

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Oscar Armando Maldonado
Astorga aprovada pela Comissão
Julgadora em 02.08/1991.

Orientador 

ANALISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE DESCARGAS ELÉTRICAS
EM CORRENTE CONTÍNUA NA SUPERFÍCIE DE ISOLADORES DE ALTA
TENSÃO SOB POLUIÇÃO, UTILIZANDO FOTOMULTIPLICADORES.

OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA

Orientador: PROF. DR. JOSÉ PISSOLATO FILHO.†

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia Elétrica da Universidade
Estadual de Campinas, UNICAMP, como
parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de DOUTOR EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

AGOSTO 1991

80/9109443

Dedico este trabalho à minha esposa Nange, e aos meus filhos Lucas Filipe e Amanda, pela paciência demonstrada durante os períodos em que esta tese me manteve ausente de suas vidas.

AGRADECIMENTOS

Os maiores agradecimentos são para o meu orientador Professor Dr. José Pissolato Filho, pela dedicação demonstrada na orientação deste trabalho, e pela amizade com que me brindou ao longo destes anos em que tive o privilégio de usufruir da sua companhia.

Agradeço aos amigos e colegas do Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP de Ilha Solteira, pelo sacrifício feito para que o afastamento, necessário à realização deste trabalho, fosse possível. Agradeço também, aos amigos do Laboratório de Alta Tensão da UNICAMP, pelo companheirismo e colaboração durante a montagem experimental deste trabalho.

Meus agradecimentos ao Renato pela colaboração na versão final, à Rosane pela revisão do texto, ao Elias pelos desenhos, e ao meu irmão Nelson, pela contribuição na aquisição de equipamentos nos Estados Unidos.

Finalmente, os meus agradecimentos à Cerâmica SANTANA, que proporcionou recursos para o desenvolvimento desta pesquisa.

ÍNDICE

| | Pag. |
|--|------|
| I - INTRODUÇÃO..... | 01 |
| II - MODELIZAÇÃO DA DESCARGA ELÉTRICA NUMA SUPERFÍCIE..... | 09 |
| II.1 - INTRODUÇÃO..... | 09 |
| II.2 - MODELIZAÇÃO DA DESCARGA..... | 09 |
| II.3 - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE FLASHOVER..... | 13 |
| II.4 - CRITÉRIOS PARA A OCORRÊNCIA DE FLASHOVER..... | 18 |
| II.5 - MECANISMOS FÍSICOS QUE REGEM A PROPAGAÇÃO DA DESCARGA | 20 |
| II.5.1 - MECANISMO DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES NO | |
| PÉ DA DESCARGA..... | 20 |
| II.5.2 - MECANISMO DA FORÇA..... | 25 |
| II.6 - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES..... | 29 |
| III - IMPLANTAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO..... | 31 |
| III.1 - CÁLCULO DA VELOCIDADE DA DESCARGA..... | 33 |
| III.2 - ALGORITMO COMPUTACIONAL..... | 36 |
| III.3 - RESULTADOS DO MODELO COMPUTACIONAL..... | 37 |
| III.4 - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES..... | 50 |
| IV - MONTAGEM EXPERIMENTAL..... | 53 |
| IV.1 - INTRODUÇÃO..... | 53 |
| IV.2 - SISTEMA EXPERIMENTAL..... | 54 |
| IV.2.1 - MODELO FÍSICO DO ISOLADOR POLUÍDO..... | 55 |
| IV.3 - SISTEMA DE VISUALIZAÇÃO DA DESCARGA..... | 57 |
| IV.3.1 - FOTOMULTIPLICADORES. INSTALAÇÃO E CIRCUITO | |
| DE ALIMENTAÇÃO..... | 58 |
| IV.4 - SISTEMA DE MEDIÇÃO..... | 60 |
| IV.5 - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES..... | 67 |

| | Pag. |
|--|------|
| V - RESULTADOS DA MONTAGEM EXPERIMENTAL..... | 69 |
| V.1 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS..... | 69 |
| V.2 - LEVANTAMENTO DA TENSÃO DE FLASHOVER..... | 70 |
| V.2.1. - POLARIDADE POSITIVA..... | 71 |
| V.2.2. - POLARIDADE NEGATIVA..... | 78 |
| V.3 - LEVANTAMENTO DA VELOCIDADE DE FLASHOVER..... | 84 |
| V.3.1 - POLARIDADE POSITIVA..... | 89 |
| V.3.2 - POLARIDADE NEGATIVA..... | 95 |
| V.4 - ANÁLISE DA DESCARGA..... | 103 |
| V.5 - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES..... | 106 |
| VI - CONCLUSÕES..... | 109 |
| VI.1 - SUJESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS..... | 114 |
| VI.2 - CONCLUSÃO FINAL..... | 114 |
| VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 116 |

FIGURAS

| Figura | Pag. |
|--|------|
| Figura 2.1 Modelo experimental..... | 10 |
| Figura 2.2 Circuito elétrico equivalente..... | 10 |
| Figura 2.3 Características $V(i)_{x=cte}$ | 13 |
| Figura 2.4 Valores críticos de flashover..... | 14 |
| Figura 2.5 Distribuição da corrente no pé da descarga..... | 23 |
| Figura 2.6 Variação do campo elétrico E_{pr} em função da resistência..... | 24 |
| Figura 2.7 Variação do campo elétrico E_{pr} em função da largura do canal..... | 25 |
| Figura 2.8 Hipótese da força para o deslocamento da descarga..... | 27 |
| Figura 2.9 Distribuição do campo no eletrodo de A.T..... | 28 |
| Figura 3.1 a) Fluxograma do programa computacional..... | 38 |
| Figura 3.1 b) Fluxograma do programa computacional..... | 39 |
| Figura 3.1 c) Fluxograma do programa computacional..... | 40 |
| Figura 3.2 Campo elétrico na poluição e na coluna da descarga.... | 41 |
| Figura 3.3 Gradientes de tensão no pé e na coluna da descarga.... | 42 |
| Figura 3.4 Velocidade de flashover para $R = 2 \text{ kohms/cm}$ | 43 |
| Figura 3.5 Velocidade de flashover para $R = 5 \text{ kohms/cm}$ | 44 |
| Figura 3.6 Diferença de campo elétrico no pé e na coluna da descarga..... | 45 |
| Figura 3.7 Resistência de poluição em função do tempo..... | 46 |
| Figura 3.8 Temperatura do eletrolito em função do tempo..... | 47 |
| Figura 3.9 Tensão de flashover em função do tempo..... | 48 |
| Figura 3.10 Corrente de flashover em função do tempo..... | 49 |

| Figura | Pag. |
|--|------|
| Figura 4.1 Diagrama geral da montagem experimental..... | 54 |
| Figura 4.2 Modelo físico do isolador poluído..... | 57 |
| Figura 4.3 Circuito divisor resistivo..... | 58 |
| Figura 4.4 Registro fotográfico de uma onda de corrente e da resposta de um fotomultiplicador..... | 61 |
| Figura 4.5 Registro de uma onda de corrente e da resposta do fotomultiplicador, na ocorrência de flashover..... | 61 |
| Figura 4.6 Circuito para obtenção do sinal de corrente da descarga..... | 62 |
| Figura 4.7 Respostas dos fotomultiplicadores..... | 63 |
| Figura 4.8 Registro da corrente de flashover para polaridade positiva..... | 64 |
| Figura 4.9 Registro da corrente de flashover para polaridade negativa..... | 65 |
| Figura 4.10 Respostas dos dois fotomultiplicadores, colocados num mesmo ponto do percurso da descarga..... | 66 |
| Figura 5.1 Registro da corrente e tensão de Flashover para determinação do tempo de flashover..... | 72 |
| Figura 5.2 Característica de tempo x tensão de flashover para polaridade positiva..... | 76 |
| Figura 5.3 Característica de tempo x tensão de flashover para polaridade positiva da referência [25]..... | 77 |
| Figura 5.4 Característica de tempo x tensão de flashover para polaridade negativa..... | 82 |
| Figura 5.5 Característica de tempo x tensão de flashover para | |

| Figura | Pag. |
|---|------|
| polaridade negativa da referência [25]..... | 83 |
| Figura 5.6 Característica de tensão de flashover x resistência de poluição para polaridade negativa e positiva..... | 84 |
| Figura 5.7 Respostas dos fotomultiplicadores para obtenção da característica de velocidade de flashover. Fibras ópticas instaladas perto do eletrodo de alta tensão... | 86 |
| Figura 5.8 Respostas dos fotomultiplicadores para obtenção da característica de velocidade de flashover. Fibras ópticas instaladas no médio do percurso da descarga.... | 87 |
| Figura 5.9 Respostas dos fotomultiplicadores para obtenção da característica de velocidade de flashover. Fibras ópticas instaladas perto do eletrodo de terra..... | 88 |
| Figura 5.10 Característica de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga para $R = 5 \text{ K}\Omega/\text{cm}$. Pol. positiva..... | 91 |
| Figura 5.11 Característica de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga para $R = 2 \text{ K}\Omega/\text{cm}$. Pol. positiva..... | 93 |
| Figura 5.12 Comparação das características de velocidade para $R = 2$ e $5 \text{ K}\Omega/\text{cm}$. Polaridade positiva..... | 94 |
| Figura 5.13 Característica de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga para $R = 5 \text{ K}\Omega/\text{cm}$. Pol. negativa..... | 97 |
| Figura 5.14 Característica de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga para $R = 2 \text{ K}\Omega/\text{cm}$. Pol. | |

| Figura | Pag. |
|---|------|
| negativa..... | 99 |
| Figura 5.15 Características de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga. Calculada e determinada experimentalmente para $R = 5 \text{ K}\Omega/\text{cm}$ | 100 |
| Figura 5.16 Características de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga. Calculada e determinada experimentalmente para $R = 2 \text{ K}\Omega/\text{cm}$ | 101 |
| Figura 5.17 Comparação dos resultados experimentais obtidos no levantamento da característica de velocidade, com os resultados apresentados na referência [25].... | 102 |
| Figura 5.18 Respostas dos fotomultiplicadores à passagem do início de uma descarga terminada em flashover..... | 104 |
| Figura 5.19 Respostas dos fotomultiplicadores à passagem do final de uma descarga terminada em flashover..... | 105 |
| Figura 6.1 Zonas luminosas de uma descarga elétrica..... | 113 |

TABELAS

| Tabela | | Pag. |
|----------------|---|------|
| Tabela 2.1 | Valores utilizados para as constantes experimentais A e n..... | 12 |
| Tabela 5.1 | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 2 KΩ/cm..... | 73 |
| Tabela 5.2 | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 5 KΩ/cm..... | 74 |
| Tabela 5.3 | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 8 KΩ/cm..... | 74 |
| Tabela 5.4 | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 10 KΩ/cm..... | 75 |
| Tabela 5.5 | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 12 KΩ/cm..... | 75 |
| Tabela 5.6 | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 2 KΩ/cm..... | 78 |
| Tabela 5.7 | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 5 KΩ/cm..... | 79 |
| Tabela 5.8 | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 8 KΩ/cm..... | 79 |
| Tabela 5.9 | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 10 KΩ/cm..... | 80 |
| Tabela 5.10 a) | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 12 KΩ/cm..... | 80 |
| Tabela 5.10 b) | Tensão aplicada x tempo de flashover para R = 12 KΩ/cm..... | 81 |

Tabela

Pag.

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabela 5.11 | Velocidade de flashover x alongamento da descarga para R = 5 KΩ/cm. Polaridade positiva..... | 90 |
| Tabela 5.12 | Velocidade de flashover x alongamento da descarga para R = 2 KΩ/cm. Polaridade positiva..... | 92 |
| Tabela 5.13 | Velocidade de flashover x alongamento da descarga para R = 5 KΩ/cm. Polaridade negativa..... | 96 |
| Tabela 5.14 | Velocidade de flashover x alongamento da descarga para R = 2 KΩ/cm. Polaridade negativa..... | 98 |

SIMBOLOGIA

- U = Tensão aplicada.
- V_d = Queda de tensão na descarga.
- V_p = Queda de tensão na camada de poluição.
- r = Resistividade do eletrolito.
- L = Comprimento do canal.
- x = Alongação da descarga.
- i = Corrente total da descarga.
- E_a = Campo elétrico na coluna da descarga.
- U_e = Queda de tensão nos eletrodos.
- V = Diferença entre a tensão aplicada e a queda de tensão nos eletrodos.
- U₀ = Valor inicial da tensão aplicada.
- A = Constante experimental dependente do meio em que a descarga se desenvolve.
- n = Constante experimental dependente do meio em que a descarga se desenvolve.
- i_m = Valor mínimo de corrente da curva V(i).
- v_m = Valor mínimo de tensão da curva V(i).
- v_{cf} = Tensão crítica de flashover.
- i_{cf} = Corrente crítica de flashover.
- x_{cf} = Alongamento crítico de flashover.
- a = Largura do canal do modelo físico.
- b = Largura do canal do modelo físico.
- r_d = Raio da descarga.

R = Resistência da poluição.
 K_r = Fator de multiplicação.
 ff = Fator de forma.
 K_s = Condutividade superficial.
 σ_s = Condutividade superficial.
 σ = Condutividade volumétrica do eletrolito.
 σ_0 = Condutividade inicial.
 h = Espessura da camada do eletrolito.
 E_{pr} = Campo elétrico no pé da descarga.
 v = Velocidade da descarga.
 μ = Mobilidade iônica no pé da descarga à pressão atmosférica.
 K = Constante de Boltzmann.
 W_0 = Energia de ativação do processo de condução no eletrolito.
 T = Temperatura absoluta do eletrolito.
 C = Capacitância da fonte de geração da descarga.
 ρ = Resistividade do eletrodo.
 CV = Calor específico.
 S = Seção da camada de poluição.
 t = Tempo.
 t_0 = Tempo inicial.
 E = Campo médio na poluição.
 $A.T.$ = Alta tensão.
 P = Potência.
 α = Constante experimental da equação da tensão de Rao e Gopal.

- β = Constante experimental da equação da tensão de Rao e Gopal.
- γ = Constante experimental da equação do gradiente do campo elétrico de Rao e Gopal.
- δ = Constante experimental da equação do gradiente do campo elétrico de Rao e Gopal.

I - INTRODUÇÃO

A elevação dos níveis de tensão nos sistemas de transmissão de energia elétrica torna cada vez mais importante o estudo da isolação. Dentro deste campo, um dos aspectos principais é constituído pelo estudo do comportamento de isoladores de alta tensão, destinados a trabalhar em regiões sujeitas a notável poluição atmosférica. Esta poluição deposita-se na superfície dos isoladores modificando as características dielétricas dos mesmos, facilitando assim a ocorrência de descargas superficiais que sob certas condições podem alongar-se entre a alta tensão e a terra provocando o curto-circuito do isolador ou da cadeia de isoladores através de um arco elétrico. A este arco elétrico é dado o nome de "flashover".

A ocorrência do flashover pode levar até ao desligamento do sistema, com todos os prejuízos decorrentes deste fato.

A fim de minimizar este problema, várias soluções empíricas vem sendo atualmente utilizadas, entre estas podem-se citar: lavagem periódica dos isoladores [01], aplicação de graxas na superfície dos isoladores a fim de retardar a formação da camada de poluição [02], utilização de diversos tipos de revestimento na superfície dos isoladores [03] [04], utilização de elementos metálicos na superfície [05], colocação de uma camada condutora [06] ou semicondutora [07] na superfície dos isoladores, e até o superdimensionamento dos isoladores ou do comprimento da cadeia [08].

Além das soluções anteriores, um grande número de pesquisadores vem dedicando-se ao estudo do comportamento de uma descarga elétrica numa superfície poluída e à análise dos critérios para a ocorrência do flashover, utilizando diversos modelos físicos do isolador, diversas metodologias experimentais e utilizando tensão alternada, contínua ou impulsiva para a reprodução da descarga. Dentro daqueles que utilizam tensão impulsiva, H. Matsuo, Y. Yunoki e N. Mita [09], e T. Yamashita, H. Matsuo e H. Fujiyama [10], utilizando fotomultiplicadores colocados no percurso de uma descarga impulsiva, medem a velocidade da descarga e, simultaneamente a intensidade da foto-emissão à frente da descarga concluindo que a velocidade é determinada pelo campo elétrico e pela foto-emissão à frente da descarga ou, pela liberação de elétrons em função da foto-ionização das moléculas neutras, e foto-separação dos elétrons dos íons negativos. A velocidade portanto independe do comprimento do canal de água do modelo utilizado, do tempo de frente da onda de tensão, e da tensão aplicada quando a resistência do líquido se mantém constante. Em relação ao mecanismo de propagação, a descarga parece propagar-se por arcos que acontecem na pequena região de ar à frente da descarga.

No que se refere a aplicações em tensão contínua, C. T. Wand, e T. C. Cheng [11], propõem uma nova técnica de contaminação em laboratório denominada "Fog Deposition Method", para a análise do flashover em superfícies poluídas e, utilizando um modelo de disco para o isolador observam que a zona seca que se forma em volta do anodo, é uma zona limpa, ou seja, o sal utilizado na formação do eletrolito migra da região em volta do anodo durante a descarga.

T. C. Cheng, C. Y. Wu, e H. Nour [12], introduzem um modelo de arcos múltiplos para representar as diversas descargas que simultaneamente ocorrem numa superfície poluída. Apresentam ainda os resultados da influência dos vários níveis de poluição, na tensão de flashover.

T. C. Cheng e H. I. M. Nour [13], utilizando o modelo de arcos múltiplos mencionado anteriormente, desenvolvem um modelo generalizado onde os fatores de forma de isoladores reais, podem ser expressos numericamente. Apresentam ainda uma equação empírica para a determinação do comprimento do arco e mostram que o comprimento efetivo do arco, tem grande influência no valor da tensão de flashover.

Zhang Renyu, Zhu Deheng e Wang Xiatao [14], utilizam um modelo experimental que permite a variação de algumas características físicas de um isolador real. Os resultados apresentados mostram que a afirmativa geralmente aceita, que a tensão de flashover de polaridade negativa é menor que a de polaridade positiva, não se confirma para isoladores projetados com um espaço livre maior entre as saias. Usualmente, os isoladores para corrente contínua tem uma forma mais complexa que os de corrente alternada, devido serem projetados com grande diâmetro das saias, uma altura maior e uma largura da coluna central, menor, de forma a aumentar o percurso a ser vencido pela descarga. Os autores apresentam resultados de testes, mostrando que para isoladores de pino, a tensão de flashover não aumenta linearmente com o aumento destas grandezas geométricas, a partir de certas dimensões, como por exemplo, 420 mm para o diâmetro das saias do isolador.

T. Matsumoto, M. Ishii e T. Kawamura [15], utilizam técnicas opto-eletrônicas para a observação das características de um arco numa superfície contaminada, e através da medição espectral mostram que a maior parte da luz emitida pela descarga, é proveniente do espectro do sódio (Na), utilizado na composição do eletrolito. É observada também, uma pequena diferença entre os valores de tensão de flashover para polaridades negativa e positiva.

Vários outros pesquisadores apresentam resultados utilizando tensão alternada e tensão contínua na reprodução da descarga. Li Shunyuan, Zhang Renyu e Tan Kexiong [16], desenvolvem um divisor de potencial através do qual, medem a distribuição de potencial instantânea no percurso da descarga, com o auxílio de um registrador de fita magnética bem como, a velocidade da mesma. Os resultados apresentados mostram que, a velocidade de propagação de um arco ao longo de uma superfície poluída é de 0,2 a 1 metro por segundo, e a média máxima do gradiente de potencial, é de 0,5 Kvolt por centímetro.

Guan Zhicheng e Zhang Renyu [17], estudam a propagação da descarga com o auxílio de uma máquina fotográfica de alta velocidade e desenvolvem um programa computacional para o cálculo do flashover. Os resultados apresentados, indicam algumas diferenças para flashover em tensão alternada e tensão contínua. Entre estas, pode-se citar que, para tensão contínua, $2/3$ do canal é o comprimento crítico, a partir do qual a ocorrência do flashover fica assegurada. No caso de tensão alternada, o fator mais importante para a ocorrência do flashover, é o restabelecimento do arco, quando da passagem da

corrente por zero.

M. Samir Flazi [18], realiza uma revisão crítica dos critérios para ocorrência de flashover, concluindo que o modelo de duas camadas, utilizado por ele para simular o isolador poluído, não permite a aceitação de vários critérios que vêm sendo utilizados. Formula também uma proposta própria para o mecanismo de alongação da descarga e das condições críticas do flashover.

A partir do exposto, fica evidente, apesar da qualidade e importância dos trabalhos que vêm sendo apresentados, que o comportamento dinâmico de uma descarga elétrica na superfície de isoladores poluídos, não tem ainda uma solução definitiva, e continua sendo um sério problema no estudo da isolação, com vários de seus aspectos ainda por resolver. É, portanto, importante o desenvolvimento de estudos que levem a um melhor conhecimento do fenômeno de flashover, a fim de que, com base neste conhecimento, possam ser desenvolvidas técnicas de operação, manutenção ou projeto, que venham a melhorar o desempenho de isoladores destinados a trabalhar em condições de poluição atmosférica.

O trabalho aqui apresentado é fruto desta necessidade cada vez maior, e tem por objetivo dar uma contribuição na compreensão do comportamento dinâmico de descargas em superfícies poluídas, especialmente em relação ao fenômeno de flashover. Com esta finalidade será apresentado um modelo matemático que permite, através de um programa computacional, o acompanhamento da descarga

fornecendo as principais grandezas envolvidas e permitindo a obtenção das características mais importantes da descarga, o que torna possível o acompanhamento dinâmico da mesma.

Serão apresentados também, os resultados obtidos a partir da simulação no Laboratório de Alta Tensão da Unicamp, de descargas elétricas em corrente contínua em superfícies poluídas. Para a realização desta simulação foi preciso a montagem de um modelo físico do isolador poluído baseado no modelo de Obenaus [19]. Da mesma forma foi desenvolvido um sistema para a geração e aplicação da descarga em alta tensão no modelo do isolador poluído. O sistema de medição e visualização da descarga foi desenvolvido com a utilização de cabos de fibra óptica, colocados no caminho de propagação da descarga. Estes cabos alimentam dois fotomultiplicadores ligados a um osciloscópio de memória que registra as respostas, a partir das quais foi possível, junto com os sinais de corrente e tensão observados, obter os resultados que serão apresentados no decorrer desta tese.

É feita ainda a comparação das respostas dos dois modelos, experimental e matemático e é apresentada uma hipótese teórica para o mecanismo que rege o deslocamento de uma descarga elétrica de alta tensão em superfícies poluídas.

A utilização de corrente contínua na reprodução da descarga elétrica neste trabalho deve-se à importância cada vez maior da transmissão de energia elétrica sob a forma de corrente contínua, importância esta que, com o progresso da eletrônica de potência

tende a aumentar em função das vantagens decorrentes desta forma de transmissão de energia, entre estas vantagens estão, a interligação de sistemas de tensão alternada que operam com frequências diferentes, e um custo menor para sistemas de transmissão aéreos em corrente contínua, para distâncias superiores a 500 quilômetros [20].

A importância do problema torna, portanto, necessário, o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa que permitam um melhor conhecimento do comportamento das descargas elétricas em corrente contínua na superfície de isoladores de alta tensão, sujeitos a poluição atmosférica.

No capítulo 2 deste trabalho, é feita a modelagem estática da descarga elétrica numa superfície poluída, a partir do circuito elétrico equivalente do modelo experimental do isolador poluído, desenvolvido a partir do modelo de Obenaus [19]. É feita ainda uma análise dos critérios para a ocorrência do flashover.

No capítulo 3 é feita a implementação do modelo matemático através de um programa computacional, que permite obter as principais características do deslocamento da descarga numa superfície poluída. São apresentados os resultados obtidos com uma análise dos mesmos.

No capítulo 4 é apresentada a montagem experimental realizada no Laboratório de Alta Tensão, constituída por um sistema de reprodução da descarga em corrente contínua, um sistema de

visualização óptica da mesma, no qual são utilizados fotomultiplicadores ligados a cabos de fibra óptica, e um sistema de medição das grandezas elétricas envolvidas.

No capítulo 5 estão os resultados obtidos da montagem experimental. É feita a sua comparação com os resultados do modelo matemático, e a análise dos resultados apresentados.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas ao longo deste trabalho e são também sugeridos novos estudos que podem vir a ser realizados, a fim de dar continuidade a esta linha de pesquisa, utilizando a tecnologia aqui desenvolvida, para a visualização óptica do deslocamento de uma descarga numa superfície poluída.

II - MODELIZAÇÃO DA DESCARGA ELÉTRICA NUMA SUPERFÍCIE

II.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita a modelização matemática de uma descarga elétrica que se desloca numa superfície poluída. São analisados os critérios para a ocorrência de flashover e os mecanismos físicos que regem a propagação da descarga.

II.2 - MODELIZAÇÃO DA DESCARGA

A modelização da descarga elétrica é feita a partir do modelo físico de um isolador poluído desenvolvido por Obenaus [19]. Este modelo consiste em um canal retangular no qual é depositado um eletrolito formado por água destilada à qual é adicionado sal comum, e cuja resistência pode ser variada. Este eletrolito, representa a camada de poluição que se deposita na superfície de um isolador de alta tensão instalado em regiões sujeitas à poluição atmosférica. O modelo consta ainda de um eletrodo de alta tensão através do qual são aplicadas descargas elétricas que se deslocam ao longo do canal, até um eletrodo de terra. Este modelo pode ser visto na figura 2.1. A figura 2.2 mostra o circuito elétrico equivalente ao modelo experimental utilizado, a partir do qual, é iniciado o equacionamento da modelagem estática do problema. O arco representa a coluna da descarga, e a resistência, representa a resistência da camada de poluição que se deposita na superfície de um isolador sob poluição.

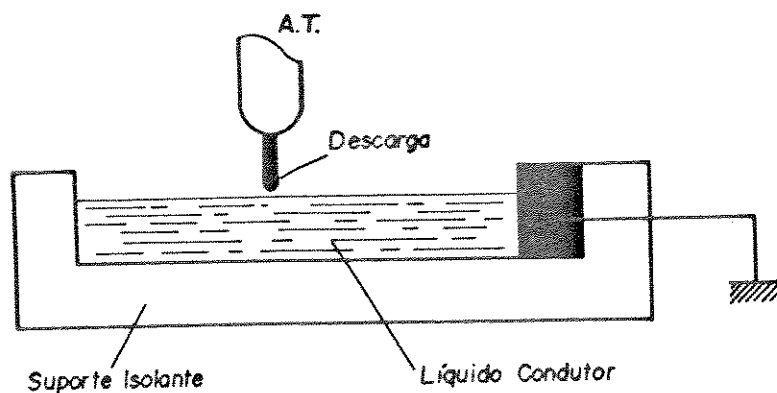


Figura 2.1 Modelo experimental

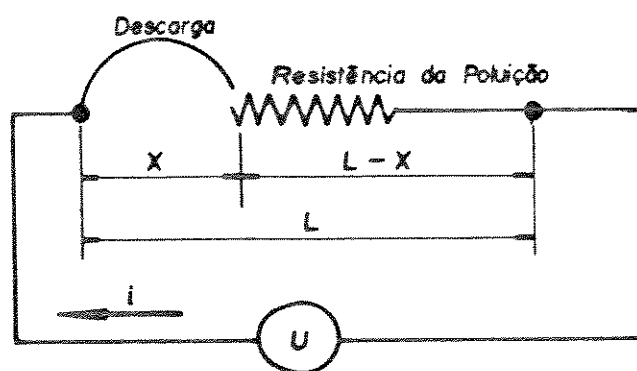


Figura 2.2 Circuito elétrico equivalente

Do circuito tem-se:

$$U = V_d + V_p$$

(1)

onde:

U = Tensão aplicada.

V_d = Queda de tensão na descarga.

V_p = Queda de tensão na camada de poluição.

ainda do circuito

$$V_p = (L - x) r.i \quad (2)$$

onde

r = resistividade do eletrolito

L = comprimento do canal

x = alongamento da descarga

i = corrente total da descarga

Para uma descarga intermediária entre a luminescência e o arco, a diferença de potencial nos seus bornes pode ser escrita como:

$$V_d = x.E_a + U_e \quad (3)$$

onde

E_a = campo elétrico na coluna da descarga

U_e = queda de tensão nos eletrodos

ainda

$$E_a = A.i^{-n} \quad (4)$$

A e n são constantes experimentais que dependem do meio em que a descarga se desenvolve. Os valores mais utilizados bem como os pesquisadores que os determinaram são apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 Valores utilizados para as constantes experimentais A e n

| AUTORES | A | n | meio |
|---------------|-----|------|---------------------|
| Obenaus | 100 | 0,7 | ar seco |
| Jolly | 80 | 0,62 | |
| Claverie | 100 | 0,5 | |
| Woodson, M.E | 200 | 0,8 | |
| Zoledzioswski | 63 | 0,76 | |
| Wilkins | | | |
| Nasser | | | |
| Rahal, Huraux | 530 | 0,24 | vapor de agua |
| Hampton | | | |
| Guan Z. | 138 | 0,69 | |

A equação da tensão será:

$$U = x.A.i^{-n} + (L - x) r.i + U_e \quad (5)$$

Considerando a queda de tensão U_e constante, a equação completa do circuito será:

$$V = U - U_e = x.A.i^{-n} + (L-x) r.i \quad (6)$$

II.3 - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE FLASHOVER

Denomina-se como tensão de flashover, o valor mínimo de tensão que, aplicada ao sistema, permita o alongamento da descarga até a ocorrência do flashover.

A partir da equação 6, é obtida a característica da tensão V , em função da corrente i , para valores de x constantes. Estas características são mostradas nos gráficos da figura 2.3. Os pontos mínimos de tensão e corrente são dados por:

$$i_m = [n \times A / r (L - x)]^{n/n+1} \quad (7)$$

$$v_m = (n+1) \cdot (A \cdot x)^{1/n+1} [(L-x)r/n]^{n/n+1} \quad (8)$$

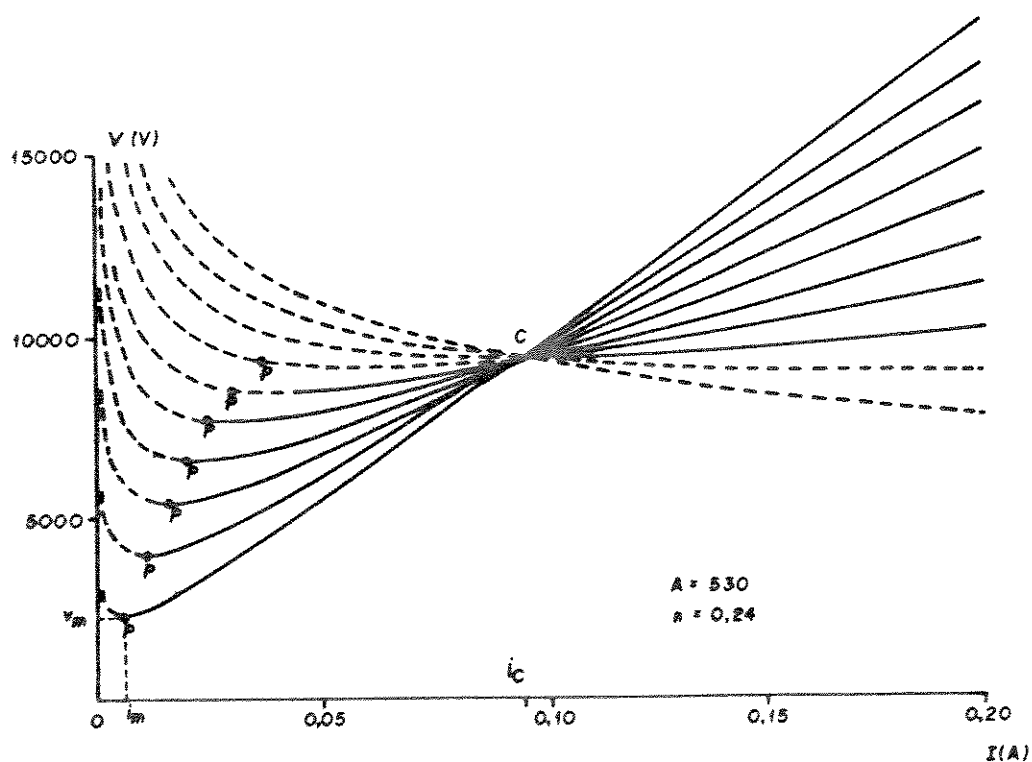


Figura 2.3 Características $V(i)_{x=cte.}$

v_m e i_m são as coordenadas dos pontos p nas curvas $V(i)$ para x constante. Os pontos p desenham uma curva que tem o seu máximo valor no ponto c , que é comum a todas as características. Esta curva dos pontos p está representada na figura 2.3 conforme estudo de Alston e Zoledziowski [21], ela permite a observação gráfica dos valores de tensão e corrente de flashover.

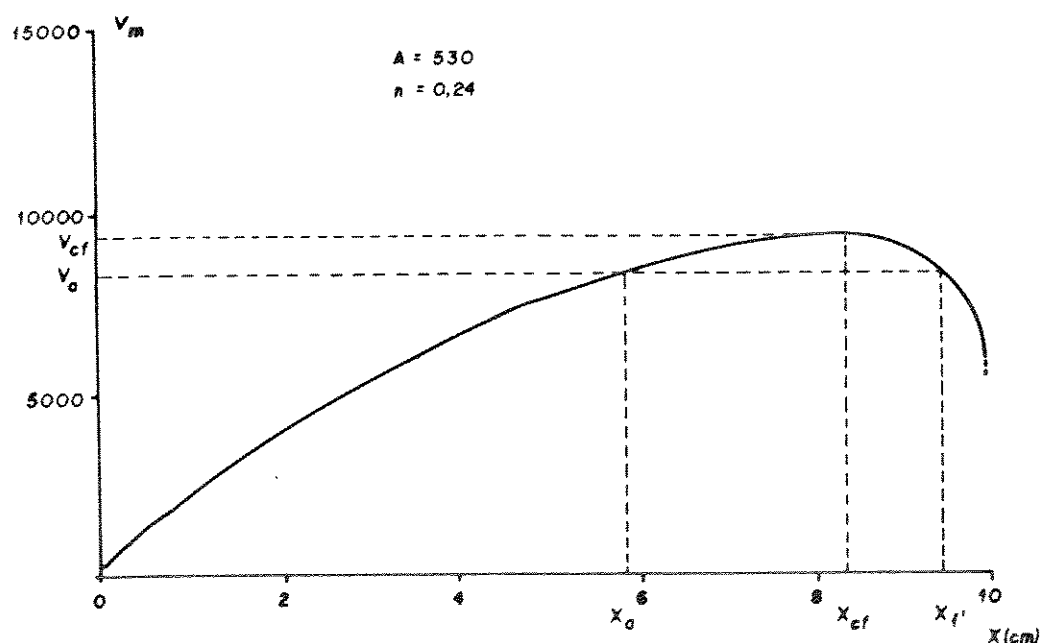


Figura 2.4 Valores críticos de flashover

Para uma determinada resistência r , v_m representa a tensão mínima capaz de alimentar uma descarga de comprimento x . Na curva da figura 2.4, para uma tensão aplicada de valor v_a , a descarga só poderá atingir um comprimento igual a x_a , inferior ao valor crítico x_{cf} sendo portanto incapaz de atingir o flashover. Os valores que

garantem a ocorrência do flashover, são v_{cf} e i_{cf} denominados como tensão e corrente críticos de flashover. A partir das equações 7 e 8, é possível determinar estes valores como sendo:

$$x_{cf} = L/(1+n) \quad (9)$$

$$i_{cf} = (A/r)^{1/n+1} \quad (10)$$

$$v_{cf} = L \cdot A^{1/n+1} \cdot r^{n/n+1} \quad (11)$$

Wilkins [22] introduz a influência das características geométricas do canal no modelo de Obenaus, onde a resistência superficial do líquido é dada por:

$$R = r_l (L-x) + \frac{a}{2\pi} \ln \frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2} \quad (12)$$

onde

a = largura do canal

r_d = raio da descarga

A equação geral da tensão será dada então por:

$$V = x A i^{-n} + r_l (L-x) + \frac{a}{2\pi} \ln \frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2} \quad (13)$$

Da mesma forma que na equação número 6. A partir

da equação número 13 é possível a determinação de dois tipos de características:

$$V(i)_x = \text{cte.}$$

e

$$X(i)_v = \text{cte.}$$

As curvas anteriores permitem obter os valores de v e x que devem existir para que a descarga se mantenha.

Resolvendo a equação 13 para x tem-se:

$$X = \frac{V - Lri - r \frac{a}{2\pi} \cdot \ln \frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2} \cdot i}{A \cdot i^{-n} - r \cdot i} \quad (14)$$

A partir da equação 11 podem ser determinados os valores críticos de tensão e corrente que asseguram a ocorrência do fenômeno de "flashover":

$$i_{cf} = \left(\frac{A}{r} \right)^{1/n+1} \quad (15)$$

$$V_{cf} = r^{n/n+1} \cdot A^{1/n+1} \cdot \left(L + \frac{a}{2\pi} \cdot \ln \frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2} \right) \quad (16)$$

V_{cf} é função dos parâmetros característicos da descarga L e r e das constantes experimentais A e n .

Neste trabalho, os valores adotados são $A=530$ e $n=0,24$, em função da descarga se dar no vapor de água.

A partir do equacionamento anterior, é possível determinar as características para as condições de flashover como, por exemplo, a curva da tensão em função da elongação ou comprimento da descarga (X), para diferentes valores de corrente. Com base nesta característica pode ser representada a relação que condiciona a ocorrência do flashover para corrente constante na descarga, como sendo:

$$\frac{dV}{dx} \leq 0 \quad (17)$$

Rao e Gopal [23], propõem uma outra equação para o gradiente de tensão da descarga. Segundo os autores, a equação já apresentada $E = A.i^{-n}$, somente é válida para correntes estacionárias o que explicaria a variação de valores para A e n dos diversos autores (Tabela 2.1). Introduzindo esta equação no modelo de Obenaus, chegam a uma nova expressão de tensão no modelo que é dada por:

$$U_a = \alpha + (\beta + x) \cdot E(i) \quad (18)$$

Onde o gradiente do campo é dado por:

$$E(i) = \gamma \left(\ln \frac{i}{\delta} \right)^{-3} \quad (19)$$

α, β, γ e δ são constantes e x é o comprimento da descarga. Introduzido ainda um novo valor de R dado por:

$$R = \frac{FF}{K_s} K_r \quad (20)$$

Onde: K_r = Fator de multiplicação que traduz a concentração de linhas de corrente no pé da descarga.

FF = Fator de forma.

K_s = Condutividade superficial da camada de poluição.

Com o novo valor para a resistência da poluição, a equação geral da tensão é dada por

$$U = \alpha + (\beta+x) \gamma \left(\ln \frac{1}{\delta}\right)^{-3} + \left(\frac{L-x}{K_s \cdot b}\right) \left(1 + \frac{b}{2\pi(L-x)} \ln \frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (21)$$

Onde r_d é o raio da descarga e b é a largura do canal.

II.4 - CRITÉRIOS PARA A OCORRÊNCIA DE FLASHOVER.

Dois critérios podem ser citados, um experimental de Hampton [24], e outro de Wilkins [22], baseado no princípio da termodinâmica que garante que "um sistema se coloca sempre na configuração que lhe permita a máxima dissipação de energia".

A partir de um sistema experimental, que consiste numa descarga que se propaga num eletrólito com escoamento vertical, Hampton [24] mostra que a condição necessária para que ocorra

flashover é que o gradiente de tensão do líquido (eletrolito) supere o gradiente de tensão da coluna do arco.

Este critério foi reescrito por Wilkins sob a seguinte expressão:

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (22)$$

Num trabalho publicado recentemente L. Shunyuan, Z. Renyu e T. Kexiong [16] concluem, a partir dos resultados por eles obtidos, que este é o melhor critério para o deslocamento da descarga, ou seja, o movimento da descarga se produz quando a curva da potência da fonte em relação ao alongamento da descarga tem uma inclinação positiva. Se a tensão se mantém constante durante a descarga, a equação se reduz para:

$$\frac{di}{dx} > 0 \quad (23)$$

J. Pissolato [25] na comparação entre os resultados obtidos a partir das equações 13 e 21 mostra que para valores de resistência de poluição acima de 6 Kohms/cm, os valores obtidos pela equação de Rao e Gopal, aproximam-se mais dos obtidos experimentalmente. Para a escolha das equações do nosso modelo no entanto, é necessário levar em consideração a compatibilidade que deve existir com o mecanismo físico escolhido para explicar a propagação da descarga, esta escolha será feita após uma análise destes mecanismos.

II.5 - MECANISMOS FÍSICOS QUE REGEM A PROPAGAÇÃO DA DESCARGA.

Dois são os mecanismos físicos propostos mais conhecidos para explicar a propagação de uma descarga elétrica numa superfície poluída.

II.5.1 - MECANISMO DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES NO PÉ DA DESCARGA

D. C. Jolly [26], propõe que, em função da concentração de linhas de corrente na origem ou raiz da descarga, o campo elétrico nesta região será intenso. Se esta intensidade provoca um arco local através do ar, a descarga será capaz de se deslocar ao longo da superfície. Este deslocamento levará até o flashover, desde que as linhas de campo estejam concentradas no início da raiz da descarga. O efeito pode ser comparado com o de uma descarga líder de uma descarga atmosférica. Descargas ou arcos ocorrendo à frente da raiz, provocam a formação de um canal ionizado que servirá como um caminho para a extensão da descarga. Este processo se repete até o curto-circuito total do isolador, ou até que o campo elétrico na origem ou raiz da descarga seja insuficiente para provocar novos arcos à frente da descarga.

Autores como Wilkins e Al-Baghdadi [27] defendem, a partir de resultados experimentais, a existência de uma corrente elétrica paralela à corrente da descarga dentro do eletrolito e apresentam como hipótese, que o mecanismo responsável pela propagação é a ionização sucessiva à frente do pé da descarga.

Esta ionização por sua vez, resulta do alto gradiente de tensão e da elevada temperatura existentes nesta região.

Mercure e Drouet [28] apresentam uma nova técnica experimental para medir a distribuição de corrente no pé da descarga. A experiência consiste em colocar pequenas bobinas, que funcionam como enrolamentos primários de transformadores no percurso da descarga. A partir dos resultados obtidos, concluem que uma das condições para a propagação é a assimetria da densidade de corrente no pé da descarga em relação a origem, ou seja, di/dx é maior no pé da descarga do que na região anterior.

Wilkins, no trabalho em que introduz as grandezas geométricas do canal do modelo de Obenaus, desenvolve a equação para a tensão ao longo do canal (X). Esta equação é dada a seguir.

$$U = \frac{-i}{4\pi\sigma h} \cdot \ln \frac{1}{4} \left[\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a} (x-b) - 1 \right] \left[\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a} (x+b) - 1 \right] \quad (24)$$

A partir desta equação é possível obter a expressão para o campo elétrico no pé da descarga E_{pr} , dada a seguir:

$$E_{pr} = \frac{i}{2\sigma ah} \left[\frac{\operatorname{sh} (2\pi r_d/a)}{\operatorname{ch} (2\pi r_d/a) - 1} + 1 \right] \quad (25)$$

Nas equações 24 e 25 tem-se que:

i = corrente total da descarga

h = espessura do eletrolito

b = distância entre a origem da descarga e o eletrodo de terra

σ = condutividade volumétrica do eletrolito

a = largura do canal que contém o eletrolito

r_d = raio da descarga

$\sigma = \frac{1}{r \cdot a \cdot e}$, onde r é a resistência e e , a espessura do líquido.

De acordo com Wilkins, para o nível de correntes encontradas, a densidade de corrente na descarga dada por $\frac{i}{\pi r_d^2}$, é constante e de valor igual a 1.45 A/cm^2 .

Swift [29], também a partir de resultados experimentais, estabelece uma equação para o campo elétrico em função da alongação ou comprimento no pé da descarga, esta equação é a seguinte:

$$E(x) = \frac{\phi(x) \cdot 2 \cdot L}{x(2L - x) \ln(2L - r_d) / r_d} \quad (28)$$

Onde $\phi(x)$ é a diferença de potencial entre o ponto X e o eletrodo de baixa tensão, conforme a figura 2.5. Nesta figura, i_a é a corrente na superfície, e i_e , é a corrente dentro do eletrolito.

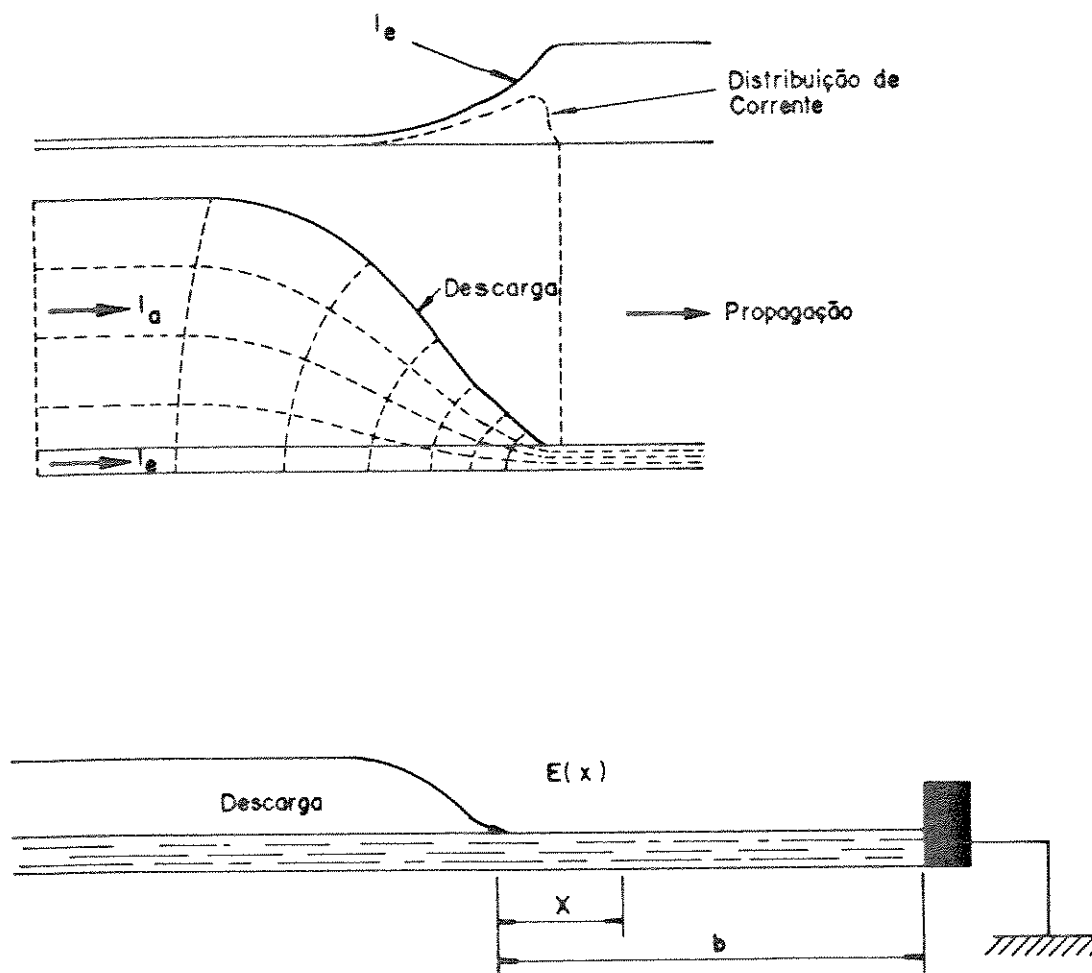


Figura 2.5 Distribuição da corrente no pé da descarga

Dentro do estudo da distribuição das correntes no pé da descarga, Peyregne [30] apresenta um estudo das variações do campo elétrico no pé da descarga em função de variações na tensão aplicada, da largura do canal que contém o eletrolito, bem como da

resistência do líquido. Os resultados deste trabalho podem ser vistos nas figuras 2.6 e 2.7.

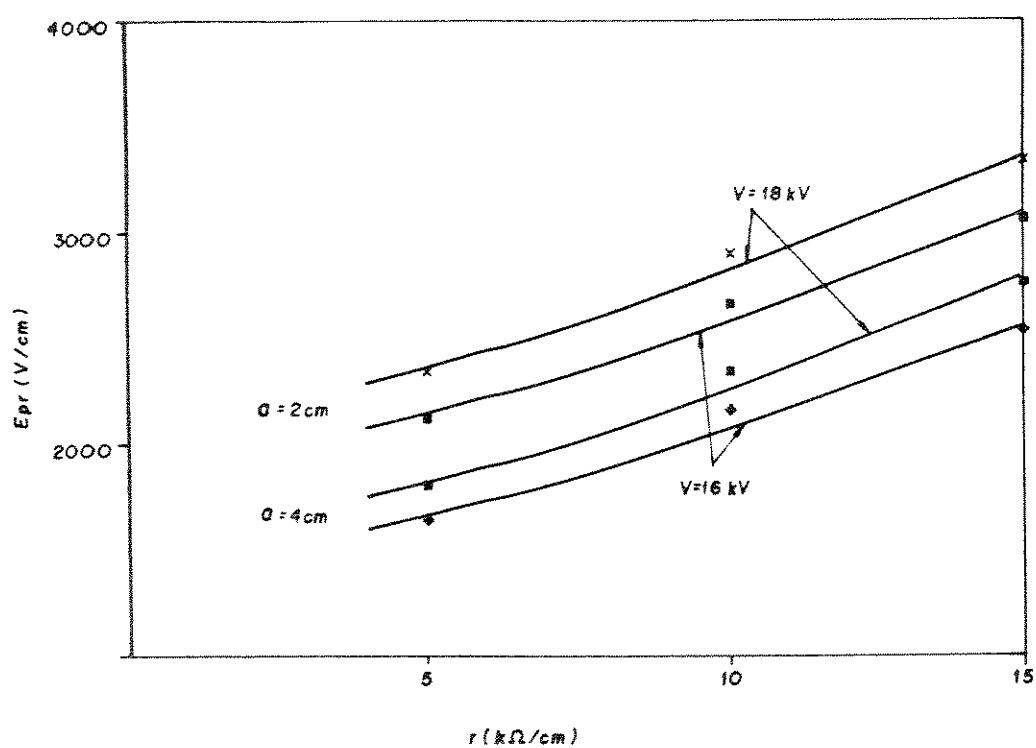


Figura 2.6 Variação do campo elétrico E_{pr} em função da resistência.

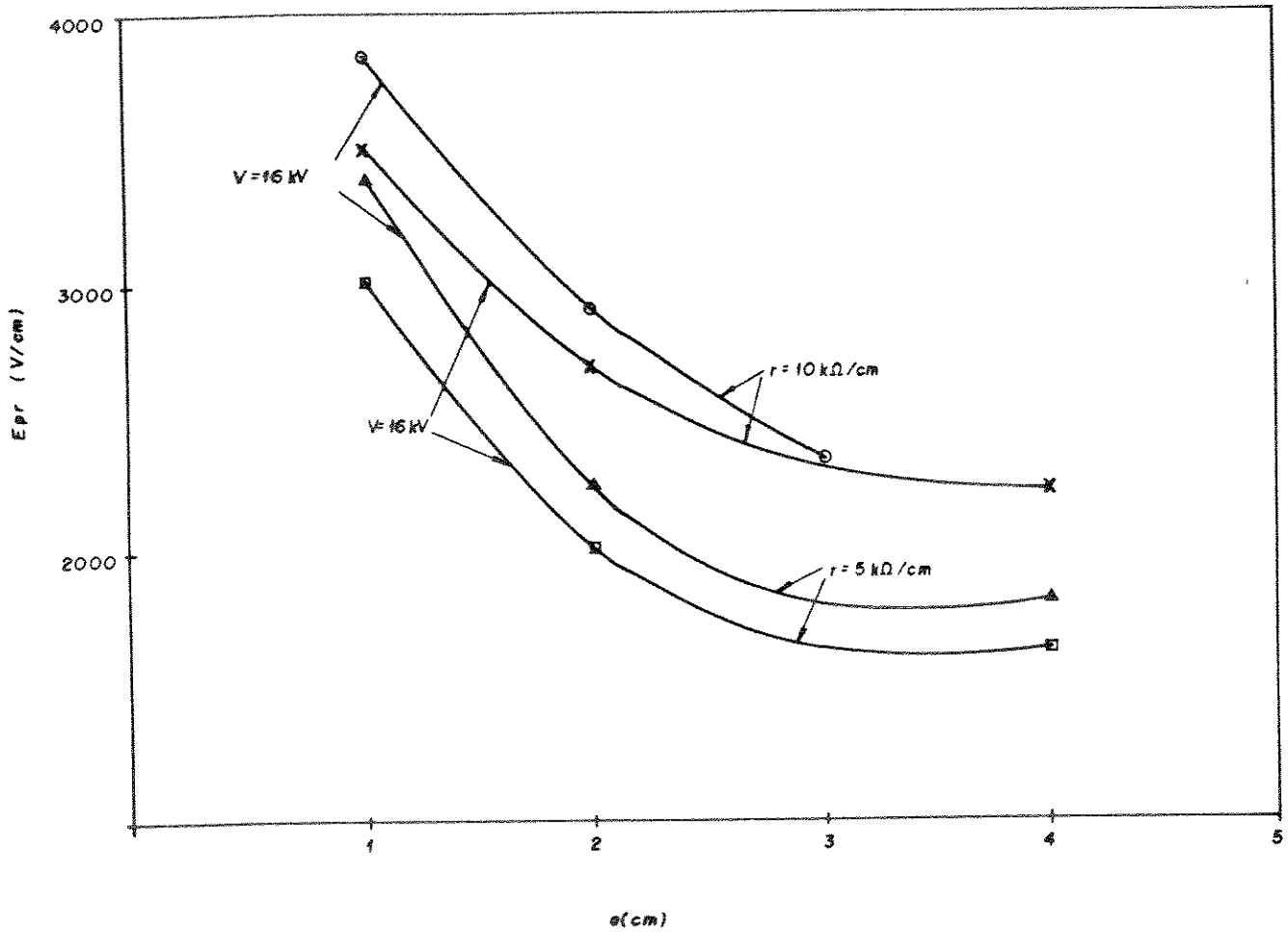


Figura 2.7 Variação do campo elétrico E_{pr} em função da largura do canal.

II.5.2 - MECANISMO DA FORÇA

A hipótese do mecanismo da força é defendida por

dois grupos de pesquisadores. O primeiro defende a existência de uma força que rege o fenômeno da propagação, e o segundo postula a ação combinada desta força com a pré-ionização devida ao intenso campo elétrico existente no pé da descarga.

Dentro do primeiro grupo, A.M. Rahal [31] demonstra teórica e experimentalmente, a existência desta força que governa a descarga. Esta é uma força eletrostática provocada pela assimetria do campo elétrico no pé da descarga. O trabalho experimental em que Rahal baseia as suas conclusões é esquematizado na figura 2.8.

Na fig. 2.8 (a e b), observa-se uma curvatura na descarga entre o eletrodo de alta tensão e o eletrolito, sempre na direção do deslocamento da descarga. Esta curvatura pode ser provocada por ação do campo magnético ou pela ação de um outro campo de origem eletrostática. Nas figuras 2.8 (c e d), verifica-se que a curvatura desaparece quando uma ligação elétrica é feita entre a descarga e o eletrolito, ou quando um condutor metálico é colocado dentro do líquido, portanto, a presença da curvatura não está ligada a existência de gradiente de tensão no líquido. Quando o deslocamento da corrente é simétrico não se observa curvatura, ou seja, ela depende da simetria do gradiente de tensão. Ainda, sendo as correntes muito pequenas, as forças de origem magnéticas podem perfeitamente ser desprezadas.

A figura 2.8 (f) mostra que atuando na repartição equipotencial do campo, pode-se alterar a curvatura da descarga entre o eletrodo de alta tensão e o eletrolito.

O cálculo da distribuição de potencial no eletrodo de alta tensão, é mostrado na figura 2.9.

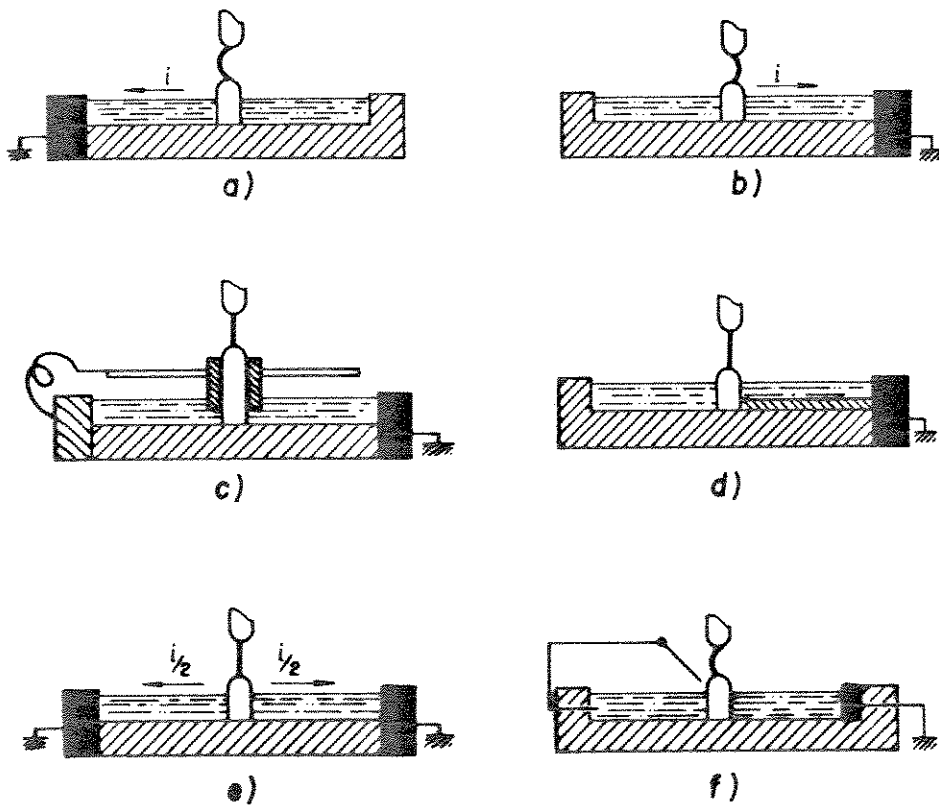


Figura 2.8 Hipótese da força para o deslocamento da descarga.

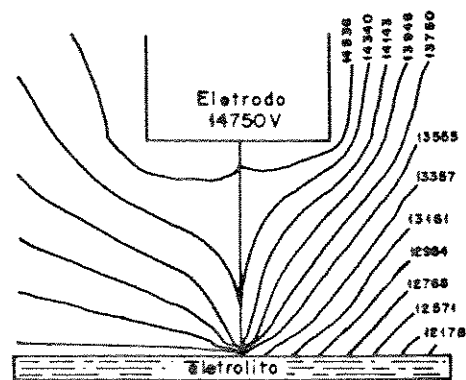


Figura 2.9 Distribuição do campo no eletrodo de A.T.

Jolly [26], considerando a possibilidade da atuação de forças através da camada do eletrólito, classifica estas forças como podendo ser de origem eletrostáticas, eletromagnéticas ou térmicas, e mostra que, para baixas correntes, as forças elétricas são dominantes, enquanto que as térmicas predominam para correntes altas.

II.6 - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.

A modelagem estática de uma descarga elétrica em alta tensão, que se desloca numa superfície poluída foi desenvolvida neste capítulo. Este desenvolvimento é feito a partir de um modelo experimental baseado no modelo de Obenaus, levando em consideração a introdução das características geométricas do canal do modelo, feita por Wilkins.

O equacionamento matemático obtido a partir do modelo, permite uma modelagem dinâmica do problema, a qual será apresentada no capítulo seguinte deste trabalho levando a concluir que, apesar da complexidade geométrica de um isolador real, utilizado em alta tensão não ser reproduzida pelo modelo, este continua sendo muito útil em estudos da dinâmica da descarga.

Neste capítulo foram consideradas também diversas hipóteses físicas para o deslocamento da descarga, as quais podem ser divididas em dois grupos, um defende que a distribuição de corrente no pé da descarga é a responsável pelo seu deslocamento [26] [28], e outro sustenta a existência de uma força que governa a descarga [31].

No capítulo 3 apresentado a seguir, é feito o desenvolvimento de um programa computacional que, baseado na modelagem estática apresentada neste capítulo, permite o acompanhamento das principais grandezas físicas e elétricas envolvidas no deslocamento de uma descarga elétrica em alta tensão, na superfície de isoladores

destinados a trabalhar em regiões sujeitas a notável poluição atmosférica.

III - IMPLANTAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

A partir da modelização estática da descarga elétrica, é possível analisar o comportamento dinâmico da mesma, de uma forma aproximada sem levar em consideração todos os parâmetros envolvidos no fenômeno. A modelização matemática, irá permitir uma análise das principais grandezas elétricas e físicas que interferem no comportamento dinâmico do deslocamento de uma descarga elétrica sobre uma superfície poluída.

Na montagem de um programa computacional, destinado a simular o comportamento dinâmico da descarga, a hipótese do mecanismo da força é considerado como responsável pelo deslocamento da descarga ao longo do canal do modelo utilizado. Em relação aos aspectos microscópicos deste mecanismo, A. M. Rahal [31] postula que o deslocamento é governado pelos íons extraídos durante a descarga. Também, G. Peyregne [30] mostra que a fonte destes íons é a coluna da descarga e que a velocidade, é proporcional ao campo elétrico existente no pé da descarga E_{pr} .

J. Pissolato [25], sustenta que o deslocamento da descarga não depende somente do campo no pé da descarga E_{pr} , mas sim, de um campo que resulta da diferença entre o campo elétrico no pé da descarga E_{pr} , e o campo elétrico existente na coluna da descarga E_a .

Nesta modelização computacional, esta hipótese, é

introduzida no modelo de Obenaus.

A partir da condição crítica da equação 13 pode-se calcular a evolução da descarga, considerando as seguintes hipóteses:

a - O deslocamento da descarga é determinado pelo comportamento de sua origem. Se a origem se desloca, provocará o alongamento da coluna da descarga;

b - A força eletrostática que se exerce no pé da descarga, é introduzida por um campo elétrico que resulta da diferença entre o campo elétrico no pé da descarga E_{pr} , e o campo elétrico na coluna da descarga E_a ;

c - O deslocamento da descarga se dará com uma velocidade determinada pela seguinte expressão:

$$v = \mu (E_{pr} - E_a) \quad (27)$$

onde

v = velocidade da descarga.

μ = mobilidade iônica no pé da descarga à pressão atmosférica.

III.1 - CÁLCULO DA VELOCIDADE DA DESCARGA

A partir das equações 13 e 27 é possível formar um sistema de equações para o cálculo da velocidade de propagação da descarga, utilizando métodos numéricos. Durante este processo, todas as principais grandezas envolvidas no fenômeno de flashover, bem como as suas influências na descarga serão analisadas.

Duas destas grandezas que interferem decididamente no comportamento dinâmico da descarga são: o aquecimento do eletrólito e a capacidade do banco de capacitores que funciona como a nossa fonte de alta tensão.

A expressão que mostra a variação da condutividade do eletrólito em função da variação da temperatura, utilizada neste programa computacional, é:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(\frac{-W_0}{K.T}\right) \quad (28)$$

Na expressão anterior:

σ = condutividade do eletrólito.

σ_0 = condutividade inicial.

k = constante de Boltzmann.

W_0 = energia de ativação.

T = temperatura absoluta do eletrólito.

Rahal [31], obtém para a relação W_0/K o valor

igual a 1550° K, considerando $W_0 = 0.5 \times 10^{-17}$ Kcal/mol e ainda a seguinte variação para o valor de condutividade:

$$2.10^{-2} < \sigma_0 < 1 \text{ (} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \text{)}$$

Rahal [31] também considera os efeitos da capacidade da fonte de alta tensão, ou seja, do banco de capacitores, sobre a tensão crítica de flashover, sustentando que: a diferença de potencial entre os bornes da fonte deve aumentar com a diminuição da capacitância do banco de capacitores. Quanto maior for a capacitância, menor será a diferença entre o valor de tensão inicial aplicado, e o valor crítico de tensão de flashover, calculado pelo modelo estático.

Rahal [31], e Peyregne [30] propõem que o valor da tensão a ser aplicada ao modelo, seja determinado pela seguinte equação:

$$U = U_0 \cdot \exp \left(- t / t_0 \right) \quad (29)$$

Considerando que t_0 se mantém constante durante a ocorrência do flashover, esta expressão não será utilizada. Neste trabalho, a cada iteração será calculado o valor da variação dV da diferença de potencial nos bornes do banco de capacitores, partindo do valor inicial V_0 , através da expressão:

$$dV = \frac{i \cdot dt}{C} \quad (30)$$

onde:

C = Capacitância da fonte.

A variação da temperatura dT em função da variação do tempo dt, na camada de poluição, será determinada pela expressão dada a seguir:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{E^2}{\rho \cdot CV} \quad (31)$$

onde:

ρ = Resistividade do eletrólito.

CV = Calor específico.

E = Campo elétrico médio na poluição.

A resistência r da camada de poluição relaciona-se com a condutividade pela equação

$$\rho = S \cdot r \quad (32)$$

onde:

S = Seção da camada de poluição.

A variação da resistência da camada de poluição r, será calculada à partir das equações 28 e 32, e o novo valor de resistência será dado por:

$$r = \frac{1}{\sigma(T) \cdot S} \quad (33)$$

III.2 - ALGORITMO COMPUTACIONAL

O programa computacional implantado para o acompanhamento do deslocamento do flashover, pode ser simplifiadamente apresentado pela seguinte sequência de cálculos:

- Cálculo dos valores de corrente e tensão críticos de "flashover" i_{cf} e v_{cf} respectivamente. Estes valores garantem a ocorrência do flashover e serão os valores iniciais no processo iterativo.
- Cálculo dos valores do campo elétrico na coluna da descarga, e do campo elétrico no pé da descarga E_a e E_{pr} respectivamente.
- Cálculo da velocidade no pé da descarga v à partir da expressão 27.
- Incremento no valor do alongamento da descarga x , do valor dx .
- Cálculo da variação da temperatura da camada de poluição dT / dt , pela expressão 31.
- Cálculo do novo valor de resistência r .
- Cálculo da variação da corrente, di ,

correspondente ao deslocamento dx . É necessário testar se o novo valor de corrente ($i + di$), será capaz de alimentar a descarga para que esta, consiga atingir o novo valor de alongamento ($x + dx$).

- Teste para saber se a alongação x , já atingiu o valor total do comprimento do canal (L).

A figura 3.1 a, b e c, mostra o fluxograma simplificado do programa computacional.

III.3 - RESULTADOS DO MODELO COMPUTACIONAL

O programa, implantado num micro computador do tipo PC, em linguagem Turbo Pascal, permite acompanhar o comportamento das principais grandezas envolvidas durante a ocorrência do fenômeno de falshover. A seguir, serão apresentados alguns dos resultados mais importantes obtidos com a utilização deste modelo.

A partir das características apresentadas na figura 3.2, observa-se o comportamento do campo elétrico na camada de poluição E_p e do campo elétrico na coluna da descarga E_a , durante a ocorrência do flashover, em função da corrente elétrica na descarga. Os gráficos desta figura deixam mais clara a observação já feita no capítulo 2, em relação ao deslocamento da descarga, ou seja, a partir do valor de corrente crítica de flashover, para que a descarga se desloque, o campo elétrico na poluição será sempre maior que o campo elétrico na coluna da descarga.

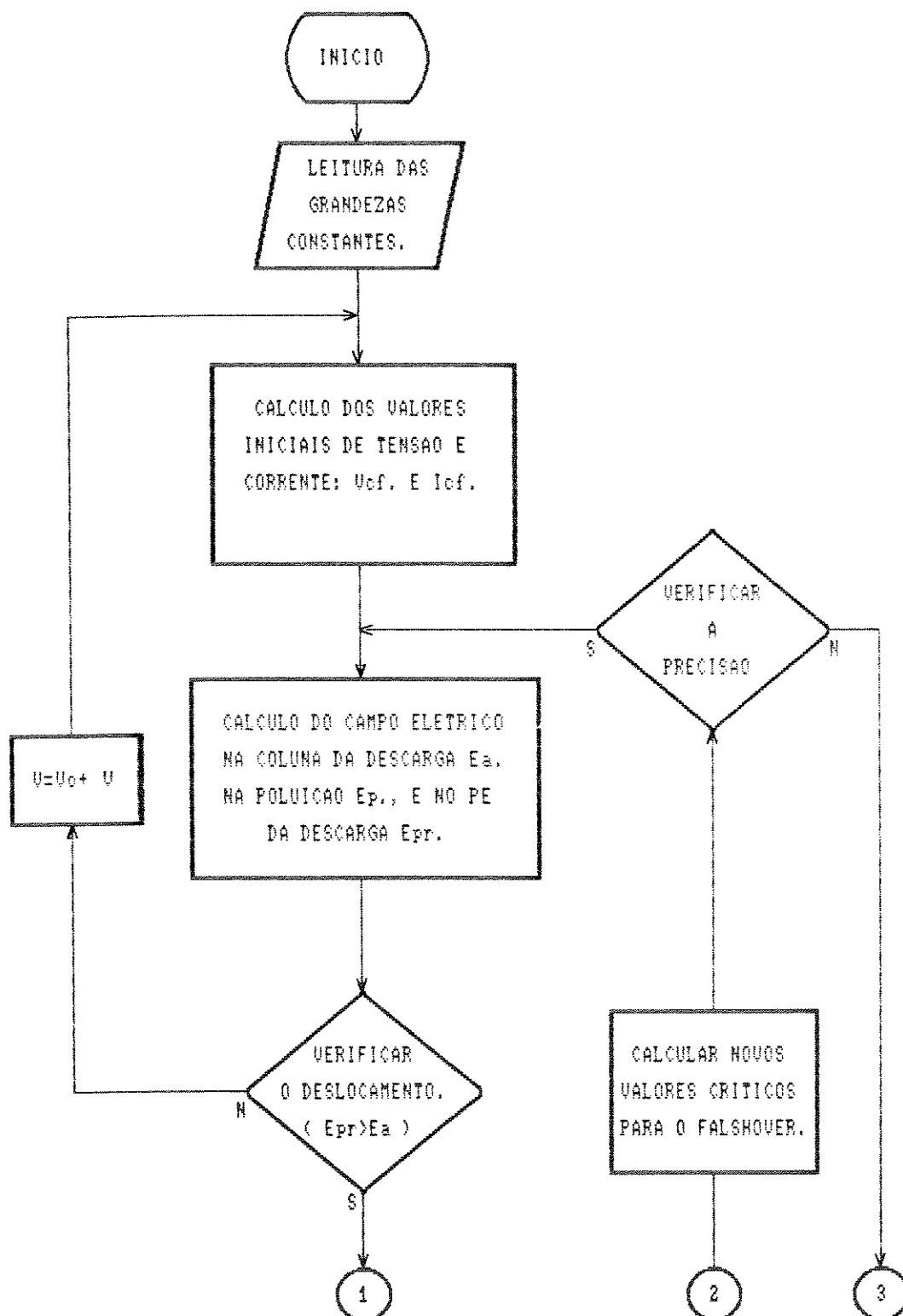


Figura 3.1 a Fluxograma do programa computacional.

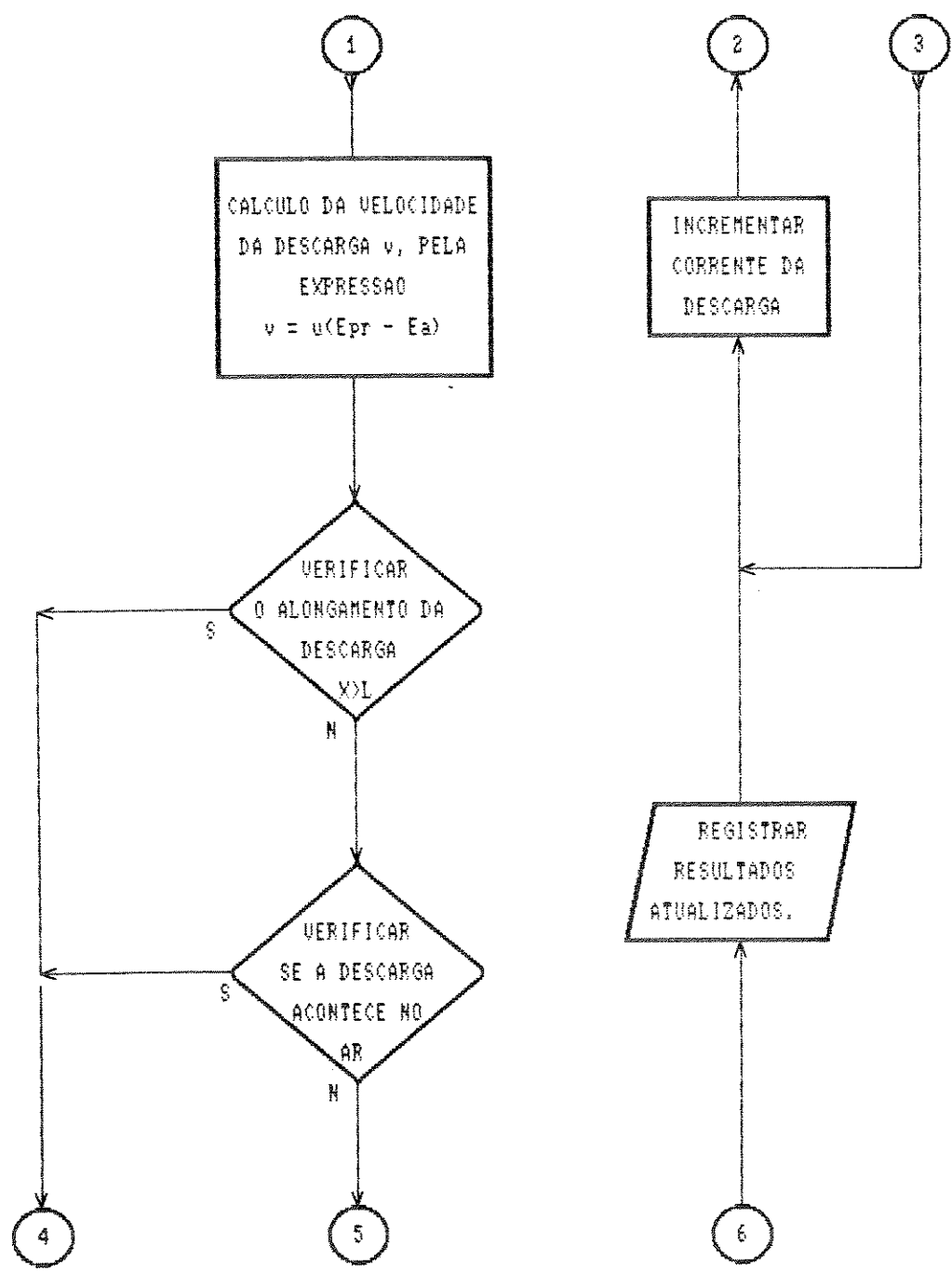


Figura 3.1 b Fluxograma do programa computacional.

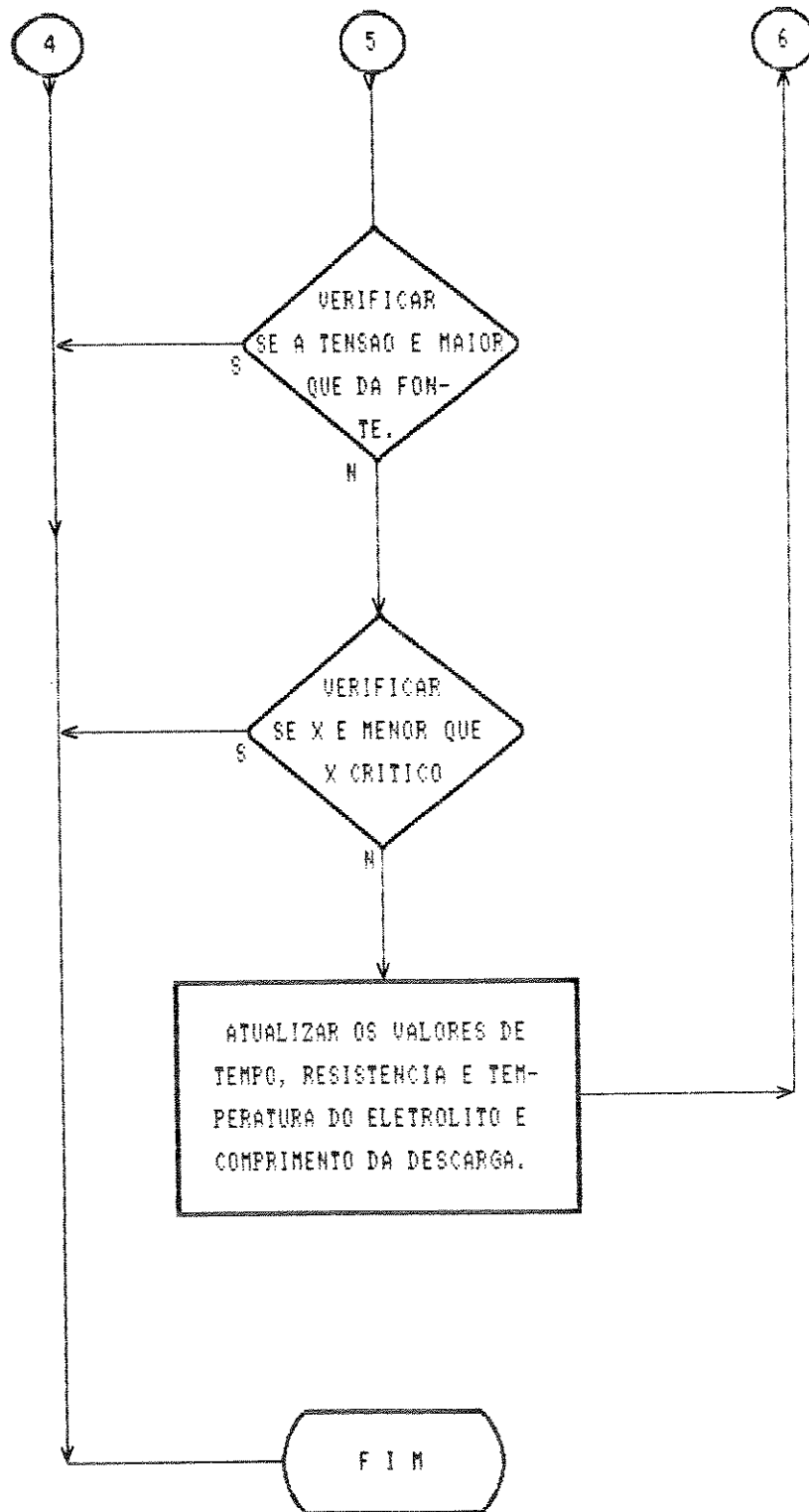


Figura 3.1 c Fluxograma do programa computacional.

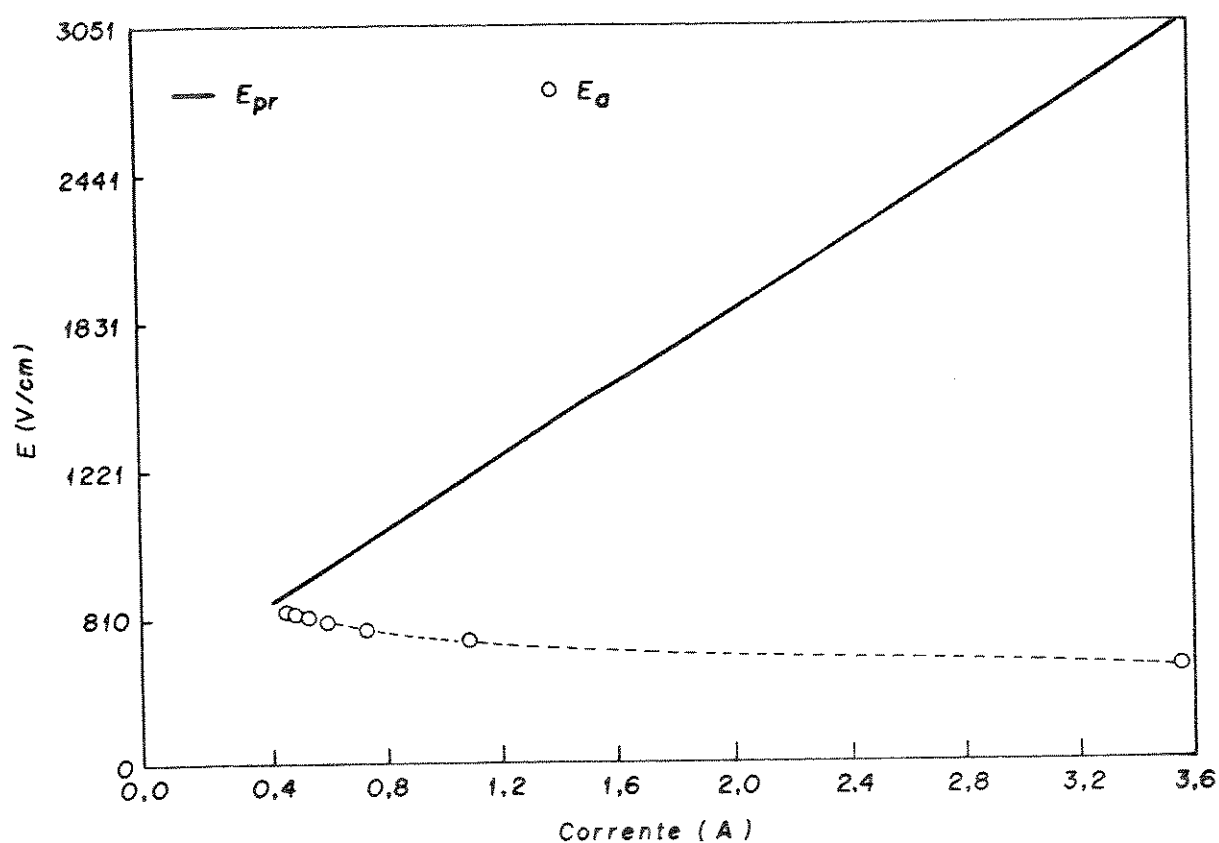


Figura 3.2 Campo elétrico na poluição e na coluna da descarga.

A figura 3.3, apresenta o comportamento do campo elétrico no pé da descarga e na coluna da descarga E_{pr} e E_a respectivamente, em função do deslocamento da descarga. Da mesma forma que na figura 3.2, observa-se que a medida que a descarga se desloca ao longo de x , o campo E_{pr} aumenta enquanto E_a diminui.

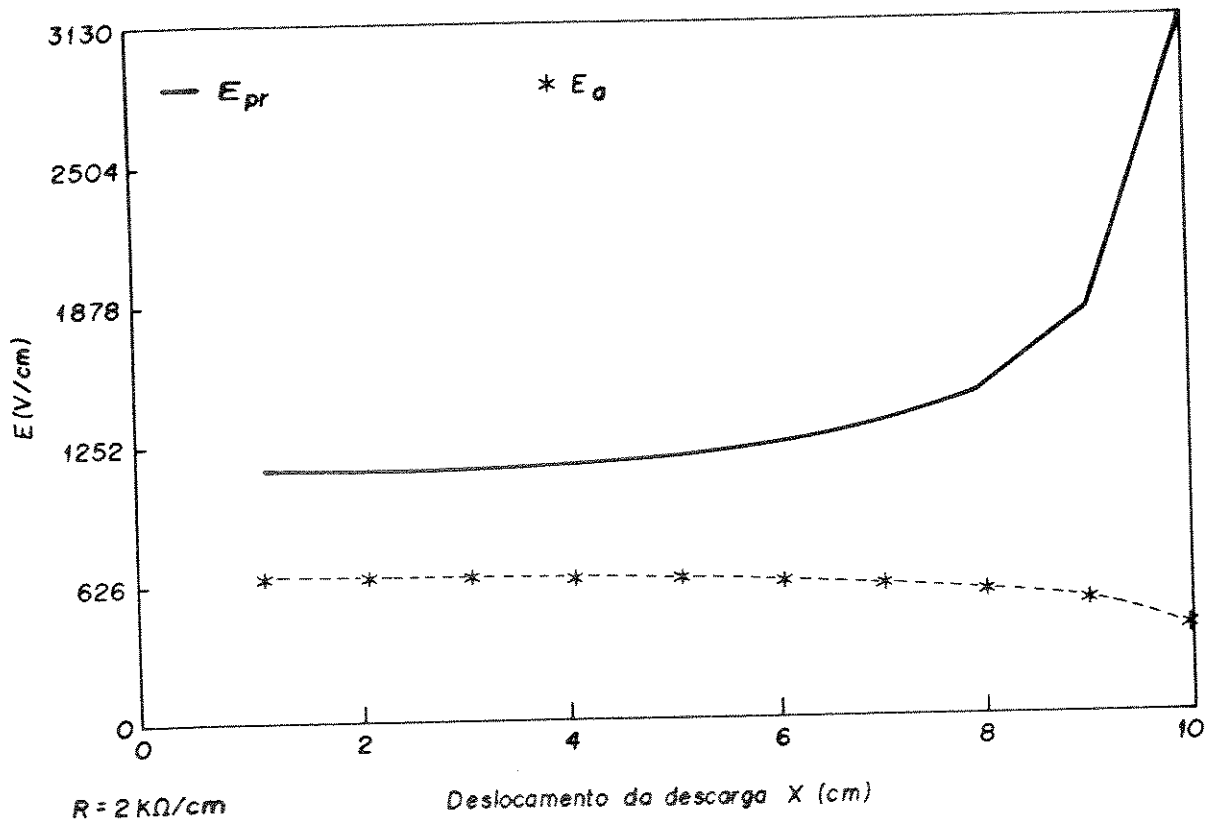


Figura 3.3 Gradientes de tensão no pé e na coluna da descarga.

A figura 3.4 apresenta as características de velocidade de flashover em função da elongação da descarga, para um valor de resistência da camada de poluição de 2 Kohms/cm. As várias curvas correspondem a diferentes valores adotados para a mobilidade iônica no programa.

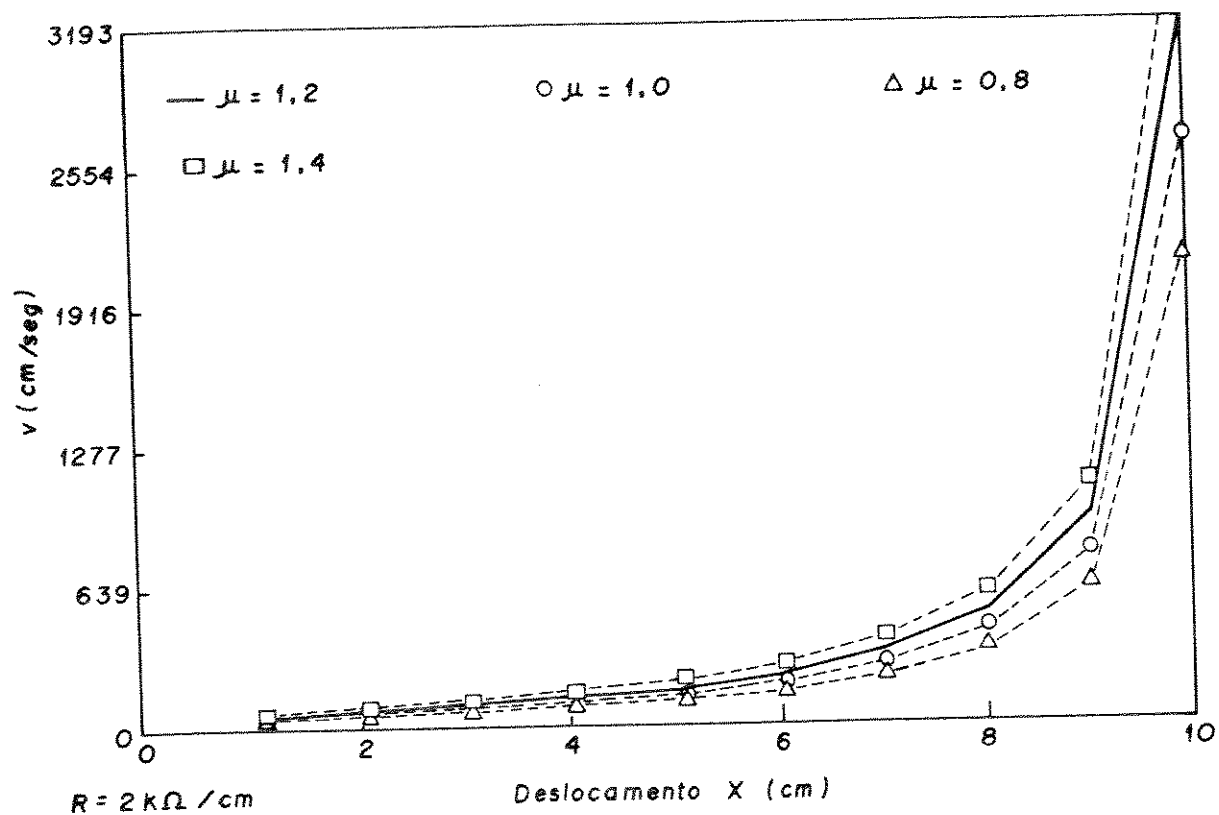


Figura 3.4 Velocidade de flashover para $R = 2 \text{ kohms/cm}$.

A figura 3.5 apresenta também as características de velocidade de flashover para um valor de resistência de poluição de 5 Kohms/cm. As várias curvas correspondem de novo, a diversos valores adotados no programa para a mobilidade iônica (μ).

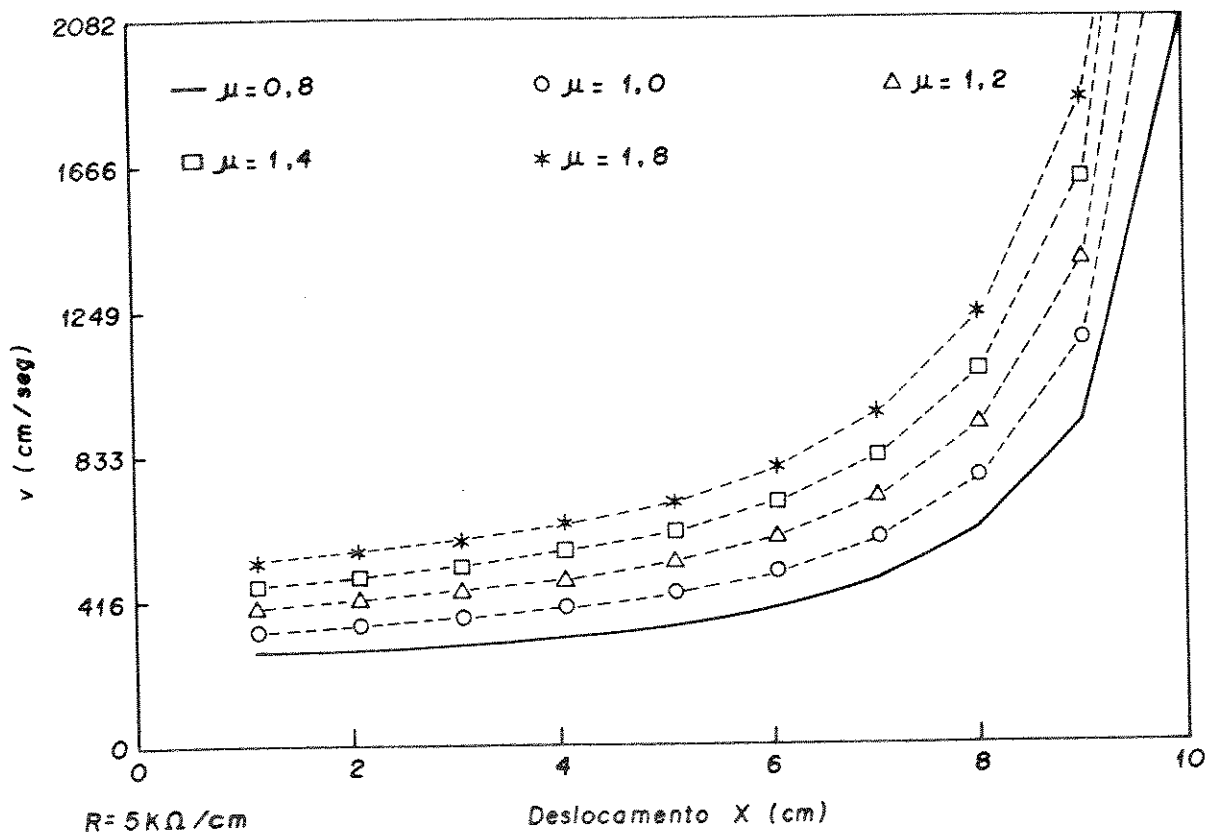


Figura 3.5 Velocidade de flashover para $R = 5 \text{ kohms/cm}$.

Dos gráficos das figuras 3.5 e 3.4, verifica-se que o valor adotado para a mobilidade iônica (μ), tem muita importância na modelização, pois dependendo deste valor, teremos uma aproximação melhor para as características obtidas experimentalmente, como poderá ser visto no capítulo 5, que apresenta os resultados experimentais.

A característica de velocidade é dada portanto, pelo comportamento da diferença dos campos elétricos, no pé e na coluna da descarga, conforme o critério adotado na nossa modelização. A figura 3.6, mostra este comportamento, para uma resistência da camada de poluição de 5 kohms/cm.

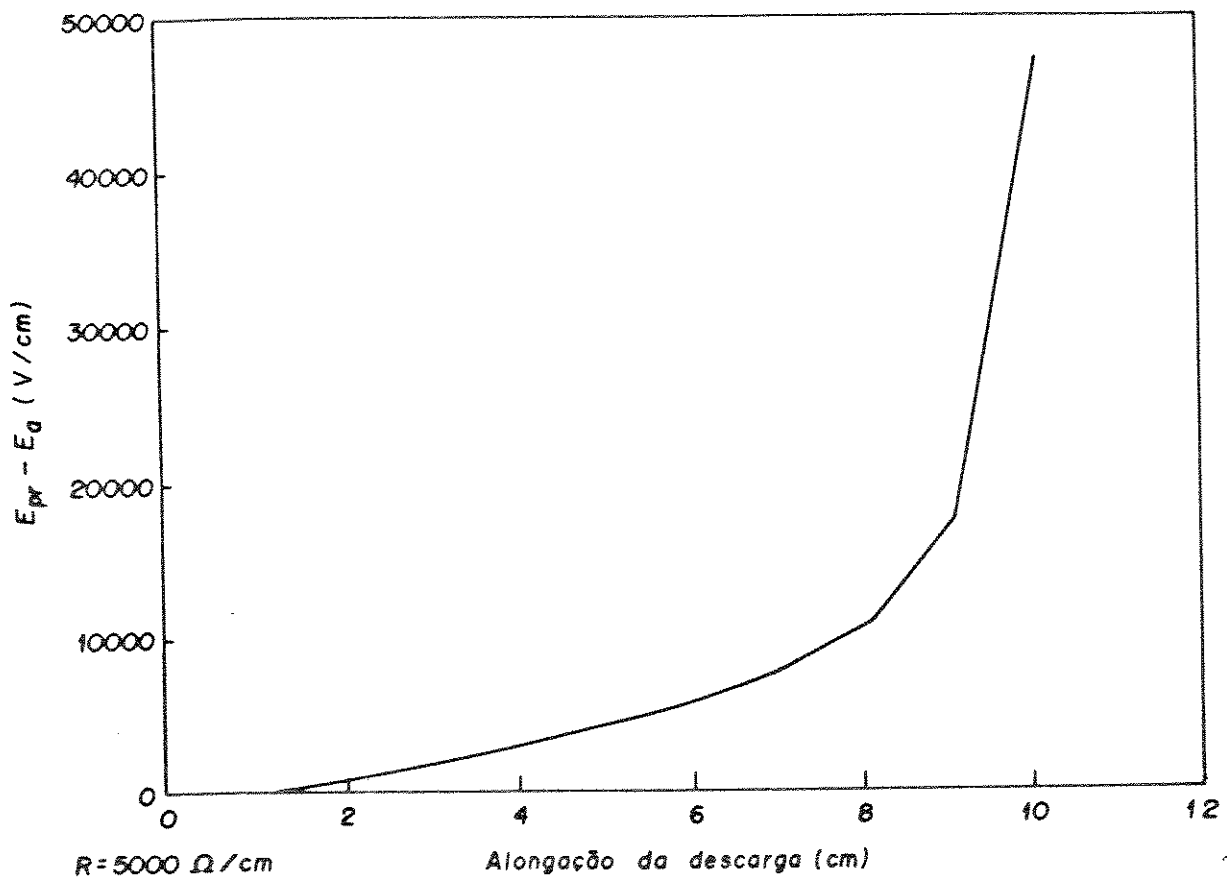


Figura 3.6 Diferença de campo elétrico no pé e na coluna da descarga.

A característica da figura 3.7, mostra o comportamento da resistência da camada de poluição durante a ocorrência da descarga, em função do tempo. Observa-se que, perto do tempo de flashover, a tendência é de uma diminuição muito rápida do seu valor.

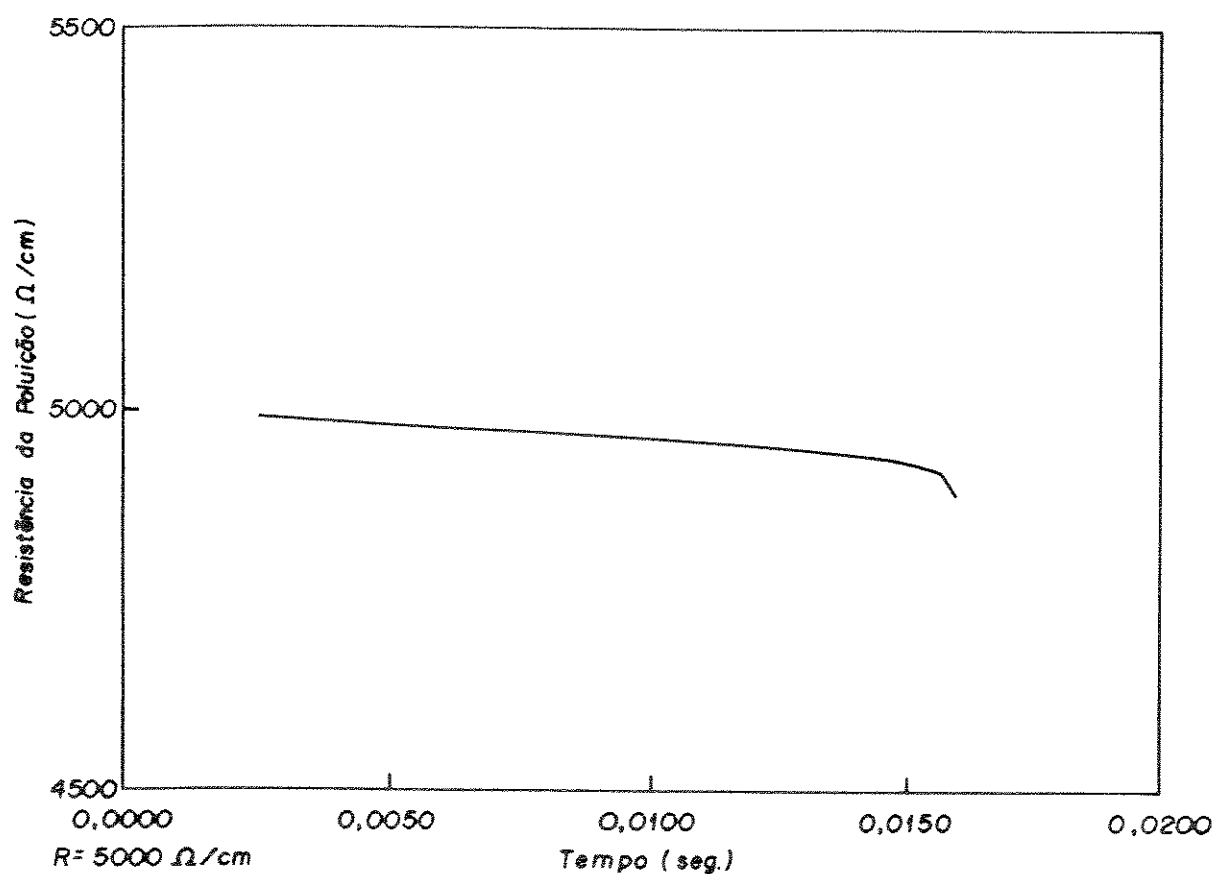


Figura 3.7 Resistência de poluição em função do tempo.

Na figura 3.8 é apresentada a característica do comportamento da temperatura no líquido eletrolito, representativo da camada de poluição, em função do tempo. O valor de resistência utilizado, é de 5 kohms/cm. Observa-se que, perto do tempo da ocorrência do flashover, ela aumenta rapidamente.

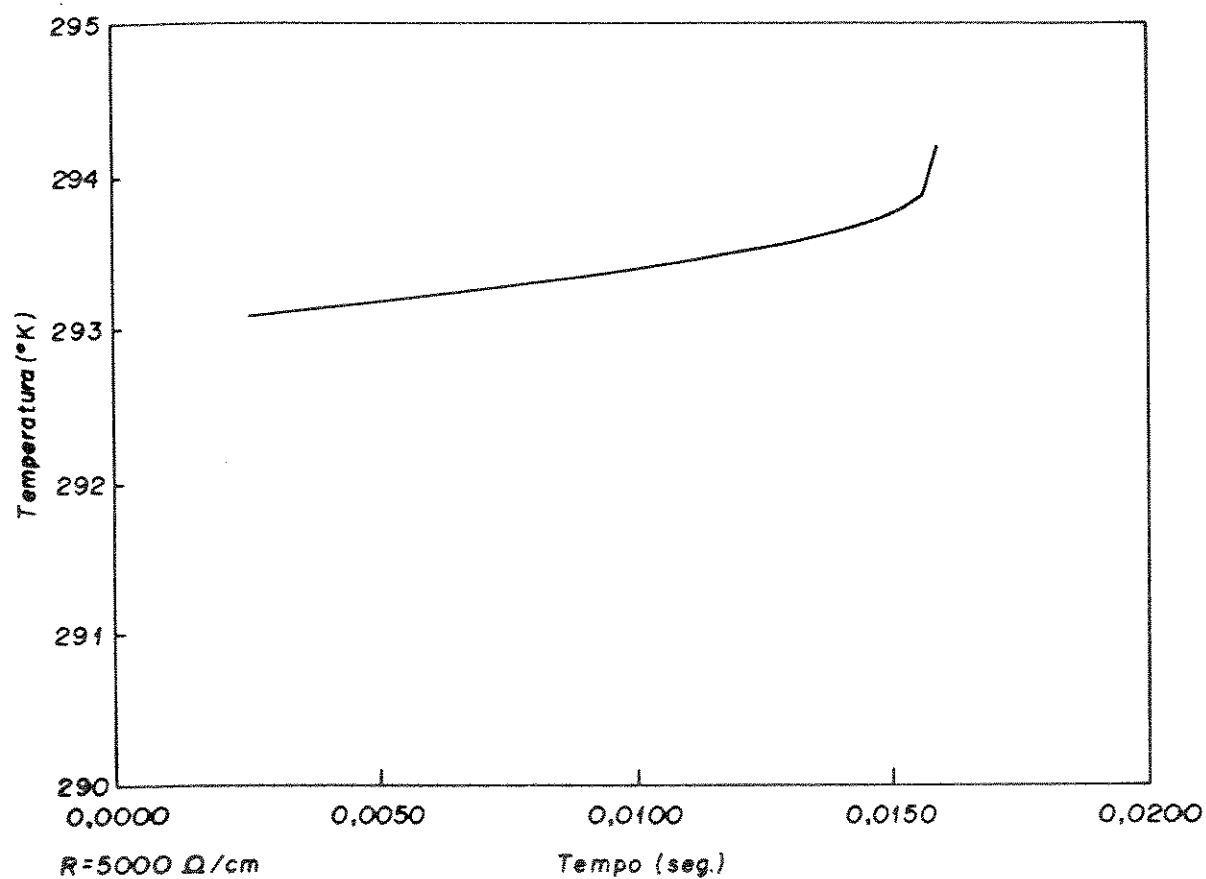


Figura 3.8 Temperatura do eletrolito em função do tempo.

A tensão durante a ocorrência de flashover em função do tempo, pode ser observada na figura 3.9. Na curva mostrada verifica-se que no instante de flashover, o seu valor decai rapidamente.

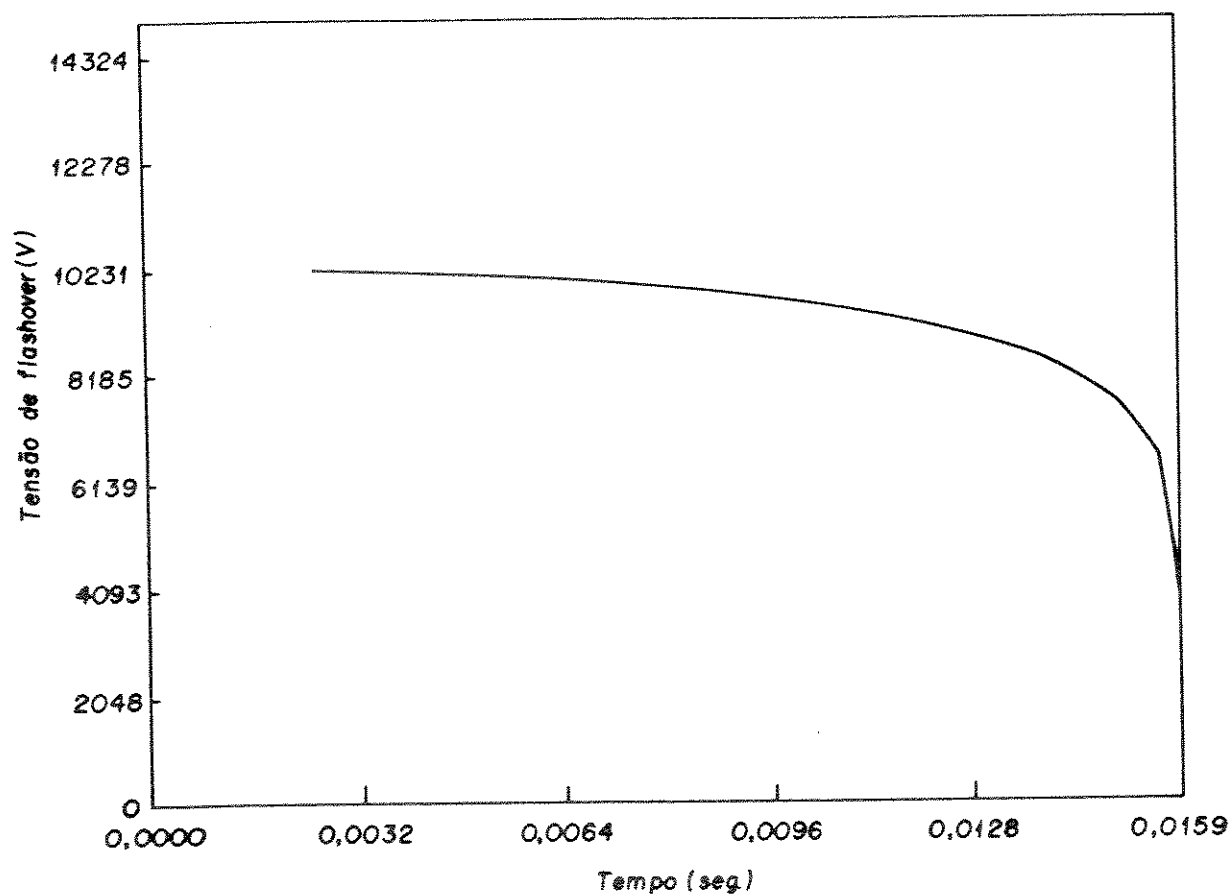


Figura 3.9 Tensão de flashover em função do tempo.

Em relação à corrente de flashover, a figura 3.10 mostra o seu comportamento, em função do tempo. Ao contrário da tensão de flashover, como era de se esperar, o seu valor aumenta rapidamente quando da ocorrência do flashover.

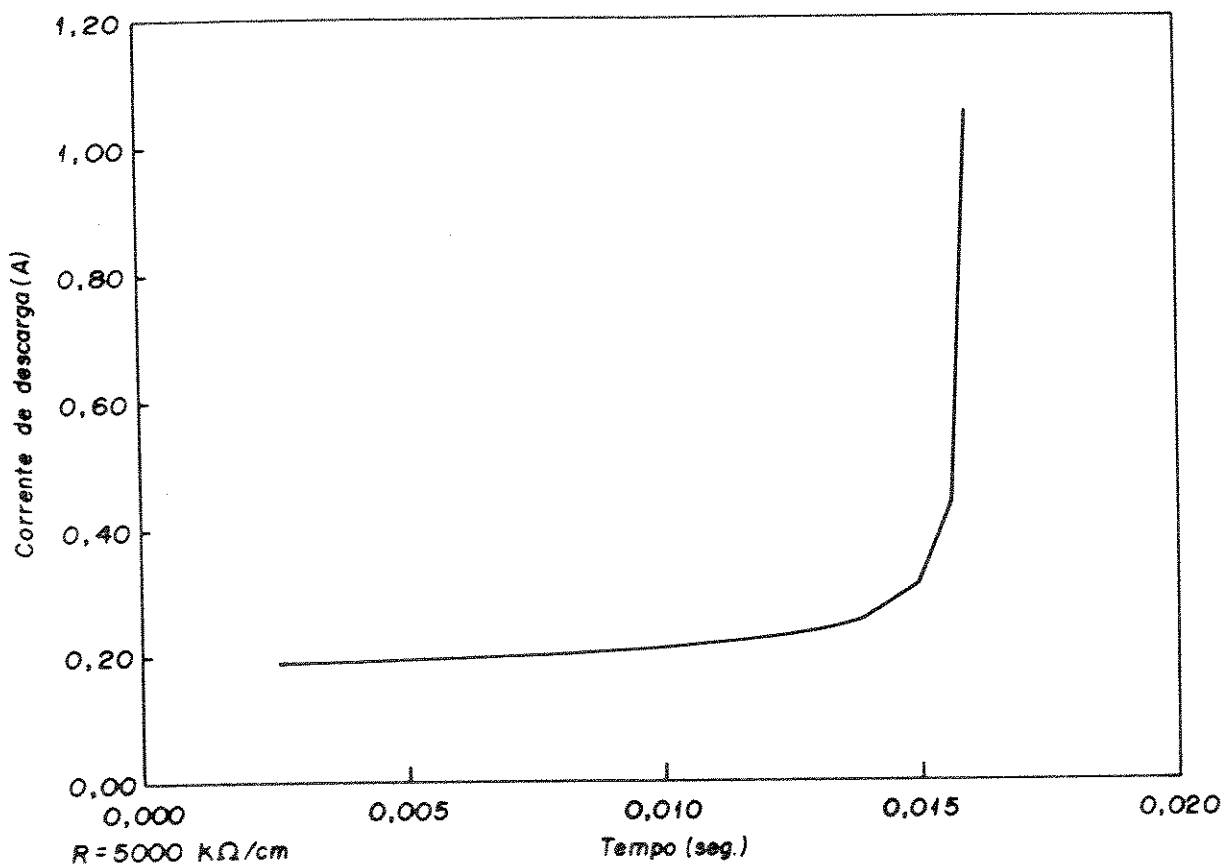


Figura 3.10 Corrente de flashover em função do tempo.

III.4 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.

Os resultados apresentados mostram que o programa computacional implantado, permite o acompanhamento de uma descarga elétrica numa superfície poluída, permitindo a obtenção das características das principais grandezas físicas ou elétricas envolvidas no fenômeno de flashover.

Em relação à tensão e correntes de flashover, os gráficos das figuras 3.9 e 3.10 mostram que, à partir do início da descarga, a tensão cresce rapidamente até o valor da tensão aplicada, menos a queda de tensão nos eletrodos, este valor vai diminuindo durante o deslocamento da descarga, em função da queda de tensão no eletrolito. Esta diminuição é pequena, até o instante em que a ocorrência do flashover se torna inevitável. À partir deste ponto, a tensão cai rapidamente até zero, em função do curto circuito estabelecido com o eletrodo de terra.

A corrente por sua vez, cresce no início da descarga até um valor limitado pela resistência do eletrolito. Este valor aumenta durante o deslocamento da descarga, em função da diminuição da resistência do líquido, até o instante em que se inicia o flashover, a partir do que, a corrente cresce rapidamente, pelo fechamento do arco entre a alta tensão, e o eletrodo de terra.

As curvas de velocidade mostradas nas figuras 3.4 e 3.5, mostram o comportamento da velocidade da descarga durante a

ocorrência do flashover, em função do alongamento da descarga, para diversos valores de mobilidade iônica dos elétrons. Observa-se que a velocidade aumenta mais rapidamente, quanto mais perto a descarga se encontra do eletrodo ligado a terra. Este comportamento é encontrado em todas as referências, independente da técnica de medição utilizada.

Estas características de velocidade são comparadas com as obtidas da medição experimental. Os resultados estão no capítulo 5 desta dissertação.

Todos os outros resultados apresentados neste capítulo, traduzem o comportamento real da descarga, tornando o programa, uma ferramenta útil no estudo do comportamento dinâmico de uma descarga.

No capítulo 4 apresentado a seguir, é feita uma montagem experimental que permite a reprodução e observação, no Laboratório de Alta Tensão da Unicamp, de descargas elétricas que se deslocam numa superfície poluída. Esta montagem é feita, a partir da reprodução de um modelo experimental de um isolador poluído, no qual são dispostos cabos de fibra óptica no percurso da descarga. Estes cabos alimentam dois fotomultiplicadores que transformam os sinais de luz da descarga em sinais elétricos, a partir dos quais será feita a análise da dinâmica da descarga.

Os resultados obtidos, à partir da montagem

experimental, servirão também, para verificar a confiabilidade dos resultados do programa computacional implantado, presentes neste capítulo 3.

IV - MONTAGEM EXPERIMENTAL

IV.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de uma montagem experimental, que permite a simulação de descargas elétricas em superfícies poluídas representativas da camada de poluição que se forma nos isoladores de alta tensão, que trabalham sob poluição atmosférica notável. Permite também, acompanhar a descarga ao longo do percurso entre o eletrodo de alta tensão e o eletrodo de terra do modelo experimental. Este acompanhamento é feito através de um sistema de visualização, formado por cabos de fibra óptica colocados no percurso da descarga, e ligados a fotomultiplicadores que transformam os sinais de luz da descarga em sinais elétricos. O sistema experimental consta ainda de aparelhos de medição destinados a registrar as principais grandezas elétricas envolvidas no fenômeno em estudo.

O desenvolvimento do sistema experimental foi feito no Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade de Campinas, e a figura 4.1 apresenta um diagrama geral da montagem experimental. Esta montagem pode ser dividida em três sistemas principais: alimentação e geração da descarga em alta tensão; sistema de visualização óptica da descarga, e sistema de medição das principais grandezas elétricas. No decorrer deste capítulo cada um destes sistemas será abordado com profundidade.

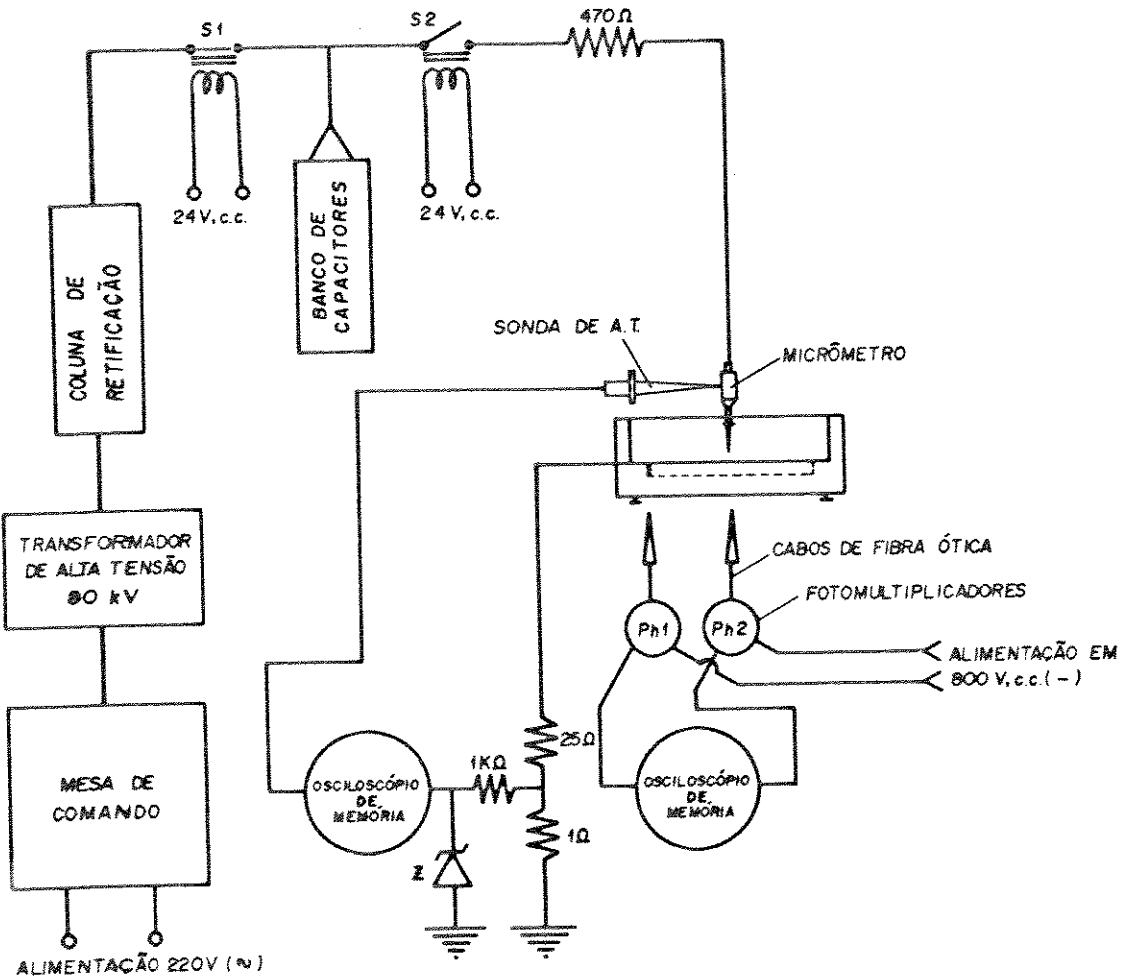


Figura 4.1 Diagrama geral da montagem experimental

IV.2 - SISTEMA EXPERIMENTAL.

A simulação em laboratório do fenômeno, requeria em primeiro lugar o desenvolvimento e montagem de um sistema

que fornecesse energia suficiente em tensões de até 30 kV, capazes de reproduzir uma descarga a ser aplicada numa superfície poluída. Este sistema deveria, ainda, permitir a troca de polaridade da tensão fornecida. Basicamente o sistema utilizado, consta de um transformador elevador com controle da tensão primária, uma coluna retificadora, e um banco de capacitores que armazena a energia a ser descarregada no momento da aplicação da descarga.

O banco de capacitores consta de dois capacitores de $3.0\mu\text{F}$ cada um, e tensão de 30 kV, ligados em paralelo, projetados de forma a suportar a necessidade de carregamento e descarregamento rápidos. O transformador é de 80 kV e 3.0 kVA e faz parte de um conjunto da TUR-PTW, que dispõe ainda de mesa de medição e controle da tensão, e de uma coluna retificadora para até 80 kV. O carregamento dos capacitores é feito através de um contato normalmente fechado de um relé de alta tensão imerso em óleo isolante. Este relé dispõe de um contato normalmente aberto, através do qual, será feito o descarregamento do banco de capacitores no modelo do isolador poluído. O acionamento deste relé é realizado por um sistema independente constituído por duas baterias de 12 volts ligadas em série.

IV.2.1 - MODELO FÍSICO DO ISOLADOR POLUÍDO.

O modelo físico que representa o isolador poluído utilizado na nossa montagem experimental, baseia-se no modelo de

Obenaus [19], o qual, apesar de não reproduzir todas as características reais de um isolador de alta tensão trabalhando sob poluição, permite atingir os objetivos propostos neste trabalho.

A fig. 4.2, mostra o modelo desenvolvido neste trabalho. Sua construção é em baquelite com os pés de sustentação reguláveis para controlar o nível da superfície do canal. Este canal, onde será depositado o eletrolito que representa a camada de poluição, tem um comprimento total L de 20 cm, uma largura a de 4 cm, e uma profundidade de 5 mm. A descarga é aplicada através de um eletrodo de alta tensão, cuja extremidade é formada por uma ponta redonda de aço de alta dureza. Este eletrodo está acoplado a um micrômetro que permite ajustar com precisão a altura do eletrodo em relação ao líquido do canal. O eletrodo de alta tensão está localizado num ponto central acima do canal, a 10 cm do eletrodo de terra. O eletrodo de terra é feito de uma pequena chapa de cobre de 2 mm. de espessura e está localizado numa das extremidades do canal, imerso no líquido.

No trecho entre o eletrodo de alta tensão e o eletrodo de terra, que será o caminho a ser percorrido pela descarga no eletrolito, foram colocadas janelas com áreas de 2 e 1 mm^2 , com o espaço de 2,0 cm, nos primeiros 6 cm do percurso; 1,0 cm, nos próximos 3 cm do percurso, e 0,5 cm, no último centímetro do percurso do flashover. Estas janelas são destinadas a receber os cabos de fibra óptica do sistema de visualização da descarga.

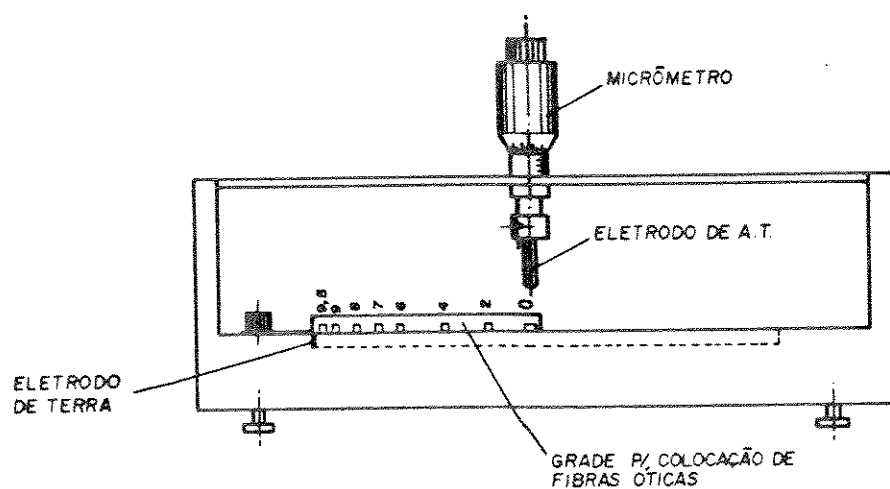


Figura 4.2 Modelo físico do isolador poluído.

IV.3 - SISTEMA DE VISUALIZAÇÃO DA DESCARGA.

Para a execução deste trabalho, foi necessário o desenvolvimento de um sistema que permitisse o acompanhamento do comportamento da descarga no eletrolito, de forma a poder ter informações de qualquer ponto do caminho percorrido pela descarga entre o eletrodo de alta tensão e o eletrodo de terra.

O sistema de visualização utilizado, é composto basicamente de dois cabos de fibra óptica. Uma das extremidades de cada cabo, é colocada nas janelas existentes no modelo experimental,

podendo ser deslocadas ao longo do percurso da descarga. A outra extremidade de cada cabo, é conectada diretamente às grades receptoras de luz, de dois fotomultiplicadores que transformam os sinais de luz emitidos pela descarga em sinais elétricos, que foram registrados num osciloscópio de memória. Os sinais dos fotomultiplicadores foram armazenados através de fotografias obtidas diretamente da tela do osciloscópio e numa etapa posterior, através de uma impressora ligada diretamente no osciloscópio. A seguir, será apresentado todo o trabalho desenvolvido para a implantação deste sistema.

IV.3.1 - FOTOMULTIPLICADORES. INSTALAÇÃO E CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO.

Os fotomultiplicadores utilizados são dois do modelo 931-A, fabricados pela RCA, com resposta para comprimentos de ondas de luz entre 300 e 660 nm. Para o funcionamento dos fotomultiplicadores, foi necessário o desenvolvimento de um circuito de excitação constituído basicamente de um divisor resistivo de tensão, destinado a distribuir a tensão aplicada aos vários dinodos. A configuração utilizada, é composta de capacitores em paralelo por ser a mais indicada para aplicações de pulso rápido [32] [33]. Foram feitas várias modificações neste circuito com a finalidade de se evitar distorções na forma de onda de resposta do fotomultiplicador, mas não foi possível eliminá-las totalmente, o que não prejudicou a avaliação dos resultados. A fig 4.3 apresenta o circuito do divisor resistivo utilizado.

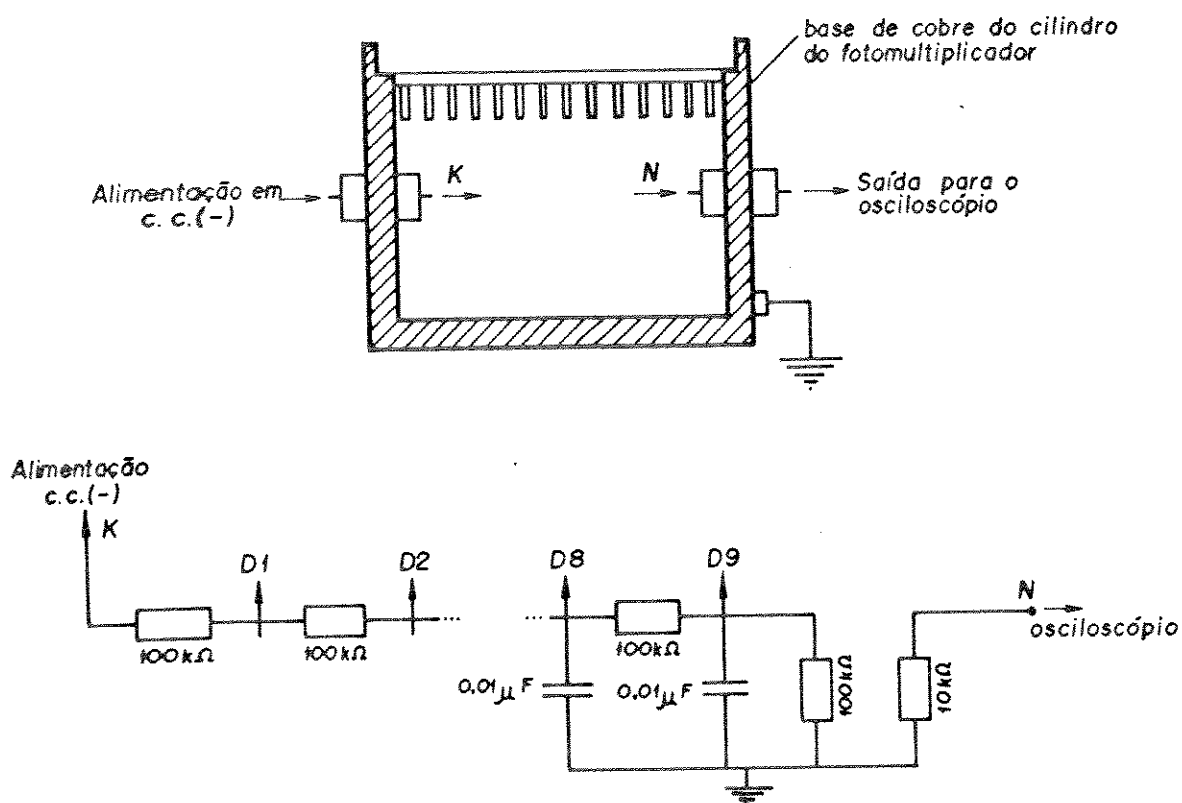


Figura 4.3 Circuito divisor resistivo.

Para a instalação dos fotomultiplicadores foram desenvolvidos dois cilindros metálicos inicialmente de aço, mas a fim de prover um melhor plano de terra, optou-se pela utilização de cobre para a confecção dos mesmos.

A alimentação do circuito é feita por uma fonte de corrente contínua da Instronic, numa tensão de 800 Volts, cc negativos. Foram realizados testes para verificar o nível da resposta dos fotomultiplicadores para tensões variando entre 750 e 1250 Volts, e não se constatou nenhuma variação significativa nos resultados. Os fotomultiplicadores são do tipo janela lateral e a entrada da luz transportada pelos cabos de fibra óptica é feita através de uma perfuração na parede do cilindro de cobre na altura da grade receptora de luz.

IV.4 - SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição, destina-se a registrar os sinais do sistema de visualização óptica da descarga e as grandezas elétricas envolvidas na experiência. A primeira parte é feita com utilização de um osciloscópio de memória. No início deste trabalho, o osciloscópio utilizado era um Kikusui 7061 A de 60 MHz, ao qual eram ligados os cabos coaxiais, que saíam dos fotomultiplicadores. O registro destes sinais foi feito através de fotografias tiradas diretamente da tela do osciloscópio, o que tornou necessário a realização de vários testes com variações na velocidade do disparo, abertura de diafragma e iluminação, até chegar a valores que garantissem uma boa qualidade dos registros fotográficos.

A figura 4.4 mostra a fotografia de uma onda de corrente e a resposta de um fotomultiplicador, para uma descarga em que não houve a ocorrência de flashover. Da mesma forma, a figura 4.5 mostra

uma onda de corrente e a resposta de um fotomultiplicador, quando da ocorrência do flashover.

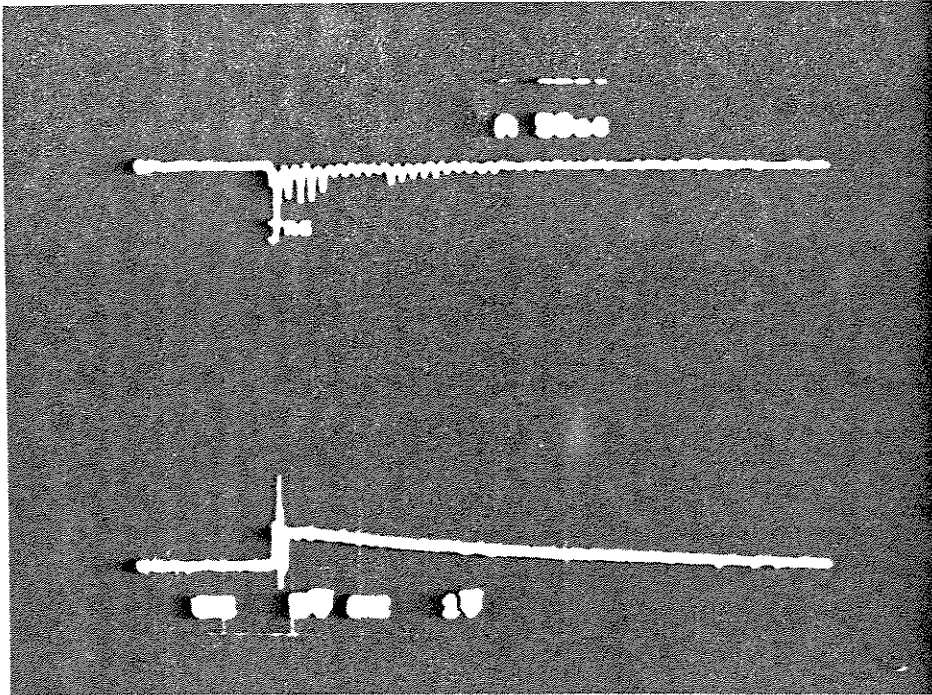


Figura 4.4 Registro fotográfico de uma onda de corrente e da resposta de um fotomultiplicador.

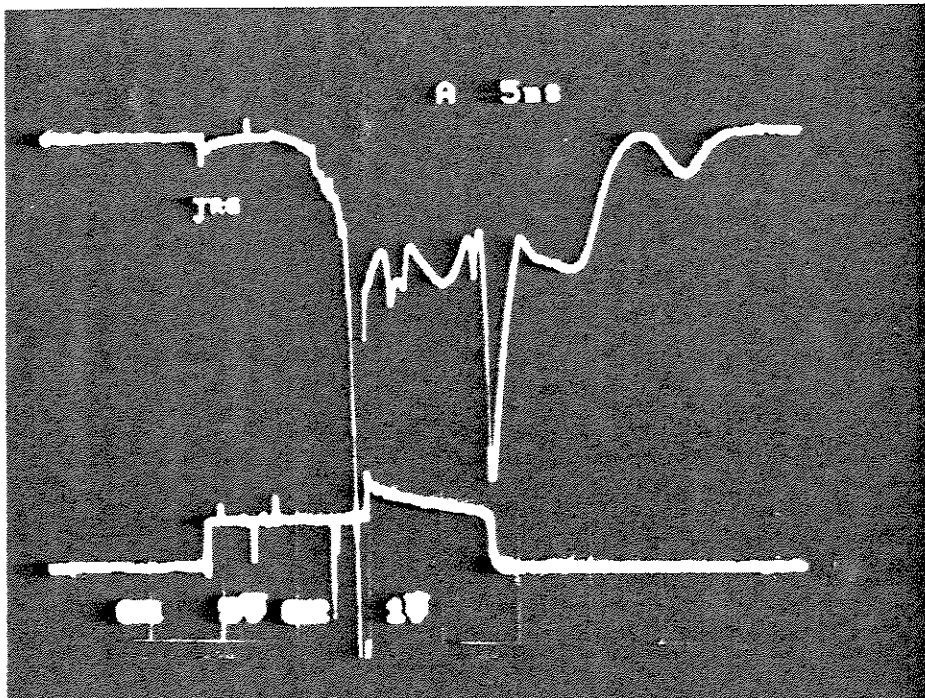


Figura 4.5 Registro de uma onda de corrente e da resposta do fotomultiplicador, na ocorrência de flashover.

Posteriormente, foi possível a utilização de um osciloscópio Tektronix 2230 de 100 MHz, ligado diretamente a uma impressora, o que permitiu o registro das respostas dos fotomultiplicadores.

As grandezas elétricas foram também registradas com o auxílio dos dois osciloscópios já citados. O sinal de corrente era obtido através do circuito divisor mostrado na figura 4.6, o qual estava colocado em série com o eletrodo de terra do modelo de Obenaus. Os diodos Zener presentes no circuito, visam preservar o osciloscópio do rápido crescimento da corrente, na ocorrência do flashover. A tensão é também registrada com o auxílio dos osciloscópios, utilizando sondas de alta tensão de 50 e 30 kVolts, com relação de 1000:1 e 100:1 respectivamente.

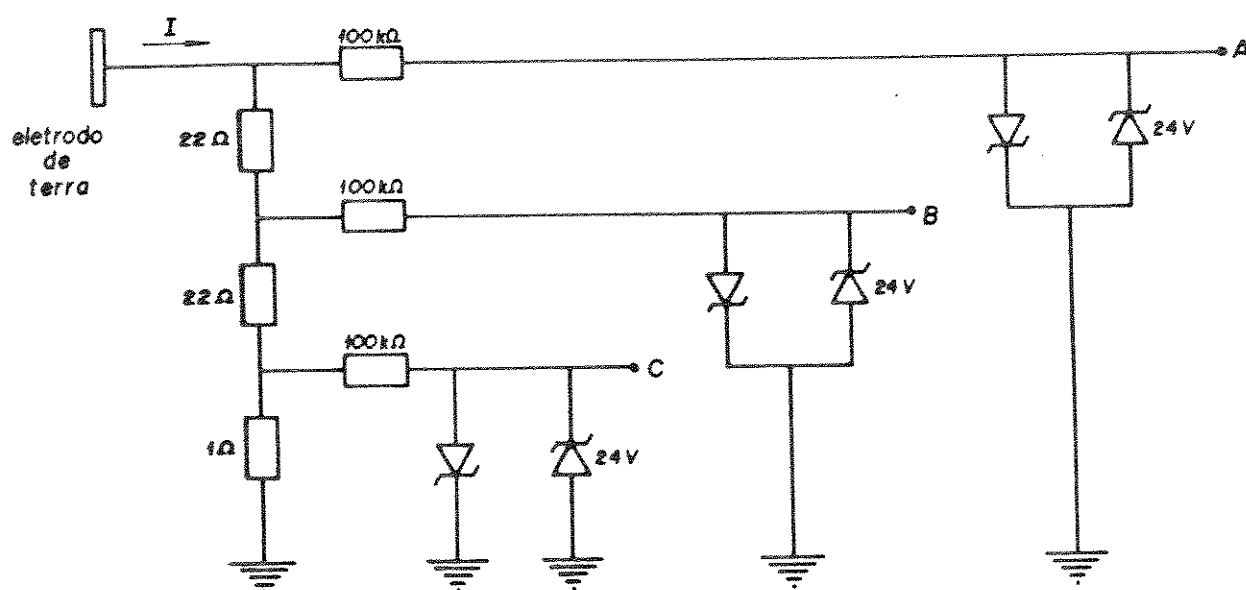


Figura 4.6 Circuito para obtenção do sinal de corrente da descarga.

Na figura 4.7, são mostradas as respostas dos fotomultiplicadores registradas no osciloscópio, para um pulso de luz. Pode-se observar que a amplitude da primeira resposta é menor do que a segunda para a mesma aplicação, isto não influi nos resultados que serão apresentados e pode ser explicado por fadiga no fotomultiplicador.

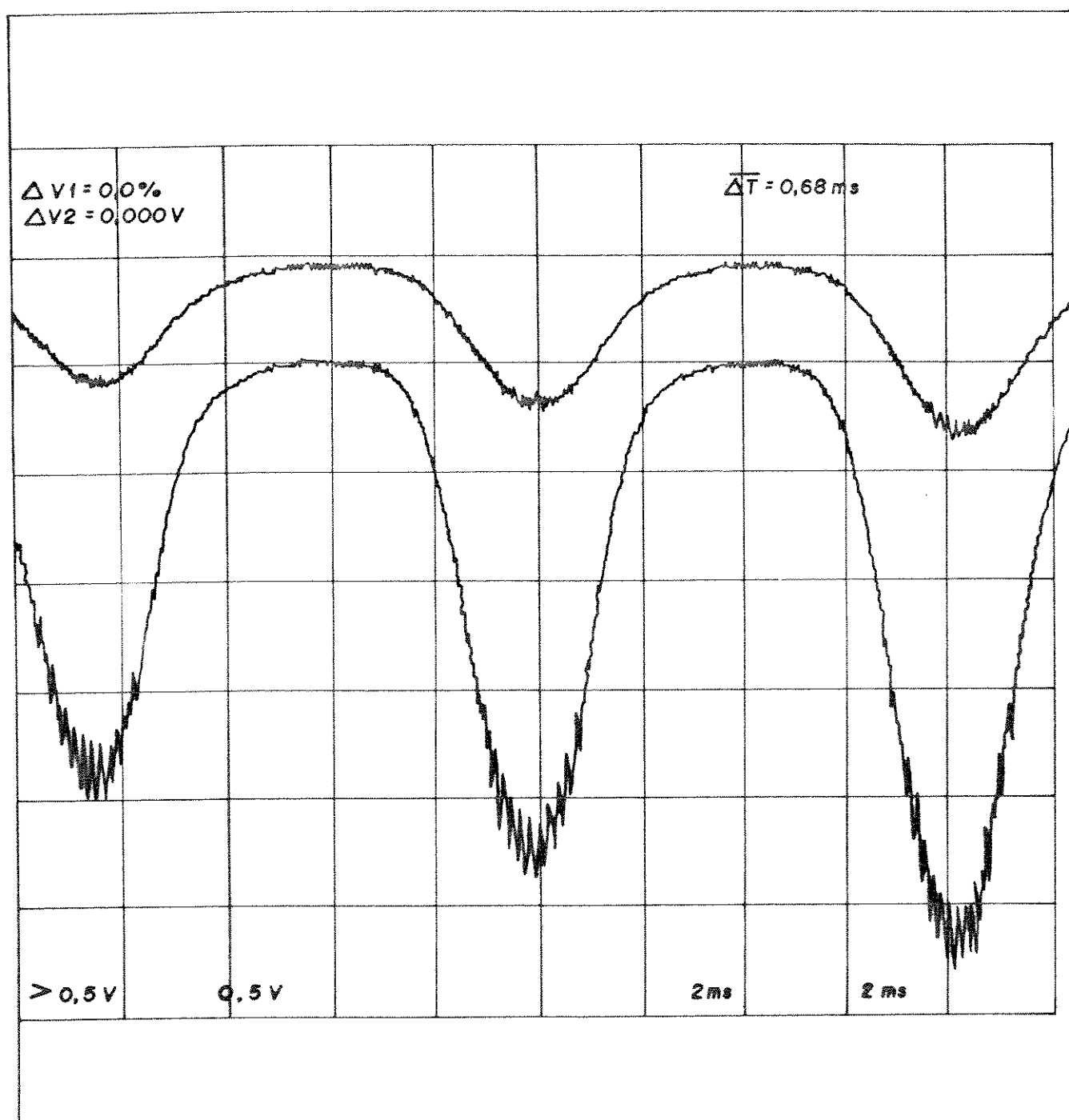


Figura 4.7 Respostas dos fotomultiplicadores.

Na figura 4.8, é apresentado o registro da corrente de flashover para polaridade positiva num canal do osciloscópio, e o registro da passagem da luz da descarga no fotomultiplicador, no segundo canal.

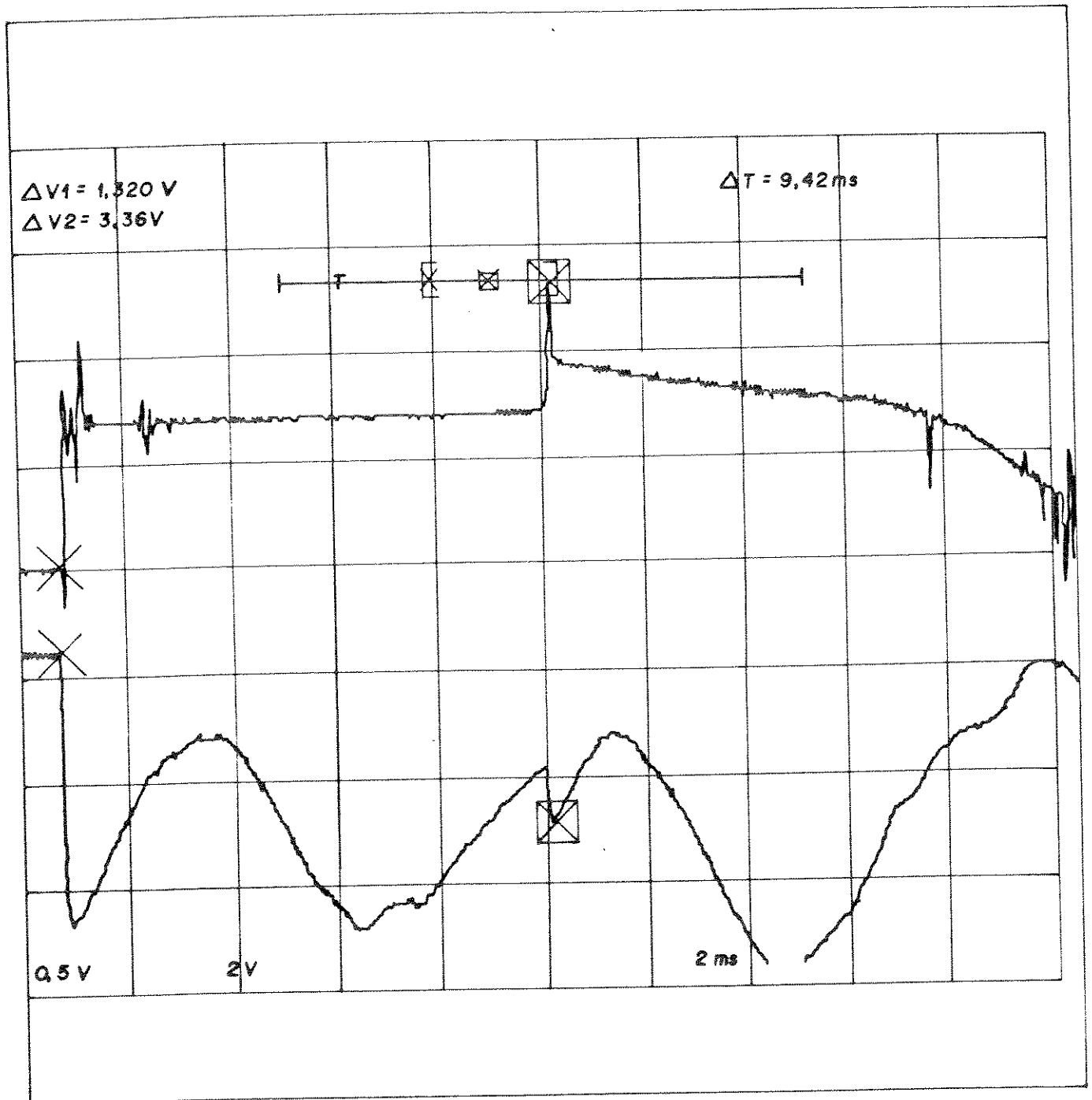


Figura 4.8 Registro da corrente de flashover para polaridade positiva.

A figura 4.9, mostra o registro da corrente de flashover para uma aplicação de polaridade negativa, e a resposta de um fotomultiplicador.

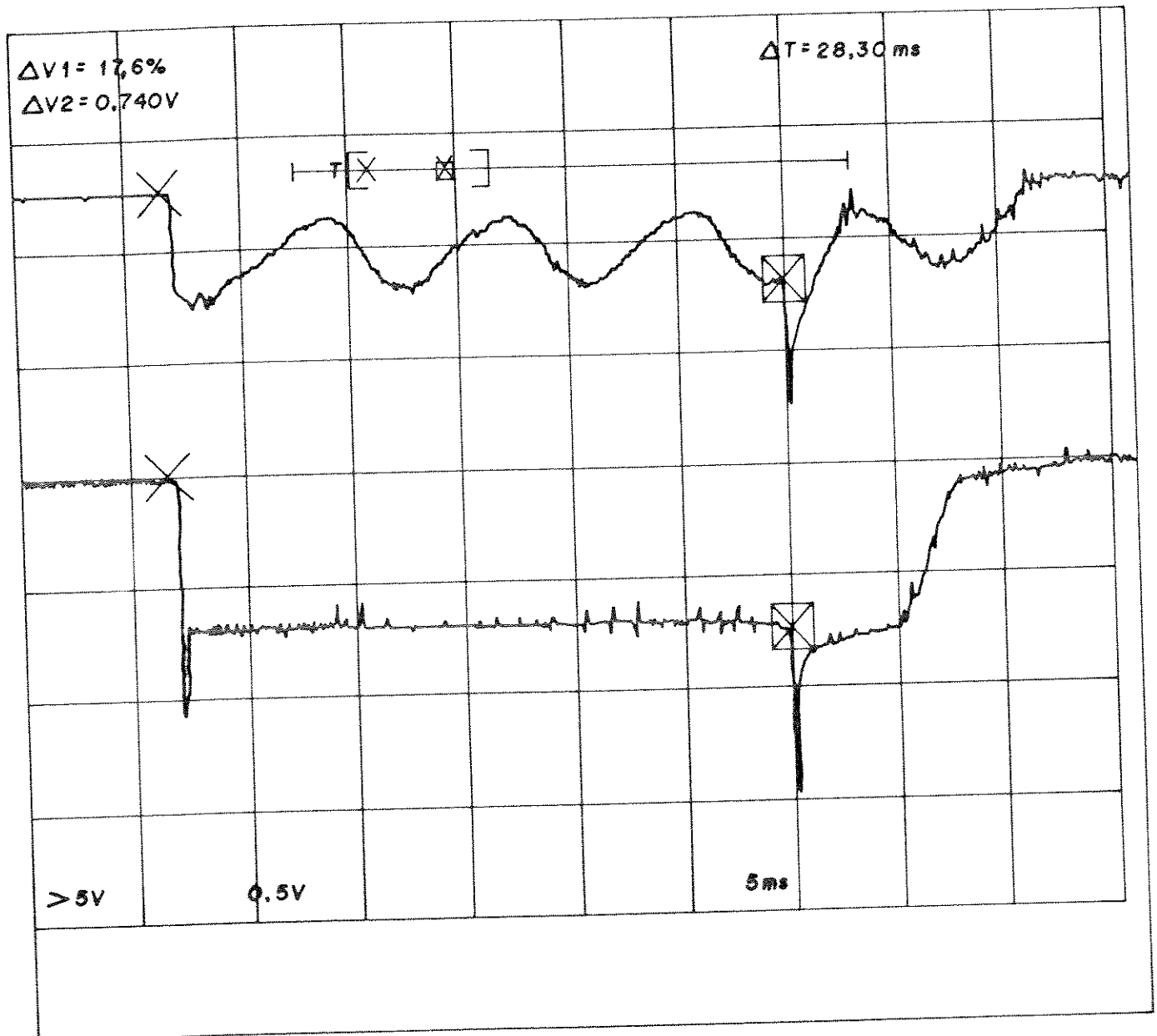


Figura 4.9 Registro da corrente de flashover para polaridade negativa.

Os gráficos da figura 4.10, mostram que, para os cabos de fibra óptica colocados num mesmo ponto do percurso da descarga, as respostas dos dois fotomultiplicadores se iniciam no mesmo instante.

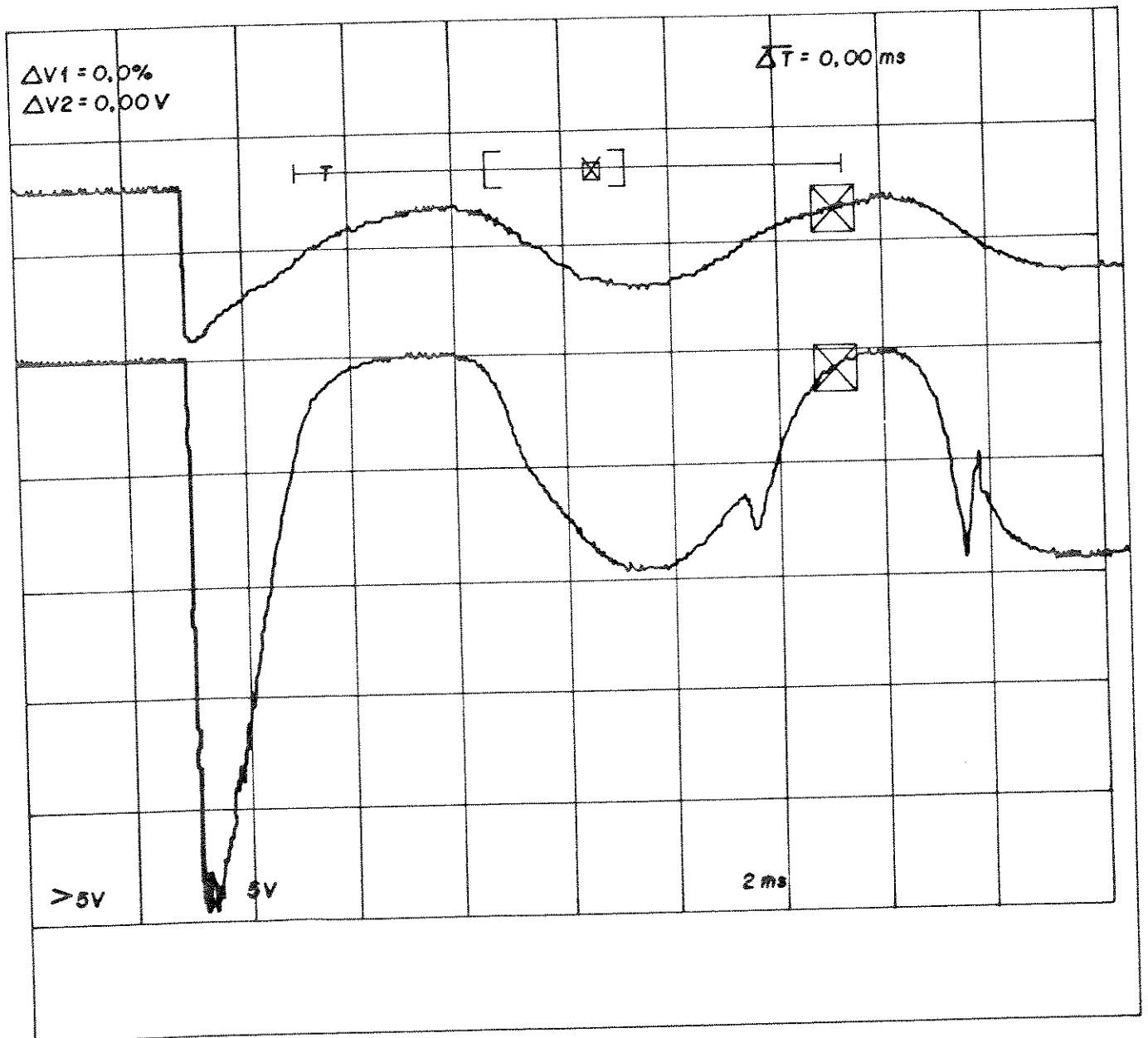


Figura 4.10 Respostas dos dois fotomultiplicadores, colocados num mesmo ponto do percurso da descarga.

IV.5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.

Uma das contribuições mais importantes deste trabalho, é a montagem deste sistema experimental que permite o acompanhamento da descarga elétrica numa superfície poluída, utilizando cabos de fibra óptica que podem ser deslocados no caminho a ser percorrido pela descarga, e que alimentam fotomultiplicadores que transformam os sinais de luz, em sinais elétricos.

Embora fotomultiplicadores já tenham sido utilizados por outros pesquisadores para a análise do comportamento dinâmico de uma descarga, a sua utilização em aplicações em corrente contínua ainda não tinha sido feita até a realização deste trabalho.

A montagem experimental foi a etapa deste trabalho, que exigiu mais esforços, em função das dificuldades conhecidas por aqueles que se dispõem a desenvolver trabalhos experimentais em laboratório.

Os resultados apresentados no capítulo seguinte, mostram a importância e utilidade do sistema experimental implantado. Este sistema fica ainda disponível para o desenvolvimento de futuros estudos que deverão vir a realizar-se dentro desta área de atuação.

No capítulo 5, a seguir, estão presentes os resultados experimentais obtidos com a utilização desta montagem, bem como a comparação dos mesmos com os resultados obtidos pela utilização do programa computacional, e com resultados obtidos por outros

pesquisadores. Será feita ainda, uma análise dos resultados apresentados.

V - RESULTADOS DA MONTAGEM EXPERIMENTAL

V.1 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O primeiro procedimento experimental para a realização de qualquer tipo de observação desejada, é a preparação do eletrolito a ser utilizado para simular a camada de poluição. Esta preparação é feita utilizando-se água destilada, à qual é adicionado sal comum até obter-se o valor de resistência desejado. Este valor de resistência, é assegurado com a utilização de um aparelho medidor de condutividade CHEMTRIX TYPE 700, cujas escalas estão em $\mu\text{mho.cm}$; portanto, é necessário determinar, a partir do valor de R em ohms/cm desejado, o valor em $\mu\text{mho.cm}$ a ser obtido na escala do aparelho. O líquido é sempre preparado no início do dia em que as experiências serão realizadas, e é trocado após cada aplicação de tensão no modelo pois a passagem de qualquer corrente modifica o valor da resistência.

A colocação do líquido no canal é feita através de uma pipeta graduada para uma quantidade de líquido, que produza uma camada de 3 mm de espessura no modelo do isolador.

A altura do eletrodo de alta tensão em relação ao eletrolito, é controlada através do micrômetro ligado ao eletrodo, de forma que esta altura seja sempre da ordem de 3mm.

A tensão de carregamento do banco de capacitores é medida através do voltímetro da mesa de comando do transformador, e também, através de um outro voltímetro conectado diretamente na bucha

de alta tensão dos capacitores, por intermédio de uma sonda de alta tensão, como mostra a figura 4.1.

O óleo isolante, no qual está submerso o relé de alta tensão, é verificado periodicamente bem como os contatos do relé a fim de evitar a ocorrência de faiscamento ou abertura de arco que além de poder danificar o relé, venham a provocar ruídos ou distorções nos sinais medidos.

Uma outra verificação constante, é feita em relação as ligações à terra de todos os equipamentos necessários à experiência. Estas ligações são feitas com fita de cobre de 3cm de largura, o que diminui o ruído por efeito indutivo da corrente de terra.

V.2 - LEVANTAMENTO DA CURVA DE TEMPO X TENSÃO DE FLASHOVER.

O levantamento dos valores de tensão de flashover para diferentes valores de resistência de poluição, é feita através do método de acréscimo e decréscimo (up and down), o qual permite determinar com precisão, a tensão mínima que garanta a ocorrência do flashover.

Os valores de resistência de poluição utilizados no desenvolvimento deste trabalho, são aqueles que representam baixas resistências de poluição (2 e 5 Kohms/cm), e altas resistências de poluição (8, 10 e 12 Kohms/cm), o que na realidade significa um nível de poluição alto e baixo, respectivamente.

V.2.1. - POLARIDADE POSITIVA.

Uma vez preparado o eletrolito, é iniciada a série de aplicações visando em primeiro lugar determinar a tensão de flashover. Obtido este valor, através da onda de tensão ou corrente, é determinado o tempo de flashover, ou seja, o tempo que a corrente leva do eletrodo de alta tensão até o instante do flashover. A figura 5.1 apresenta o registro na tela do osciloscópio das ondas de tensão e corrente durante o flashover, sendo o tempo medido a partir de qualquer uma delas. Como era de se esperar, nos gráficos da figura, observa-se que no instante do flashover, a tensão reduz rapidamente o seu valor para zero, enquanto a corrente da descarga cresce rapidamente. A interrupção no crescimento da corrente no gráfico, decorre da atuação do diodo zener colocado no circuito de medição para proteção do osciloscópio.

Uma vez determinada a tensão de flashover a partir dos oscilogramas de tensão ou corrente, é feito um aumento gradativo da tensão aplicada e são anotados, a partir da curva de corrente ou de tensão registradas no osciloscópio, o tempo que a descarga levou até a ocorrência do flashover. O procedimento anterior é repetido até a obtenção do número de pontos necessários ao levantamento da curva.

O levantamento da característica de tempo de flashover em função da tensão de flashover, é repetido para os seguintes valores de resistência: 5, 8, 10 e 12 Kohms/cm.

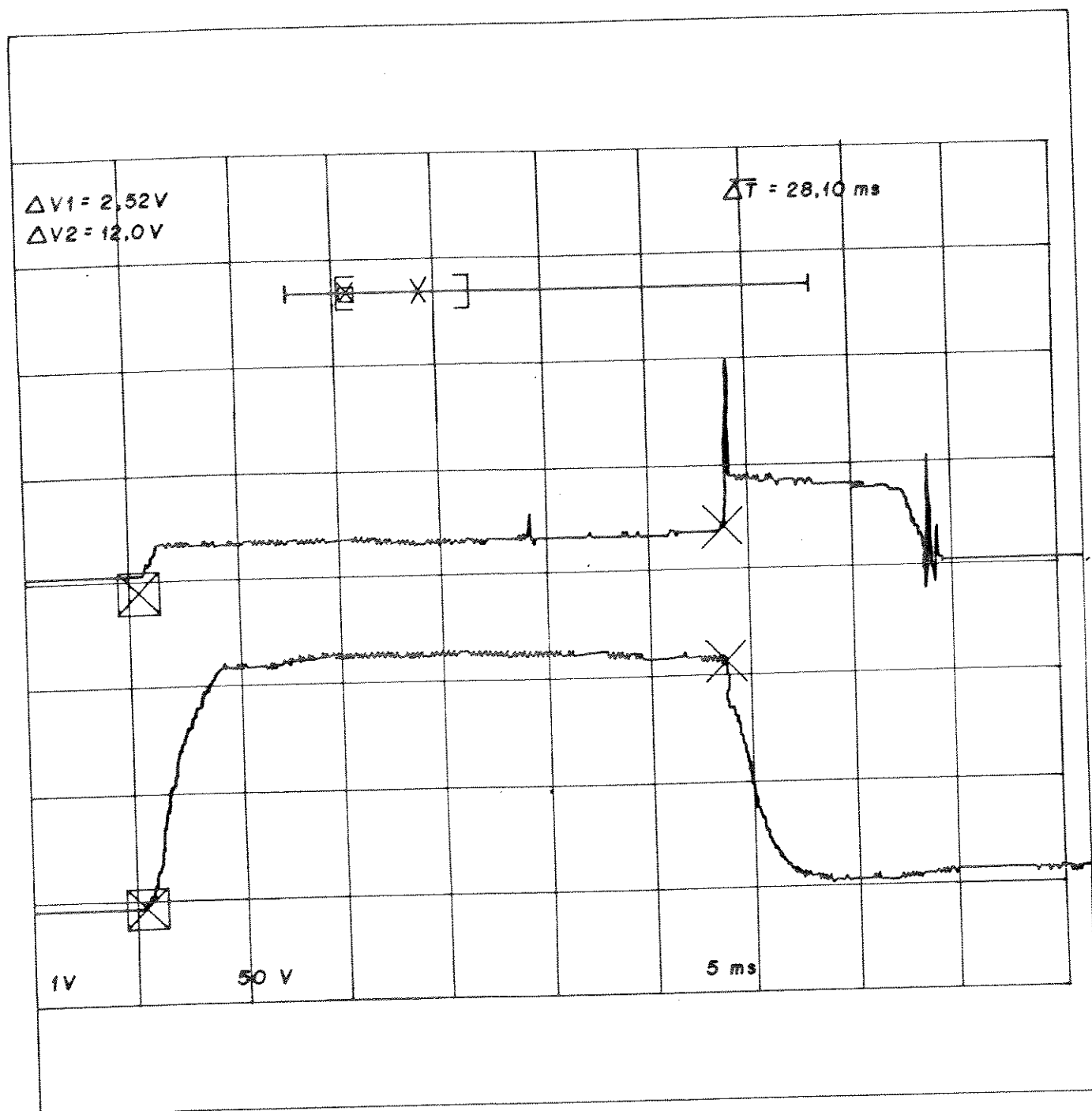


Figura 5.1 Registro da corrente e tensão de Flashover para determinação do tempo de flashover.

As características obtidas estão agrupadas na figura 5.2.

Os valores de tensão aplicada ao modelo e os tempos obtidos de flashover nas diversas aplicações realizadas para o levantamento das características, estão mostrados nas tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

Tabela 5.1 Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 2 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 7,3 | - | NÃO |
| 7,5 | 4,50 | SIM |
| 8,0 | 2,40 | SIM |
| 8,5 | 1,79 | SIM |
| 9,0 | 1,34 | SIM |
| 9,5 | 0,72 | SIM |
| 10,0 | 0,54 | SIM |
| 11,0 | 0,29 | SIM |

Tabela 5.2 Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 5 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 10,5 | - | NÃO |
| 10,8 | - | NÃO |
| 10,9 | 21,05 | SIM |
| 11,0 | 13,10 | SIM |
| 11,5 | 4,78 | SIM |
| 12,0 | 2,24 | SIM |
| 13,0 | 1,47 | SIM |
| 14,0 | 0,73 | SIM |

Tabela 5.3 Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 8 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 12,5 | - | NÃO |
| 12,8 | 27,30 | SIM |
| 12,9 | 22,10 | SIM |
| 13,0 | 17,02 | SIM |
| 13,5 | 14,40 | SIM |
| 13,8 | 4,60 | SIM |
| 14,0 | 2,68 | SIM |
| 15,0 | 1,51 | SIM |

Tabela 5.4 Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 10 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 14,0 | - | NÃO |
| 14,3 | 46,32 | SIM |
| 14,5 | 34,06 | SIM |
| 15,0 | 24,71 | SIM |
| 15,5 | 19,75 | SIM |
| 15,6 | 18,48 | SIM |
| 15,8 | 15,38 | SIM |
| 16,0 | 2,41 | SIM |
| 16,5 | 1,91 | SIM |
| 17,0 | 1,70 | SIM |

Tabela 5.5 Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 12 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 15,0 | - | NÃO |
| 15,8 | 53,62 | SIM |
| 16,5 | 26,15 | SIM |
| 16,8 | 23,90 | SIM |
| 17,0 | 2,30 | SIM |
| 17,5 | 1,22 | SIM |

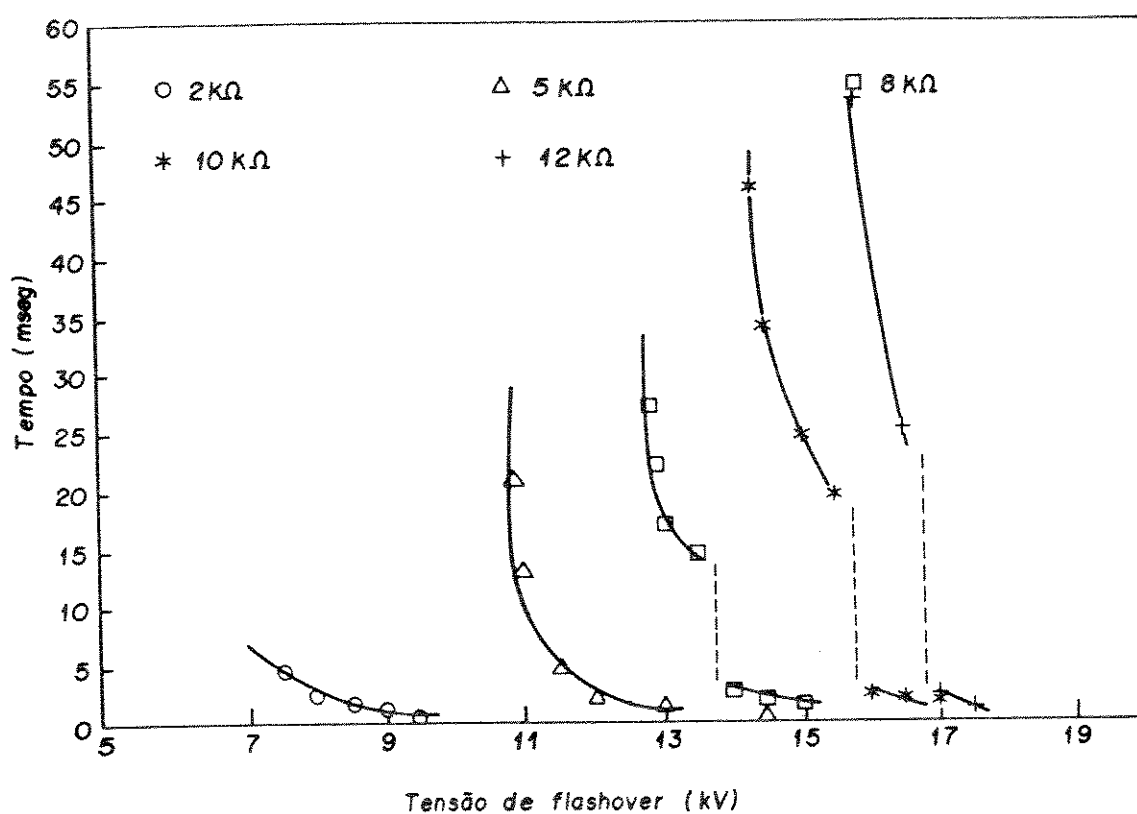


Figura 5.2 Características de tempo x tensão de flashover para polaridade positiva.

A descontinuidade observada na figura 5.2 para as características de $R = 8, 10$ e 12 Kohms/cm , estão completamente de acordo com os resultados obtidos por Pissolato [25], mostrados na figura 5.3, e que sustentam a hipótese da existência de dois mecanismos diferentes para a propagação da descarga, defendida por

Peyregne [30]. Um destes mecanismos decorre de uma força que se exerce sobre a descarga, e a outra, da existência de uma ruptura dielétrica na frente do pé da descarga. O primeiro mecanismo corresponde a parte superior da curva e o outro a parte inferior da mesma.

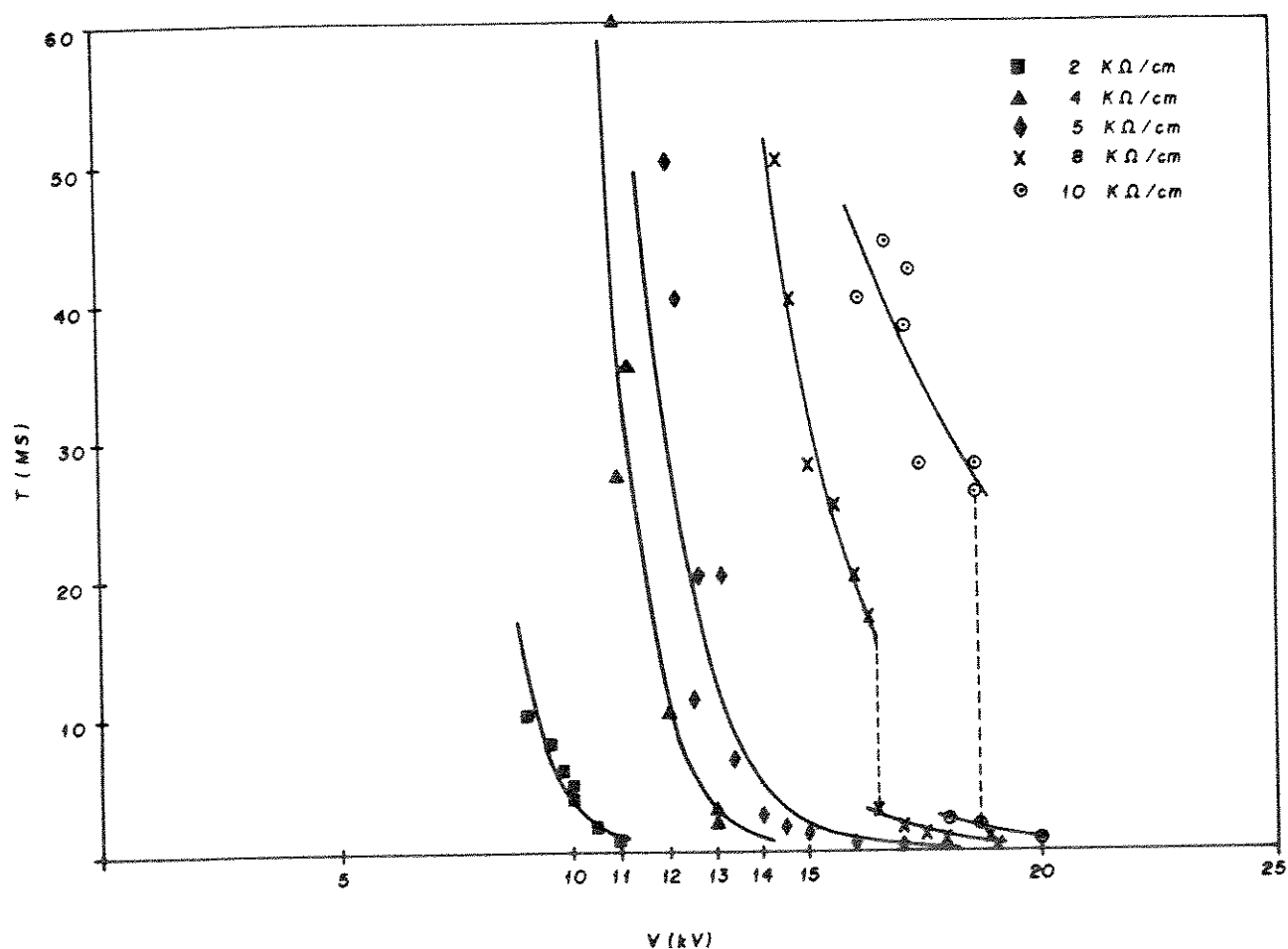


Figura 5.3 Características de tempo x tensão de flashover para polaridade positiva da referência [25].

V.2.2. - POLARIDADE NEGATIVA

É feito o levantamento das características de tensão de flashover versus o tempo de flashover com polaridade negativa, e para os mesmos valores de resistência de poluição já utilizados nas aplicações com polaridade positiva ou seja, $R = 2, 5, 8, 10$ e 12 Kohms/cm .

Os valores de tensão aplicada ao modelo e os tempos obtidos de flashover nas diversas aplicações realizadas para o levantamento das características, estão mostrados nas tabelas 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10.

Tabela 5.6 Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 2 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 7,2 | - | NÃO |
| 7,8 | - | NÃO |
| 8,0 | 27,25 | SIM |
| 8,5 | 24,10 | SIM |
| 9,0 | 14,91 | SIM |
| 10,0 | 8,41 | SIM |
| 10,5 | 7,09 | SIM |
| 11,0 | 2,67 | SIM |

Tabela 5.7 Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 5 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 10,0 | - | NÃO |
| 10,3 | - | NÃO |
| 10,5 | 26,08 | SIM |
| 11,0 | 22,17 | SIM |
| 12,0 | 14,04 | SIM |
| 13,0 | 9,35 | SIM |
| 14,0 | 5,42 | SIM |
| 15,0 | 3,77 | SIM |
| 16,0 | 1,20 | SIM |

Tabela 5.8 Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 8 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 11,5 | - | NÃO |
| 11,8 | 36,38 | SIM |
| 12,0 | 23,63 | SIM |
| 12,5 | 18,36 | SIM |
| 13,5 | 13,60 | SIM |
| 14,5 | 10,15 | SIM |
| 15,5 | 5,12 | SIM |

Tabela 5.9 Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 10 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 12,0 | - | NÃO |
| 12,3 | 35,41 | SIM |
| 12,5 | 22,61 | SIM |
| 13,5 | 15,60 | SIM |
| 14,5 | 12,33 | SIM |
| 15,5 | 8,25 | SIM |
| 16,5 | 6,12 | SIM |
| 17,5 | 4,46 | SIM |

Tabela 5.10 a) Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 12 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 12,5 | - | NÃO |
| 13,0 | 28,27 | SIM |
| 13,5 | 18,53 | SIM |
| 14,0 | 16,58 | SIM |
| 14,5 | 15,09 | SIM |
| 15,0 | 13,16 | SIM |
| 15,5 | 10,47 | SIM |

Tabela 5.10 b) Tensão aplicada x tempo de flashover para $R = 12 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

| V aplicada (Kv) | t de flashover (ms) | flashover |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 16,0 | 9,28 | SIM |
| 16,5 | 8,42 | SIM |
| 17,5 | 6,56 | SIM |
| 18,0 | 3,90 | SIM |

As curvas resultantes destes ensaios estão presentes nos gráficos da figura 5.4.

Pode observar-se nos gráficos da figura 5.4, que as descontinuidades desaparecem para todos os valores de resistência de poluição, o que vem ao encontro dos resultados obtidos por Pissolato [25], apresentados na figura 5.5.

Os resultados apresentados deixam claro a existência de um comportamento diferente do flashover para valores de tensão superiores ao valor crítico, a partir de um valor aproximadamente igual a $8 \text{ K}\Omega/\text{cm}$ para a camada de poluição, para polaridade positiva e negativa..

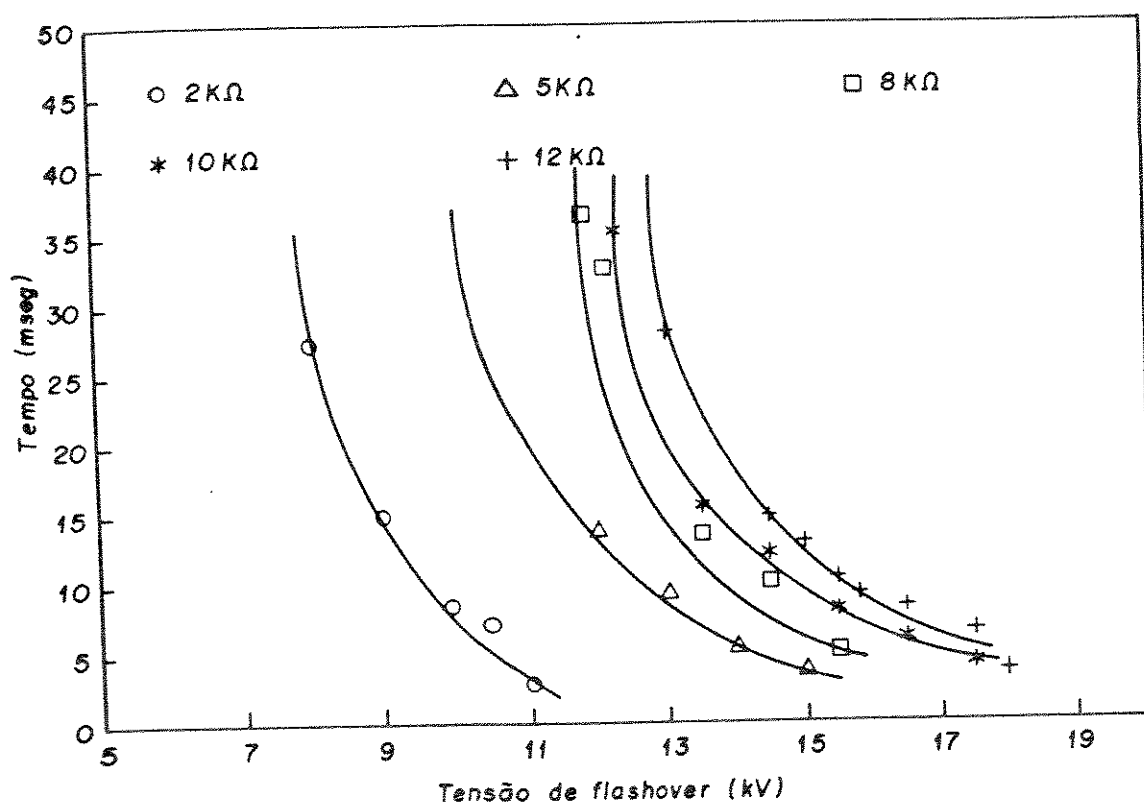


Figura 5.4 Características de tempo x tensão de flashover para polaridade negativa.

As características apresentadas na figura 5.6, mostram o comportamento da tensão de flashover em função do valor de resistência da camada de poluição do modelo. Observa-se que para

valores baixos de resistênciã, a tensãõ de flashover nãõ apresenta muita diferençã para polaridades diferentes, enquanto que para valores maiores (acima de 5 K Ω /cm aproximadamente), a tensãõ de flashover é maior para polaridade negativa do que para polaridade positiva.

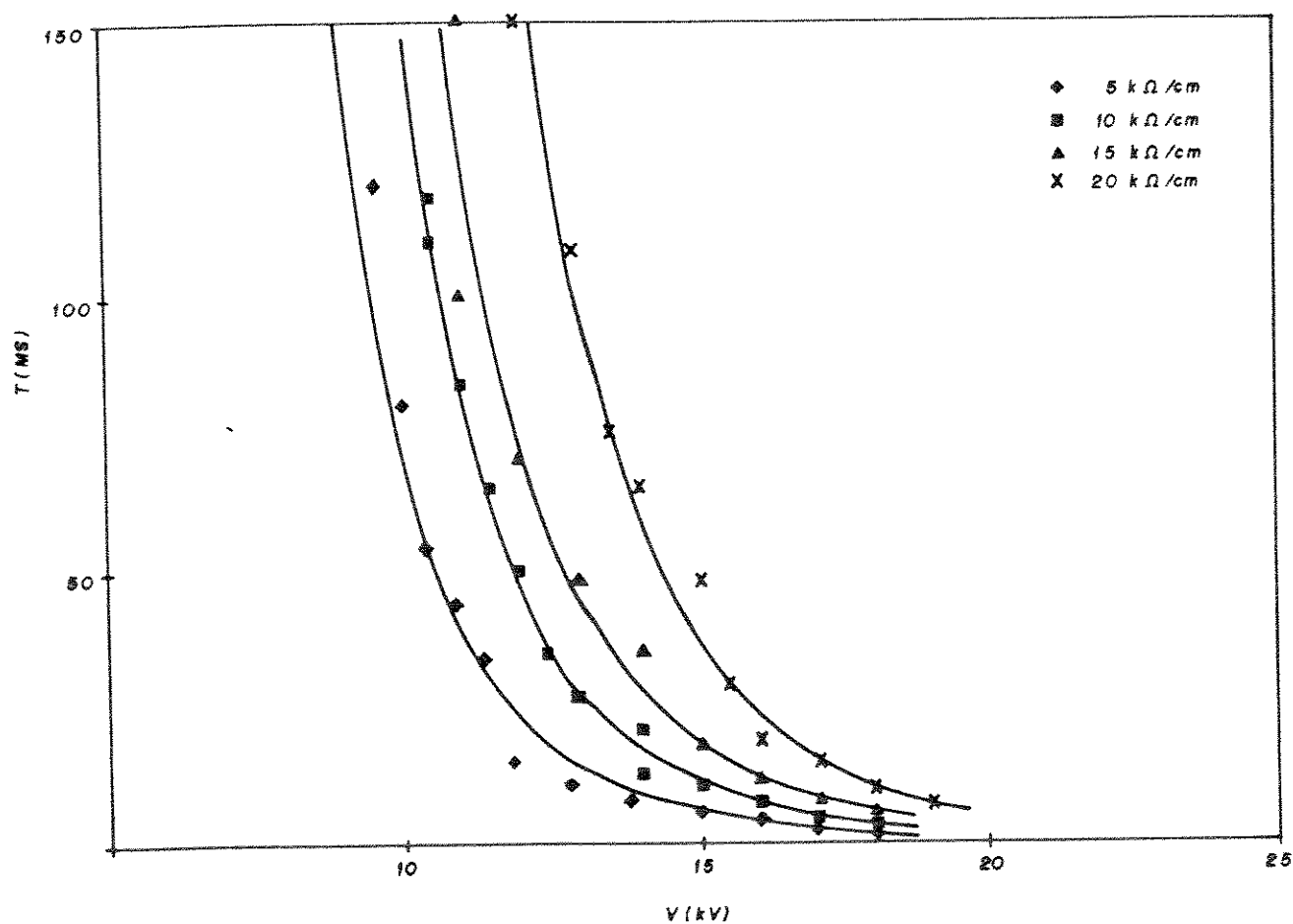


Figura 5.5 Características de tempo x tensão de flashover para polaridade negativa da referênciã [25].

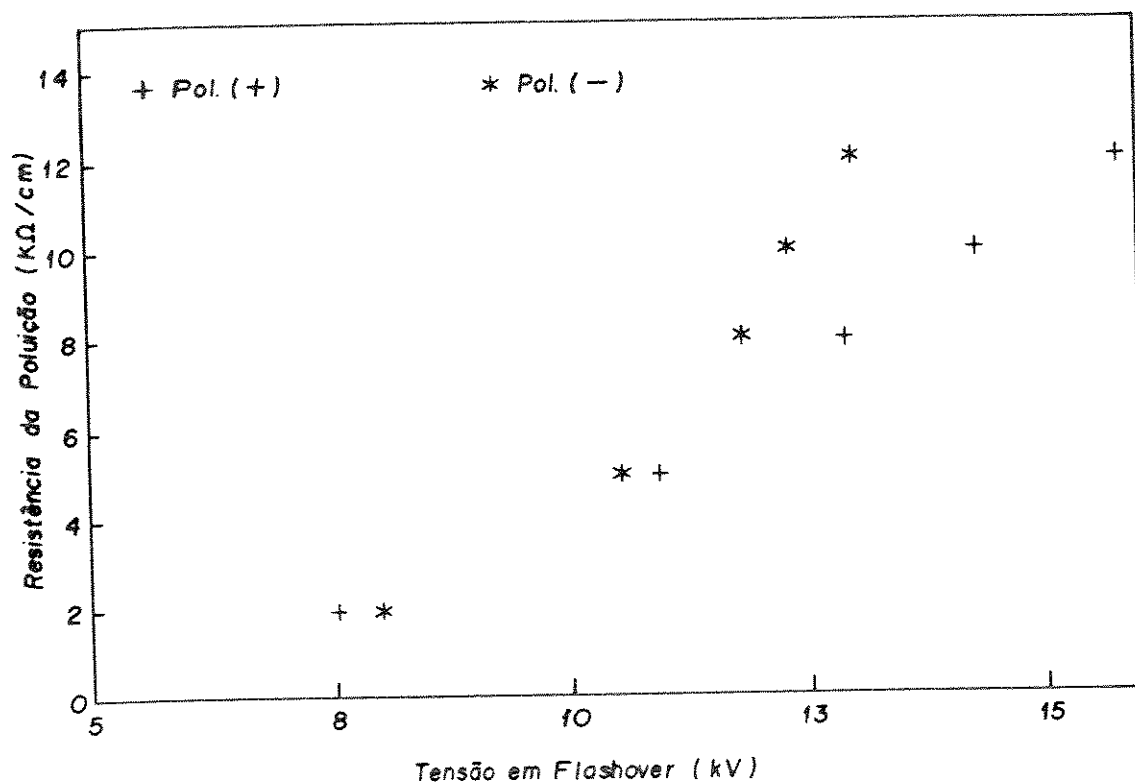


Figura 5.6 Característica de tensão de flashover x resistência de poluição para polaridade negativa e positiva.

V.3. - LEVANTAMENTO DA CARACTERÍSTICA DE VELOCIDADE DE FLASHOVER.

O procedimento experimental utilizado no levantamento da característica de velocidade da descarga na ocorrência do flashover, é o mesmo dos ensaios anteriores até o momento da aplicação da descarga no modelo do isolador poluído. A partir deste ponto, a metodologia consiste na obtenção do tempo que

a descarga leva para deslocar-se da posição em que se encontra um cabo de fibra óptica até a posição em que se encontra o outro cabo. Uma vez determinado este tempo e conhecida a distância entre os dois cabos de fibra óptica, é possível determinar a velocidade média da descarga ou do flashover, neste trecho do canal, que contém o eletrolito.

A medição de tempo é feita a partir das respostas dos fotomultiplicadores, registradas na tela do osciloscópio de memória ao qual estão ligados.

A figura 5.7, mostra o registro das respostas dos dois fotomultiplicadores utilizados, à ocorrência de um flashover para uma resistência da camada de poluição de 2 kohms/cm. Os cabos de fibra óptica estão colocados, o primeiro a 2 cm do eletrodo de alta tensão, e o segundo a 4 cm do mesmo. Na figura, o sinal superior corresponde à resposta do primeiro fotomultiplicador, e o inferior ao segundo. O tempo que a descarga leva para passar do primeiro ao segundo cabo, está mostrado no gráfico.

A figura 5.8, mostra o registro das respostas dos fotomultiplicadores para o mesmo valor de resistência anterior, mas com os cabos de fibra óptica colocados a 7 cm o primeiro, e a 8 cm o segundo em relação ao eletrodo de alta tensão. Pode-se ver que a medição do tempo entre o primeiro e o segundo sinal, é mais difícil em função da velocidade que aumenta à medida em que a descarga se aproxima do eletrodo de terra, como mostram as características de velocidade.

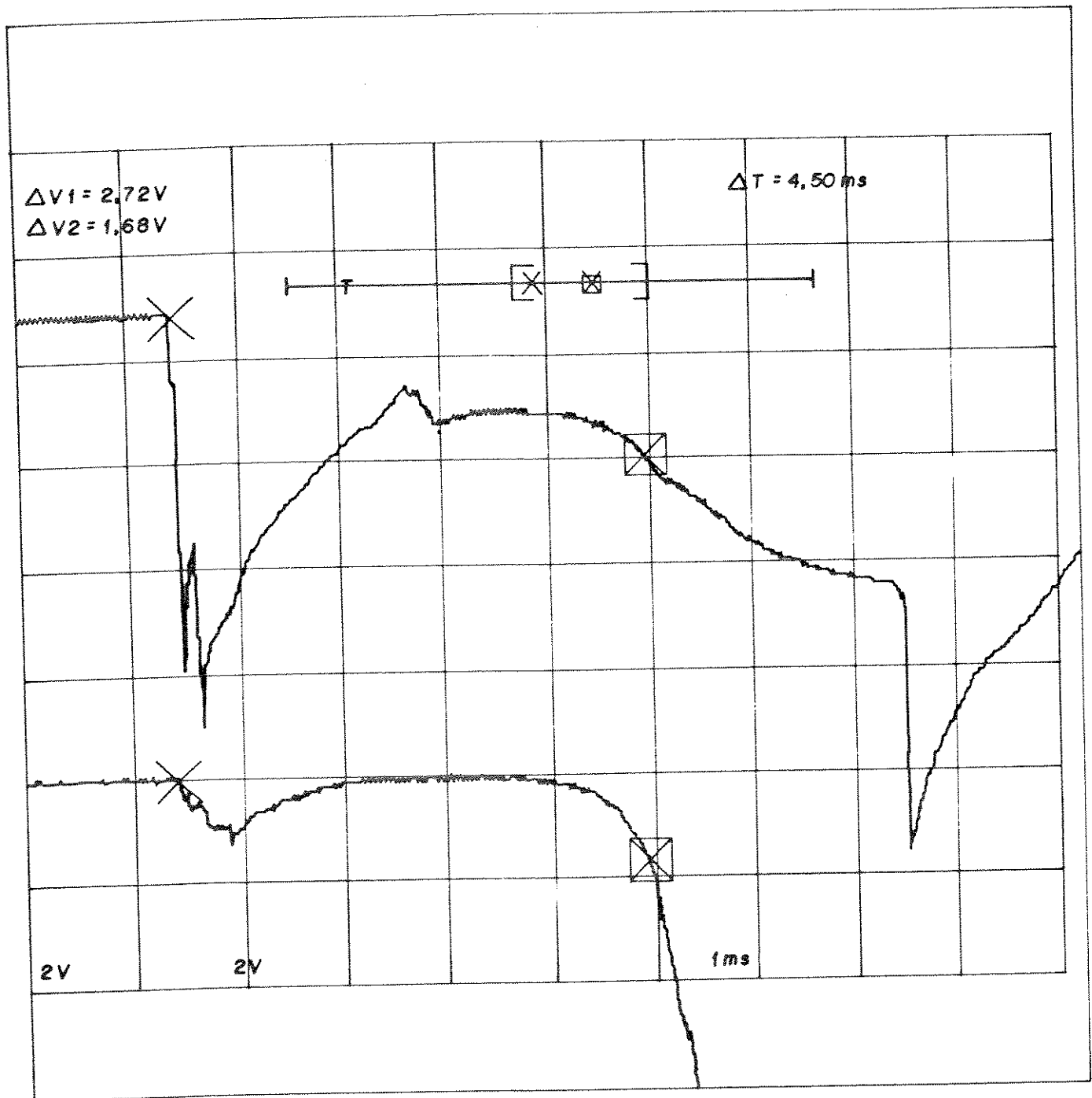


Figura 5.7 Respostas dos fotomultiplicadores para obtenção da curva de velocidade de flashover. Fibras ópticas instaladas perto do eletrodo de alta tensão.

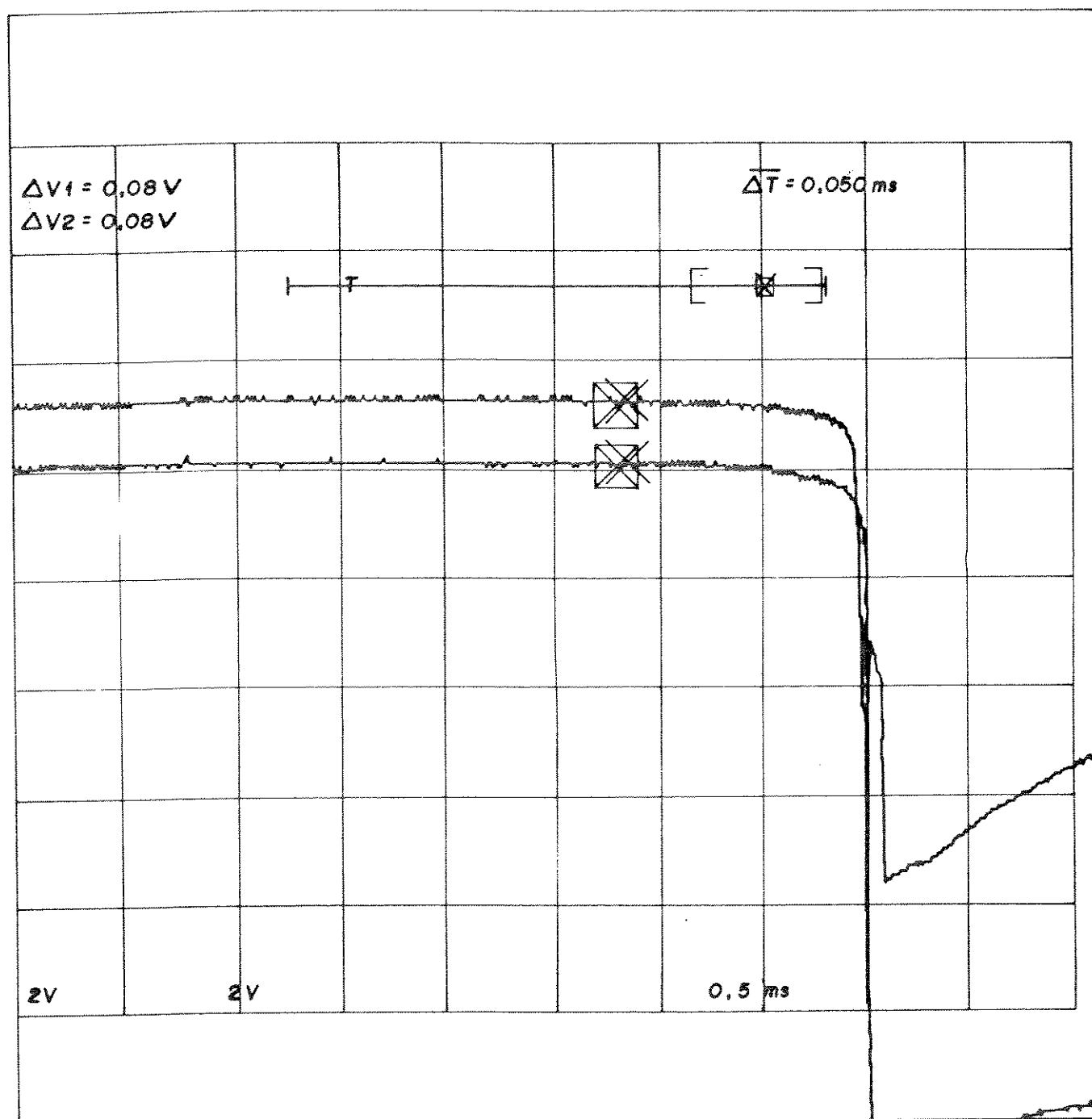


Figura 5.8 Respostas dos fotomultiplicadores para obtenção da curva de velocidade de flashover. Fibras ópticas instaladas no meio do percurso da descarga.

Na figura 5.9 os cabos estão colocados a 9 e 9.5 cm do eletrodo de alta tensão, muito próximos do eletrodo de terra.

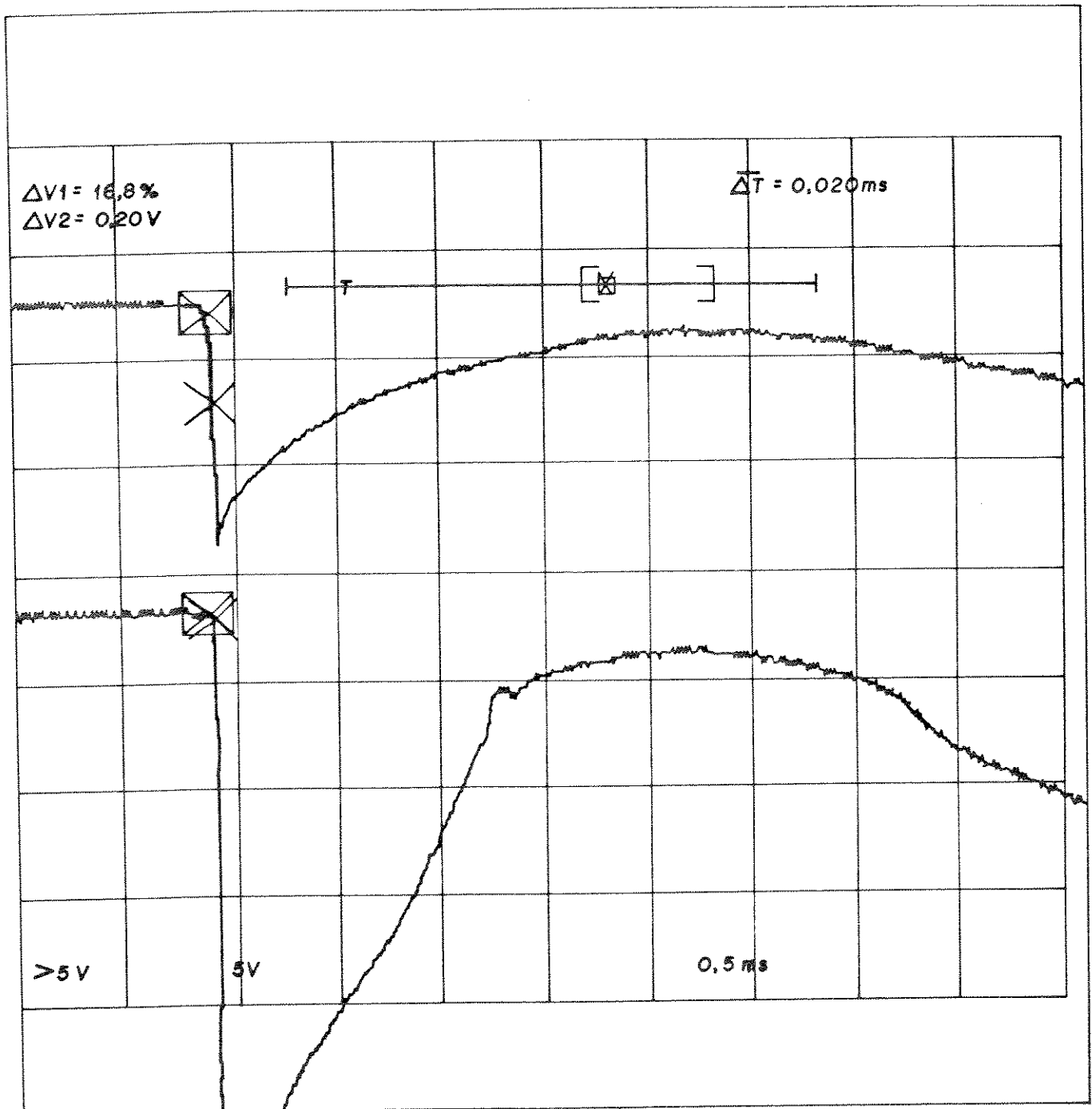


Figura 5.9 Respostas dos fotomultiplicadores para obtenção da curva de velocidade de flashover. Fibras ópticas instaladas no percurso da descarga, perto do eletrodo de terra.

Da figura anterior tem-se que, a medida que os cabos de fibra se aproximam do eletrodo de terra, as medições de tempo devem ser feitas com muita precisão.

Durante o levantamento das características de velocidade foram realizadas no mínimo cinco medições ou aplicações para cada trecho do canal a ser analisado, ou seja, a partir do eletrodo de alta tensão, de 0 a 20 cm, de 2 a 4 cm, de 4 a 6 cm, de 6 a 7 cm, de 7 a 8 cm, de 8 a 9 cm e de 9 a 9.5 cm. O valor considerado para o levantamento de cada ponto da curva de velocidade é a média dos cinco valores obtidos para cada trecho.

V.3.1 - POLARIDADE POSITIVA.

O primeiro levantamento será para $R = 5 \text{ Kohms/cm}$. A primeira atividade do ensaio é determinar a tensão de flashover. Uma vez determinada, as aplicações serão sempre feitas com esta tensão com a mudança do líquido após cada aplicação, e com a alteração da posição dos cabos de fibra óptica após cada cinco aplicações em cada um dos trechos já referidos anteriormente.

A tabela 5.11, mostra os resultados obtidos nas diversas medições realizadas durante a execução do ensaio. A partir destes resultados que feito o levantamento da característica de velocidade de flashover, em função do alongamento da descarga. Nesta tabela, na primeira coluna, é identificado o trecho do percurso, no

qual a velocidade será medida. O primeiro número indica a distância do primeiro cabo de fibra óptica em relação ao eletrodo de alta tensão. O segundo número indica a distância do segundo cabo. Estas distâncias estão dadas em cm. Na segunda coluna, está o tempo médio obtido para as várias aplicações. Na terceira coluna, é dada a velocidade média do flashover neste trecho.

Tabela 5.11 Velocidade de flashover x alongamento da descarga para $R = 5 \text{ K}\Omega/\text{cm}$. Polaridade positiva.

| Trecho do canal (cm) | tempo (ms) | velocidade (cm/s) |
|-------------------------|---------------|----------------------|
| 0 - 2 | 14,300 | 140,0 |
| 2 - 4 | 8,400 | 238,0 |
| 4 - 6 | 5,340 | 774,0 |
| 6 - 7 | 0,480 | 2083,0 |
| 7 - 8 | 0,095 | 10526,0 |
| 8 - 9 | 0,055 | 18181,0 |
| 9 - 9,5 | 0,020 | 25000,0 |

A figura 5.10 mostra a característica de velocidade obtida após a realização dos ensaios.

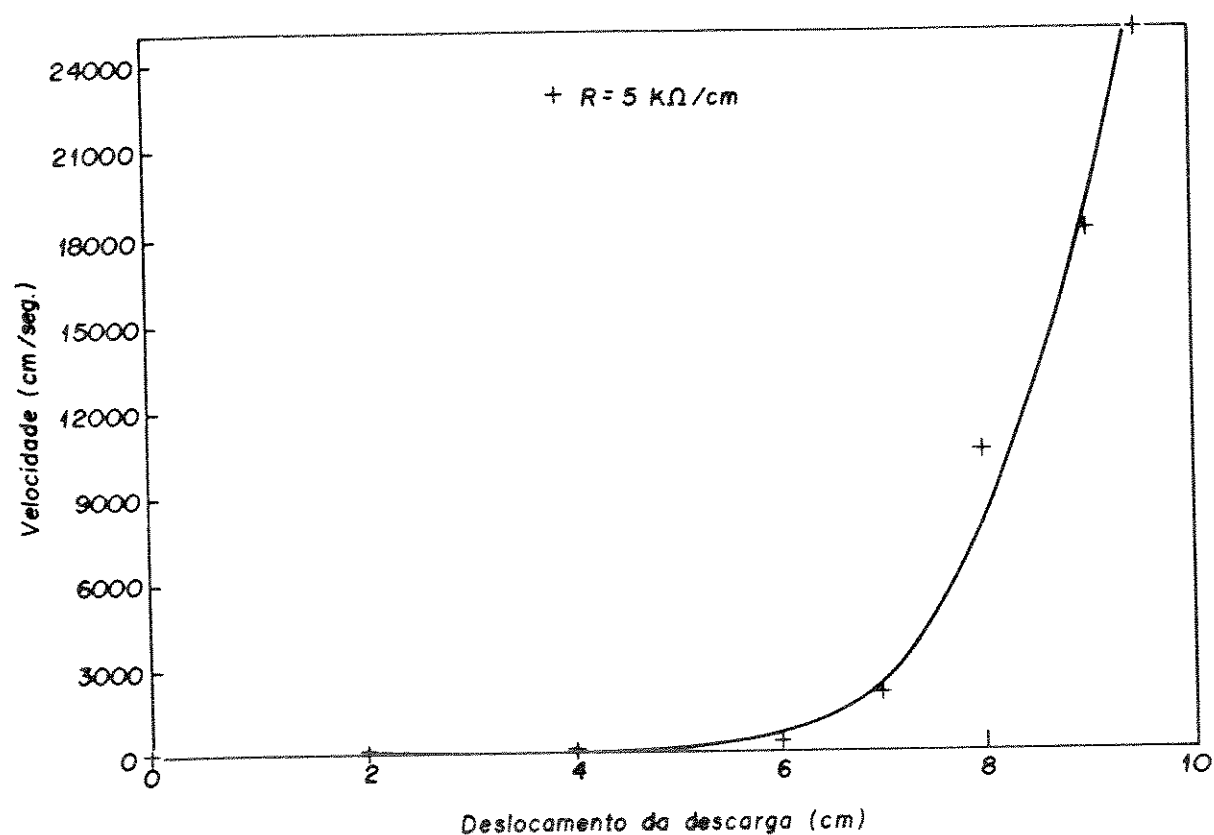


Figura 5.10 Característica de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga para $R = 5 \text{ k}\Omega/\text{cm}$. Pol. positiva

A seguinte aplicação foi realizada para um valor de resistência de poluição de $2 \text{ Kohms}/\text{cm}$. O procedimento seguido é igual ao dos ensaios anteriores. A tabela 5.12 mostra os valores obtidos das várias aplicações experimentais realizadas. Os valores mostrados nesta

tabela, devem ser lidos com as mesmas observações feitas para os valores da tabela 5.11.

Tabela 5.12 Velocidade de flashover x alongamento da descarga para
R = 2 KΩ/cm. Polaridade positiva.

| Trecho do canal (cm) | tempo (ms) | velocidade (cm/s) |
|-------------------------|---------------|----------------------|
| 0 - 2 | 5,500 | 363,6 |
| 2 - 4 | 4,500 | 444,0 |
| 4 - 6 | 2,480 | 806,4 |
| 6 - 7 | 0,240 | 4166,6 |
| 7 - 8 | 0,085 | 11764,0 |
| 8 - 9 | 0,070 | 14285,0 |
| 9 - 9,5 | 0,030 | 16666,6 |

A característica de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga, é mostrado na figura 5.11.

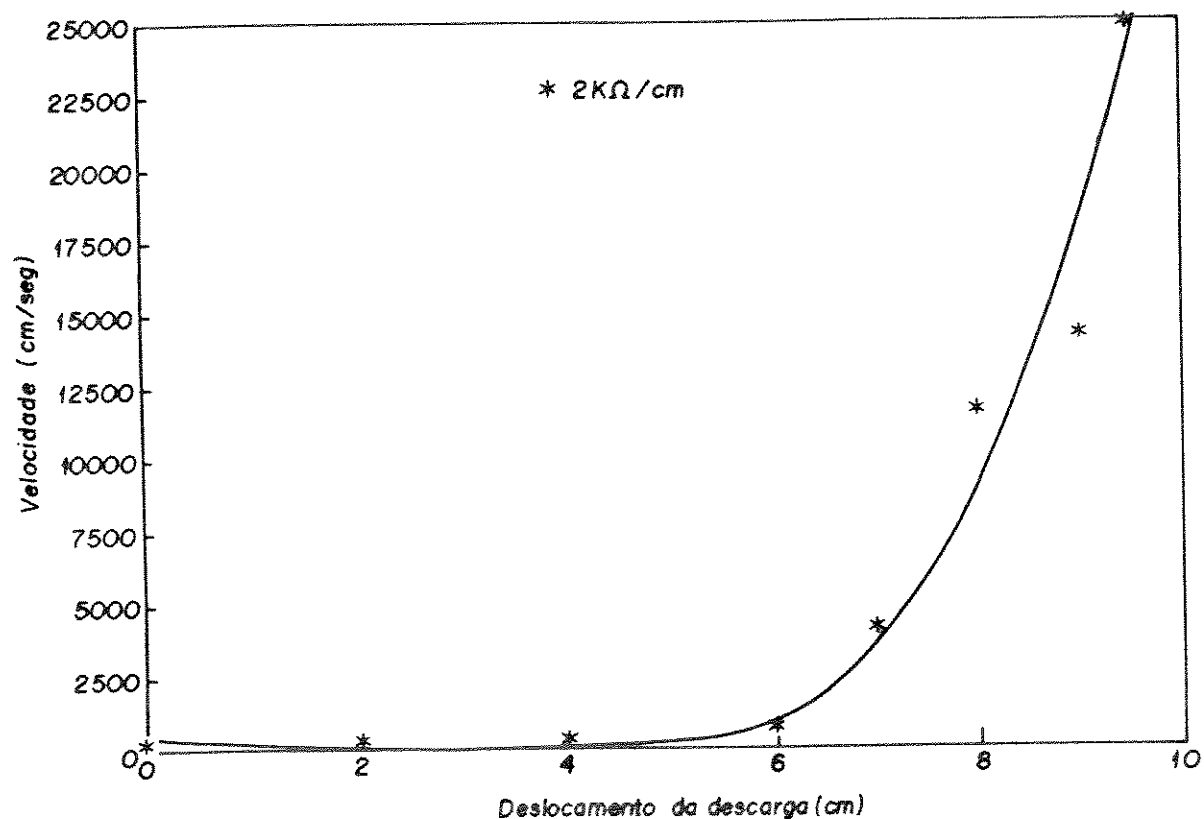


Figura 5.11 Característica de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga para $R = 2 \text{ K}\Omega/\text{cm}$. Pol. positiva

Nos gráficos da figura 5.12, são apresentadas as curvas de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga para valores de resistência da camada de poluição, de 2 e 5 Kohms/cm, para aplicações feitas com a tensão de flashover de

polaridade positiva. Observa-se que no início da descarga, as velocidades não são muito diferentes para os dois valores de resistência. A medida que a descarga se aproxima de 2/3 do comprimento do canal, a velocidade começa a aumentar. Quanto mais próximo estiver do eletrodo de terra, a característica para 5 K Ω /cm, tem um crescimento mais rápido que a de 2 K Ω /cm.

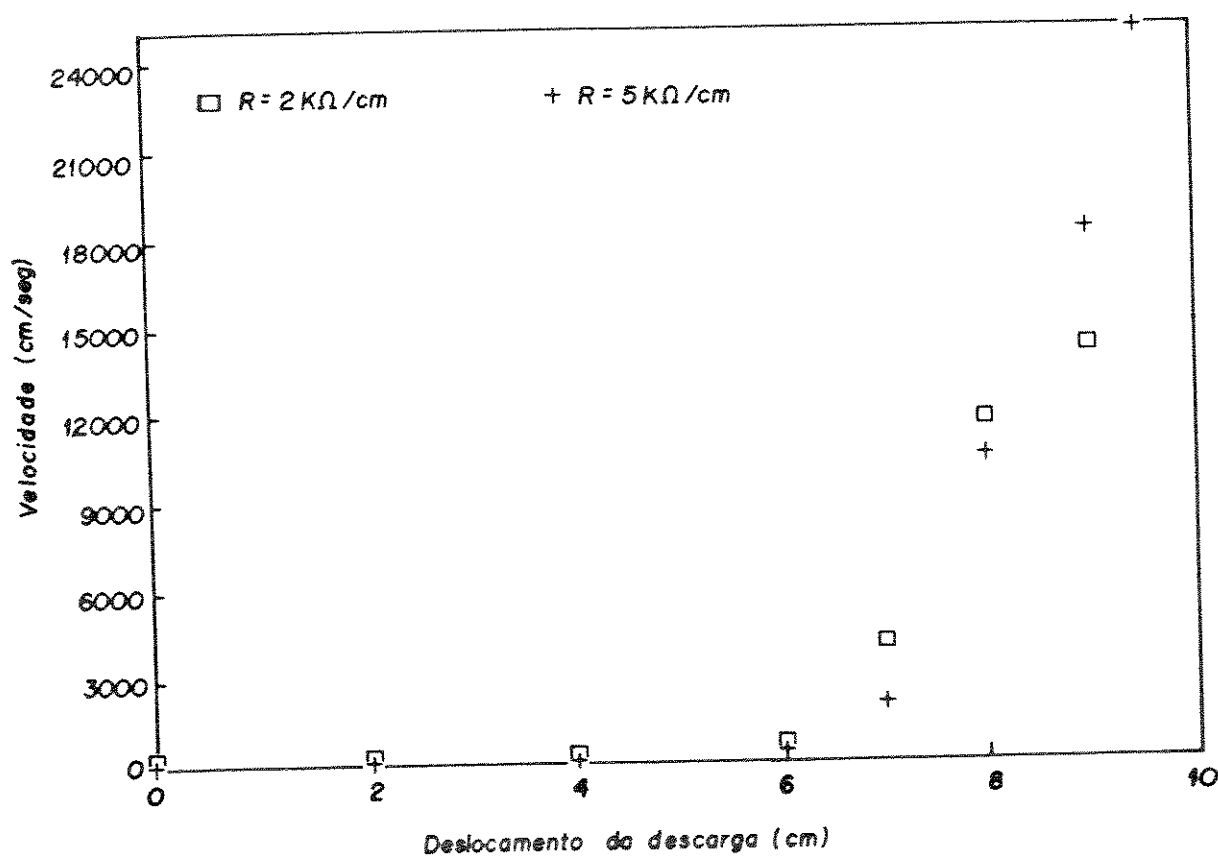


Figura 5.12 Comparação das características de velocidade para R = 2 e 5 K Ω /cm. Polaridade positiva.

V.3.2 - POLARIDADE NEGATIVA.

A mudança da polaridade da tensão aplicada, é feita pela inversão da polaridade da coluna de retificação do sistema de reprodução da descarga em alta tensão.

É feito o levantamento das características de velocidade para os valores de resistência de poluição de 2 e 5 Kohms/cm. O procedimento experimental é o mesmo utilizado nos ensaios anteriores, mantendo o mínimo de 5 aplicações para cada trecho do canal que contém o eletrolito.

A tabela 5.13, mostra os valores utilizados no levantamento das características de velocidade de flashover. Da mesma forma que nas tabelas 5.11 e 5.12, os valores apresentados para os tempos e para as velocidades, são os valores médios dos obtidos das várias aplicações, feitas durante o levantamento experimental das curvas.

A figura 5.13 mostra a característica de velocidade de flashover em cm/seg em função do comprimento do canal em cm, para $R = 5$ Kohms/cm.

Tabela 5.13 Velocidade de flashover x alongamento da descarga para
R = 5 K Ω /cm. Polaridade negativa.

| Trecho do canal (cm) | tempo (ms) | velocidade (cm/s) |
|-------------------------|---------------|----------------------|
| 0 - 2 | 8,480 | 235,8 |
| 2 - 4 | 8,180 | 246,3 |
| 4 - 6 | 7,270 | 343,7 |
| 6 - 7 | 0,580 | 1724,0 |
| 7 - 8 | 0,360 | 2777,0 |
| 8 - 9 | 0,085 | 11760,0 |
| 9 - 9,5 | 0,800 | 12500,0 |

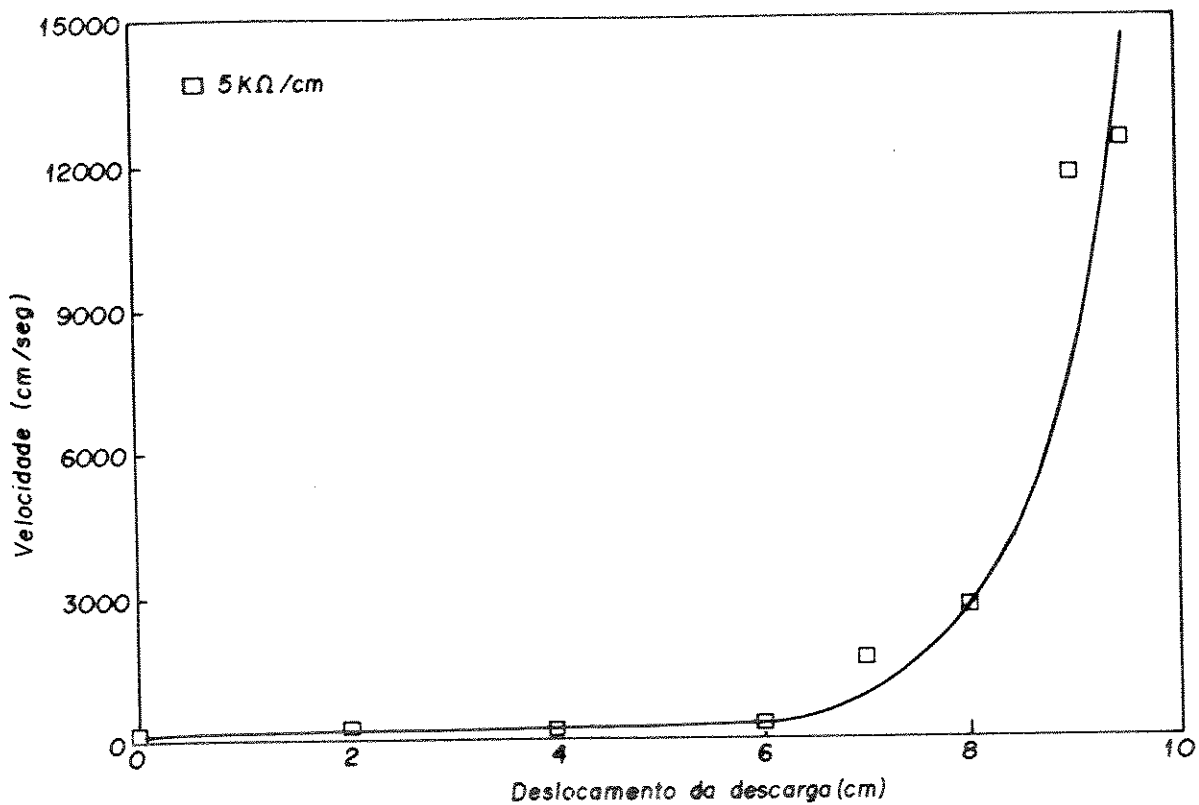


Figura 5.13 Característica de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga para $R = 5 \text{ K}\Omega/\text{cm}$. Pol. negativa

Na tabela 5.14, estão presentes os valores obtidos experimentalmente para o levantamento da característica de velocidade de flashover, em função do alongamento da descarga, para uma resistência da camada de poluição de $2 \text{ K}\Omega/\text{cm}$. Os valores de tensão aplicados, são os valores de tensão de flashover e a polaridade desta

tensão é negativa.

Tabela 5.14 Velocidade de flashover x alongamento da descarga para
R = 2 K Ω /cm. Polaridade negativa.

| Trecho do canal (cm) | tempo (ms) | velocidade (cm/s) |
|-------------------------|---------------|----------------------|
| 0 - 2 | 8,480 | 234,0 |
| 2 - 4 | 7,900 | 254,0 |
| 4 - 6 | 5,570 | 358,0 |
| 6 - 7 | 1,200 | 833,0 |
| 7 - 8 | 0,680 | 1470,0 |
| 8 - 9 | 0,260 | 3846,0 |
| 9 - 9,5 | 0,080 | 6250,0 |

O gráfico mostrado na figura 5.14, corresponde à característica de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga, para uma resistência do líquido que representa a camada de poluição de 2 Kohms/cm.

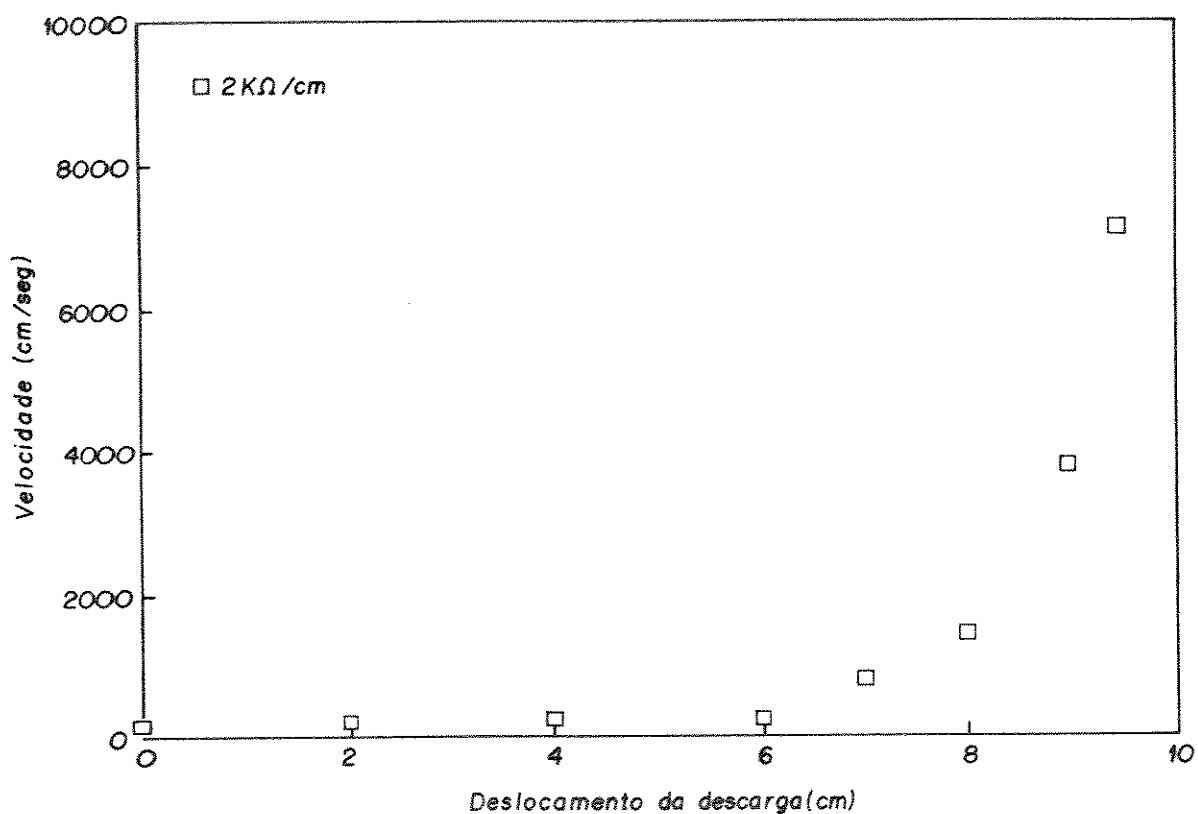


Figura 5.14 Característica de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga para $R = 2 \text{ K}\Omega/\text{cm}$. Pol. negativa

A figura 5.15, mostra uma comparação entre a característica de velocidade obtida experimentalmente, e aquela obtida com a utilização do programa computacional desenvolvido, para $R = 5 \text{ Kohms/cm}$. O valor da mobilidade iônica considerada

no programa (μ), é mostrado no gráfico.

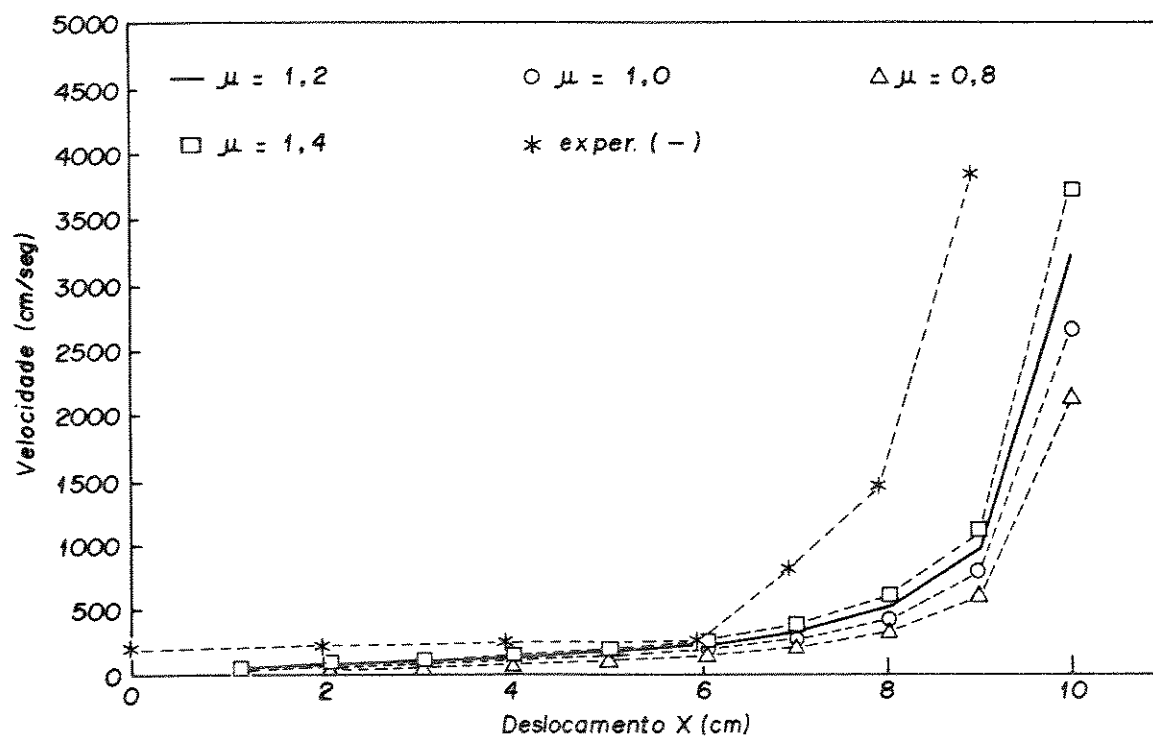


Figura 5.15 Características de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga, calculada e determinada experimentalmente para $R = 5 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

A figura 5.16, mostra a comparação da característica de velocidade determinada experimentalmente, e aquela obtida pelo programa computacional, para uma resistência de poluição de 2 Kohms/cm.

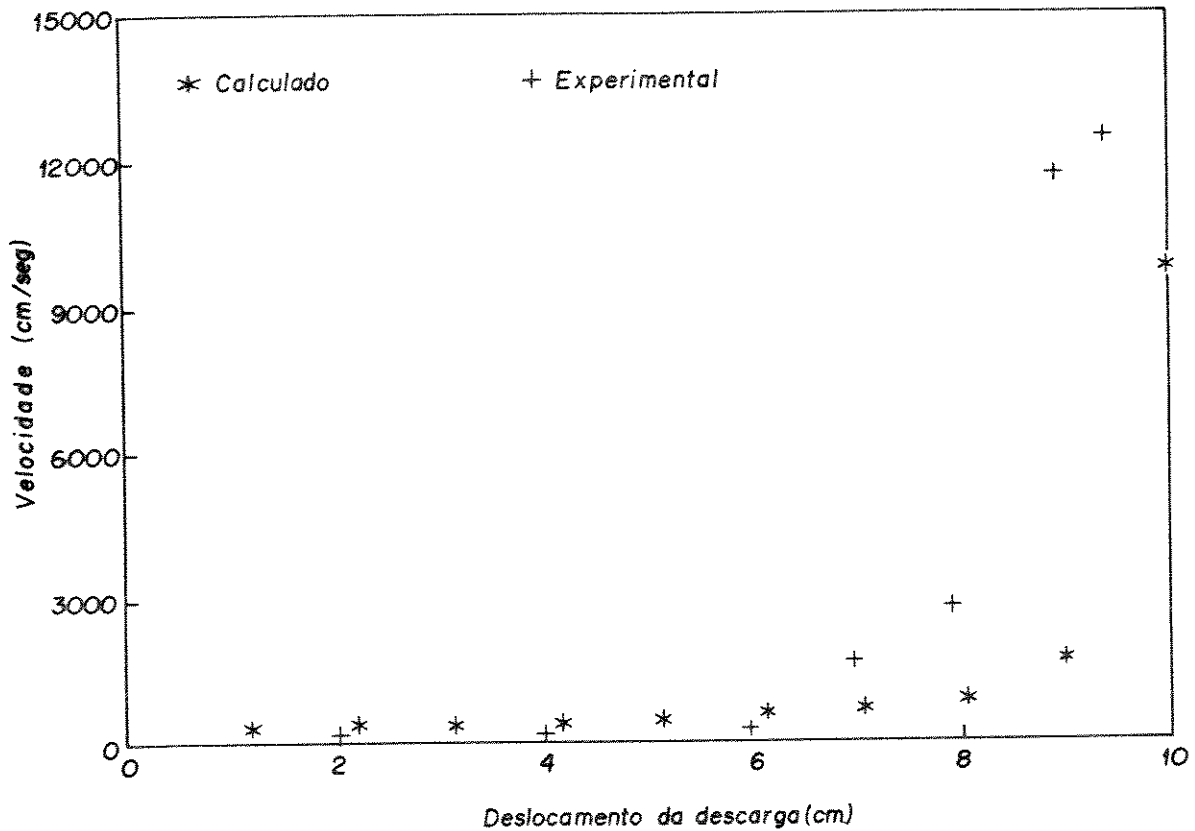


Figura 5.16 Características de velocidade de flashover em função do alongamento da descarga, calculada e determinada experimentalmente para $R = 2 \text{ K}\Omega/\text{cm}$.

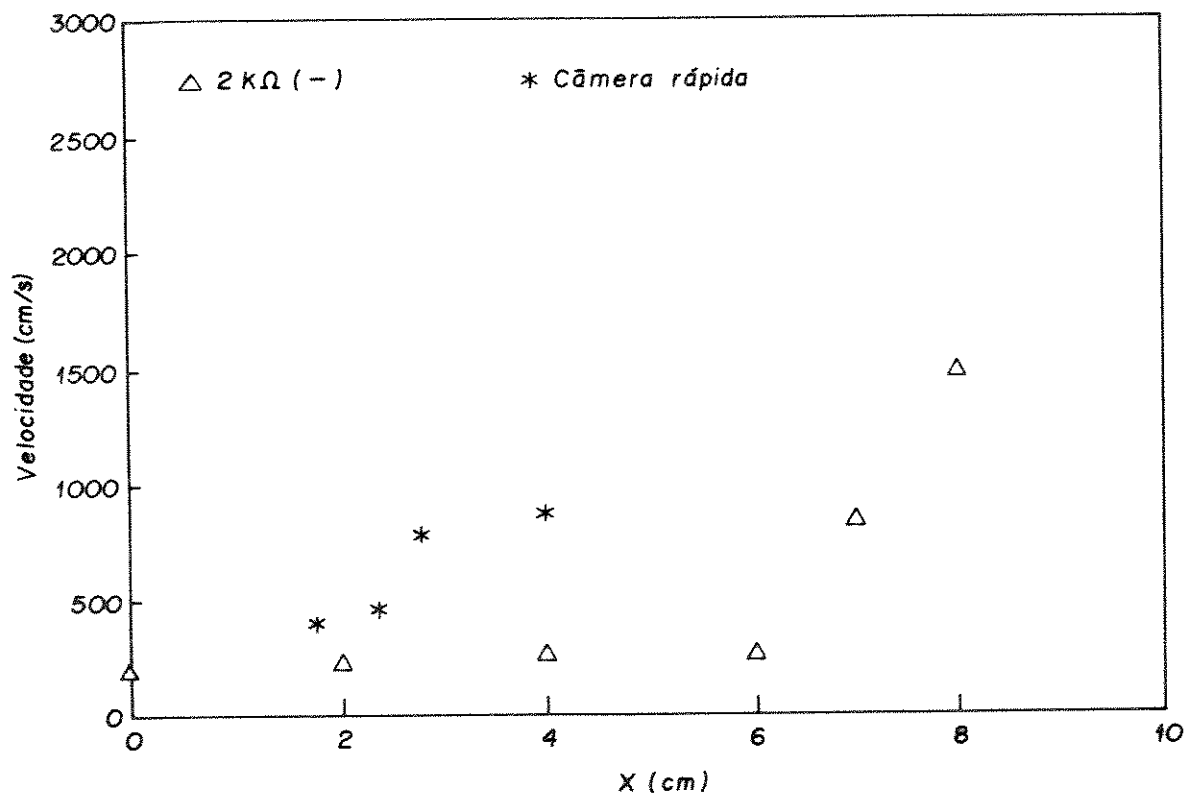


Figura 5.17 Comparação dos resultados experimentais obtidos no levantamento da característica de velocidade, com os resultados apresentados na referência [25]

V.4 - ANÁLISE DA DESCARGA

Os gráficos apresentados nas figuras 5.16 e 5.17, representam respectivamente, o início e o final das respostas dos dois fotomultiplicadores, à passagem de uma descarga que termina na ocorrência de flashover. À partir destes gráficos, é possível realizar a medição do tempo que a descarga leva do ponto em que está colocada a fibra óptica que alimenta o primeiro fotomultiplicador, até o ponto em que está colocada a fibra óptica que alimenta o segundo fotomultiplicador, ou pelo início dos gráficos ou pela parte final dos mesmos; sendo que o resultado é aproximadamente igual nas duas situações.

Esta observação, obtida a partir dos resultados experimentais, faz supor que a descarga se comporta como um bloco de energia, que se desloca ao longo do canal do modelo físico do isolador poluído, com o seu início e o seu final bastante definidos.

Vários pesquisadores como Flazi S. [18], e Pissolato [25], se referem à descarga como uma carga espacial que se desloca no eletrolito. A observação aqui exposta, vem reforçar esta teoria.

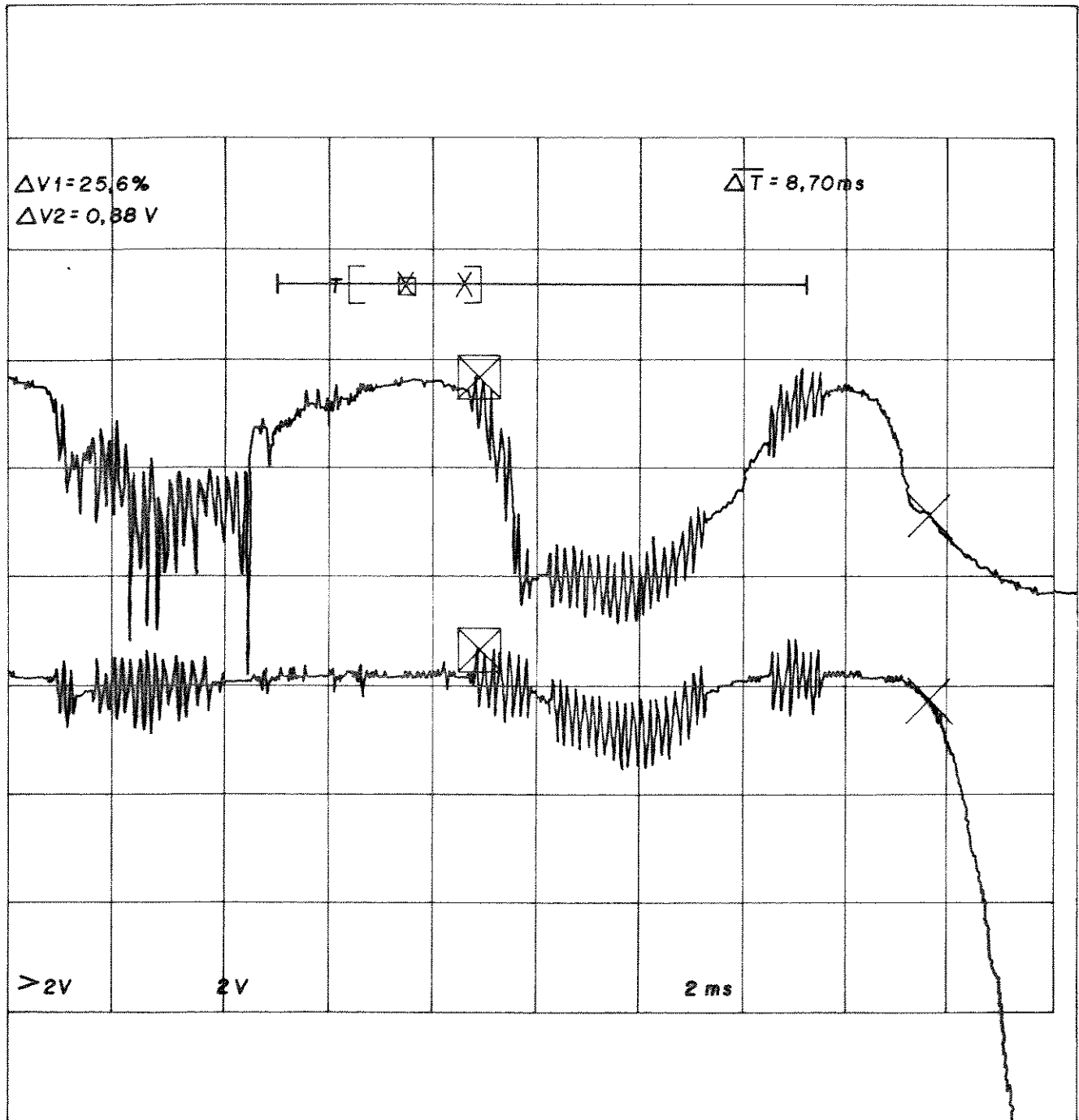


Figura 5.18 Respostas dos fotomultiplicadores à passagem do início de uma descarga terminada em flashover.

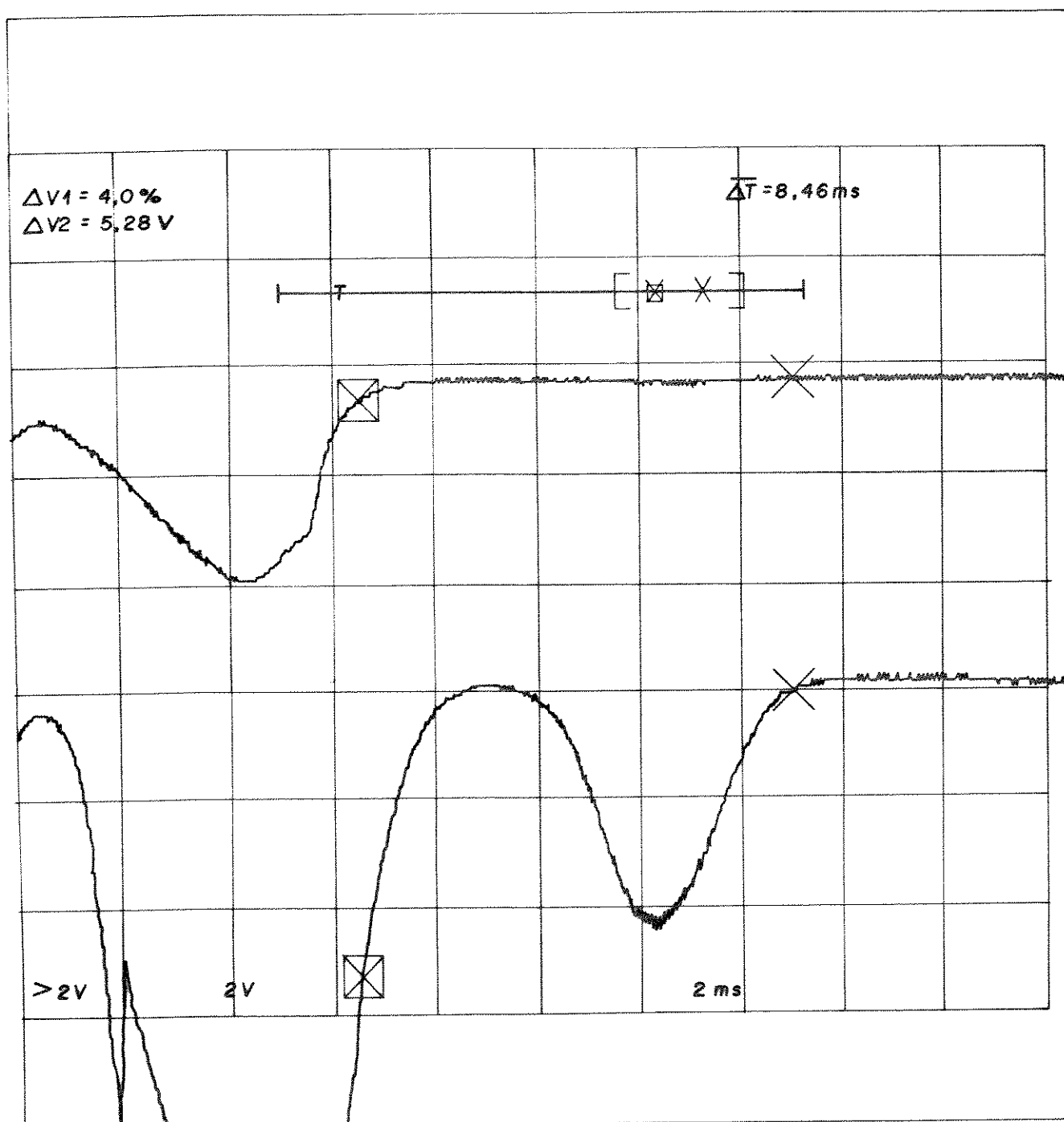


Figura 5.19 Respostas dos fotomultiplicadores à passagem do final de uma descarga terminada em flashover.

V.5 - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.

Os resultados apresentados ao longo deste capítulo, permitem desde já concluir que, a montagem experimental realizada neste trabalho cumpre os objetivos pretendidos, ou seja, através da utilização de um modelo físico do isolador poluído, de um sistema de reprodução da descarga elétrica em corrente contínua, e de um sistema de visualização da descarga composto de cabos de fibra óptica e fotomultiplicadores, foi possível analisar o comportamento dinâmico de uma descarga numa superfície poluída, especialmente, quando esta descarga provoca a ocorrência do fenômeno de flashover.

A partir da análise destes resultados, várias discussões podem ser estabelecidas em relação ao comportamento da descarga.

Do levantamento da característica de tensão de flashover em função de tempo para polaridade positiva, verifica-se que a descarga se dá, aparentemente por dois processos diferentes, para valores de resistência da camada de poluição acima de 7,5 kohms/cm (aproximadamente). Estes resultados, confirmam a hipótese das referências [25] e [30], segundo a qual, a parte superior das curvas da figura 5.3, obedecem ao mecanismo da força exercida sobre a descarga. A parte inferior destas curvas por outro lado, são o resultado da existência de uma ruptura dielétrica à frente do pé da descarga.

Em relação ao valor da tensão de flashover, os

resultados deste capítulo mostram que, para valores baixos de resistência da camada de poluição (até 5 kohms/cm aproximadamente), a conclusão da referência [15], está correta quando sustenta que os valores de tensão de flashover, apresentam diferenças muito pequenas para polaridade positiva e negativa.

Para valores de resistência da camada de poluição maiores de 5 kohms/cm (aproximadamente), no entanto, os resultados mostram que, para aplicações de descargas com tensão de polaridade positiva, os valores de tensão de flashover, são maiores que para descargas com tensão de polaridade negativa. O anterior, está de acordo com as referências [11] e [25].

A conclusão que se obtém destes resultados, é que, para valores baixos de resistência da camada de poluição, ou seja, uma poluição severa na superfície de isoladores reais, as diferenças entre os valores de tensão crítica de flashover para polaridades positiva e negativa, são pequenas. Para altos valores de resistência da camada de poluição, o que representa um nível de poluição pouco severo na superfície de um isolador real, os valores de tensão, necessários para a ocorrência do fenômeno de flashover, são maiores para tensão de polaridade positiva, do que para polaridade negativa.

Em relação às características de velocidade, pode-se concluir que os resultados obtidos a partir do sistema experimental desenvolvido durante a realização deste trabalho, servem para entender melhor o comportamento do flashover, já

que permitem a verificação do modelo matemático implantado, bem como dos resultados obtidos por outros pesquisadores.

Outras conclusões obtidas a partir dos resultados experimentais, serão apresentadas no seguinte capítulo deste trabalho.

No capítulo a seguir, serão apresentados também as principais conclusões de todo o trabalho desenvolvido, e serão sugeridos futuros trabalhos de pesquisa que podem vir a ser desenvolvidos com a utilização da modelagem experimental aqui utilizada, e do sistema experimental implantado.

VI CONCLUSÕES.

Neste capítulo final, são apresentadas as principais conclusões a partir dos resultados obtidos ao longo deste trabalho. É feita uma discussão final sobre alguns aspectos ainda não considerados, e são sugeridos novos trabalhos que podem vir a ser desenvolvidos, dentro desta linha de pesquisa, utilizando como ponto de partida, os recursos disponíveis neste trabalho tanto na parte de modelagem computacional, como na de modelagem experimental.

As conclusões que podem ser apresentadas como contribuição deste trabalho, no esforço da compreensão do comportamento dinâmico de uma descarga elétrica numa superfície poluída estão a seguir.

- Em relação ao deslocamento da descarga, a condição crítica, sob o ponto de vista estático, é dada pela diferença entre o campo elétrico E_a e E_{pr} , na coluna e no pé da descarga respectivamente.

Esta diferença se manifesta, por uma força eletrostática exercida no pé da descarga, força esta, responsável pelo deslocamento espaço-tempo do comprimento da descarga (X). O movimento se dará então com uma velocidade proporcional a esta força.

- O programa computacional implantado permite, como pode ser verificado pelos resultados presentes no capítulo 3 deste

trabalho, a obtenção das características, das principais grandezas físicas e elétricas, envolvidas no processo do deslocamento da descarga elétrica. Isto torna mais fácil o acompanhamento da dinâmica da descarga, e do fenômeno de flashover em particular.

Cabe observar que, em relação às curvas de tensão e correntes de flashover fornecidas pelo programa e mostradas no capítulo 3, os valores iniciais de tensão e corrente, são os valores críticos de flashover, ou seja, aqueles valores que garantem a ocorrência do flashover. É por esta razão que os gráficos não registram o instante anterior ao flashover.

- Em relação à montagem experimental, verifica-se, também a partir dos resultados apresentados, que, a metodologia idealizada para o desenvolvimento deste trabalho, se mostra de grande utilidade e eficácia no estudo do comportamento dinâmico da descarga.

O desenvolvimento e implantação deste sistema experimental, composto de:

- a) modelo experimental do isolador poluído;
- b) sistema de reprodução de descarga elétrica em corrente contínua;
- c) sistema de visualização da descarga elétrica, composto por cabos de fibra óptica colocados

ao longo do percurso da descarga e conectados a fotomultiplicadores;

d) sistema de medição das principais grandezas envolvidas;

é uma contribuição importante deste trabalho, que facilitará o desenvolvimento de novos estudos.

- Em relação aos valores de tensão de flashover, os resultados apresentados no capítulo 5, confirmam as observações das referências [25] e [30], isto é, o mecanismo de flashover se comporta de forma diferente para descargas de polaridade negativa e positiva. Para aplicações de tensão de polaridade positiva, as curvas de tensão de flashover em função do tempo, apresentam uma descontinuidade para valores de resistência da camada de poluição superiores a 7,5 kohms/cm (aproximadamente), e para aplicações acima do valor da tensão de flashover. Surge, a partir desta observação, a hipótese de dois mecanismos diferentes a dominar o flashover. Um deles, responsável pela parte superior das curvas na figura 5.2, é um mecanismo de força. O outro, responsável pela parte inferior das curvas, é um mecanismo de ruptura dielétrica.

Outra conclusão obtida a partir dos gráficos da figura 5.6, é que, para valores baixos de resistência da camada de poluição (até 5 kohms/cm aproximadamente), ou seja, um nível de poluição real severo, os valores de tensão de flashover não

apresentam grandes diferenças. Já para valores altos de resistência da camada de poluição, os valores de tensão para polaridade positiva, são maiores que os de polaridade negativa, para um mesmo valor de resistência. Esta diferença aumenta com o aumento da resistência da camada de poluição, ou seja, com a diminuição da severidade da camada de poluição, que se depositaria num isolador real.

- Em relação à velocidade da descarga, os resultados apresentados no capítulo 5 mostram, em primeiro lugar, que o sistema de visualização da descarga da montagem experimental, é eficaz para realizar este tipo de estudo; em segundo, os resultados mostram que a velocidade do fenômeno de flashover tem um comportamento praticamente constante, até aproximadamente $2/3$ do percurso, partindo do eletrodo de alta tensão. A partir deste ponto, a velocidade aumenta rapidamente até a ocorrência do fenômeno de flashover. Esta observação implica, que uma descarga deslocando-se numa superfície poluída autosustentando-se até aproximadamente $2/3$ do comprimento do canal, deverá terminar em flashover. O anterior confirma os resultados das referências [17] e [25], e é válido, para o modelo físico usado nesta montagem experimental.

Em relação à intensidade da foto-emissão da descarga verifica-se que, esta é maior quanto maior for a tensão de flashover aplicada. É importante levar em consideração que, em função da solução utilizada para o eletrolito (água destilada mais NaCl), a maior parte de luz emitida pelo arco, se compõe do espectro de Na, [15], o que dificulta uma análise espectral da descarga.

Não obstante a observação anterior, os resultados dos registros dos fotomultiplicadores, mostram que existe uma região mais luminosa perto de eletrodo de alta tensão na coluna da descarga, do que na frente ou pé da descarga. A figura 6.1 mostra estas regiões observadas nas referências [18] e [25].

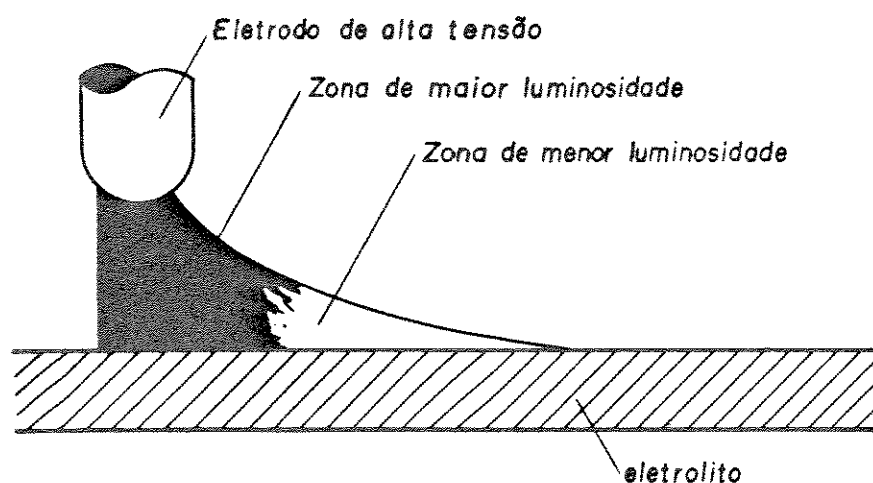


Figura 6.1 Zonas luminosas de uma descarga elétrica.

VI.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS.

A partir deste trabalho, algumas sugestões podem ser realizadas para o desenvolvimento de futuros trabalhos. Entre estas:

- Utilização da metodologia de observação e medição experimental aqui utilizada, para estudo do comportamento dinâmico de uma descarga elétrica num modelo de isolador físico de duas camadas.

- Estudo do comportamento dinâmico de uma descarga elétrica, em tensão alternada, a partir do desenvolvimento teórico e experimental realizado neste trabalho.

- Análise da descarga, através do estudo do espectro de luz emitido pelo arco, utilizando uma outra solução química na composição do eletrolito utilizado no modelo físico de uma ou duas camadas.

- A existência de duas zonas de luminosidade diferente na descarga, demonstrada nas referências [18] e [25], e observadas na execução deste trabalho, pode ser melhor analisada, na busca de uma solução definitiva para o mecanismo responsável pelo deslocamento da descarga.

VI.2 CONCLUSÃO FINAL.

Este trabalho foi iniciado, com o propósito de dar uma contribuição na compreensão do comportamento dinâmico de uma descarga elétrica na superfície de isoladores de alta tensão, destinados a trabalhar em regiões sujeitas a poluição atmosférica notável. Do estudo bibliográfico das últimas e principais publicações a respeito, constata-se que não existe ainda uma solução

definitiva para o problema em estudo; daí a importância deste trabalho.

A fim de efetivar esta contribuição, é desenvolvido um programa computacional que permite a simulação da descarga numa superfície poluída.

É desenvolvido também, um sistema experimental que até agora não tinha sido utilizado para esta aplicação, e que permite o acompanhamento da dinâmica de uma descarga elétrica numa superfície poluída.

Os resultados dos modelos matemático e experimental, são analisados e comparados entre si, e com resultados de referências.

São ainda, apresentadas conclusões e comentários sobre os resultados obtidos, bem como sugestões para a realização de novos trabalhos de pesquisa que podem ser desenvolvidos, utilizando as ferramentas disponíveis a partir desta dissertação.

Por todo o conteúdo anterior, pode-se afirmar que, o objetivo pretendido no início deste trabalho, foi totalmente atingido.

VII - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - P.J. LAMBETH "Effect of Pollution on high-voltage outdoor insulation" Proc. I.E.E., I.E.E Reviews, GB, vol.118 n^o 9R, Sep.1971, pp. 1107-1130.
- 02 - J.F. HALL, T. HILLESLAND, S.R. KNUDSEN "500 KV Station post insulator performance at P.G. and E'S outdoor laboratory at Moss Landing" I.E.E.E. Trans. on PAS USA vol.PAS-95, n^o 1, Jan. Fev. 1976, pp. 166-177.
- 03 - J.H. MORAN, D.G. POWEL "Resistance graded insulator. The ultimate solution to the contamination problem" I.E.E.E. Trans. on PAS, USA. Dec. 1972, pp. 2452-2458.
- 04 - M.R. RACHUVEER el Al "Application of partially conducting polymeric materials for high-voltage outdoor insulators in polluted environments" I.E.E.E. Trans on PAS USA, vol.97, n^o 5 Sept/Oct. 1978, pp. 1672-1678.
- 05 - D.A. SWIFT "Flashover across the surface of an electrolyte: arresting arc propagation with narrow metal strips" I.E.E.-Proc. vol.127, Pt.A, n^o 8 Nov/1980.
- 06 - S. FLAZI "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.

- 07 - M. ALIOUCHENE "Contournement électrique de surfaces isolante polluées: modele bicouche à résistance non linéaire" Thèse de Docteur Ingenieur. Institut National Polytechnique. Toulouse, 1985.
- 08 - CLAVERIE an PORCHERON "How to choose insulators for polluted Areas" I.E.E.E. PES Summer meeting. San Francisco, CALIF. July 9-14, 1972.
- 09 - H. MATSUO, Y. YUNOKI, N. MITA "Impulse on Contaminated Surface" Electrical Engeneering in Japan, vol.89, n^o 9, 1969.
- 10 - T. YAMASHITA, H. MATSUO, H. FUJIYAMA "Relationship Between Photo-emission and Propagation Velocity of Local Discharge on Electrolytic Surfaces" I.E.E.E. Trans. on Electrical Insulation vol.EI-22 n^o 6 Dec.1987.
- 11 - C.T. WAND, T.C. CHENG "Formation Mechanisms of Clean Zones During the Surface Flashover of Contaminated Insulators" I.E.E.E. Trans. Electrical Insulation vol.EI-13 n^o 3, June 1978.
- 12 - T.C. CHENG, C.Y. WU, e H. NOUR "DC Interfacial Breakdown on Contaminated Electrolytic Surfaces" I.E.E.E. Trans. Electrical Insulation vol.EI-19 n^o 6, December 1984.

- 13 - T.C. CHENG e H.I.M. NOUR "A study of the profile of HVDC insulator" I.E.E.E. Trans. on Electrical Insulation vol.24 n^o1, February 1989.
- 14 - ZANG RENYU, ZHU DEHENG, WANG XIAOTAO "Configuration Effect on D.C. Flashover on Polluted Insulators." I.E.E.E. Trans. on Electrical Insulation vol. 25 n^o 3, June 1990.
- 15 - T. MATSUMOTO, M. ISHII, T. KAWAMURA "Optoelectronic Measurement of Partial Arcs on a contaminated surface" I.E.E.E. Trans. on Electrical Insulation vol. E.I.-19 n^o 6, December 1984.
- 16 - LI SHUNYUAN, ZHANG RENYU and TAN KEYIONG "Measurement of Dynamic Potencial Distribution during the Propagation of a Local Arc. along a Polluted Surface" I.E.E.E. Trans. on Electrical Insulation vol.25 n^o 4, August 1990.
- 17 - GUAN ZHICHENG and ZHANG RENYU "Calculation of D.C. and A.C. Flashover Voltage of Polluted Insulator" I.E.E.E. Trans. on Electrical Insulation vol.25 n^o 4, August 1990.
- 18 - M. ZAMIR FLAZI "Etude du contournement Electrique des Insolateurs Haute Tension Pollues Critere d'elongation de la Decharge et Dynamique du Phenomene" These de Docteur D'etat- Université Paul Sabatier de Toulouse - 1987.

- 19 - F. OBENAUS, H. BOEHME "Essais de contournement sur isolateurs pollués en laboratoire et en lieu de service du point de vue de la conception d'une modèle d'amorçage par courant rampant" CIGRE - 1966.
- 20 - E.W. KIMBARK "Direct Current Transmission" vol.1 Wiley Interscience - USA, 1971.
- 21 - L. L. ALSTON, S. ZOLEDZIEWSKI "Growth of discharges on polluted insulation" Proc. IEE, 1963 110 (7) pp 1260-1266.
- 22 - R. WILKINS "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films" Proc. I.E.E.E. 1969, 116(3), pp. 457-465.
- 23 - S. GOPAL, N. RAO "Flashover phenomena of polluted insulators" I.E.E.E. Proceedings vol.131, Pt, C n^o4, July 1984.
- 24 - B.F. HAMPTON "Flashover Mechanism of Polluted Insulators" Proc. I.E.E., vol.111, n^o5, May 1964.
- 25 - J. PISSOLATO "Analyse du contournement d'une surface faiblement conductrice par une decharge électrique alimentée en courant continu" Thèse de Docteur, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1986.
- 26 - D.C. JOLLY "Physical Processes in the flashover of insulator

with contaminated surfaces" Thesis of PhD, M.I.T. 1971.

- 27 - R. WILKINS e A. AL-BAGHADADI "Arc Propagation along an electrolyte surface" Proc. I.E.E. vol.118 n^o12 Dec. 1971.
- 28 - H. MERCURE e M. DROUET "Dynamic Measurements of the current distribution in the foot of an arc propagation along the surface of an electrolyte" I.E.E.E. Trans. on PAS vol. PAS 101 n^o3, March 1982.
- 29 - D.A. SWIFT "Flashover across the surface of an electrolyte: arresting arc propagation with narrow metal strips" I.E.E. Proc. vol.127, Pt.A, n^o8, Nov.1980.
- 30 - G. PEYREGNE "Etude en régime dynamique du contournement par décharges de surfaces isolantes rendues faiblement conductrices" Thèse de Docteur - Ingenieur, Université Paul Sabatier de Toulouse 1981.
- 31 - A.M. RAHAL "Sur les mécanismes physiques du contournement des isolateurs haute tension" Thèse de Docteur, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1979.
- 32 - RCA Photomultiplier Manual RCA Corporation, USA, 1970.
- 33 - G.E. MARODE "La Formation de l'arc entre une pointe positive et un plan" Thèses Université Paris, S. Centre O'ORSAY 1972.