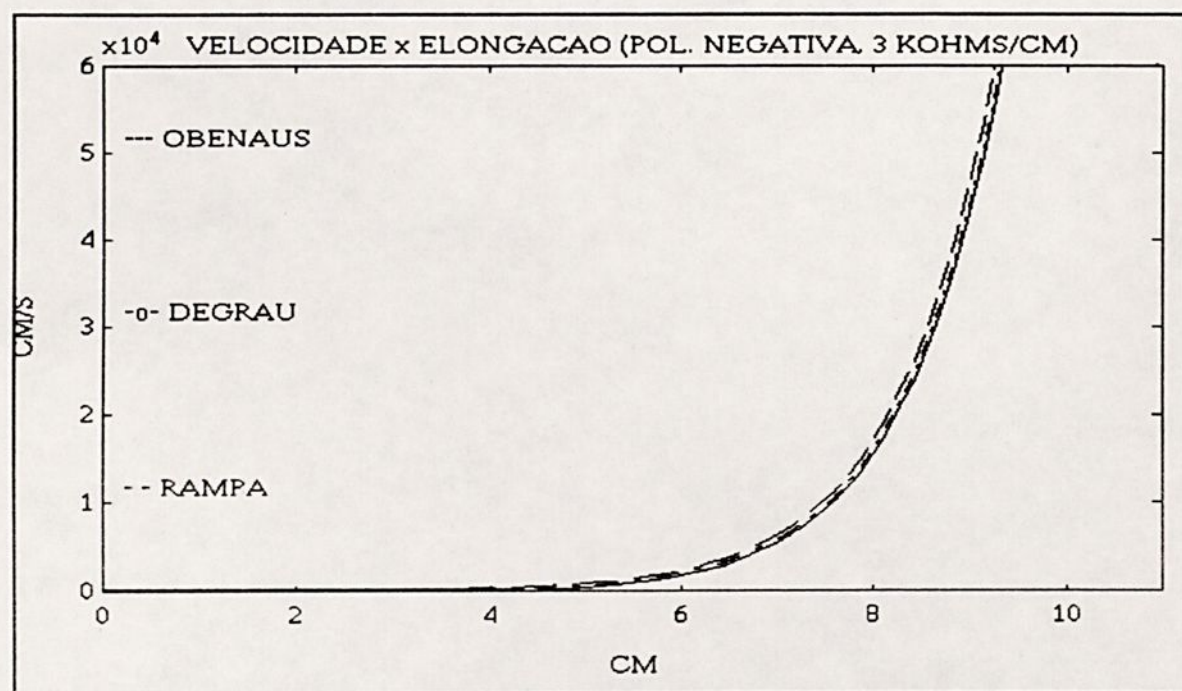


Figura 6.19 - Velocidade do fenômeno, 3 [KΩ/cm], polaridade negativa.

Com resistividade superficial do eletrólito de 5 [KΩ/cm] e polaridade positiva, não se obteve dados para o modelo físico com a introdução do degrau. Novamente, a tensão mínima de flashover superou o limite de tensão da montagem experimental, que era de 11 [KV]. Além disso, a tensão dos ensaios, para obtenção dos sinais de velocidade da descarga, foi padronizada em 10 [KV], neste trabalho. Nas duas tabelas apresentadas, a seguir, os valores iniciais da velocidade são maiores para o modelo sem alteração na profundidade. Porém, a velocidade da descarga, para o modelo físico com a introdução da rampa, tem um crescimento mais acentuado. Pois, quando a elongação atinge a metade do canal, esse modelo com alterações na seção transversal, apresenta os maiores valores de velocidade.

Tabela 6.34 - Velocidade do fenômeno, 5 [KΩ/cm], polaridade positiva, sem alteração na profundidade do modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	158,73	145,45	146,52	155,64	141,34
2-4	291,97	320,00	287,77	322,58	305,34
4-6	555,56	500,00	625,00	606,06	588,24
6-7	769,23	909,09	740,74	666,67	714,29
7-8	4000,00	3333,33	3333,33	4000,00	3333,33
8-9	12500,00	12500,00	12500,00	12500,00	12500,00
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Tabela 6.35 - Velocidade do fenômeno, 5 [KΩ/cm], polaridade positiva, introdução da rampa no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	130,71	106,10	128,62	119,40	121,58
2-4	204,08	200,00	198,02	161,29	160,00
4-6	952,38	655,74	547,95	615,38	597,01
6-7	4000,00	4000,00	5000,00	4000,00	5000,00
7-8	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00
8-9	16666,67	16666,67	16666,67	16666,67	16666,67
9-9,5	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

A figura 6.20 mostra as curvas obtidas das duas tabelas anteriores. Ou seja, essa figura apresenta os gráficos de velocidade da descarga em função da elongação, para uma resistividade superficial de 5 [K Ω /cm] e polaridade positiva. Observa-se, claramente, as diferenças entre as duas curvas, nos valores de velocidade para um mesmo valor de elongação. A introdução da rampa, no modelo físico, provoca um crescimento mais acentuado da velocidade, do que para o caso sem alterações na profundidade do modelo físico.

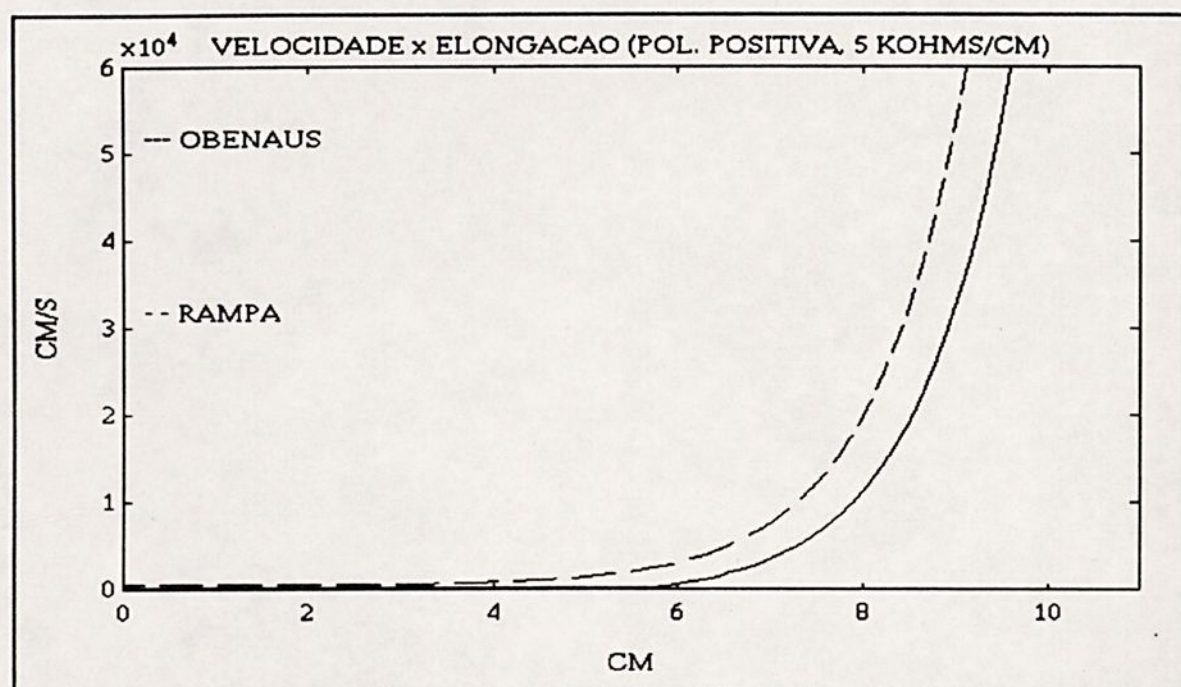


Figura 6.20 - Velocidade do fenômeno, 5 [K Ω /cm], polaridade positiva.

Em todos os casos anteriores, a velocidade final da descarga tem a tendência de atingir o valor de 50000 [cm/s]. Porém, para resistividade superficial do eletrólito de 5 [K Ω /cm] e polaridade negativa, essa tendência não se confirma. Repete-se, porém, a característica apresentada na maioria dos casos anteriores: com alterações na seção transversal do modelo físico, a velocidade cresce mais acentuadamente, do que para o modelo sem alteração na profundidade. Isso é observado nas próximas tabelas.

Tabela 6.36 - Velocidade do fenômeno, 5 [KΩ/cm], polaridade negativa, sem alteração na profundidade do modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	162,60	187,79	165,29	160,64	154,44
2-4	169,49	196,08	207,25	203,05	193,24
4-6	341,88	363,64	336,13	370,37	353,98
6-7	444,44	400,00	408,16	444,44	408,16
7-8	1818,18	2000,00	1333,33	1538,46	1818,18
8-9	5000,00	4000,00	3846,15	5555,56	5000,00
9-9,5	12500,00	12500,00	12500,00	25000,00	25000,00

Tabela 6.37 - Velocidade do fenômeno, 5 [KΩ/cm], polaridade negativa, introdução do degrau no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	62,70	89,29	87,91	85,84	91,95
2-4	112,68	120,48	121,21	118,00	112,04
4-6	243,90	273,97	264,90	239,52	258,06
6-7	909,09	909,09	833,33	714,28	714,28
7-8	5000,00	3333,33	2857,14	2857,14	2500,00
8-9	6250,00	8333,33	8333,33	7142,86	8333,33
9-9,5	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00

Tabela 6.38 - Velocidade do fenômeno, 5 [KΩ/cm], polaridade negativa, introdução da rampa no modelo físico.

<u>DIST.</u> <u>(cm)</u>	<u>VELOCIDADE</u> <u>(cm/s)</u>				
0-2	87,34	77,19	81,97	93,68	88,50
2-4	107,24	125,39	126,58	125,79	125,00
4-6	204,08	191,39	215,05	208,33	200,00
6-7	1250,00	1176,47	909,09	1250,00	1111,11
7-8	2500,00	2857,14	3333,33	3333,33	3333,33
8-9	6666,67	6250,00	5555,56	7142,86	6250,00
9-9,5	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00	25000,00

A análise gráfica, dos dados das três tabelas anteriores, é feita através dos gráficos da figura 6.21. Observa-se que diminuindo-se a seção transversal do modelo físico, a velocidade da descarga tem um crescimento mais acentuado em função da elongação da descarga. Essa é uma característica observada na maioria dos casos estudados neste item.

Pode-se afirmar, então, que as diferenças no comportamento da velocidade da descarga não têm influência direta da tensão, cujo valor permaneceu constante em 10 [KV]. Assim, neste capítulo, as características, da velocidade da descarga, são conseqüências das alterações no perfil da profundidade do modelo físico.

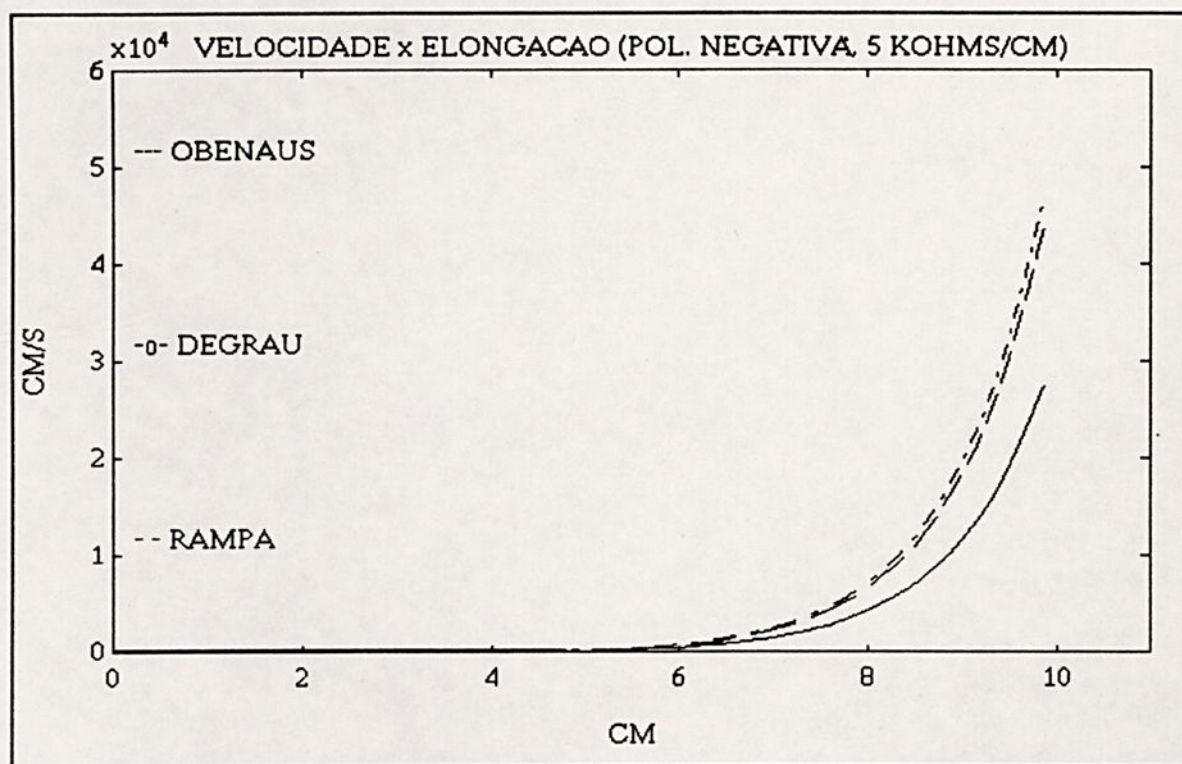


Figura 6.21 - Velocidade do fenômeno, 5 [KV/cm], polaridade negativa.

Constata-se, após analisar os gráficos da velocidade em função da elongação da descarga, que na maioria dos casos, a velocidade tem um crescimento mais acentuado com a introdução de uma variação contínua da profundidade do modelo físico

(introdução da rampa no modelo físico). Além disso, nas curvas de tempo em função da tensão, o tempo do fenômeno para introdução da rampa é menor do que para a introdução do degrau.

Segundo Schei e Larsen [09], no início da contaminação de um pára-raios de óxido de zinco, a camada de poluição, depositada na superfície do mesmo, tem distribuição desigual. Conforme as desigualdades na distribuição da camada de poluição diminuem, a tensão crítica de flashover diminui também.

Desta forma, os resultados apresentados neste capítulo e os resultados de Schei e Larsen [09], sugerem que a variação discreta da profundidade do modelo físico, realizada através da introdução do degrau, simula uma distribuição desigual da camada de poluição. Ou seja, simula o início da formação da camada de poluição na superfície do isolador de alta tensão.

A introdução da rampa no perfil da profundidade do modelo físico, baseando-se na proposta teórica de Schei e Larsen [09], adequa-se melhor à simulação do fenômeno de flashover sobre um isolador de alta tensão, pois a tensão crítica para este caso é menor do que para o caso com a introdução do degrau no caminho a ser percorrido pela descarga. Como, segundo vários autores, a camada de poluição tem espessura variável, o modelo com variação contínua na profundidade é uma contribuição satisfatória para a compreensão do fenômeno de flashover em isoladores de alta tensão poluídos.

Finalizando este capítulo, as próximas figuras apresentam fotos dos sinais dos fotomultiplicadores que foram analisados para obtenção dos valores de velocidade apresentados anteriormente. São sinais coletados para uma resistividade superficial da solução eletrolítica de 2 [KΩ/cm].

A figura 6.22 mostra a resposta dos fotomultiplicadores para um ensaio com polaridade negativa, sendo que as fibras ópticas foram colocadas na janela logo abaixo do eletrodo de alta tensão, e na janela a 2 [cm] desse mesmo eletrodo. O modelo utilizado, para a obtenção desse sinal, não tinha alterações na seção transversal. E seguindo a padronização utilizada para obtenção dos valores de velocidade, a tensão utilizada tinha o valor de 10 [KV].



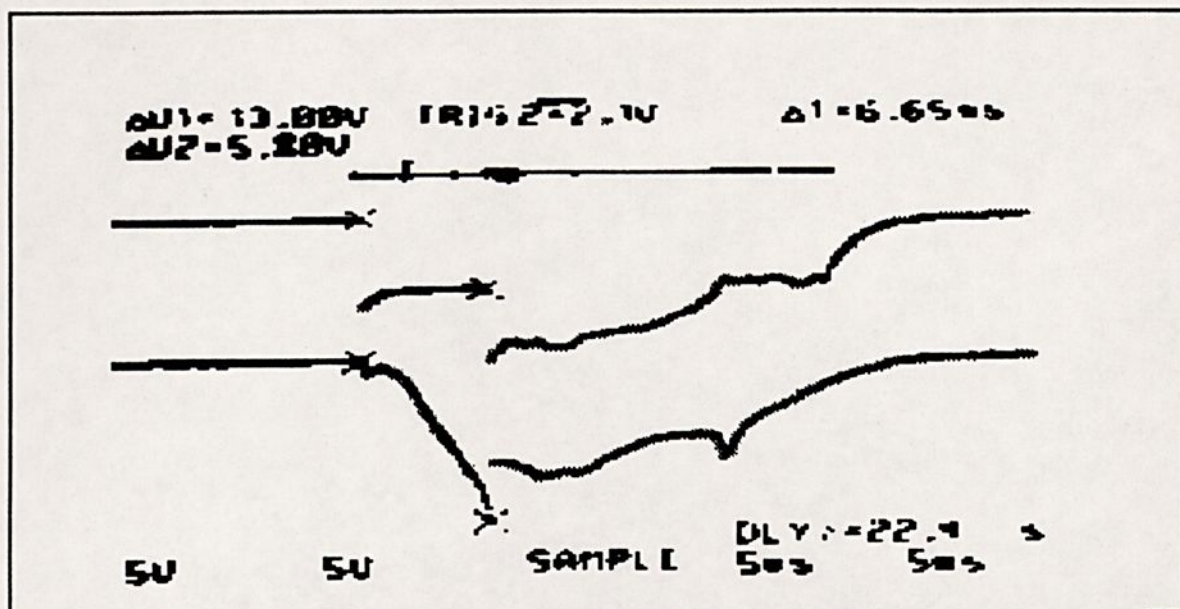


Figura 6.22 - Respostas dos fotomultiplicadores (0-2 [cm]), polaridade negativa, modelo sem alteração na profundidade.

A figura 6.23 apresenta as respostas dos fotomultiplicadores com as fibras ópticas colocadas a 4 e 6 [cm] do eletrodo de alta tensão. Utilizou-se o modelo físico com a introdução da rampa, e polaridade positiva.

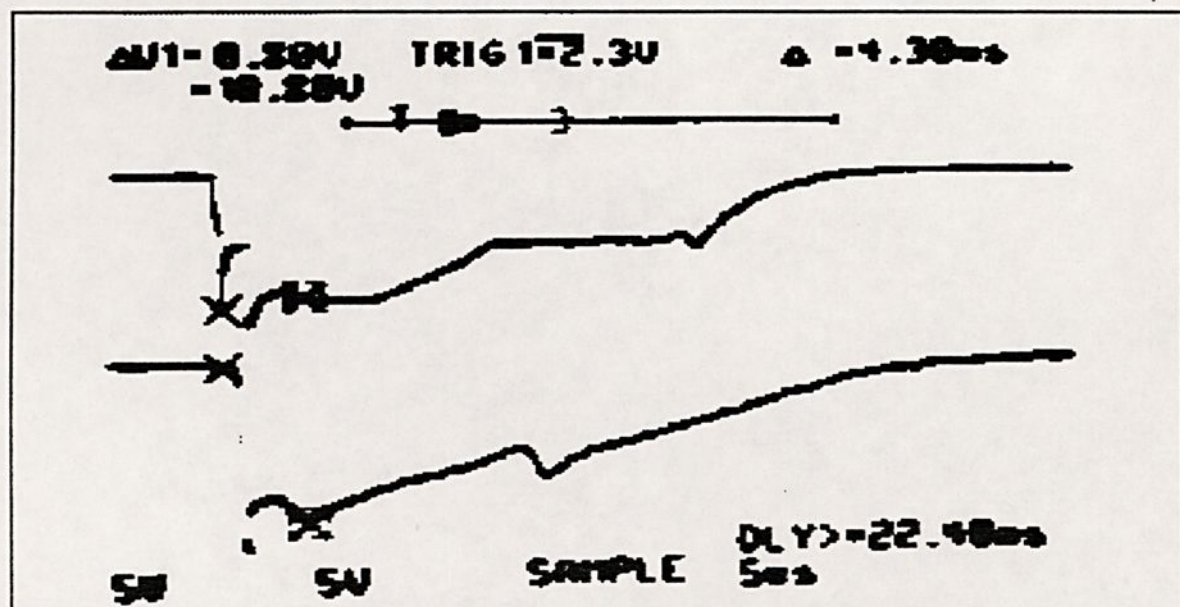


Figura 6.23 - Respostas dos fotomultiplicadores (4-6 [cm]), polaridade positiva, modelo com a introdução da rampa.

A figura 6.24 mostra sinais de respostas dos fotomultiplicadores com as fibras ópticas localizadas a 7 e 8 [cm] do eletrodo de alta tensão. Utilizou-se, para esse ensaio, polaridade positiva e o modelo com a introdução do degrau.

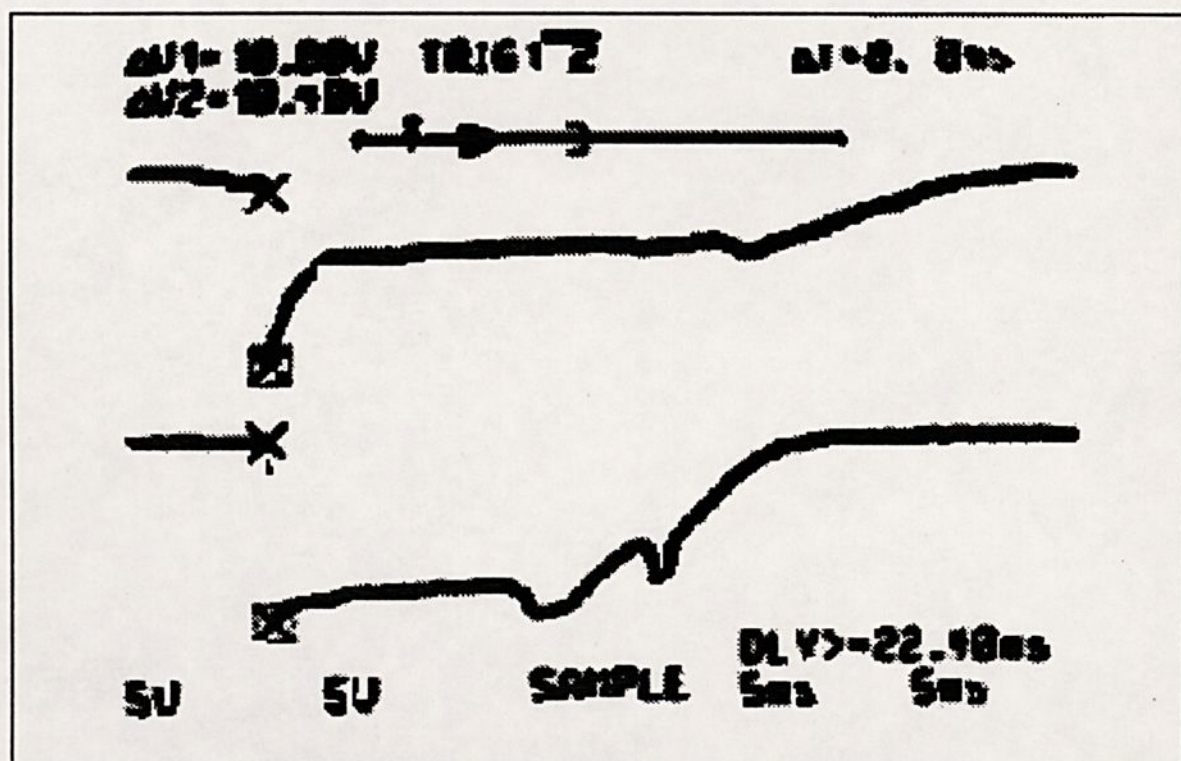


Figura 6.24 - Respostas dos fotomultiplicadores (7-8 [cm]), polaridade positiva, modelo com a introdução do degrau.

Na figura 6.25, os sinais apresentados, foram obtidos para polaridade positiva e com a introdução da rampa no modelo físico. As fibras ópticas foram colocadas nas duas últimas janelas do modelo. Ou seja, essas fibras ópticas estavam a distâncias de 9 e 9,5 [cm] do eletrodo de alta tensão. Por causa da rapidez da descarga, nesse ponto, os sinais tornam-se tênues na tela do osciloscópio.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

O capítulo II apresentou um estudo bibliográfico dos trabalhos mais recentes sobre o fenômeno de flashover em isoladores de alta tensão poluídos. Esses trabalhos demonstram que ainda não há uma teoria definitiva sobre o fenômeno de flashover. Demonstram, também, que a poluição atmosférica, além de afetar os isoladores de alta tensão, influenciam o funcionamento de outros equipamentos de alta tensão, como os pára-raios de óxido de zinco presentes em subestações transformadoras. Assim, a poluição atmosférica pode afetar de maneira generalizada todo o sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica.

O capítulo III apresenta as alterações propostas no modelo físico de isolador poluído. O modelo original, desenvolvido por Obenaus [01], sofre modificações em seu perfil de profundidade que alteram o circuito equivalente e o equacionamento matemático deste modelo. Propõe-se um circuito equivalente composto por duas resistências elétricas em série. Uma delas, simula a resistência inicial da camada de poluição e a outra, simula as alterações na resistência da poluição causadas pelas variações da espessura desta camada de poluição. As alterações propostas para o modelo físico são adaptadas aos conceitos e mecanismos de ocorrência e propagação do flashover, aceitos pela maioria dos autores, que realizaram e realizam pesquisas sobre este assunto, facilitando a comparação dos resultados apresentados neste trabalho.

O programa computacional, apresentado no capítulo IV, faz uma simulação matemática do desenvolvimento dinâmico de uma descarga elétrica sobre um isolador de alta tensão poluído. As figuras, apresentadas neste capítulo, demonstram a versatilidade do programa computacional, capaz de gerar gráficos de todas as variáveis envolvidas na simulação do fenômeno de flashover. Um avanço significativo deste programa, é o equacionamento da influência da polaridade da descarga simulada nos resultados matemáticos do mesmo.



Embora, a montagem experimental do capítulo V tenha sido baseada em trabalhos de outros autores, ela teve que ser adaptada às alterações no perfil da profundidade do modelo físico. Além disso, utilizava-se o modelo de isoladores de alta tensão poluídos pela primeira vez no Laboratório de Alta Tensão de Ilha Solteira. A montagem experimental, então, foi cuidadosamente executada para evitar erros nos dados coletados, que poderiam ser gerados pelas novas condições em que se utilizava o modelo físico de isolador de alta tensão poluído.

No capítulo VI, os resultados experimentais não serviram apenas para a confirmação do modelo matemático utilizado. Eles apresentaram, também, novos dados sobre mecanismos físicos de propagação das descargas elétricas sobre isoladores poluídos, propostos por outros autores. Isso foi constatado em fotos de sinais de tensão armazenados no osciloscópio de memória, e também, pelas descontinuidades observadas nos valores de tempo para um mesmo valor de tensão. Aliás, a análise dos dados coletados baseou-se no registro fotográfico de sinais típicos do flashover, armazenados pelo osciloscópio de memória. Como exemplo, várias fotos foram reproduzidas neste capítulo.

Não se pretende que este trabalho, apresentado nos capítulos anteriores, seja a solução definitiva para a explicação do fenômeno de flashover. Pretende-se que o mesmo seja mais uma contribuição que somada a contribuições de outros autores levem a um melhor entendimento sobre o flashover. Desta forma, a contribuição deste trabalho, para a compreensão do fenômeno de flashover em isoladores de alta tensão poluídos, é a proposta de um modelo físico e matemático capaz de simular a espessura variável da camada de poluição que se forma sobre esses isoladores.

1 - Propostas para trabalhos futuros

Para a compreensão do fenômeno de flashover em isoladores de alta tensão poluídos, há a necessidade de novos trabalhos sobre o assunto. Pode-se fazer as seguintes sugestões para



novos estudos sobre esse tema:

- aplicar tensão alternada no modelo de isolador de alta tensão poluído desenvolvido neste trabalho, simulando as tensões de trabalho da maioria dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição de energia elétrica existentes;

- estudo de descargas elétricas, sobre o modelo apresentado, com tensões impulsivas. O objetivo é simular o isolador de alta tensão poluído trabalhando em condições de manobras de chaveamento, e de descargas elétricas atmosféricas, no sistema elétrico de transmissão ou de distribuição de energia;

- estudo da possibilidade de simulação do isolador de alta tensão poluído através de um modelo físico contendo várias alterações no perfil da profundidade. Cada alteração estaria relacionada com uma determinada região do isolador. Esta sugestão baseia-se nas pesquisas de Sundararajan e Gorur [03], [05], que dividem o isolador em seis regiões, conforme esquematiza a figura 7.1.

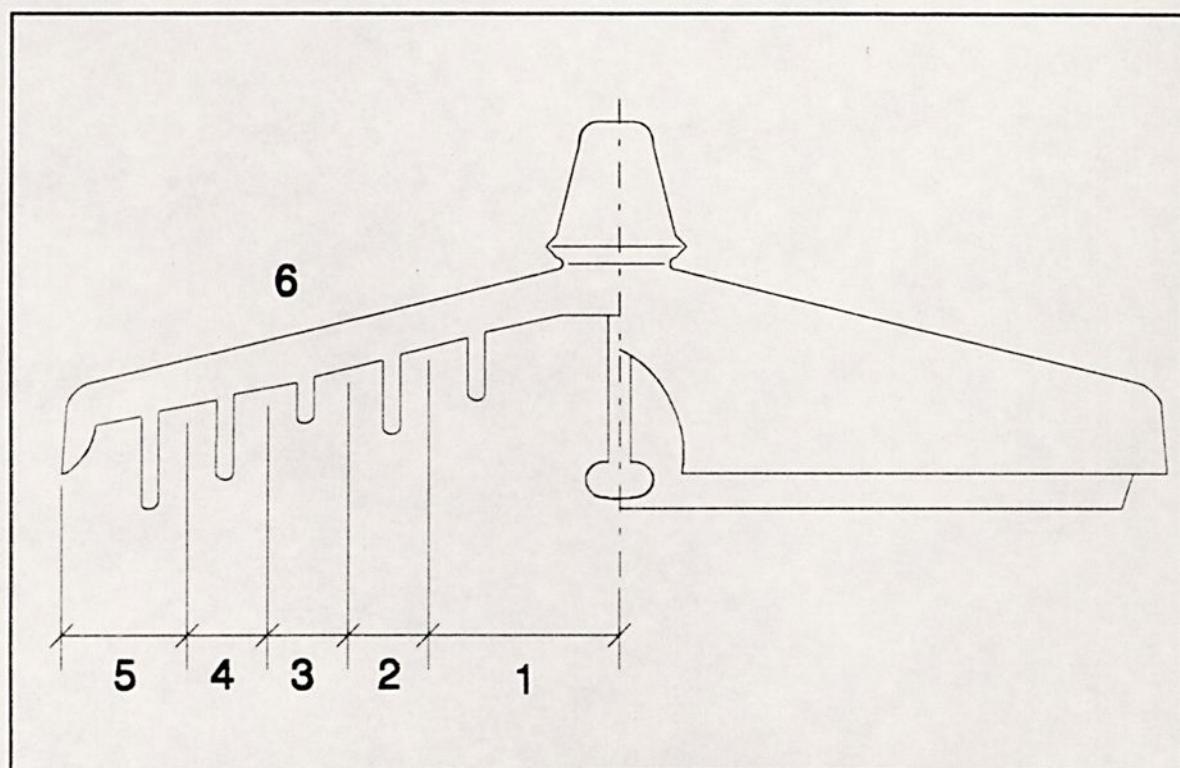


Figura 7.1 - Estudos realizados por Sundararajan e Gorur [03], [05], em que se baseou proposta de continuidade deste trabalho.

2 - Conclusão final

Estudos recentes sobre o fenômeno de flashover constataam que o mesmo não afeta apenas os isoladores de alta tensão poluídos, atingindo linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica de forma generalizada. Contudo, não há uma explicação definitiva sobre o fenômeno de flashover.

Propõe-se neste trabalho, como forma de estudar o fenômeno de flashover, alterações no perfil da profundidade do modelo físico original de isoladores de alta tensão poluídos, bem como, um novo circuito equivalente desse modelo e um equacionamento matemático adequado às modificações propostas.

O programa computacional desenvolvido para a simulação matemática de uma descarga elétrica sobre um isolador de alta tensão poluído, apresenta uma boa versatilidade, além de introduzir a influência da polaridade da tensão nesta simulação matemática.

Para a realização dos ensaios no Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (DEE/FEIS/UNESP), adaptou-se montagens experimentais de outros autores às condições desse local e às alterações propostas no modelo físico do isolador poluído.

Os resultados experimentais confirmam os resultados matemáticos, conseguindo-se, também, dados que podem servir de comprovação de mecanismos físicos de propagação de descargas elétricas em isoladores poluídos, propostos por outros autores e comentados neste trabalho. Segundo a análise dos resultados obtidos, das duas formas de alteração na profundidade do modelo físico a que demonstrou ser mais eficiente para a simulação de uma camada de poluição de espessura variável, é a introdução da rampa.

Este trabalho, então, é uma contribuição para o estudo do fenômeno de flashover na simulação da espessura variável da camada de poluição que se deposita sobre isoladores de alta tensão, quando estes são submetidos a ambientes poluídos.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - OBENAU, F.; BOEHME, H.; "Essais de contournement sur isolateurs pollués en laboratoire et en lieu de service du point de vue de la conception d'une modèlè d'amorçage par courant rampant", CIGRE, 1966.
- 02 - SUNDARARAJAN, R.; GORUR, R. S.; "Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under dc voltage", I.E.E.E. Transactions on Electrical Insulation, vol. 28, n° 02, pp. 209-218, April, 1993.
- 03 - SUNDARARAJAN, R.; GORUR, R. S.; "Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under dc voltage", Erratum, I.E.E.E. Transactions on Electrical Insulation, vol. 28, n° 03, p.432, June, 1993.
- 04 - HAMPTON, B. F.; "Flashover mechanism of polluted insulators", Proc. I.E.E., vol. 111, n° 05, May, 1964.
- 05 - SUNDARARAJAN, R.; GORUR, R. S.; "Effect of insulator profiles on dc flashover voltage under polluted conditions. A study using a dynamic arc model", I.E.E.E. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 01, n° 01, pp. 124-132, February, 1994.
- 06 - WATSON, D. B.; KHO, S. K.; SAMUELS, K. A.; MA, L.; CHIU, J. B.; "Impulse flashover trajectory in air in nonuniform fields", I.E.E.E. Transactions on Electrical Insulation, vol. 28, n° 02, pp. 200-208, April, 1993.
- 07 - YAMANO, Y.; "Elimination of surface leader an increase in flashover strength by use of hollow insulators",



I.E.E.E. Transactions on Electrical Insulation, vol. 28, n° 03, pp. 372-378, June, 1993.

- 08 - FARAG, A. S. A.; ZEDAN, F. M.; CHENG, T. C.; "Analytical studies of HV insulators in Saudi Arabia. Theoretical aspects", I.E.E.E. Transactions on Electrical Insulation, vol. 28, n° 03, pp. 379-391, June, 1993.
- 09 - SCHEI, A.; LARSEN, V.; Seminar on Modern Techniques for Application and monitoring of ZnO Surge Arrester, Realização: IEEE (Seção Sul Brasil, Seção Rio de Janeiro), USP-Politécnica, São Paulo, 23-24/11/1992.
- 10 - ASOKAN, T.; SUDARSHAN, T. S.; "Spectral nature of luminosity associated with the surface flashover process", I.E.E.E. Transactions on Electrical Insulation, vol. 28, n° 02, pp. 192 -199, April, 1993.
- 11 - ASOKAN, T.; SUDARSHAN, T. S.; "Effect of residual stress on the surface flashover of alumina ceramics", I.E.E.E. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 01, n° 01, pp. 97-105, February, 1994.
- 12 - AL-ARAINY, A. A.; MALIK, N. H.; QURESHI, M. I.; "Influence of sand/dust contamination on the breakdown of asymmetrical air gaps under switching impulses", I.E.E.E. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 01, n° 02, pp. 305-314, April, 1994.
- 13 - SUNDARARAMAN, R.; LI, C. R.; SUDARSHAN, T. S.; "Influence of surface microstructure on the electric and spectroscopic characteristics of dielectric surface flashover", I.E.E.E. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 01, n° 02, pp. 315-322, April, 1994.



- 14 - SKOPEC, A.; WANKOWICZ, J. G.; SIKORSKI, B.; "Electric field calculation for an axially-symmetric insulator with surface contamination", I.E.E.E. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 01, n° 02, pp. 332-339, April, 1994.
- 15 - PAVLIK, B. L.; "Tecnologia da ferragem para linhas de AT e EAT", Editorial Gente, São Paulo, Março, 1989.
- 16 - PISSOLATO, J.; "Analyse du contournement d'une surface faiblement conductrice par une decharge electrique alimentee en courant continu", Thèse de Docteur, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1986.
- 17 - MALDONADO, O. A. A.; "Análise do comportamento dinâmico de descargas elétricas em corrente contínua na superfície de isoladores de alta tensão sob poluição, utilizando fotomultiplicadores", Tese de Doutorado, Agosto, 1991.
- 18 - MALDONADO, O. A. A.; "Dynamic analysis of flashover in high voltage d.c. polluted insulator", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria, Canada, 1992.
- 19 - WILKINS, R.; "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films", Proc. I.E.E.E., vol. 116, n° 03, pp. 457-465, 1969.
- 20 - PEYREGNE, G.; "Etude en régime dynamique du contournement par décharges de surfaces isolantes rendues faiblement conductrices", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1981.
- 21 - WILKINS, R.; AL-BAGHADADI, A.; "Arc propagation along an electrolyte surface", Proc. I.E.E., vol. 118,



n° 12, December, 1971.

- 22 - SWIFT, D. A.; "Flashover across the surface of an electrolyte: arresting arc propagation with narrow metal strips", Proc. I.E.E., vol. 127, Pt. A, n° 08, November, 1980.
- 23 - RAHAL, A. M.; "Sur les mécanismes physiques du contournement des isolateurs haute tension", Thèse de Docteur, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1979.
- 24 - FLAZI, S.; "Modélisation d'une décharge électrique sur une surface isolante polluée recouverte d'une couche conductrice. Application au contournement des isolateurs H. T.", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1980.
- 25 - FLAZI, M. S.; "Etude du contournement électrique des isolateurs haute tension pollués critère d'elongation de la décharge et dynamique du phénomène", Thèse de Docteur D'état, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1987.
- 26 - PISSOLATO, J.; MALDONADO, O. A. A., HURAU, C.; "Análise do comportamento dinâmico de descargas elétricas sobre isoladores poluídos", X Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Subgrupo VIII-01, Equipamentos Elétricos e Materiais, SGE, Curitiba, 01-05/10/1990.
- 27 - MALDONADO, O. A. A.; PISSOLATO, J.; HURAU, C.; "Propagación de descargas eléctricas em aisladores de alta tensión contaminados", Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Vigo, 4-6/07/1990.
- 28 - JOLLY, D. C.; "Physical processes in the flashover of insulator with contaminated surfaces", Thesis of PhD, M.I.T., 1971.

- 29 - MERCURE, H.; DROUET, M.; "Dynamic measurements of the current distribution in the foot of an arc propagation along the surface of an electrolyte", Trans. on PAS, vol. 101, n° 03, March, 1982.
- 30 - PISSOLATO, J.; MALDONADO, O. A. A.; "Análise da dinâmica do flashover em isoladores de alta tensão sob poluição, utilizando fotomultiplicadores", SNPTEE, Grupo XIII, Rio, 04-06/10/1991.
- 31 - ASOKAN, T.; SUDARSHAN, T. S.; "Effect of residual stress on the surface flashover of alumina ceramics", Erratum, I.E.E.E. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 01, n° 01, pp. 97-105, February, 1994.



APÊNDICE

No desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, houve várias participações em congressos e simpósios. Nessas oportunidades foram apresentados tópicos que constituem os capítulos do texto deste relatório. Assim, as participações em congressos e simpósios foram um fator de aperfeiçoamento da pesquisa aqui apresentada. A relação destas reuniões científicas com os respectivos trabalhos apresentados está colocada abaixo.

- 01 - MALDONADO, O. A. A.; PRADO, A. J.; "Implantação de um modelo para estudo do desenvolvimento de uma descarga elétrica em isoladores poluídos", II Congresso de Iniciação Científica da UNESP, Botucatu, 26-28/10/1990.
- 02 - MALDONADO, O. A. A.; PRADO, A. J.; "Simulação de uma descarga elétrica numa superfície poluída", III Congresso de Iniciação Científica da UNESP, Jaboticabal, 24-26/10/1991.
- 03 - MALDONADO, O. A. A.; PRADO, A. J.; "Simulação de uma descarga elétrica numa superfície poluída", I Reunião de Iniciação Científica, Ilha Solteira, 30/10/1991.
- 04 - MALDONADO, O. A. A.; PRADO, A. J.; "Descargas em isoladores poluídos de alta tensão: um modelo matemático para análise do flashover", X Congresso Chileno de Ingenieria Electrica, Universidad Austral de Chile, 22-26/11/1993.
- 05 - MALDONADO, O. A. A.; PRADO, A. J.; "The flashover phenomenon: an analysis with influence of the thickness of the layer pollution of the high voltage polluted insulators", 1994 IEEE International

Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh,
Pennsylvania, 05-08/06/1994.

- 06 - MALDONADO, O. A. A.; PRADO, A. J.; "Modelling of the influence of the layer pollution thickness in high voltage polluted insulators", 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Leicester University, Leicester, United Kingdom, 10-13/07/1995.



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
AV. BRASIL, 56 - CAIXA POSTAL 31
15378-000 ILHA SOLTEIRA - SP

