

FIRMINO GUIMARÃES DE SOUSA FILHO

ESTUDO DE DESCARGAS SUPERFICIAIS EM TU
BOS DE P.V.C. PARA USO EM APARELHOS DE
ALTA-TENSÃO.

*Dissertação apresentada à Coordenação
dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal
da Paraíba, em cumprimento parcial às
exigências para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO DA ENERGIA - ALTA TENSÃO
ORIENTADOR: Prof. SREERAMULU RAGHURAM NAIDU

Campina Grande, março de 1983



S725e Sousa Filho, Firmino Guimaraes de
 Estudo de descargas superficiais em tubos de P.V.C. para
 uso em aparelhos de alta-tensao / Firmino Guimaraes de
 Sousa Filho. - Campina Grande,
 119 f. : il.

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

 1. Energia Eletrica - 2. Tubos de PVC 3. Dissertacao I.
 Naidu, Sreeramulu Raghuram, Dr. II. Universidade Federal da
 Paraiba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 621.315(043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me ajudaram e incentivaram na elaboração e realização do presente trabalho.

De forma especial o faço ao Prof. Dr. K. D. SRIVASTAVA que sugeriu este trabalho e orientou a parte prática inicial, ao Prof. Dr. S. R. NAIDU por aceitar em dar continuidade à orientação, exercendo-a valorosamente, ao Prof. ANTONIO FAUSTINO C. NETO, Chefe do Laboratório de ALTA TENSÃO, pela atenção que me foi dispensada.

Agradeço a todos os funcionários do Laboratório de Alta-Tensão, em particular ao Sr. Adalberto José da Silva, incansável no apoio técnico.

Ao amigo Prof. Raimundo Nazareno Cunha Alves, pelo inestimável apoio nos momentos difíceis, os meus sinceros agradecimentos.

À minha sogra, D. Maria, fica aqui o meu profundo reconhecimento.

Não poderia deixar de agradecer aos meus manos e manas Leonam, Wander, Adervane, Leuza, Lêunia, José Antonio, Jofir e Paulo Roberto, amigos leais e incentivadores que juntos constituem uma base sólida na minha existência.

Espero, um dia, poder retribuir a todos.

À Ingrid,
Alinna,
Alan e
Aldine.

À minha mãe e em memória de meu pai.

R E S U M O

Um estudo de descargas superficiais em tubos de p.v.c, provenientes de impulsos atmosféricos de polaridades positiva e negativa, com o registro das características de ruptura em campos não-uniformes para arranjos com e sem tubo, é aqui relatado.

O campo elétrico foi calculado computacionalmente pelo Método de Simulação de Carga. Foi também desenvolvido um programa para calcular a tensão de iniciação de corona.

ABSTRACT

An investigation of surface discharges on the p.v.c. tubes, originating from the negative and positive polarities atmospheric impulses, with the record of the breakdown characteristics in nonuniform fields for arrangements with and without tube, is related here.

The electric field was computed by means of the Charge Simulation Method. A computational programme has been also developed to calculate the corona starting voltage.

Í N D I C E

	Pág.
Capítulo I - INTRODUÇÃO.	1
Capítulo II - FENÔMENO DE RUPTURA EM GASES E RUPTURA SUPERFICIAL EM SÓLIDOS	4
2.1 - Ruptura em Gases.	4
2.1.1 - Teoria de Townsend.	6
2.1.1.1 - Critério de Townsend para ruptura	7
2.1.1.2 - Interpretação física do critério de Townsend	8
2.1.2 - Teoria do Canal	9
2.1.2.1 - Critério do Canal para ruptura	9
2.1.3 - Características de ruptura no ar para uma configuração esfera-plano em campos não-uniformes	11
2.2 - Ruptura superficial em sólidos	12
2.2.1 - Considerações gerais	12
2.2.1.1 - Intensidade do campo elétrico	12
2.2.1.2 - Rigidez dielétrica	13
2.2.2 - Ruptura do meio próximo a super- fície de um isolante sólido e ci- lindrico	13

- 2.2.2.1. - Influência da imperfeição da forma do isolante sólido na tensão de ruptura. 14
- 2.2.2.2. - Efeito da umidade na tensão de ruptura. . . 14

Capítulo III - CÁLCULO DA TENSÃO DE INICIAÇÃO DE CORONA EM CAMPOS NÃO-UNIFORMES DE DISTRIBUIÇÃO CONHECIDA 19

3.1 - Cálculo da tensão de iniciação de corona em campos não-uniformes. 20

3.2 - Cálculo de campos elétricos de alta-tensão aplicando o método de simulação de carga. 22

3.2.1 - O Método de Simulação de Carga(MSC) 22

3.2.2 - Princípio básico do MSC. 23

3.2.3 - Aplicação do MSC a sistemas com dois dielétricos. 25

3.2.3.1 - Procedimento. 26

3.2.3.2 - Critérios para a disposição de cargas e pontos de contorno. . . 28

3.2.3.3 - Exemplos de aplicação.	29
3.3 - Simulações e cálculos efetuados	
neste trabalho	30
3.3.1 - Cálculo do campo elétrico.	30
3.3.1.1 - Aproximação da forma do eletrodo	31
3.3.1.2 - Simulação do "Arranjo com tubo"	31
3.3.1.2(a) - Definição dos pa- râmetros.	31
3.3.1.2(b) - Posicionamento das cargas e pontos de contorno.	32
3.3.1.2(c) - Disposição das car- gas e pontos de contorno.	35
3.3.1.2(d) - Cálculo das inten- sidades das cargas fictícias	38
3.3.1.2(e) - Checagem do poten- cial	41
3.3.1.2(f) - Cálculo do campo elétrico	41

3.3.1.3 - Simulação do "Arranjo sem tubo"	41
3.3.2 - Cálculo da tensão de iniciação de corona	42
Capítulo IV - ARRANJOS EXPERIMENTAIS	54
4.1 - Sistema elétrico experimental	55
4.2 - Arranjos Testados	55
4.3 - Material utilizado nos arranjos	56
4.3.1 - Primeiro arranjo	56
4.3.2 - Segundo arranjo	57
4.3.3 - Terceiro arranjo.	58
4.3.4 - Quarto arranjo	60
4.4 - Equipamentos utilizados.	61
4.5 - Tratamento dos eletrodos	62
4.6 - Tratamento dos tubos de P.V.C.	62
Capítulo V - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	66
5.1 - Procedimento Experimental	67
5.1.1 - Calibração do gerador de impulso. 67	
5.1.1.1 - Método de Acréscimo e Decréscimo.	67
5.1.1.2 - Correções ambientais. . 68	
5.1.1.3 - Curva de calibração. . 70	

5.1.2 - Procedimento nos ensaios com os arranjos experimentais	70
5.2 - Apresentação dos Resultados	72
5.2.1 - Ensaio do 1º arranjo	72
5.2.2 - Ensaio do 2º arranjo	72
5.2.3 - Ensaio do 3º arranjo	73
5.2.4 - Ensaio do 4º arranjo	74
5.3 - Análise e discussão dos resultados.	75
5.3.1 - Análise comparativa das ca- racterísticas de ruptura pa- ra os arranjos com tubo.	75
5.3.2 - Características de ruptura na ausência do tubo	77
Capítulo VI - CONCLUSÕES.	88
Apêndice-A	92
Apêndice-B	93
Apêndice-C	94
REFERÊNCIAS	117

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>	<u>PÁG.</u>
2.1 Relação tensão-corrente de uma descarga em um gás..	15
2.2 Ruptura em campos uniformes - Critério de Townsend ..	15
2.3 Efeito da carga espacial produzido por uma <u>avalan</u> che no campo elétrico aplicado	16
2.4 Canal dirigido ao catodo	16
2.5 Ruptura em campos não-uniformes - Critério do Canal.	17
2.6 Características distância entre os eletrodos-tensão de ruptura para a configuração esfera-plano	17
2.7 Arranjo para ilustrar a discussão sobre centelhamen to na superfície de um isolante cilíndrico	18
2.8 Características de centelhamento superficial para dois cilindros de materiais diferentes	18
3.1 Canal dirigido ao anôdo	45
3.2 Coeficientes de ionização de Townsend para o ar a 760 mmHg e 20°C	45
3.3 Cargas discretas em um sistema com dois dielétricos.	46
3.4 Arranjos para a definição do fator de atribuição (f_a).	46
3.5 Arranjo de eletrodo usado na proteção de aparelhos de alta-tensão	47
3.6 Intensidade do campo tangencial ao longo da superfí cie do dielétrico mostrado na fig. 3.5	47

3.7	(a) Sistema constituído de um eletrodo esférico e uma chapa dielétrica; (b) Fatores de campo	48
3.8	Eletrodo "panela-disco" usado nos testes	49
3.9	(a) Contorno do eletrodo "panela-disco" comparado ao contorno da simulação; (b) Eletrodo da simulação visto de cima	49
3.10	Arranjo para a "simulação com tubo" (definição dos parâmetros)	50
3.11	Arranjo para a "simulação sem tubo" (definição dos parâmetros)	50
3.12	Disposição das cargas e pontos de contorno	51
3.13	Distribuição do campo tangencial para o "arranjo com tubo"	52
3.14	Distribuição do campo tangencial para o " arranjo sem tubo"	53
4.1	Circuito equivalente de um gerador de impulso com seis estágios	63
4.2	Circuito experimental	63
4.3	Fotografias. (a) Gerador de impulso; (b) Sistema elétrico experimental	64
4.4	Arranjos experimentais	65
5.1	Curva de calibração do gerador de impulso	80
5.2	Forma de onda padronizada da tensão de impulso 1,2/50 μ s	81
5.3	Características distância entre os eletrodos - <u>ten</u> são de ruptura do 1º arranjo	82
5.4	Características distância entre os eletrodos - <u>ten</u> são de ruptura do 2º arranjo	83
5.5	Características distância entre os eletrodos - <u>ten</u> são de ruptura do 3º arranjo	84

5.6	Características distância entre os eletrodos - tensão de ruptura do 4º arranjo	85
5.7	Comparação entre as características de ruptura do 3º e do 4º arranjos	86
5.8	Tensões de ruptura (medida experimentalmente) e de iniciação de corona (calculada computacionalmente); 4º arranjo; pol. positiva	87

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O comportamento de superfícies isolantes na presença de descargas elétricas tem sido objeto de muitas pesquisas. Os estudos realizados têm prestado uma enorme contribuição para o desenvolvimento de equipamentos como capacitores, resistores, suportes isoladores, etc.

MASON⁽¹⁾ apresentou uma classificação satisfatória de materiais isolantes com relação às suas resistências à deteriorização e ruptura por descargas superficiais no ar, com aplicação de testes do tipo tempo-para-ruptura, usando eletrodos haste e plano. Dentre os materiais isolantes pesquisados por MASON encontra-se o polivinilclorificado (p.v.c) rígido. Os resultados apresentados mostram que o p.v.c., a 20°C, tem aproximadamente a mesma resistência à descargas que, p. ex., o vidro-epoxy E5 laminado. No entanto, para campos acima de 60 kV/cm, podem ocorrer quase imediatamente

falhas na estrutura do p.v.c. quando submetido a descargas a uma temperatura ambiente de 90°C.

MANDELCORN, HOFF e SPRENGLING⁽²⁻³⁾ relataram o comportamento de materiais isolantes submetidos a descargas que provocam "tracking", carbonização ou erosão na superfície. A técnica experimental por eles adotada envolve a passagem de uma descarga elétrica através do eixo central de um isolante. Fizeram medições da resistência elétrica do isolante durante e depois da descarga, para diversas faixas de densidade de potência.

Pesquisas realizadas por ALSTON⁽⁵⁾ revelaram que a presença de um isolante sólido perfeitamente cilíndrico e limpo inserido em um gás (ar), tal que a superfície sólida seja perpendicular às superfícies equipotenciais em todos os pontos, não afeta a tensão de ruptura entre os eletrodos num campo uniforme. Entretanto, se a superfície apresenta imperfeições poderá ocorrer uma queda substancial na tensão de ruptura.

Inúmeras pesquisas já foram efetivadas nessa área. Mesmo assim, a ruptura entre eletrodos por descargas na superfície de materiais isolantes no ar ainda necessita de maiores esclarecimentos. A razão disso é que ainda existem alguns fatores, tais como geometria do eletrodo, condições ambientais, forma de isolantes, que exercem muita influên - cia na tensão de ruptura.

O objetivo deste trabalho é verificar, experimen - talmente, a influência exercida sobre a tensão de ruptura , por alguns fatores inseridos nos arranjos experimentais testados, como diâmetro e comprimento do sólido isolante (tubo de p.v.c.), geometria dos eletrodos e polaridade da tensão aplicada . A técnica utilizada nos testes consistiu na

aplicação de descargas de impulsos atmosféricos de polaridades positiva e negativa através da superfície do tubo de p.v.c. com a medição dos níveis de tensão disruptiva a 50 % no ar, na presença de campos não-uniformes. Foram utilizados vários tipos de eletrodos, bem como tubos de vários diâmetros e comprimentos. Uma configuração sem o tubo de p.v.c, isto, é, ao ar livre foi também testada a fim de comparar seus níveis de ruptura com os níveis apresentados com os tubos.

Os mecanismos de ruptura em gases e a ruptura em sólidos devido a descargas superficiais serão abordados no Capítulo II. O campo elétrico ao longo do tubo de p.v.c. e a tensão de iniciação de corona, são calculados no Capítulo III. No Capítulo IV são descritos as formas dos objetos de ensaio e dos eletrodos utilizados. Os resultados obtidos experimentalmente são relatados e discutidos no Capítulo V. Finalmente, no Capítulo VI, são expostas as conclusões deste trabalho.

CAPITULO II

FENÔMENO DE RUPTURA EM GASES E RUPTURA SUPERFICIAL EM SÓLIDOS

Este Capítulo se prende a tópicos que visam esclarecer os fenômenos de ruptura em gases de um modo geral e em sólidos submetidos a descargas elétricas. Para isso são explanados os princípios básicos que envolvem esses processos. É também mostrado um estudo sobre ruptura num afastamento esfera-plano submetido a tensões impulsivas em campos não-uniformes, cuja técnica e resultados em muito se assemelham aos deste trabalho.

2.1. - RUPTURA EM GASES

Um gás, tal como o ar, é normalmente um isolador quase perfeito, porém, alguns elétrons livres e íons sempre estão presentes em sua constituição devido a ionização pro

vocada pelas fontes naturais de radioatividade e radiação cósmica. Um campo elétrico de alta intensidade aplicado ao gás, provocará uma corrente que será grandemente aumentada através de processos de ionização no gás e na superfície do eletrodo negativo, conduzindo o gás à conseqüente ruptura. (4-10)

Para um melhor entendimento da ruptura elétrica dos gases, é interessante fazer uma descrição qualitativa das características de tensão e corrente para um espaçamento entre eletrodos planos. (4)

A Fig. 2.1 mostra a curva tensão x corrente que caracteriza o comportamento de uma descarga no meio gasoso entre dois eletrodos planos de 2cm de diâmetro com 50cm de separação a uma pressão de poucos mmHg. Ao aumentar lentamente a tensão entre os eletrodos, serão observados pulsos aleatórios de corrente com intensidades menores que 10^{-16} A. Entretanto, quando os elétrons livres provenientes da ionização externa estiverem, em grande quantidade, presentes no gás, será observado um estado sem a investida dos pulsos. Sob um nível de radiação constante, a corrente aumentará com a tensão até atingir uma condição estável chamada de corrente de saturação. Decorrido algum tempo sem se alterar com o aumento da tensão, a corrente volta a crescer exponencialmente e aí passa a ser chamada de descarga Townsend. Elevando ainda mais o nível da tensão, a corrente passa a independer da fonte de ionização externa e se torna autosustentada provocando com isso o colapso do meio. Essa transição abrupta é chamada de ruptura. Com o contínuo crescimento da corrente, a tensão através da descarga começará a decrecer até atingir um nível muito baixo caracterizando a região chamada de descarga ardente (glow discharge). Finalmente, quando é permitido a corrente crescer ainda mais, ocorre ou

tra transição, e uma nova forma de descarga, conhecida como *descarga em arco*, se desenvolve.

A rigidez dielétrica dos isolantes gasosos é função da pressão à qual o gás está submetido e da configuração geométrica dos eletrodos. Segundo a Lei de Paschen, a tensão de ruptura é função do produto $p.d$, onde p é a pressão do gás e d é a distância entre os eletrodos.⁽⁴⁻⁵⁾ Consequentemente, a rigidez dielétrica crescerá com a pressão aplicada ao gás. A ruptura do gás acontecerá devido aos efeitos da chamada avalanche de elétrons, e duas teorias são suficientes para explicar esse fenômeno: a Teoria de Townsend e a Teoria do Canal.

2.1.1. - Teoria de Townsend

Quando um elétron é emitido pelo catodo, ele é acelerado na direção do anodo pelo campo aplicado, ganhando energia. O elétron, tendo ganho energia suficiente, ao colidir com a molécula neutra do gás, ionizará essa molécula.

De essa maneira é formado um novo par de íons. De modo cumulativo, o número de elétrons e íons positivos cresce rapidamente para a formação da avalanche de elétrons, constituindo, assim, o *processo de ionização primária* do gás.

Os íons positivos são também acelerados pelo campo ganhando, no entanto, consideravelmente menos energia do que os elétrons e, por possuírem massas maiores, perdem muita energia em cada colisão. Por isso, é muito improvável que eles possam ionizar o gás. Entretanto, eles podem liberar elétrons pelo bombardeamento da superfície do catodo. Esse processo é chamado de *processo secundário*. A emissão fotoelétrica do catodo e a fotoionização no gás causada por fó

tons oriundos de átomos excitados ou de processos de recombinação, são outros processos secundários que existem nas descargas em gases.

2.1.1.1. - Critério de Townsend para Ruptura

A corrente em um campo uniforme cresce, devido a vários processos primários e secundários, de acordo com a equação (5-10)

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.1)$$

onde I_0 = corrente inicial devido unicamente a fontes de ionização externas.

α = coeficiente de ionização primária (número de colisões de ionização por elétron por unidade de comprimento do caminho na direção do campo).

γ = coeficiente de ionização secundária (número de elétrons secundários liberados do catodo por íon positivo incidente).

d = distância entre eletrodos.

A equação (2.1) pode determinar a tensão de ruptura entre os eletrodos em campo uniforme. A ruptura ocorrerá quando a corrente tender para infinito, ou seja, quando o denominador da equação (2.1) se tornar zero. Logo,

$$\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1) = 1$$

como normalmente $e^{\alpha d} \gg 1$, então

$$\gamma \cdot e^{\alpha d} = 1 \quad (2.2)$$

Este é o critério de ruptura de Townsend (Fig. 2.2).

2.1.1.2 - Interpretação Física do Critério de Townsend

A interpretação física do critério de Townsend é bastante simples. Por cada elétron emitido do catodo chegam ao anodo de $e^{\alpha d}$ elétrons e são gerados $e^{\alpha d} - 1$ íons positivos. Quando esses íons atingem o catodo, liberam $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ elétrons. Esses elétrons liberados pelos íons positivos são chamados elétrons secundários. A corrente através do gás se torna independente da corrente inicial, passando a ser uma descarga automantida.

O critério de Townsend não dá nenhuma informação sobre o crescimento temporal dos processos que conduzem um gás à ruptura. Entretanto, a teoria de Townsend deixa bem claro que são necessárias muitas gerações de avalanches de elétrons para que ocorra uma ruptura.

A Teoria de Townsend é considerada adequada para explicar a ruptura de um gás sob condições de campo uniforme e sujeito a um aumento lento de tensão contínua. Entretanto, esta teoria não é suficiente para explicar o mesmo fenômeno para campos não-uniformes em gases sujeitos a tensões impulsivas.

Como já foi visto, um tipo de ruptura segundo Townsend requer uma sequência completa de avalanches. Para um afastamento de 1cm entre os eletrodos no ar atmosférico, por

tanto, pode ser esperado um atraso de tempo formativo de vários microsegundos⁽¹⁰⁾. Entretanto, a ruptura pode se dar em menos de 0.1µs. Esse fato conduziu ao conceito do tipo de ruptura canal, que é a ruptura causada por uma única avalanche de elétrons.

2.1.2. - Teoria do Canal

A Teoria do Canal⁽⁴⁻¹⁰⁾ é fundamentada no efeito da carga espacial produzida por uma avalanche de elétrons (Fig. 2.3). De acordo com esta teoria, o campo de carga espacial de elétrons e íons na cabeça de uma avalanche pode causar uma instabilidade no desenvolvimento da avalanche. A carga espacial altamente localizada perto do anodo aumenta o campo e, se essa carga for muito grande, o aumento do campo produz avalanches auxiliares de elétrons provenientes da fotoionização do gás nas imediações da carga espacial. Essas avalanches auxiliares ocorrem primeiramente próximo ao anodo e tendem a aumentar a carga espacial e se estender em direção ao catodo (Fig. 2.4). O processo pode ser muito rápido, e o caminho desenvolvido pelo movimento da carga espacial positiva para o catodo formará um canal. A ruptura ocorrerá quando o canal atingir o catodo e aí produzirá muitos elétrons secundários.

2.1.2.1. - Critério do Canal para Ruptura

Ainda não foi formulado quantitativamente um critério satisfatório para a formação de canais. MEEK⁽⁴⁻¹⁰⁾ propôs que canais direto do catodo e do anodo se desenvolvem quando o campo radial de carga espacial da cabeça da avalanche primária torna-se da mesma ordem de magnitude do

campo externo aplicado. Dessa suposição surgiu a seguinte equação para a ruptura de um gás em campo não-uniforme: ⁽¹⁰⁾

$$\alpha_x \exp\left\{\int_0^x \alpha dx\right\} = KE_x \left[\frac{x}{\rho}\right]^{1/2} \quad (2.3)$$

onde x = comprimento crítico da avalanche (comprimento da avalanche no momento em que ela se torna instável e são formados os Canais).

α_x = coeficiente de ionização primária de Townsend na cabeça da avalanche.

ρ = densidade do gás

K = constante ($\approx 0,1$)

É importante observar que em campos não-uniformes o comprimento crítico da avalanche (x) pode ser menor que a distância entre os eletrodos.

Na equação de Meek predomina o termo exponencial. Uma análise mais detalhada mostrará que o expoente poderia ser quase constante e independente da geometria dos eletrodos. Consequentemente, é obtido o critério de Meek para a ruptura como sendo (Fig. 2.3):

$$\int_0^x \alpha dx = k \quad (2.4)$$

onde a constante k tem um valor em torno de 20 para o ar à pressão atmosférica.

A Teoria do Canal é considerada aplicável para espaçamentos grandes entre eletrodos e sob a ação de campos não-uniformes, e para gases onde a fotoionização é um mecanismo predominante.

2.1.3. - Características de ruptura no ar para uma configuração esfera-plano em campos não uniformes

Muitos estudos já foram efetivados a cerca da ruptura entre uma esfera e um plano aterrado (sphere-plane gaps). Essa configuração de eletrodos raramente é encontrada em sistemas práticos, porém, é de muita utilidade nos estudos básicos de descargas por centelhas (spark discharges) tendo em vista a facilidade da computação da distribuição do campo entre os eletrodos.⁽⁶⁾

KUFFEL e ABDULLAH⁽⁷⁾, em estudos recentes, observaram as características de ruptura entre eletrodos esfera-plano, aplicando tensões de impulso convencionais de ambas as polaridades. A Fig. 2.6 mostra o registro dessas observações. Segundo estes pesquisadores, para tensões de polaridade positiva (esfera de alta tensão positiva), a ruptura se desenvolve por meio de uma descarga líder (centelha) positiva que inicia no anodo e se desloca para o catodo. Para se propagar, a descarga líder precisa de um gradiente de tensão relativamente baixo e, conseqüentemente, os valores de ruptura observados são baixos. Sob tensões de polaridade negativa (esfera de alta tensão negativa), a ruptura se desenvolve por um líder negativo que cresce em degraus. A parte descontínua, na Fig. 2.6, corresponde a uma mistura de descargas líderes positivas e negativas. Nessa região os valores de ruptura são muito dispersos.

Outros mecanismos foram propostos para a ruptura do gás entre eletrodos esfera-plano sob a ação de tensões de polaridade negativa. ALIBONE e MEEK⁽⁸⁾ registraram um líder negativo do catodo que não atravessa inteiramente o espaço entre os eletrodos. Nesse meio tempo um guia positivo inicia no anodo e se encontra com o guia negativo na metade

do espaçamento. Outros observadores registraram a complementação da ruptura pelo crescimento de um líder positivo iniciando no plano (ou placa) e atravessando inteiramente o espaçamento entre os eletrodos.

2.2. - RUPTURA SUPERFICIAL EM SÓLIDOS

2.2.1. - Considerações Gerais

Existem dois tipos de ruptura que podem ocorrer na superfície de materiais isolantes. O primeiro tipo é caracterizado pela formação de um caminho condutivo na superfície do isolante, isto é, pela degradação do material sólido devido, por exemplo, a descargas. Este tipo de ruptura é comumente chamado de "*tracking*". O outro tipo de ruptura superficial consiste na ruptura do meio em que o sólido é colocado, e é usualmente chamado de centelhamento.⁽⁵⁾ Esta forma de ruptura é a que interessa explicar, tendo em vista que não houve ocorrência de "*tracking*", nos experimentos e sim centelhamentos superficiais no ar. Antes, porém, para que se tenha uma perfeita compreensão do que seja o centelhamento, é necessário relembrar dois conceitos muito importantes na tecnologia de alta tensão: intensidade do campo elétrico e rigidez dielétrica.

2.2.1.1. - Intensidade do Campo Elétrico

Define-se intensidade do campo elétrico a que uma isolação é submetida, como⁽⁵⁾ "a força, E , sobre uma unidade de carga localizada na isolação". Esta definição se justifica plenamente pelo fato de que partículas carregadas, sob a ação dessa força, podem adquirir energia cinética suficiente para romper a isolação e ocasionar sua condução. A

ddp entre dois pontos se iguala ao trabalho realizado por E para deslocar a unidade de carga entre eles, ou seja,

$$V = - \int E dx$$

por conseguinte

$$E = - \frac{dv}{dx}$$

de onde se conclui que o esforço elétrico é numericamente igual ao gradiente de tensão.

2.2.1.2. - Rigidez Dielétrica

A rigidez dielétrica de uma isolação, por definição, é (5) "o máximo esforço que o material isolante pode suportar sem se danificar". Esta é uma definição qualitativa. Quantitativamente, é muito difícil definir a rigidez dielétrica, devido a vários fatores que a afetam, como pressão, temperatura, material do eletrodo, configuração do campo, forma de onda da tensão, presença de impurezas e imperfeições no dielétrico e o tempo de vida útil que o isolante deve ter.

2.2.2. - Ruptura do meio próximo a superfície de um isolante sólido e cilíndrico

Se um isolante sólido é inserido em um gás (p.ex., o ar) de tal forma que a sua superfície é perpendicular às superfícies equipotenciais em todos os pontos, então o gradiente de tensão não é afetado pelo isolante. Considerando, por exemplo, um isolador cilíndrico num campo uniforme [Fig. 2.7 (a)], a tensão de ruptura não é afetada pela presença do iso

lador se a sua superfície é bastante limpa e sem imperfeições. Porém, se estas condições não forem satisfeitas, a tensão de ruptura poderá sofrer uma queda substancial⁽⁵⁾. Isto está melhor explicado no próximo item.

2.2.2.1. - Influência da imperfeição da forma do isolante sólido na tensão de ruptura

Sempre que se utiliza um isolante sólido cilíndrico cujas extremidades não são perfeitamente perpendiculares ao eixo, como mostra a Fig. 2.7 (b), ocorre a intensificação do campo elétrico. A intensidade do campo próximo ao eletrodo pode atingir k vezes a intensidade média⁽⁵⁾ (onde k é a constante dielétrica do cilindro isolante). Podem, então, ocorrer descargas para uma tensão aproximadamente $1/k$ vezes a tensão de ruptura na ausência do cilindro, e essas descargas podem precipitar a ruptura. Surge então a necessidade de se controlar o campo elétrico próximo ao eletrodo. A Fig. 2.7 (c) mostra um método capaz de reduzir esse esforço. Com essa técnica a tensão de ruptura pode ser mantida em torno de 30% do valor obtido na ausência do cilindro.⁽⁵⁾

2.2.2.2. - Efeito da Umidade na Tensão de Ruptura

A umidade do meio ambiente pode influenciar muito no comportamento da ruptura de um gás. MAXSTADT⁽⁵⁾ mostrou o efeito da umidade para cilindros isolantes perfeitos (Fig. 2.8). Segundo ele, se a umidade é suficientemente alta, a tensão de ruptura cai devido à formação de caminhos condutivos na superfície do cilindro. O valor da umidade relativa para o qual a tensão se extingue depende da superfície do cilindro isolante.

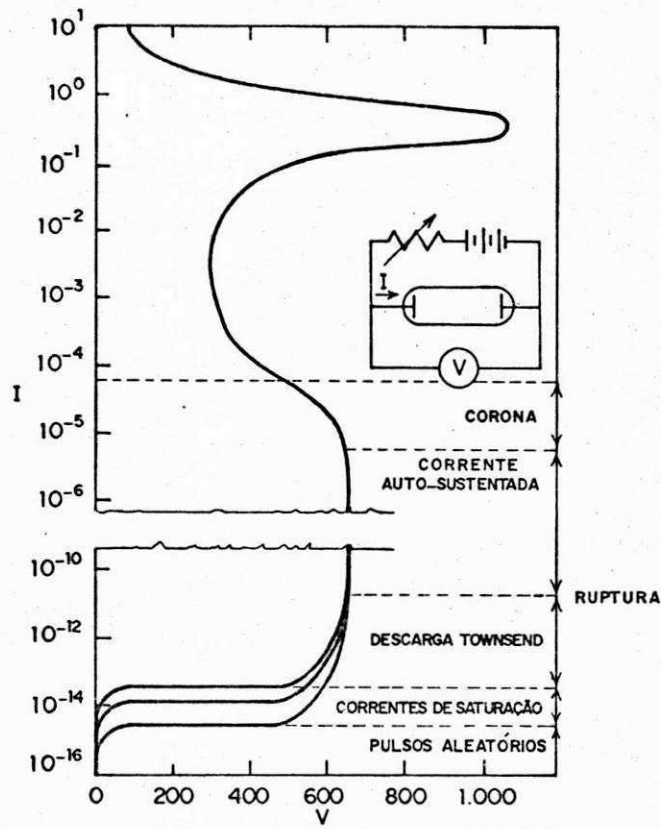


Fig. 2.1 - Relação tensão - corrente de uma descarga em um gás.

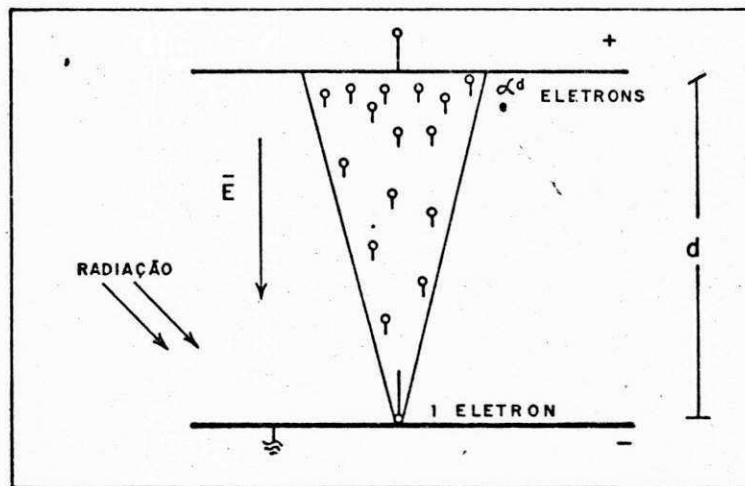


Fig. 2.2 - Ruptura em campos uniformes - Critério de Townsend.

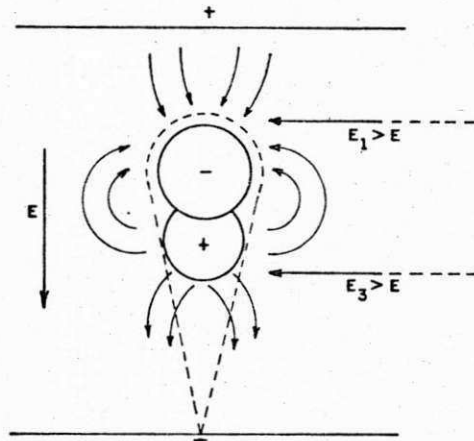


Fig. 2.3 - Efeito da carga espacial produzido por uma avalanche no campo elétrico aplicado.

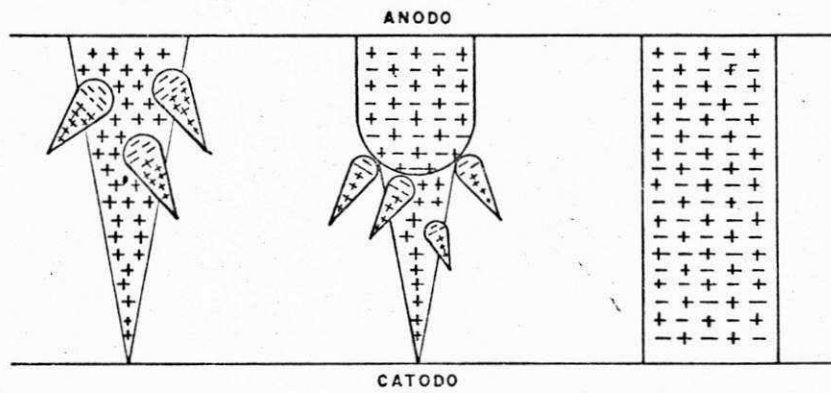


Fig. 2.4 - Canal dirigido ao catodo.

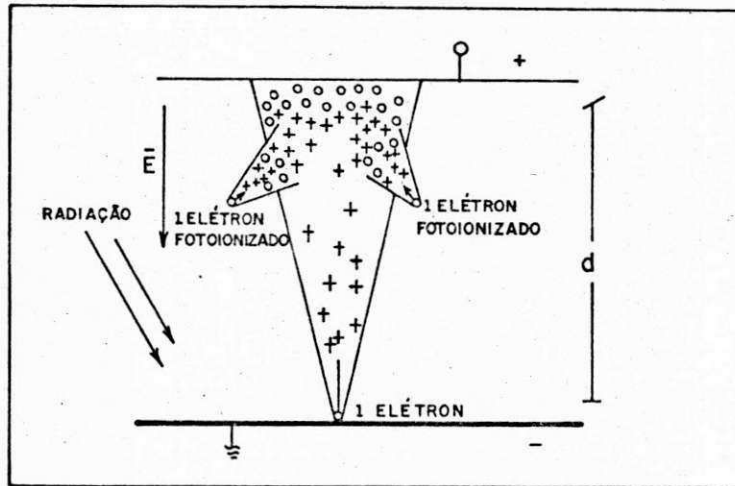


Fig. 2.5 - Ruptura em campos não-uniformes - Critério do Canal.

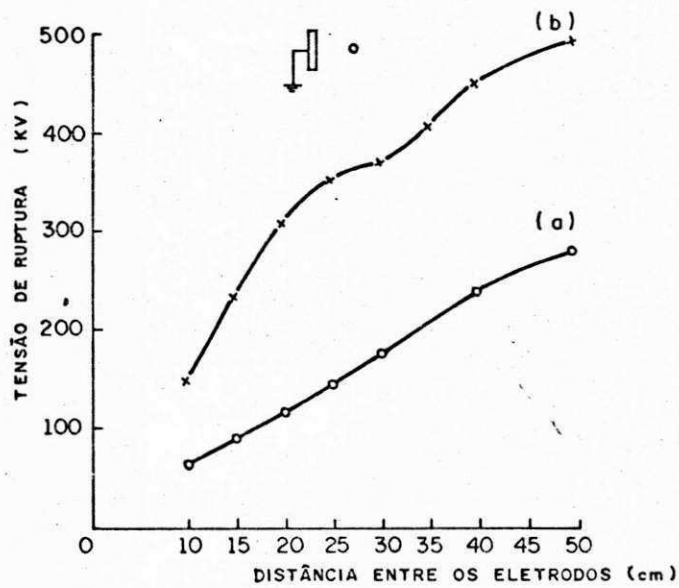


Fig. 2.6 - Características distância entre os eletrodos - tensão de ruptura para a configuração esfera - plano; (a) esfera positiva; (b) esfera negativa.

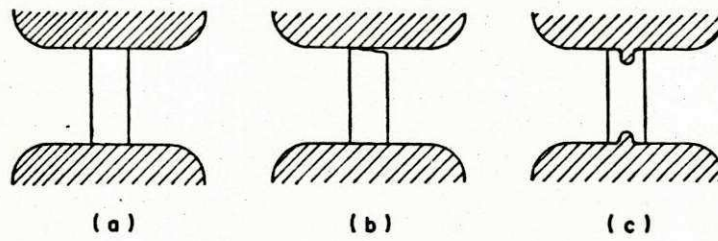


Fig. 2.7 - Arranjo para ilustrar a discussão sobre centelhamento na superfície de um isolante cilíndrico.

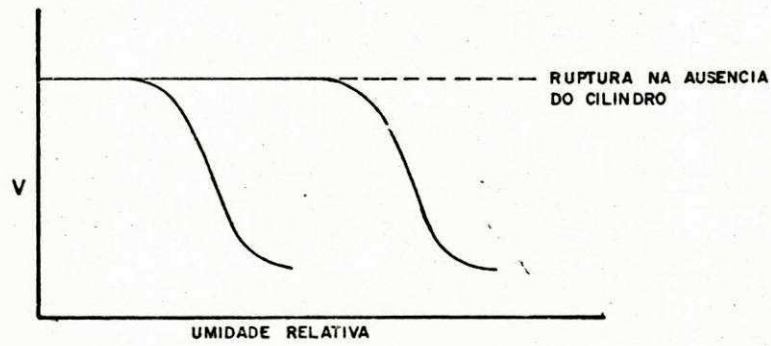


Fig. 2.8 - Características de centelhamento superficial para dois cilindros de materiais diferentes.

CAPÍTULO III

CÁLCULO DA TENSÃO DE INICIAÇÃO DE CORONA EM CAMPOS NÃO-UNIFORMES DE DISTRIBUIÇÃO CONHECIDA

A importância de uma descrição bem detalhada e precisa das características de ruptura para diversas geometrias de eletrodos, tem levado pesquisadores a desenvolver estudos relacionados aos processos que envolvem as tensões de ruptura e de iniciação de corona. O estudo comparativo entre essas tensões tem servido de suporte para a tecnologia de equipamentos de alta-tensão. Já existe uma grande quantidade de fórmulas empíricas disponíveis em matérias específicas desta área. Entretanto, essas fórmulas são oriundas de teorias físicas que estabelecem critérios quantitativos de valor limitado para a engenharia de alta-tensão. Em muitos casos a falta de dados fundamentais torna a aplicação des

ses critérios difícil ou impossível, e os resultados não são melhores do que os obtidos de métodos práticos. Entretanto, estudiosos têm mostrado que é possível estabelecer um critério, baseado nessas teorias, através do qual as tensões de ruptura e de iniciação de corona são calculadas com precisão satisfatória para qualquer gás sujeito a campos não-uniformes de distribuição conhecida.

3.1. - CÁLCULO DA TENSÃO DE INICIAÇÃO DE CORONA EM CAMPOS NÃO-UNIFORMES

Como já foi explanado no Capítulo 2, o critério de Townsend é insuficiente para explicar a ruptura de um gás em campo não-uniforme. Surge então o critério do Canal (Eq. 2.4), proposto por Meek, que é considerado aplicável a espaçamentos grandes entre eletrodos sob a ação de campos não-uniformes. A suposição de Meek (ver Eq. 2.3), entretanto, apresenta deficiências causadas pelas dificuldades envolvidas na formulação quantitativa do conceito de Canal. PEDERSEN⁽¹⁰⁾ modificou a Eq. 2.3, sugerindo que a formação de Canais no ar seria da seguinte forma:

$$\alpha_x \exp\left\{\int_0^x \alpha dx\right\} = G(x, \rho) \quad (3.1)$$

onde x e ρ são variáveis dominantes entre outras. No ar, a pressão atmosférica, esta equação pode ser escrita como:

$$\ln(\alpha_x) + \int_0^x \alpha dx = g(x) \quad (3.2)$$

onde α_x é o valor numérico de α na cabeça da avalanche.

Aplicando a Eq. 3.2 para um campo uniforme, então x , é igual

a distância entre os eletrodos e α é constante. Logo, a equação se torna

$$\ln(\alpha) + \alpha \cdot x = g(x) \quad (3.3)$$

Calculando $g(x)$ dessa maneira, está se negligenciando o efeito das cargas espaciais na cabeça da avalanche, isto é, a distorção do campo elétrico.

Para calcular a tensão de iniciação de corona, em campos não-uniformes, a partir da resolução da Eq. 3.2, sem considerar o efeito das cargas espaciais, tomam-se os valores numéricos de $g(x)$ calculados para campos uniformes e aplicam-se esses valores a campos não-uniformes. O erro imposto pela negligência do efeito das cargas espaciais é muito reduzido.

No cálculo da tensão de iniciação de corona baseado no critério do canal, é necessário computar o crescimento de uma única avalanche crítica de elétrons.⁽⁹⁾ O tamanho de uma avalanche de elétrons é dado pelo número de elétrons existente na sua cabeça. Segundo RAETHER⁽⁹⁾, uma avalanche crítica contém em torno de 10^8 elétrons na cabeça antes da transição para canais. Para gases submetidos a tensões impulsivas de ambas as polaridades, o número de elétrons na cabeça de uma avalanche, para canais dirigidos ao catodo (Ver fig. 2.4), é expresso matematicamente por⁽¹⁰⁻¹¹⁾

$$N_{e_x} = \exp\left\{\int_0^x (\alpha - \eta) \cdot dx\right\} \quad (3.4)$$

onde α e η são coeficientes de ionização e coesão, respectivamente, e são funções do campo elétrico e da pressão do gás. Para o ar esta equação torna-se

$$N_{e_x} = \exp\left(\int_0^x \alpha dx\right) \quad (3.5)$$

No caso de canais dirigidos ao anodo (Fig. 3.1), tem-se:

$$N_{e_x} = \exp\left(\int_{x-d}^d \alpha dx\right) \quad (3.6)$$

O procedimento para calcular a tensão de iniciação de corona, a partir da Eq. 3.5, é o seguinte:

- 1 - Calcular α para vários valores de x . Isto por que α varia muito rapidamente com a intensidade do campo, como é visto na Fig. (3.2).
- 2 - Para cada valor de α calculado, resolver a integral $I = \int_0^x \alpha dx$
- 3 - Se $\exp(I) = 10^8$, então a tensão para esse valor é a *tensão de iniciação de corona*. Caso não seja satisfeita a igualdade, aumentar a tensão recalcular o campo elétrico e repetir o procedimento.

3.2. - CÁLCULO DE CAMPOS ELÉTRICOS DE ALTA-TENSÃO APLICANDO O MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE CARGA

3.2.1. - O Método de Simulação de Carga (MSC)

No cálculo de campos elétricos em um sistema físico, deve-se ter a solução das equações de POISSON e LAPLACE bem como as condições de contorno do sistema satisfeitas. Isto pode ser feito através de dois métodos: analítico ou numérico. A solução analítica tem melhor aplicabilidade em sistemas bem simples. Porém, na prática, os sistemas são tão complexos que soluções analíticas são difíceis ou impossíveis e por esse motivo os métodos numéricos são comumente usados para aplicações em engenharia.

Os métodos numéricos se apresentam normalmente baseados nos conceitos de diferenciação e integração. A equação de Laplace foi solucionada aplicando-se a técnica das diferenças finitas. Outra solução aproximada consiste no uso das equações de Poisson e Laplace nas suas formas integrais e empregando cargas discretas ou dividindo a região onde se quer calcular o campo em subsecções de cargas.

O MSC⁽¹²⁾ é baseado no conceito de cargas discretas e se mostra muito útil no cálculo de problemas envolvendo sistemas bi e tridimensionais onde o espaço é ilimitado e a geometria dos condutores é relativamente simples. Este método especialmente se destaca pelo seu cálculo de alta-velocidade e alta-precisão como também é capaz de calcular o campo em sistemas que apresentam mais de um dielétrico.

Devido a sua natureza discretizada, o MSC requer a seleção e colocação de um grande número de cargas para atingir uma precisão satisfatória. Para isso o uso da computação digital é indispensável. É importante observar que a posição exata dessas cargas não vai interferir na solução final, porém, é a principal responsável pelo tempo gasto na computação bem como pela precisão dos resultados obtidos.

3.2.2. - Princípio Básico do MSC

No MSC as cargas fictícias são posicionadas fora do espaço onde o campo elétrico deve ser calculado. Assim, essas cargas são distribuídas internamente ao sistema, pois, é na região externa que se deseja analisar o comportamento do campo. Usualmente as cargas fictícias se apresentam como cargas pontuais, linhas de carga ou anéis de carga. As cargas pontuais são usadas na simulação de superfícies ter

minadas esfericamente. As *linhas de carga* são empregadas em configurações cilíndricas. Os *anéis de carga* são aplicados geralmente para simular perfis que apresentam simetria axial. Se um sistema físico apresentar uma forma diversificada, pode ser possível simulá-lo com o emprego conjunto desses três tipos de cargas. Os potenciais das cargas fictícias são tomados como soluções particulares das equações de Poisson e Laplace. As intensidades dessas cargas tem de ser calculadas de modo que seus efeitos integrados satisfaçam as condições de contorno exatamente para um número selecionado de pontos sobre o contorno. Como os potenciais devido a essas cargas satisfazem as equações de Poisson e Laplace, dentro do espaço considerado, a solução é única dentro desse espaço.

Para calcular o campo elétrico, substitui-se, a carga distribuída na superfície dos condutores por n cargas fictícias arranjadas na parte interna dos mesmos. Para determinar as intensidades dessas cargas são escolhidos, também, n pontos sobre a superfície dos condutores (pontos de contorno), de forma que o potencial resultante da superposição das cargas em cada um desse pontos, seja igual ao potencial do condutor, isto é,

$$\sum_{j=1}^n p_j \cdot Q_j = \phi_c \quad (3.7)$$

onde: Q_j = carga fictícia discreta

p_j = coeficiente do potencial associado à carga

ϕ_c = potencial do condutor

Aplicando essa equação para os n pontos de contorno, se obtém um sistema de n equações lineares para as n cargas.

Assim, resolvendo o sistema para as cargas Q_j , tem-se, usando a forma matricial:

$$[p] \cdot [Q] = [\phi c] \quad (3.8)$$

de onde se obtêm

$$[Q] = [p]^{-1} \cdot [\phi c] \quad (3.9)$$

O próximo passo, depois de determinados os módulos das n cargas, consiste em verificar se o conjunto de cargas calculado satisfaz as condições de contorno. Para isso pode-se calcular o potencial em um número de *pontos de checagem* localizados sobre o contorno. A diferença entre esses potenciais e o potencial do contorno dado, é uma medida da precisão da simulação. Se a precisão for suficientemente satisfatória, os campos elétricos em qualquer ponto dentro do espaço considerado podem ser calculados analiticamente por superposição. Muitas vezes surge a necessidade de calcular o campo elétrico em sistemas constituídos de condutores e um plano infinito aterrado. Para esse fim existe o *método das imagens* que pode ser usado juntamente com o método de simulação de carga.

3.2.3. - Aplicação do MSC a sistemas com dois dielétricos

Já é sabido da teoria de campos eletrostáticos que em um dielétrico os dipolos são realinhados pelo campo elétrico. No interior os dipolos se compensam entre si, mas, na superfície do dielétrico eles têm o efeito de uma rede superficial de carga, o que torna possível o uso do método de si

mulação.⁽¹²⁾

Na simulação de um sistema com dois dielétricos existem duas diferenças importantes em relação a outros sistemas:

- (a) Geralmente o contorno do dielétrico não corresponde a uma superfície equipotencial;
- (b) Pode-se calcular o campo elétrico em ambos os lados do dielétrico; isto é necessário para formar o sistema de equações.

3.2.3.1. - Procedimento

O procedimento na aplicação do MSC a sistemas com dois dielétricos é ilustrado pela Fig. 3.3, onde um pequeno número de cargas é usado. Como mostra a figura, no eletrodo existem n_e cargas com igual número de pontos de contorno, dos quais n_{ed} estão localizados ao lado do dielétrico (ponto 1) e $n_e - n_{ed}$ estão do lado do ar (pontos 2 e 3). As cargas no eletrodo são válidas para o cálculo do potencial e do campo elétrico tanto para o dielétrico como para o ar, que também é um dielétrico. Na superfície do dielétrico n_b pontos de contorno são colocados (pontos 4 e 5) com n_b cargas no ar (cargas 4 e 5) - válidas para o dielétrico - e n_b cargas no dielétrico (cargas 6 e 7) - válidas para o ar. Existe um total de $n_q = n_e + 2n_b$ cargas e $n_c = n_e + n_b$ pontos de contorno.

As condições de contorno a serem satisfeitas são as seguintes:

- 1^a) O potencial dos pontos de contorno sobre a superfície do eletrodo, tanto nos do lado do dielétrico como nos do lado do ar, deve ser o mesmo.

Se ϕ_c é o potencial do condutor, usando a Eq. 3.7 chega-se às seguintes equações:

Do lado do dielétrico

$$\sum_{j=1}^{n_e} Q_j \cdot p_j + \sum_{j=n_e+1}^{n_e + n_b} Q_j \cdot p_j = \phi_c \quad (3.10)$$

(devido às cargas no condutor)

(devido às cargas no ar)

Do do lado ar

$$\sum_{j=1}^{n_e} Q_j \cdot p_j + \sum_{j=n_e+n_b+1}^{n_e + 2n_b} Q_j \cdot p_j = \phi_c \quad (3.11)$$

(devido às cargas no condutor)

(devido às cargas no dielétrico)

2^a) É desconhecido o valor do potencial nos pontos de contorno sobre a superfície do dielétrico, mas, para cada ponto ele deve ser o mesmo no ar (ϕ_A) e no dielétrico (ϕ_D).

Assim, na fronteira ar-dielétrico $\phi_A = \phi_D$, ou seja:

$$\sum_{j=n_e+n_b+1}^{n_e+2n_b} Q_j \cdot p_j - \sum_{j=n_e+1}^{n_e+n_b} Q_j \cdot p_j = 0 \quad (3.12)$$

(devido às cargas no dielétrico)

(devido às cargas no ar)

3^a) Nos pontos de contorno sobre a superfície do dielétrico, a intensidade do campo elétrico no ar

deve ser ϵ_r vezes maior do que no dielétrico.

Então,

$$(\epsilon_r - 1) \cdot \sum_{j=1}^{n_e} Q_j \cdot f_j + \epsilon_r \cdot \sum_{j=n_e+1}^{n_e+n_b} Q_j \cdot f_j - \sum_{j=n_e+n_b+1}^{n_e+2n_b} Q_j \cdot f_j = 0 \quad (3.13)$$

(devido às cargas no condutor) (devido às cargas no ar) (devido às cargas no dielétrico)

onde f_j é definido como ⁽¹²⁾ a contribuição da carga Q_j a cada componente do vetor campo normal à superfície do dielétrico num ponto de contorno dado.

Obedecendo as condições de contorno acima citadas, são formadas as n_q equações lineares necessárias para o cálculo das n_q cargas desconhecidas.

3.2.3.2. - Critérios para a disposição de cargas e pontos de contorno

É muito importante em sistemas com dois dielétricos a questão de um arranjo adequado das cargas e dos pontos de contorno, na simulação. Um critério prático é obtido a partir da definição do seguinte fator de atribuição, ⁽¹²⁾ Fig. 3.4(a):

$$f_a = \frac{a_2}{a_1} \quad (3.14)$$

sendo,

a_1 - distância entre dois pontos de contorno sucessivos;

a_2 = distância entre um ponto de contorno e a carga correspondente,

A precisão do cálculo vai depender da escolha desse fator, bem como da densidade de pontos de contorno (a precisão pode ser melhorada aumentando-se o número de pontos). Na prática, f_a deve ter o seu valor entre 1 e 2.

Em contornos curvados os espaçamentos entre as cargas não devem ser muito pequenos. Para estas cargas existe um critério de curvatura (Raio δ). Com base na média geométrica de a_1 e a_2 , deduziu-se⁽¹²⁾, com a notação da Fig. 3.4(b),

$$\frac{\delta_1}{\delta_0} = r \cdot \left[\sqrt{1 + \left(f_a \cdot \frac{a_1}{r} \right)^2} + f_a \cdot \frac{a_1}{r} \right] \quad (3.15)$$

sendo δ_1 e δ_0 válidos para curvaturas convexas e côncavas, respectivamente. Esses raios devem ser usados de acordo, na simulação de contornos dielétricos.

3.2.3.3. - Exemplos de Aplicação

A Fig. 3.5 mostra um sistema constituído de um cilindro dielétrico (linhas tracejadas) inserido em um arranjo de eletrodo usado na proteção de aparelhos de alta-tensão. Para simular esse sistema utilizou-se anéis de carga. O potencial dos anéis espaçados foram fixados em 75, 50 e 25% do potencial do eletrodo superior (1 MV). As magnitudes da intensidade de campo elétrico são representadas pelos comprimentos das setas. O semi-círculo tracejado representa a intensidade de campo de 5kV/cm. O campo máximo no eletrodo de topo atingiu o valor de 5,6kV/cm. A Fig. 3,6 mostra a intensidade do campo tangencial na superfície do cilindro.

dielétrico. (12-13)

A Fig. 3.7(a) ilustra outro exemplo de simulação. A figura mostra um sistema envolvendo um eletrodo esférico e uma chapa dielétrica. Os resultados do cálculo estão apresentados na Fig. 3.7(b).

É importante mencionar que o método de simulação aplicado aos sistemas com dois dielétricos foi utilizado no cálculo de campo em eletrodos de proteção de transformadores de teste de UHV. O método também conduziu à descoberta de um novo efeito na teoria do campo eletrostático a respeito de eletrodos parcialmente inseridos em um dielétrico. (12)

De um modo geral, o MSC tem comprovado sua eficiência quando aplicado na solução de problemas que envolvem o cálculo do campo elétrico em sistemas bidimensionais, por ser um método simples e também por fornecer resultados bastante precisos com um tempo de computação reduzido em relação a outros métodos. O limite prático para a precisão da simulação dos eletrodos é dado pela tolerância de fabricação dos condutores. Do mesmo modo, a precisão da simulação dos dielétricos tem o seu limite prático na precisão da determinação das constantes dielétricas.

3.3. - SIMULAÇÕES E CÁLCULOS EFETUADOS NESTE TRABALHO

Neste item são expostos, primeiramente, todos os passos que levam ao conhecimento da distribuição do campo elétrico para configurações testadas neste trabalho. Depois de computado o campo elétrico, é efetuado o cálculo da tensão de iniciação de corona.

3.3.1. - Cálculo do Campo Elétrico

O campo elétrico é calculado para dois arranjos

experimentais simulados. O primeiro arranjo simulado constitui um sistema com dois dielétricos (tubo de p.v.c. e ar) e é tratado, neste trabalho, como *arranjo com tubo*. No outro não aparece o tubo de p.v.c. e recebe a denominação de *arranjo sem tubo*. O mesmo eletrodo é utilizado nos dois casos. O método de simulação de cargas (ver secção 3.2), é aplicado na computação dos campos elétricos. Maiores detalhes sobre os arranjos são dados no Capítulo 4.

3.3.1.1. - Aproximação da forma do eletrodo

O eletrodo utilizado nos dois arranjos apresenta uma forma irregular que dificulta a simulação. O mesmo é constituído de uma panela de alumínio sobreposta a um disco de ferro [Fig.3.8(a)]. Para suprir a dificuldade de simulação, aproximou-se a forma do eletrodo "panela-disco" para a forma do disco com as dimensões do primeiro [Fig.3.9(a)].

3.3.1.2. - Simulação do "Arranjo com Tubo"

3.3.1.2(a) - Definição dos parâmetros

De acordo com a notação da Fig. 3.10, são definidos os seguintes parâmetros:

H = altura (distância do plano até a metade da espessura do eletrodo).

DG = espessura do eletrodo.

B = distância do eixo de simetria até o início da parte curvada do eletrodo.

DR = raio da parte curvada do eletrodo.

B2 = distância da origem (ponto O) de DR até o início da parte curvada do eletrodo.

DE = Diâmetro externo (distância do eixo de simetria até a superfície externa do tubo).

DI = diâmetro interno (distância do eixo de simetria até a superfície interna do tubo).

3.3.1.2(b) - Posicionamento das cargas e pontos de contorno

Em se tratando de um sistema bidimensional com simetria axial, é conveniente usar o sistema de coordenadas cilíndricas. Desta forma, as posições de cargas e pontos de contorno são facilmente encontradas através das coordenadas (r, z) . Como já foi visto na secção 3.2.2, as cargas fictícias devem ser colocadas fora do espaço onde se deseja calcular o campo elétrico (neste caso, a superfície externa do tubo). Assim, tem-se (Fig.3.12):

No eletrodo

1. Parte plana superior

(a) Pontos de contorno

$$r_c = B \cdot \frac{i}{N1}, \quad i = 1, \dots, N1$$

$$z_c = H + DG/2$$

(b) Cargas fictícias

$$r_f = r_c$$

$$z_f = H + DP/2, \quad DP = 0,7DG$$

2. Parte curvada

$$\theta = \frac{\text{Arc cos } (B2/DR)}{N1} \cdot (1+N1-2.i) \quad , \quad i=1,\dots,N1.$$

(a) Pontos de contorno

$$r_c = DR \cdot \cos\theta - (B2-B)$$

$$z_c = H + DR \cdot \text{sen}\theta$$

(b) Cargas fictícias

$$r_f = DP2 \cdot \cos\theta - (B2-B) \quad , \quad DP2=0.7DR$$

$$z_f = H + DP2 \cdot \text{sen}\theta$$

3. Parte plana inferior

(a) Pontos de contorno

$$r_c = B \cdot \frac{i}{N1} \quad , \quad i=1,\dots,N1$$

$$z_c = H - DG/2$$

(b) Cargas fictícias

$$r_f = r_c$$

$$z_f = H - DP/2$$

No dielétrico

1. Superfície interna

(a) Pontos de contorno

$$r_c = DI$$

$$z_c = (H - DG/2) \cdot \frac{i}{N5+1}, \quad i=1, \dots, N5$$

(b) Cargas fictícias no ar

$$r_{f_a} = DI - a_2$$

$$z_{f_a} = (H - DG/2) \cdot \frac{i}{N5+1}$$

(c) Cargas fictícias no dielétrico

$$r_{f_d} = DI + a_2$$

$$z_{f_d} = z_{f_a}$$

2. Superfície externa

(a) Pontos de contorno

$$r_c = DE$$

$$z_c = (H - DG/2) \cdot \frac{i}{N5+1}, \quad i=1, \dots, N5$$

(b) Cargas fictícias no ar

$$r_{f_a} = DE + a_2$$

$$z_{f_a} = (H - DG/2) \cdot \frac{i}{N5+1}$$

(c) Cargas fictícias no dielétrico

$$r_{f_d} = DE - a_2$$

$$z_{f_d} = z_{f_a}$$

3.3.1.2(c) - Disposição das cargas e pontos de contorno

As cargas fictícias e os pontos de contorno são distribuídos ordenadamente no eletrodo e nos dielétricos (tu

bo e ar) de acordo com as suas coordenadas. O tipo de carga fictícia empregado na simulação, tanto do eletrodo como do dielétrico, é o *anel de carga*. Este tipo de carga é o que melhor se adapta ao perfil simulado.

Para simular o arranjo com o tubo, foram utilizadas 105 cargas (anéis de carga) e 75 pontos de contorno, com a seguinte distribuição (Ver Fig. 3.12):

	Cargas	Pontos de contorno
Eletrodo	45	45
Dielétrico (tubo)	30	30
Ar	<u>30</u>	<u>nenhum</u>
total	105	75

Disposição no eletrodo

	Cargas	Pontos de contorno
Parte plana superior	15	15
Parte curvada	15	15
Parte plana inferior	<u>15</u>	<u>15</u>
total	45	45

A parte plana inferior do eletrodo é sub-dividida, pelo dielétrico, em três regiões. A disposição de cargas e pontos de contorno por região, de acordo com a Fig. 3.12, é:

	Cargas	Pontos de Contorno
Reg. correspondente à parte externa do dielétrico	6	6
Reg. correspondente ao dielétrico	3	3
Reg. correspondente à parte interna do dielétrico	<u>6</u>	<u>6</u>
total	15	15

Disposição no dielétrico

	Cargas (próximo da superfície)	Pontos de Contorno (na superfície)
Superfície externa	15	15
Superfície interna	<u>15</u>	<u>15</u>
total	30	30

Disposição no ar

Cargas próximo à superfí- cie externa	15
Cargas próximo à superfí- cie interna	<u>15</u>
total	30

Obs.: Os pontos de contorno no dielétrico são comuns ao ar e ao dielétrico, isto é, eles são posicionados nas fronteiras ar-dielétrico (Fig. 3.12).

3.3.1.2(d) - Cálculo das intensidades das cargas fictícias

As intensidades das cargas fictícias são calculadas pelo sistema de equações,

$$[A] \cdot [Q] = [\emptyset] \quad (3.16)$$

onde $[A]$ é a matriz formada pelos coeficientes de potencial (p_j) e de campo (f_j), que são dados pelas equações⁽¹²⁾:

$$p_j = \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \frac{K(k_1)}{\alpha_1} - \frac{K(k_2)}{\alpha_2} \right\} \quad (3.17)$$

$$f_j = \frac{1}{\pi r} \cdot \left\{ \frac{[r_j^2 - r^2 + (z - z_j)^2] \cdot E(k_1) - \beta_1^2 \cdot K(k_1)}{\alpha_1 \cdot \beta_1^2} - \frac{[r_j^2 - r^2 + (z + z_j)^2] \cdot E(k_2) - \beta_2^2 \cdot K(k_2)}{\alpha_2 \cdot \beta_2^2} \right\} \quad (3.18)$$

sendo

$$\alpha_1 = \sqrt{(r+r_j)^2 + (z-z_j)^2}, \quad \alpha_2 = \sqrt{(r+r_j)^2 + (z+z_j)^2}$$

$$\beta_1 = \sqrt{(r-r_j)^2 + (z-z_j)^2}, \quad \beta_2 = \sqrt{(r-r_j)^2 + (z+z_j)^2}$$

$$k_1 = \frac{2\sqrt{r_j \cdot r}}{\alpha_1}, \quad k_2 = \frac{2\sqrt{r_j \cdot r}}{\alpha_2}.$$

$K(k)$ e $E(k)$ são, respectivamente, integrais completas de primeira e segunda espécie. Os índices i e j referem-se a cargas e pontos de contorno, respectivamente.

As condições de contorno exigidas para formar o sistema de equações dado por (3.16), são as apresentadas na seção 3.2.3.1, e mais, considerou-se como unitário o potencial no eletrodo (ϕ_c). Para cada ponto de contorno tem-se:

$$a_{11}Q_1 + a_{12}Q_2 + a_{13}Q_3 + \dots + a_{nn}Q_n = \phi_c, \quad n=1, \dots, 105 \quad (3.19)$$

Dessa maneira formou-se o seguinte sistema para determinar as 105 intensidades de cargas fictícias:

$$\begin{bmatrix}
 P_{11} & \dots & P_{145} & 0 & \dots & 0 & P_{176} & \dots & P_{1105} \\
 \vdots & & & & & & & & \\
 \vdots & & & & & & & & \\
 P_{361} & & P_{3645} & 0 & & 0 & P_{3676} & & P_{36105} \\
 P_{371} & & P_{3745} & P_{3746} & & P_{3775} & 0 & & 0 \\
 \vdots & & & & & & & & \\
 \vdots & & & & & & & & \\
 P_{391} & & P_{3945} & P_{3946} & & P_{3975} & 0 & & 0 \\
 P_{401} & & P_{4045} & 0 & & 0 & P_{4076} & & P_{40105} \\
 \vdots & & & & & & & & \\
 \vdots & & & & & & & & \\
 0 & & 0 & P_{4646} & & P_{4675} & -P_{4676} & & -P_{46105} \\
 \vdots & & & & & & & & \\
 \vdots & & & & & & & & \\
 0 & & 0 & P_{7546} & & P_{7575} & -P_{7576} & & -P_{75105} \\
 (\epsilon_r - 1)f_{461} & & (\epsilon_r - 1)f_{4645} & \epsilon_r f_{4646} & & \epsilon_r f_{4675} & -f_{4676} & & -f_{46105} \\
 \vdots & & & & & & & & \\
 \vdots & & & & & & & & \\
 (\epsilon_r - 1)f_{751} & & (\epsilon_r - 1)f_{7545} & \epsilon_r f_{7546} & & \epsilon_r f_{7575} & -f_{7576} & & -f_{75105}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 Q_1 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 Q_{36} \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 Q_{39} \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 Q_{40} \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 Q_{46} \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 Q_{75} \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 Q_{105}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 1 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 1 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 1 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 1 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 0 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 0 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 0
 \end{bmatrix}$$

(3.20)

3.3.1.2(e) - Checagem do potencial

Para verificar se as cargas fictícias calculadas satisfazem às condições de contorno ($\phi_c = 1V$), procede-se com a checagem do potencial no contorno do eletrodo. Nesta simulação foram escolhidos 27 pontos de checagem na superfície do eletrodo. Para cada ponto de checagem encontra-se, de acordo com a Eq. (3.19),

$$\phi_p(r,z) = a_{11}Q_1 + a_{12}Q_2 + \dots + a_{105105}Q_{105}$$

3.3.1.2(f) - Cálculo do campo elétrico

O campo elétrico tangencial foi calculado em 15 pontos na superfície do tubo. Para cada ponto o campo é calculado pela soma das contribuições individuais de cada anel de carga simulado. O gráfico da Fig. 3.13 mostra como está distribuído o campo ao longo do tubo, para vários valores da altura H.

Todos os passos descritos para este cálculo são mostrados no fluxograma do APÊNDICE-A.

3.3.1.3. - Simulação do "Arranjo sem Tubo"

Para simular este arranjo são válidas quase todas

as considerações feitas para o arranjo com o tubo. Foram definidos os parâmetros H, DG, B, B2, DR e DE. Destes só DE é definido de maneira diferente. No arranjo sem tubo DE passa a ser o raio médio do eletrodo. A condição de contorno é a mesma para o eletrodo, isto é, $\phi_c = 1V$. Foram, também, empregadas 105 cargas na simulação do eletrodo, todas igualmente distribuídas nas partes plana superior(35), curvada (35) e plana inferior (35). Igual número de pontos de contorno foi escolhido. O esquema deste arranjo é mostrado na Figura 3.11.

O campo elétrico foi calculado em 35 pontos situados no espaço entre o eletrodo e o plano sobre o eixo correspondente ao da superfície do tubo, caso aí ele estivesse, de maneira análoga à do arranjo anterior. A distribuição do campo é mostrada na figura 3.14.

Na simulação dos dois arranjos, o plano de terra foi simulado pelo método das imagens.

3.3.2. - Cálculo da Tensão de Iniciação de Corona (V_{cor})

A tensão de iniciação de corona foi calculada para o caso em que o "Arranjo sem Tubo" é submetido a impulsos de polaridade positiva, tendo em vista que já era conhecida a distribuição do campo elétrico. Como já foi visto na secção 3.1, para impulsos positivos, V_{cor} é determinada a partir da equação (3.4), ou seja,

$$Ne_x = \exp\left\{\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right\}.$$

Considerou-se que, a tensão no gás é a tensão de iniciação

de corona, quando $N_{e_x} = 10^8$ elétrons (RAETHER).

Na equação (3.4), $(\alpha - \eta)$ foi calculado da seguinte expressão:⁽⁹⁾

$$(\alpha - \eta)/p = \exp[a_1 (E/p)^{N-1} + a_2 (E/p)^{N-2} + \dots + a_n]$$

(3.21)

onde os coeficientes a_1, a_2, \dots, a_n são escolhidos de acordo com as faixas de variação de E/p . Para as essas faixas são:

Para $30 \leq E/p \leq 60$ volt/cm-torr, $N = 7$

Para $60 < E/p \leq 160$ volt/cm-torr, $N = 11$

Para $160 < E/p \leq 360$ volt/cm-torr, $N = 11$

Para $360 < E/p \leq 1000$ volt/cm-torr, $N = 11$

Como não é dada a faixa para valores de E/p menores que 30 volt/cm-torr, considerou-se que

Para $E/p < 30$ volt/cm-torr, $(\alpha - \eta)/p = 0$

Foram também definidos os seguintes valores neste cálculo:

E = Campo Elétrico (volt/m)

V_0 = Tensão inicial aplicada ao espaçamento entre os eletrodos (volt).

p = Pressão (torr)

Gap = Distância entre o eletrodo e o plano (cm)

$X_{ref} = \ln(N_{e_x}) = \ln(10^8) = 18.42$

N = Número de pontos onde o campo foi calculado.

A integral da equação (3,4) foi calculada pelo método de SIMPSON. Para cada valor de V_o , calculava-se o valor na integral e comparava-se com X_{ref} . Se para um determinado valor de tensão o valor da integral fosse igual a X_{ref} , então esta era a tensão de iniciação de corona. Caso contrário, incrementava-se o valor da tensão, refaziam-se os cálculos até encontrar o valor desejado.

Todos os passos para o cálculo computacional da tensão de iniciação de corona estão no fluxograma do APÊNDICE-B.

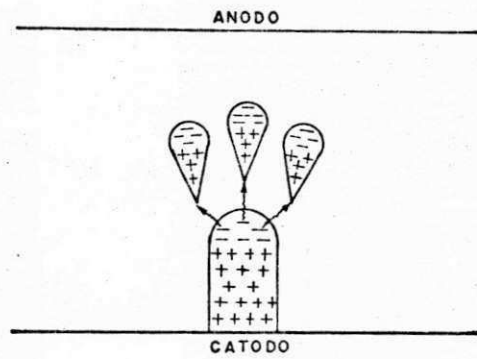


Fig.3.1 - Canal dirigido ao ânodo.

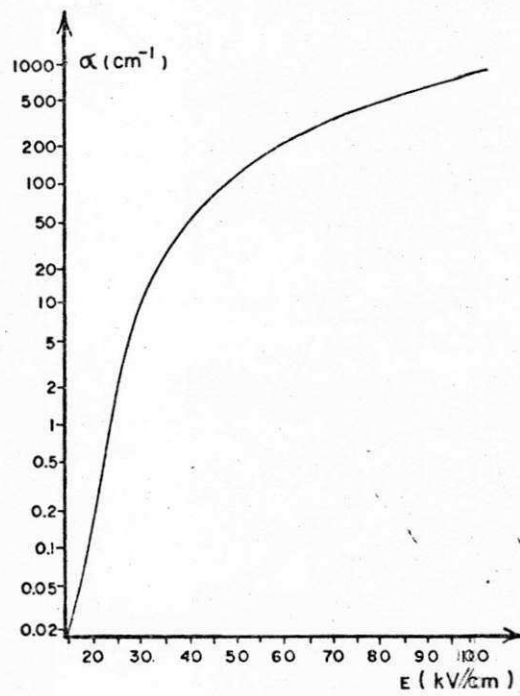


Fig. 3. 2 - Coeficiententes de ionização de Townsend para o ar a 760mm Hg e 20° C.

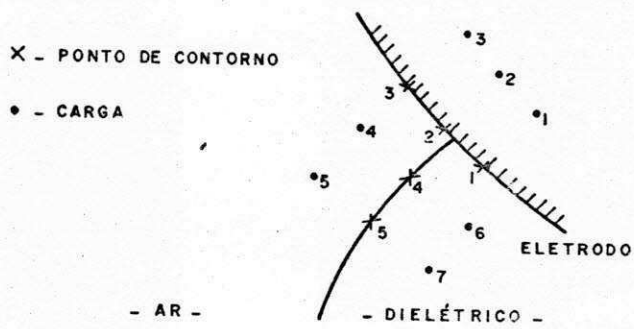


Fig. 3.3 - Cargas discretas em um sistema com dois dielétricos.

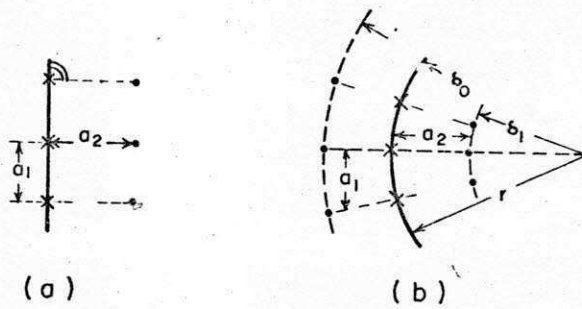


Fig. 3.4 - Arranjos para a definição do fator de atribuição (f_a).

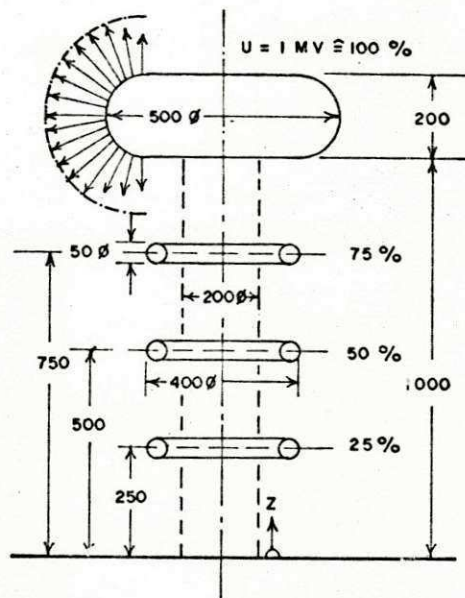


Fig. 3.5 - Arranjo de eletrodo usado na proteção de aparelhos de alta-tensão (dimensões em cm)

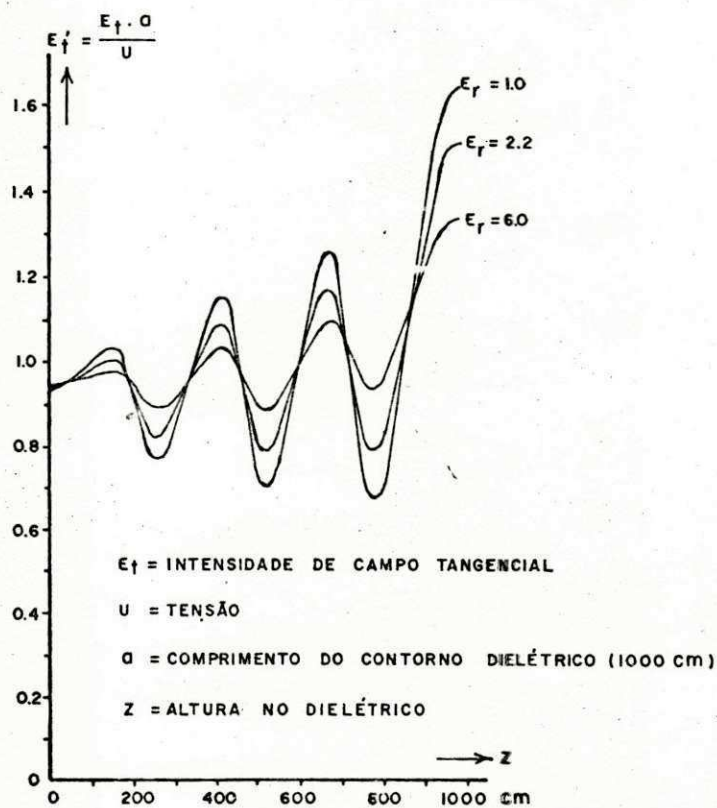
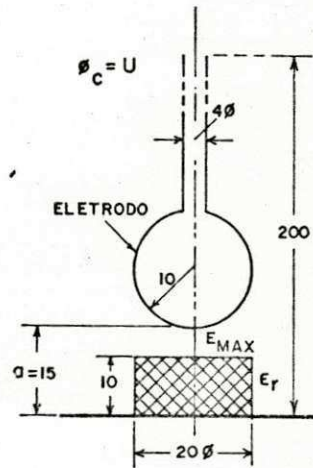


Fig. 3.6 - Intensidade do campo tangencial ao longo da superfície do dielétrico mostrado na fig. 3.5



(a)

ϵ_r	E'
1	2.19
2	2.63
3	2.86
5	3.15
7	3.31
10	3.46

$$E' = \frac{E_{MAX} \cdot \sigma}{U}$$

(b)

Fig. 3.7 - (a) Sistema constituído de um eletrodo esférico e uma chapa dielétrica;

(b) Fatores de campo.

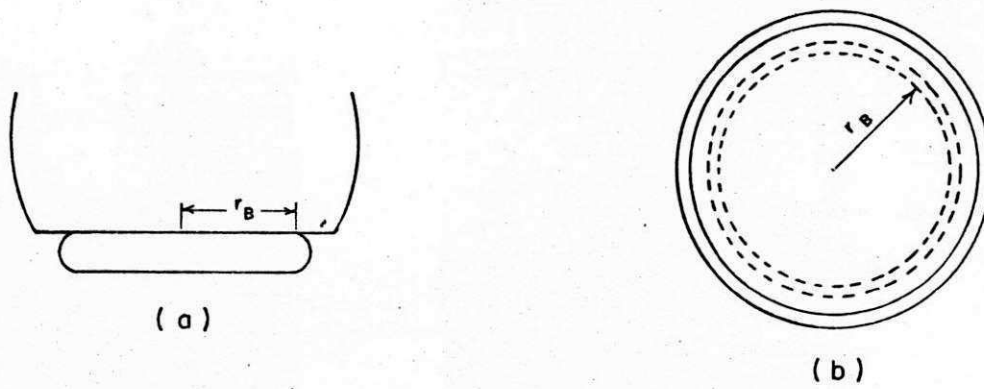


Fig. 3.8 - Elettrodo "panela-disco" usado nos testes;
 (a) Visto de frente; (b) Visto de cima.

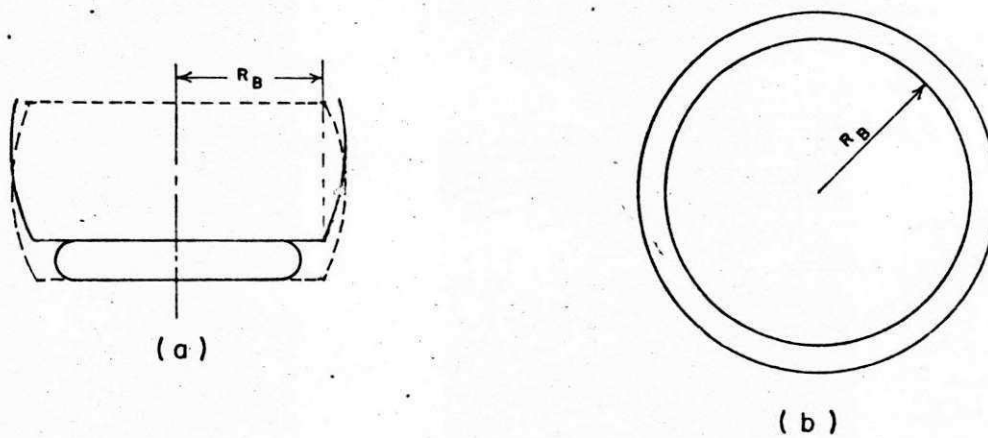


Fig. 3.9 - (a) Contorno do elettrodo "panela-disco" comparado ao
 contorno da simulação;
 (b) Elettrodo da simulação visto de cima.

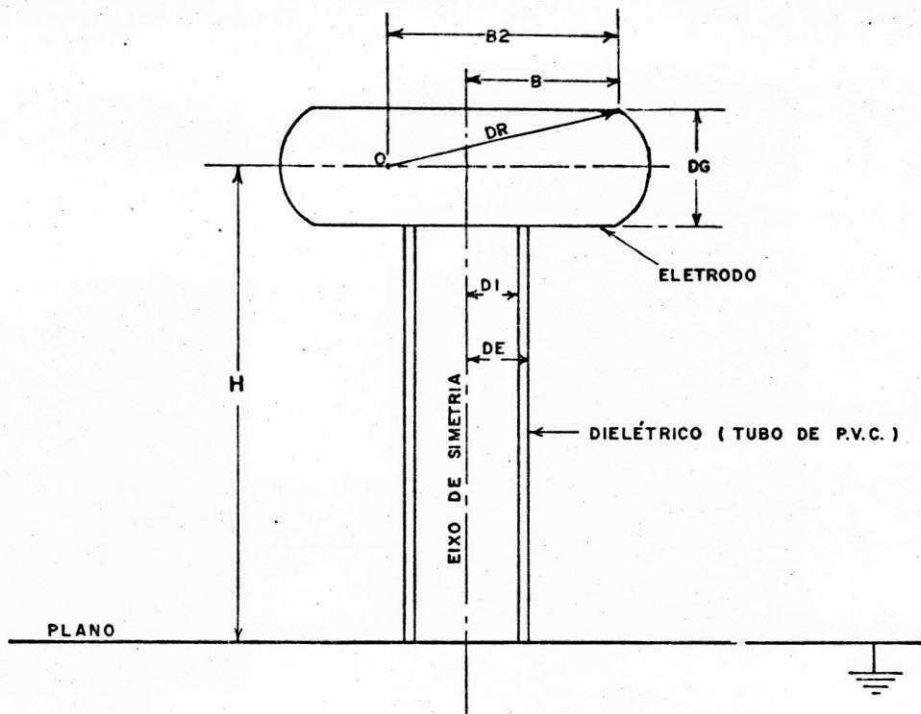


Fig. 3.10 - Arranjo para a "simulação com tubo"
(definição dos parâmetros).

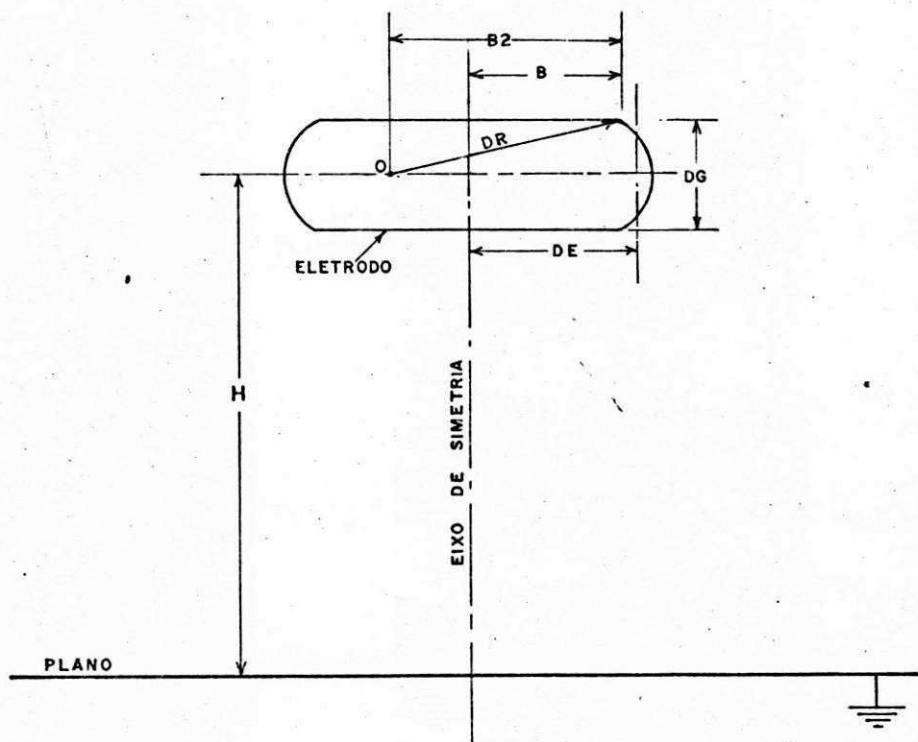


Fig. 3.11 - Arranjo para a "simulação sem tubo"
(definição dos parâmetros).

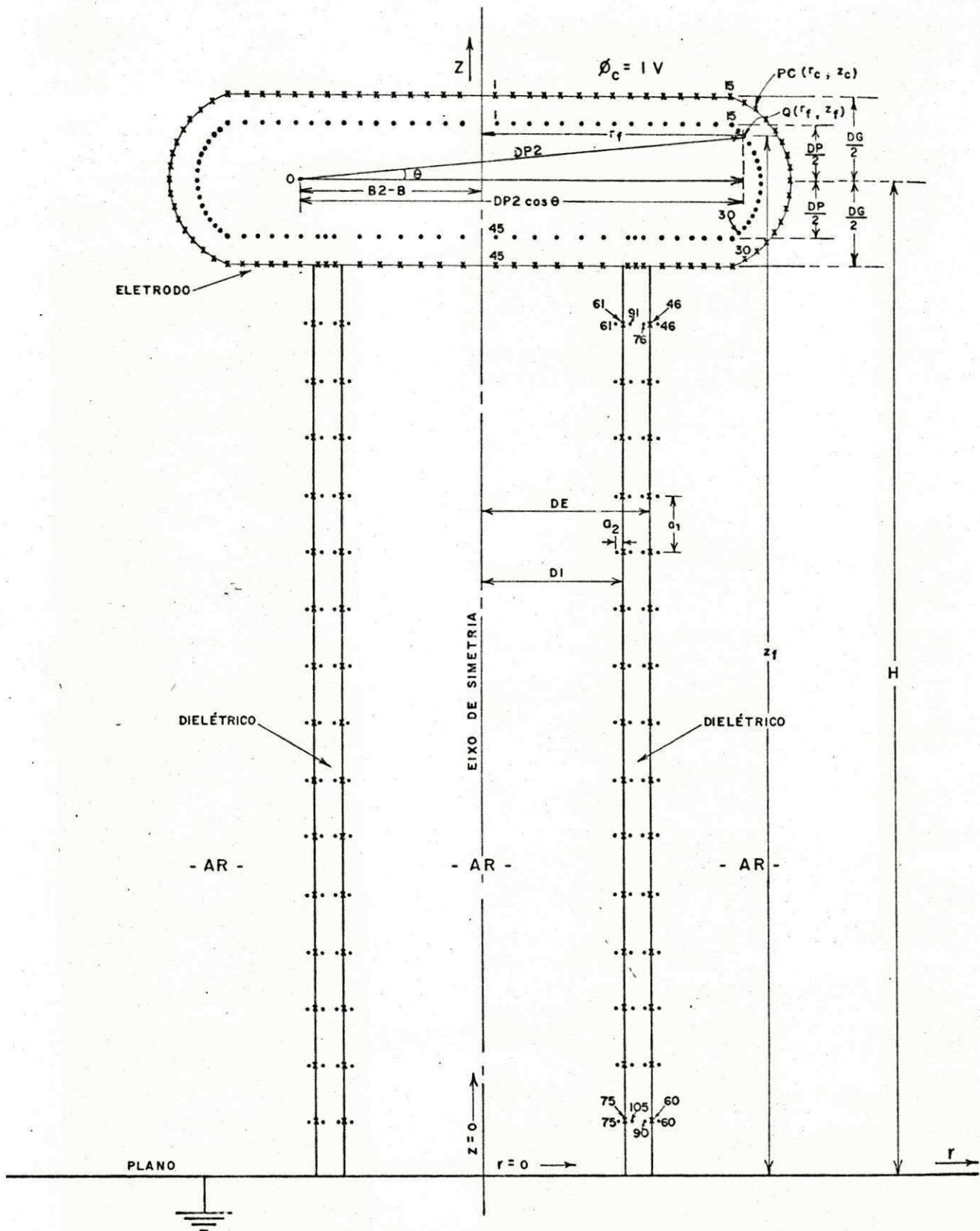


Fig.3.12 - Disposição das cargas e pontos de contorno
(• - carga ; x - ponto de contorno)

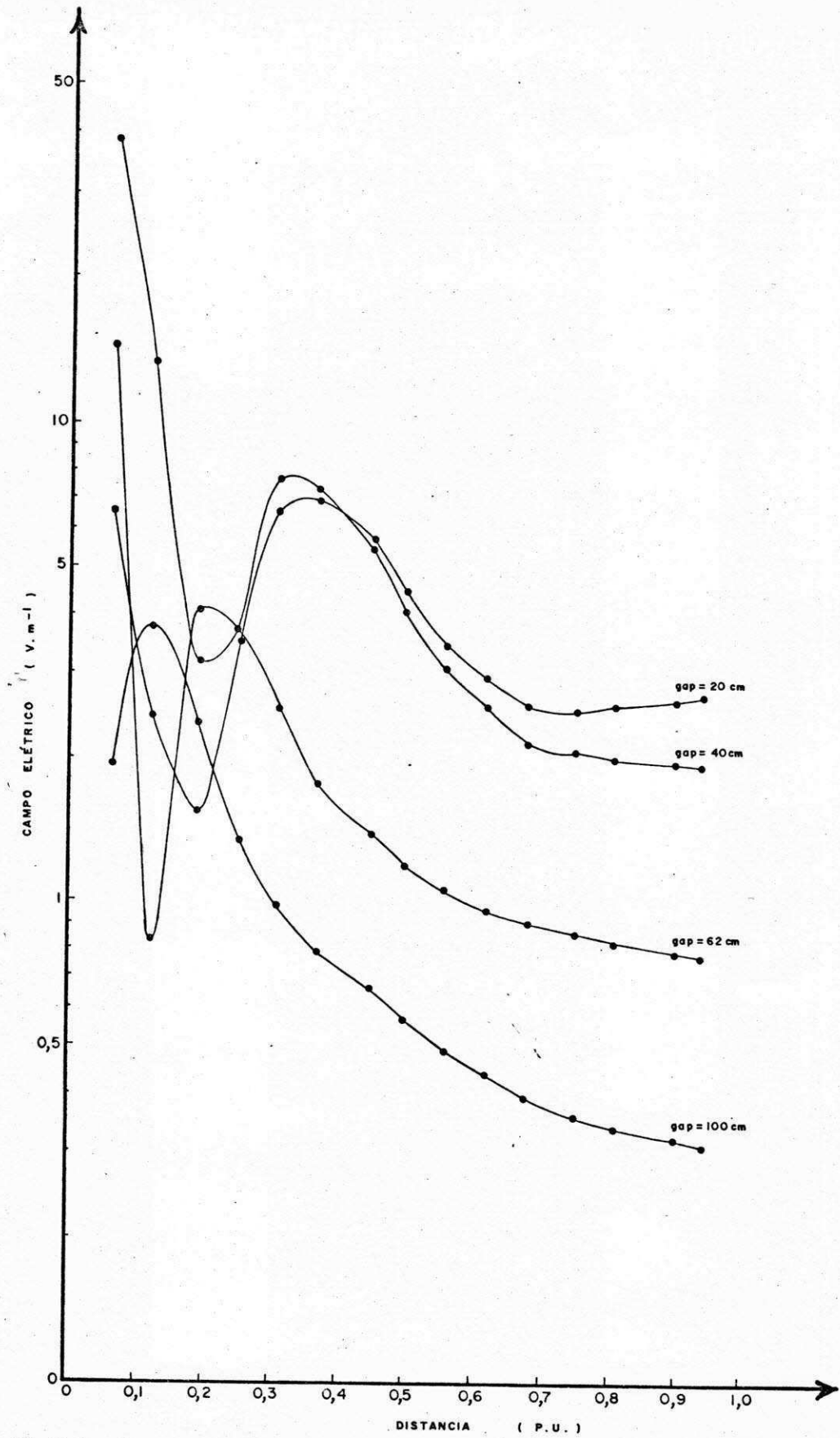


Fig.3.13 - Distribuição do campo tangencial para o "arranjo com tubo "

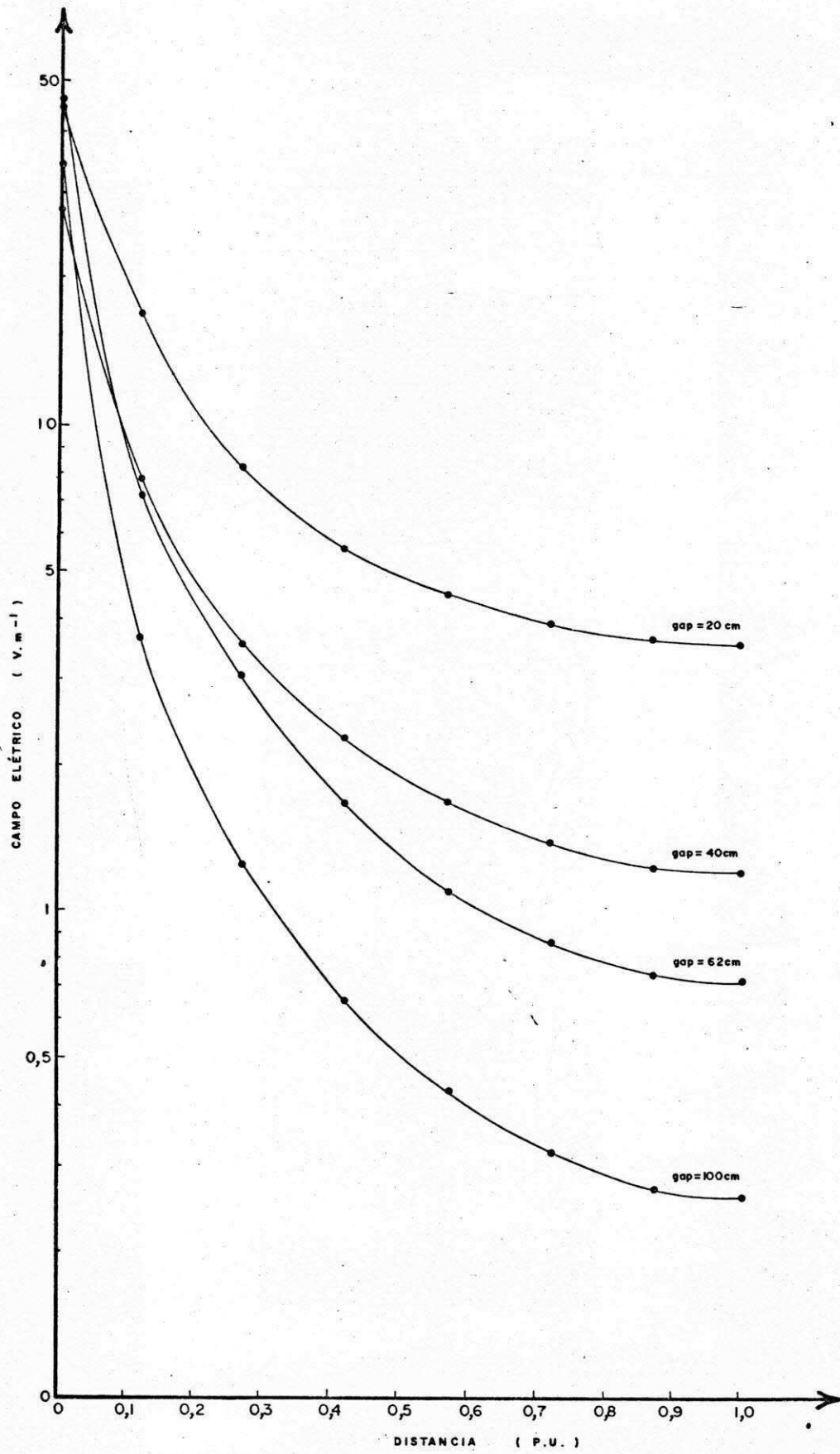


Fig.3.14 - Distribuição do campo tangencial para o "arranjo sem tubo"

CAPÍTULO IV

ARRANJOS EXPERIMENTAIS

A natureza prática deste trabalho levou à montagem de sistemas físicos experimentais que evoluíram de acordo com a necessidade de melhores resultados. Estes sistemas físicos(ou arranjos) se caracterizam principalmente pela simplicidade da forma e pelo baixo custo do material utilizado, este, por sua vez, bastante acessível.

Este capítulo contém detalhes da montagem do circuito experimental, da geometria dos eletrodos, e, das dimensões, constituição e confecção dos eletrodos e tubos utilizados nos ensaios práticos.

4.1. - SISTEMA ELÉTRICO EXPERIMENTAL

O sistema elétrico montado para a realização dos ensaios práticos, é constituído basicamente de um gerador de impulso com resistência de frente-de-onda $R_f = 700$ ohms e resistência de cauda-de-onda $R_t = 200$ ohms/estágio, gerando impulsos atmosféricos de tensão com forma de onda $1,2/50\mu s$, que são aplicados aos arranjos sob teste conectados na saída do gerador. Mediu-se a tensão por meio de um divisor capacitivo e de um cabo coaxial com resistência de $0,612 \times 10^{-4}$ ohm/metro e impedância de surto de 75 ohms, que é conectado à bancada de medição. A Fig. 4.1 mostra o circuito equivalente de um gerador de impulso de estágios múltiplos. A Fig. 4.2 mostra o circuito de teste. Na Fig. 4.3 estão as fotografias do gerador de impulso utilizado nos ensaios e do sistema experimental.

4.2. - ARRANJOS TESTADOS

Quatro arranjos, entre outros, foram escolhidos para relatar neste trabalho. Destes, três constituem sistemas com dois dielétricos (1º, 2º e 3º arranjos), ou seja, apresentam um cilindro dielétrico (tubo de p.v.c.) inserido entre um eletrodo e um plano aterrado. O 4º arranjo testado se diferencia dos demais, essencialmente, por não apresentar o tubo de p.v.c. como dielétrico, e sim o próprio ar (configu-

ração eletrodo-plano). Os tubos do 1º e do 2º arranjos eram dotados de um anel de alumínio, aterrado por meio de um fio elétrico, que servia para variar a distância entre os eletrodos. Uma luva de redução de ferro galvanizado serviu de eletrodo no 1º arranjo. No 2º arranjo foi utilizado um disco de ferro doce de bordas retas. No 3º e 4º arranjos utilizou-se o eletrodo "panela-disco" descrito no capítulo 3. A Fig.4.4 mostra os esquemas dos arranjos experimentais. Maiores detalhes dos arranjos serão dados no próximo item.

4.3. - MATERIAL UTILIZADO NOS ARRANJOS

4.3.1. - Primeiro Arranjo

1º Ensaio:

- Eletrodo de topo: luva de redução de ferro galvanizado 1"/(3/4)".
- Tubo de p.v.c.: comprimento = 90 cm, diâmetro = 20 mm
- Eletrodo inferior: anel de alumínio; largura = 3,3 cm
- Plano: placa de madeira revestida com zinco; 78,74 cm x 64 cm, espessura = 3,7cm
- Encaixe do tubo no plano: luva de ferro galvanizado soldada a um disco de ferro doce.

2º Ensaio:

As mudanças em relação ao 1º Ensaio foram:

- Eletrodo de topo: luva de redução de ferro galvanizado $1 \frac{1}{2}$ "/1"
- Tubo de p.v.c.: comprimento = 100 cm, diâmetro = 60 mm

4.3.2. - Segundo Arranjo

1º Ensaio:

- Eletrodo de topo: disco de ferro doce; diâmetro = 17 cm, espessura = 1,8 cm
- Tubo de p.v.c.: comprimento = 100 cm, diâmetro = 85 mm
- Eletrodo inferior: anel de alumínio; largura = 3,3 cm
- Plano: placa de madeira revestida com zinco; 78,74 cm x 64 cm, espessura=3,7cm
- Encaixe do tubo no plano: disco de ferro doce.

2º Ensaio:

As mudanças em relação ao 1º Ensaio foram:

- Eletrodo de topo: disco de ferro doce; diâ-

metro = 20 cm, espessura =
2,43 cm

- Tubo de p.v.c.: comprimento = 100 cm, diâmetro = 110 mm

3º Ensaio:

As mudanças em relação ao 1º Ensaio foram:

- Eletrodo de topo: disco de ferro doce; diâmetro = 21,3 cm, espessura = 1,9 mm
- Tubo de p.v.c.: comprimento = 100 cm, diâmetro = 155 mm

4.3.3. - Terceiro Arranjo

1º Ensaio:

- Eletrodo de topo: "panela-disco"; panela (diâm. sup. = 27 cm, diâm. inf. = 21,5 cm, altura = 23,57 cm) disco (diâm. = 17 cm, espes. = 1,8 cm)
- Tubo de p.v.c.: comprimento = 100 cm, diâmetro = 85 mm
- Eletrodo inferior: disco de ferro doce; diâmetro = 17 cm, espessura = 1,8 cm

- Plano: chapa de ferro sobre rodas; 148 cm x 122 cm, espessura = 0,8 cm

2º Ensaio:

- Eletrodo de topo: "panela-disco"; panela (diâm. sup. = 27 cm, diâm. inf. = 21,5 cm, altura = 23,57 cm)
 - disco (diâm. = 20 cm, espes. = 2,43 cm)
- Tubo de p.v.c.: comprimento = 100 cm, diâmetro = 110 mm
- Eletrodo inferior: disco de ferro doce; diâmetro = 20 cm, espessura = 2,43 cm
- Plano: chapa de ferro sobre rodas: 148 cm x 122 cm, espessura = 0,8 cm

3º Ensaio:

- Eletrodo de topo: "panela-disco"; panela (diâm. sup. = 27 cm, diâm. inf. = 21,5 cm, altura = 23,57 cm)
 - disco (diâm. = 21,3 cm, espessura = 1,9 cm)
- Tubo de p.v.c.: comprimento = 100 cm, diâmetro = 155 mm

- Eletrodo inferior: disco de ferro doce; (diâmetro = 21,3 cm, espessura = 1,9 cm)
- Plano: chapa de ferro sobre rodas; (148 cm x 122 cm, espessura = 0,8 cm)

4.3.4. - Quarto Arranjo

- Eletrodo de topo: "panela-disco"; panela (diâm.sup. = 27 cm, diâm.inf. = 21,5 cm, altura = 23,57 cm) - disco (diâm. = 20cm, espes. = 2,43 cm)
- Eletrodo inferior: disco de ferro doce; diâmetro = 20 cm, espessura = 2,43 cm
- Haste de sustentação do eletrodo de topo: tubo de p.v.c. de 3/4" com fio elétrico interno
- Plano: chapa de ferro sobre rodas; (148 cm x 122 cm, espessura = 0,8 cm)

4.4. - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

(1) Gerador de Impulso de Estágios Múltiplos

Entrada: 220 volts, 60 Hz, monofásico

Saída: 220 volts, 60 Hz, monofásico

Capacitância: 0,36 μ F por estágio

Energia: 12,6 kJ

(2) Fonte de Alta-Tensão Estabilizada

Entrada: 220 volts, 60 Hz, monofásico

Saída: 10 - 100 kV, DC

Corrente de Saída: 1 mA, DC

Polaridade: reversível

(3) Transformador de Potência

Primário: 220 volts

Secundário: 120 - 60 kV

Potência: 10 - 5 kVA

(4) Divisor Capacitivo

Entrada: 770 kV

Capacitância: 400 pF(BT); 0,776 μ F(AT)

(5) Regulador de Tensão

Entrada: 275 volts(máximo)

Saída: 0 - 275 volts

Corrente: 42 A, 48/65 Hz

4.5. - TRATAMENTO DOS ELETRODOS

Os eletrodos, com exceção das luvas de ferro galvanizado, foram confeccionados na oficina mecânica. A forma circular e o polimento dos discos de ferro são resultados desse trabalho. Os discos foram pintados, recebendo inicialmente uma camada de tinta antiferruginosa e, posteriormente, a pintura com tinta a óleo comum. Os discos foram dotados de uma rosca centralizada para receber os tubos de p.v.c. Os anéis de alumínio tiveram as suas bordas arredondadas e a junção das extremidades era feita através de um pequeno parafuso de onde partia o fio de aterramento.

Os eletrodos eram submetidos a rigorosa limpeza antes de cada teste, a fim de retirar os resíduos de poeira de suas superfícies.

4.6. - TRATAMENTO DOS TUBOS DE P.V.C.

Os tubos de p.v.c., na forma original, eram tubos usados. Como esses tubos apresentavam irregularidades na superfície, foram submetidos a um processo de lixagem uniforme. Nas terminações foram abertas roscas para receber os eletrodos.

Antes de cada teste, os tubos também eram submetidos a limpeza com líquido adequado, tanto interna como externamente.

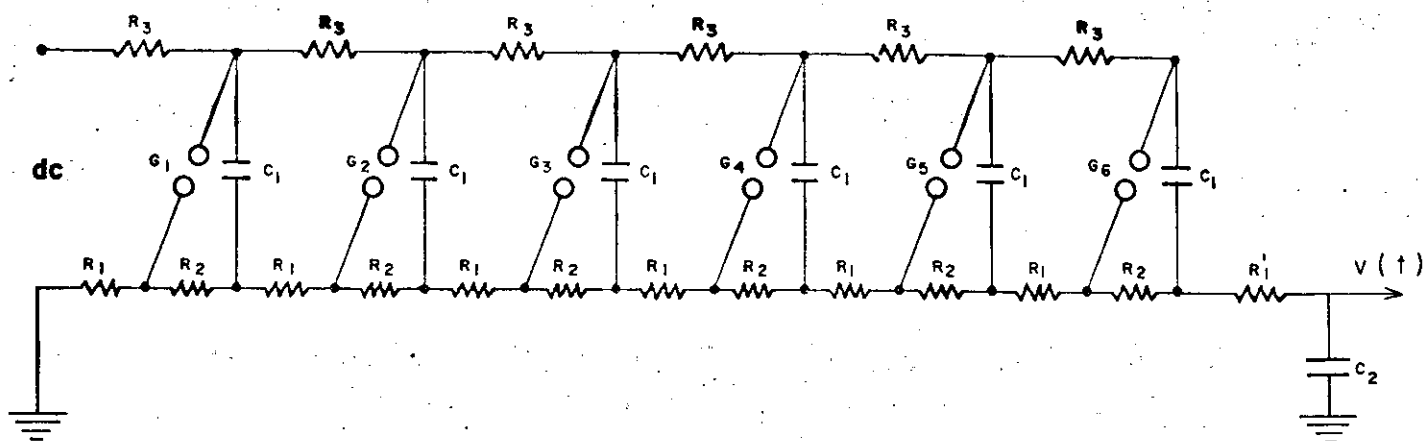


Fig. 4.1 - Circuito equivalente de um gerador de impulso com seis estágios. R_1 , R_1' : resistores de frente-de-onda; R_2 : resistores de cauda-de-onda; R_3 : resistores de carregamento; C_1 : capacitores por estágio; C_2 : divisor capacitivo; $G_1 \dots G_6$: gaps.

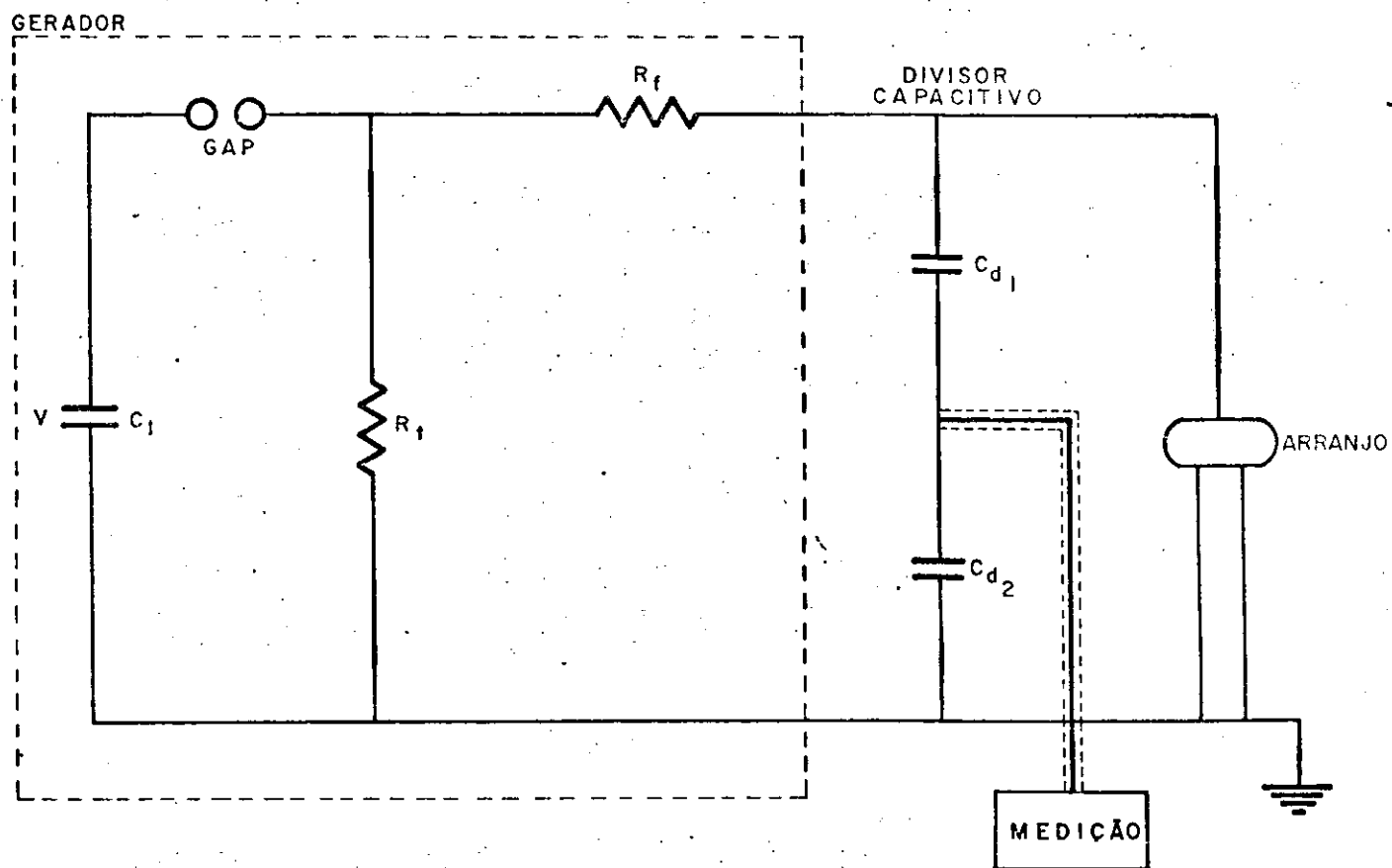
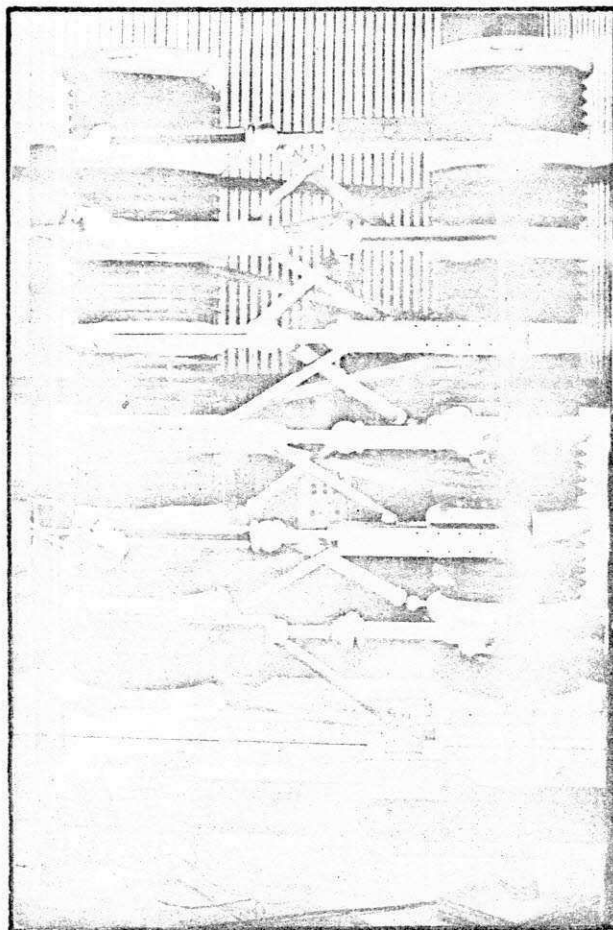
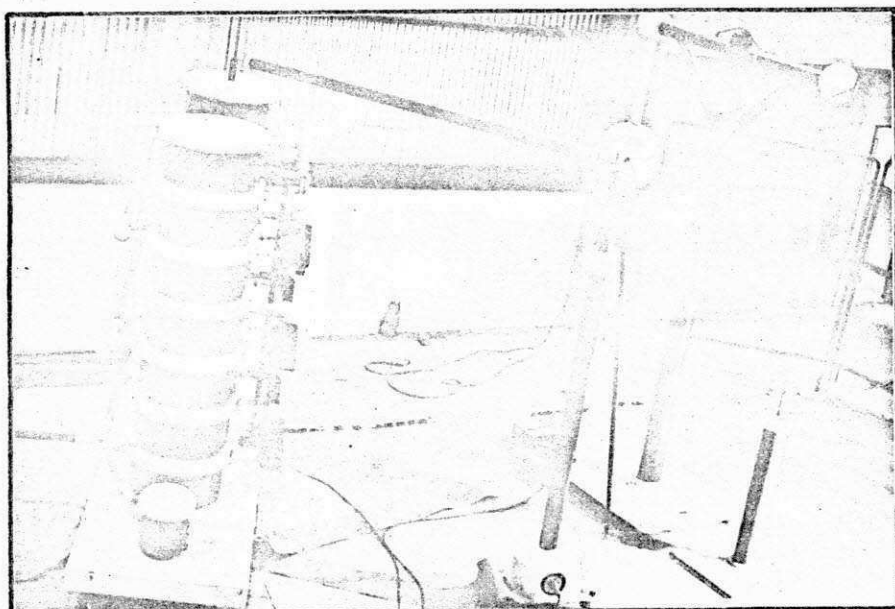


Fig. 4.2 - CIRCUITO EXPERIMENTAL.

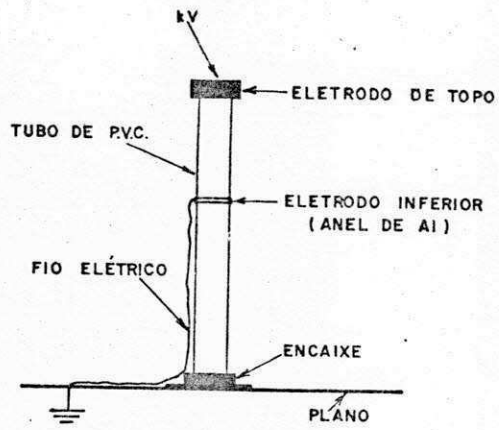


(a)

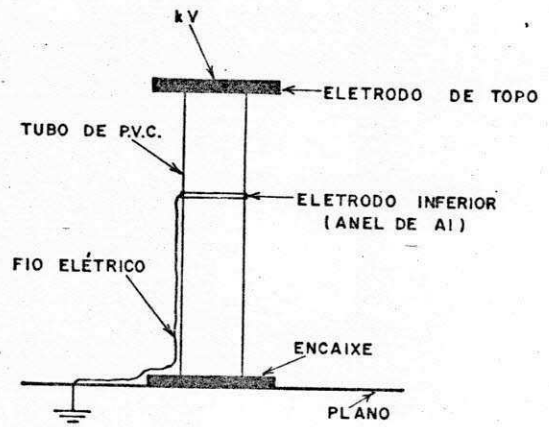


(b)

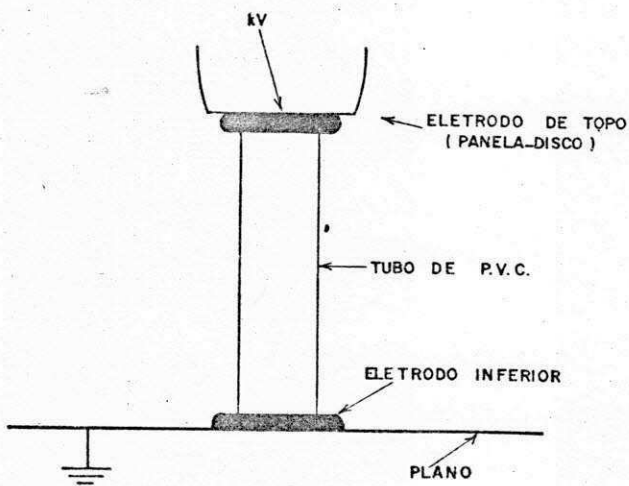
Fig.4.3 - Fotografias. (A) Gerador de impulso (7 estágios; fabricação: FERRANTI- Inglaterra)
(B) Sistema elétrico experimental.



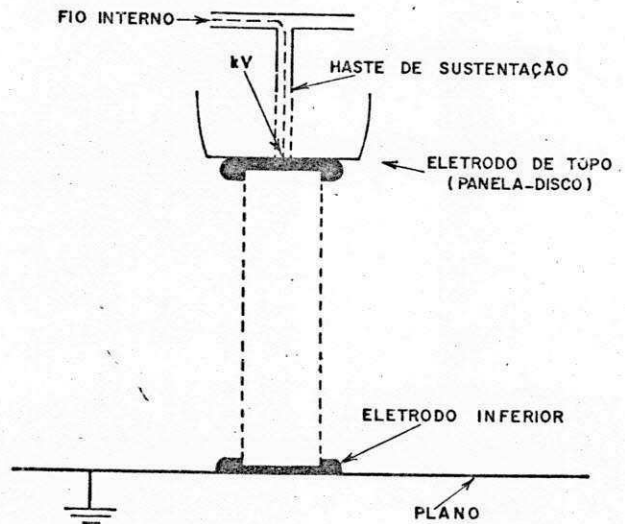
- 1º ARRANJO -



- 2º ARRANJO -



- 3º ARRANJO -



- 4º ARRANJO -

Fig. 4.4 - ARRANJOS EXPERIMENTAIS.

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios práticos foram realizados com o objetivo de verificar o tipo de ruptura que pode ocorrer na superfície do tubo isolante (p.v.c.) e como se comporta a tensão de ruptura com a variação de diâmetro e comprimento do tubo, com a polaridade da tensão aplicada e com a geometria do eletrodo. Outro objetivo foi verificar o comportamento da tensão de ruptura na ausência do tubo isolante, para um mesmo arranjo de eletrodo.

Neste capítulo serão relatados e discutidos os resultados das experiências. Todos os testes foram efetuados obedecendo aos padrões estabelecidos pelas Normas Técnicas.

5.1. - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1.1. - Calibração do gerador de impulso

Como passo inicial para a realização dos ensaios foi feita a calibração do gerador de impulso, resultando na plotagem de uma *curva de calibração*, cuja finalidade é relacionar os valores das tensões de ruptura obtidas nos testes com valores padronizados, permitindo com isso uma maior exatidão na determinação dessas tensões disruptivas.

A saída do gerador foi calibrada através de um centelhador de esferas, e o método aplicado para a obtenção da tensão disruptiva a 50%⁽¹⁴⁾ foi o Método de Acréscimo e Decréscimo, cujo teor é apresentado a seguir.

5.1.1.1. - Método de Acréscimo e Decréscimo

(up-and-down)

É escolhida uma tensão U_k a qual é suposta ser aproximadamente igual ao nível da tensão disruptiva a 50%. Também é escolhido um intervalo de tensão ΔU , aproximadamente 3% de U_k . É aplicado um impulso ao nível de U_k . Se este não causar uma descarga disruptiva, o próximo impulso deve ter o nível $U_k + \Delta U$. Se ocorrer uma descarga disruptiva ao nível de U_k , o próximo impulso deve ter o nível $U_k - \Delta U$. Este procedimento é repetido, o nível de cada impulso sendo então determinado pe-

lo resultado dos anteriores, até que o número suficiente de observações tenha sido registrado. O número de impulsos n_v aplicado em cada nível U_v é então contado e a tensão 50% de descarga disruptiva é dada por

$$U_{50} = \frac{\sum n_v U_v}{\sum n_v}$$

Nesta equação, $\sum n_v$ deve ser maior ou igual a 20, sendo considerado o primeiro nível aquele em que são aplicados dois ou mais impulsos. Isto evita algum erro apreciável se U_k é escolhido muito alto ou muito baixo. Se for necessário uma melhor precisão na determinação da tensão de descarga disruptiva a 50%, o número de aplicações da tensão deve ser aumentado mas geralmente não precisa ser maior que 40.

5.1.1.2. - Correções ambientais

Os valores das tensões disruptivas para um dado espaçamento das esferas do centelhador, para condições atmosféricas diferentes do padrão estabelecido (temperatura: 20°C; pressão atmosférica: 760mmHg), são obtidos multiplicando-se os valores da tensão por um fator de correção k que é função da densidade relativa, d , do ar definida por

$$d = \frac{p}{760} \times \frac{273 + 20^{\circ}\text{C}}{273 + t} \quad (5.1)$$

onde p é a pressão atmosférica em mm Hg e t é a temperatura em $^{\circ}\text{C}$. A tabela abaixo mostra a relação entre a densidade do ar e o fator de correção. (14)

Densidade relativa do ar (d)	Fator de correção (k)
0,70	0,72
0,75	0,77
0,80	0,82
0,85	0,86
0,90	0,91
0,95	0,95
1,00	1,00
1,05	1,05
1,10	1,09
1,15	1,13

Não foram aplicadas correções relacionadas à umidade. A razão disto é o desconhecimento de um fator de correção que expresse quantitativamente a sua influência na tensão disruptiva. Entretanto sabe-se que a tensão disruptiva aumenta com o

aumento da umidade do ar.

5.1.1.3. - Curva de calibração

No processo para levantar a curva de calibração do gerador de impulso foram calculadas as tensões disruptivas para cinco espaçamentos das esferas do centelhador: 5, 10, 15, 20 e 30 centímetros. Foram aplicados impulsos atmosféricos de polaridades positiva e negativa. Os valores de p e t utilizados na equação(5.1), foram determinados pela média aritmética dos valores anotados durante cada ensaio. A Figura 5.1 mostra a curva de calibração para as duas polaridades. No gráfico podem ser observados os pontos de checagem que foram tomados com o auxílio do osciloscópio.

5.1.2. - Procedimento nos ensaios com os arranjos experimentais

Antes do ensaio propriamente dito eram tomadas algumas medidas necessárias para o bom desenrolar da experiência, como:

- 1 - Limpeza e aquecimento dos "gaps" do gerador. O aquecimento era feito por meio de lâmpadas de 250 W. Com essa medida conseguia-se reduzir o efeito da umidade;

- 2 - Limpeza dos eletrodos, tubos e plano de terra;
- 3 - Verificação do sistema de aterramento;
- 4 - Verificação das ligações do circuito experimental;
- 5 - Observação das condições atmosféricas (quando a umidade estava muito alta preferia-se não realizar o ensaio, isso ocorria geralmente quando o tempo estava chuvoso).

Depois de tomadas essas medidas procedia-se com a montagem do arranjo, ou seja, fixação do tubo de p.v.c. no plano e adaptação do eletrodo de topo. Em seguida ligava-se o arranjo ao circuito de teste, anotavam-se as condições atmosféricas no laboratório, fazia-se mais uma limpeza no arranjo e então iniciava-se o ensaio.

Em todos os testes foram aplicados impulsos atmosféricos de tensão com forma de onda $1,2/50\mu s$ (Fig. 5.2). Utilizou-se o Método de Acréscimo e Decréscimo para determinar a tensão disruptiva a 50%.

Com relação à variação do espaçamento entre os eletrodos procedeu-se da seguinte maneira: para o 1º e 2º arranjos o espaçamento foi variado pelo deslocamento do anel de alumínio (Ver fig. 4.4) ao longo do tubo; nos ensaios do 3º arranjo foram utilizados tubos de vários tamanhos para cada diâmetro, o espaçamento ficava então definido pelo comprimento do tubo; no 4º arranjo o espaçamento foi variado pelo des-

locamento, para cima, do eletrodo de topo, através da haste que o sustentava. Os comprimentos dos espaçamentos eram medidos com uma fita métrica. Os testes sempre começavam pelo menor espaçamento.

5.2. - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.2.1. - Ensaio do 1º arranjo

Com este arranjo foram realizados dois ensaios. O que diferencia esses ensaios são as dimensões dos tubos e eletrodos (ver secção 4.3.1). Nos dois ensaios foram aplicadas tensões de polaridade positiva, utilizando 6 estágios do gerador, para espaçamentos entre eletrodos (gaps) de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 cm. O gráfico da Fig. 5.3 mostra como varia a tensão de ruptura com a distância entre os eletrodos.

Observou-se nestes ensaios que os centelhamentos provocados pelas descargas se processavam no ar próximo à superfície do tubo, iniciando no eletrodo de topo e terminando no eletrodo inferior, como mostra o esquema da Figura 5.3. Não se observou nenhuma deteriorização na superfície dos tubos.

5.2.2. - Ensaio do 2º arranjo

Para este caso foram realizados três ensaios tam-

bem diferenciados pelas dimensões dos componentes sob teste (ver secção 4.3.2). Para cada ensaio foram efetuados testes com tensões de polaridades positiva e negativa, respectivamente, utilizando 5 estágios do gerador. Os espaçamentos submetidos a tensões positivas foram de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 80 cm; os submetidos a tensões negativas foram de 10, 20, 30, 40 e 50 cm. Os gráficos da Fig. 5.4. mostram a variação da tensão de ruptura a distância entre os eletrodos para as duas polaridades.

Nos três ensaios, para ambas as polaridades, observou-se que a trajetória da centelha era no ar próximo à superfície do tubo, partindo da borda do eletrodo de topo até o eletrodo inferior, sem causar nenhum dano à superfície do mesmo.

5.2.3. - Ensaio do 3º arranjo

Para este arranjo foram realizados três ensaios diferenciados também pelas dimensões dos componentes testados (ver secção 4.3.3). Para cada um dos ensaios foram efetuados testes com tensões de polaridades positiva e negativa utilizando os 7 estágios do gerador de impulso. Nestes ensaios não houve uniformidade na escolha dos espaçamentos entre os eletrodos (comprimentos dos tubos). Para os tubos de 85 mm e 110 mm de diâmetro os comprimentos disponíveis eram de 18, 30, 50 e 78 cm. Estes foram submetidos a tensões po-

sitivas; para tensões negativas utilizou-se apenas tubos de 18, 30 e 50 cm. Os comprimentos disponíveis para os tubos de 155 mm de diâmetro eram de 17, 30, 50 e 67 cm. todos usados para as duas polaridades. Na Fig. 5.5 estão os gráficos demonstrativos da variação da tensão de ruptura a distância entre os eletrodos para ambas as polaridades.

Os centelhamentos se processaram no ar bem próximo à superfície do tubo, com trajeto iniciando no eletrodo de topo e terminando no eletrodo inferior, deixando "fotografias" quase imperceptíveis nas superfícies dos mesmos. Isto foi observado nos três ensaios e para as duas polaridades de tensão.

5.2.4. - Ensaio do 4º arranjo

Nos testes deste arranjo foram aplicados impulsos de ambas as polaridades, utilizando 7 estágios do gerador, para espaçamentos, 20,30,40, 50, 62, 82 e 100 cm - polaridade positiva e de 20, 30, 40, 50 e 62 cm - polaridade negativa. As formas e dimensões dos componentes deste arranjo já foram mencionadas na secção 4.3.4. O gráfico da Fig. 5.6 mostra a variação da tensão de ruptura com a distância entre os eletrodos para as polaridades positiva e negativa.

O centelhamento se processou entre as bordas dos eletrodos em diversas posições, iniciando no eletrodo de topo.

5.3. - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.3.1. - Análise comparativa das características de ruptura para os arranjos com tubo

Uma análise detalhada das características de ruptura superficial envolvendo o 1º, 2º e 3º arranjos, baseada nos resultados mostrados graficamente nas figuras 5.3, 5.4 e 5.5, leva às seguintes observações:

- Nos 3 casos a tensão de ruptura aumenta quase linearmente com o aumento do espaçamento entre os eletrodos (comprimento do tubo), para impulsos de polaridades positiva e negativa;

- Os níveis de ruptura são mais elevados quando se aplicam impulsos de polaridade negativa;

- O 1º e 2º arranjos apresentam praticamente as mesmas características de ruptura para polaridade positiva;

- Para comprimentos maiores que 30 cm, os níveis de ruptura do 1º e 2º arranjos, para polaridade positiva, são mais elevados do que os níveis de ruptura do 3º arranjo;

- Para polaridade negativa, os níveis de ruptura do 3º arranjo são mais elevados do que os níveis de ruptura do 1º e 2º arranjos;

- Nos dois primeiros arranjos o diâmetro do tubo

não afeta substancialmente a tensão de ruptura;

- No 3º arranjo, para ambas as polaridades, a figura 5.5 mostra que para o comprimento de 50 cm existe uma grande diferença entre as tensões de ruptura para tubos de diferentes diâmetros. Para impulsos positivos a tensão de ruptura para 50 cm do tubo de 155 mm é em torno de 300 kV enquanto que para os outros diâmetros o nível de ruptura é aproximadamente 260 kV. Para impulsos negativos, com esse mesmo comprimento, a tensão de ruptura maior é a do tubo de 85 mm (aproximadamente 567 kV) comparada à do tubo de 155 mm (518 kV) e à do tubo de 110 mm (462 kV); para tubos de 15 a 30 centímetros de comprimento os níveis de ruptura crescem mantendo uma diferença quase uniforme na mesma ordem por diâmetro (do menor para o maior nível de ruptura: 155, 85 e 100 mm); a partir de 30 cm de comprimento, começa a cair o nível de ruptura do tubo de 110 mm confundindo-se em alguns pontos com os níveis para os outros diâmetros.

Resumindo, observou-se principalmente que as características de ruptura superficial do 3º arranjo são diferentes das do 1º e 2º arranjos com respeito aos níveis da tensão de ruptura para impulsos de ambas as polaridades. A explicação plausível para isto é que a tensão de ruptura para o 3º arranjo é influenciada pela geometria do eletrodo de topo, considerando que nos dois primeiros arranjos as características de ruptura são praticamente as mesmas apesar das formas dos respectivos eletrodos.

5.3.2 - Características da ruptura na ausência do tubo

Comparando as características de ruptura do 4º arranjo (arranjo sem tubo) com as características do 3º arranjo (arranjo com tubo), observou-se que para ambas as polaridades dos impulsos de tensão aplicados, os níveis de ruptura para o arranjo sem tubo são mais elevados que os níveis de ruptura para o arranjo com tubo, como mostra a figura 5.7. Com este resultado pode-se então med dizer que a tensão de ruptura foi afetada pela presença do tubo. Dois fatores podem ser os responsáveis pela queda da tensão de ruptura na presença do tubo:

a) sujeira e imperfeições na superfície do tubo;

b) um ajuste mal feito do eletrodo de topo no tubo, permitindo a formação de um 'gap' de ar na junção eletrodo-tubo, o que provocou a intensificação do campo elétrico e a conseqüente precipitação da ruptura superficial no 'gap'. Desde estes dois fatores, é provável que o segundo tenha dado a maior contribuição para a queda da tensão de ruptura, considerando que foram tomados todos os cuidados com relação à forma e à limpeza da superfície do tubo de p.v.c. Outro fator que poderia influenciar na tensão de ruptura, comparando os resultados dos dois arranjos é a umidade do ar, entretanto, esta hipótese foi afastada pelo fato das experiências

terem sido realizadas aproximadamente sob as mesmas condições ambientais (pressão = 717 mm Hg, temperatura = 25° C e densidade do ar = 0,93),

Fazendo uma comparação entre as características de ruptura no ar do arranjo panela-disco-plano deste trabalho com o arranjo esfera - plano estudado por Kuffel e Abdullah (Ver secção 2.1.3 - fig. 2.6), verifica-se que as tensões de ruptura de ambas as polaridades, para os dois arranjos, apresentam uma maior proximidade para espaçamentos a partir de 40 cm de comprimento entre os eletrodos, sendo que para o espaçamento de 50 cm essas tensões têm os seus valores ainda mais próximos (em torno de 300 kV para polaridade positiva e em torno de 500 kV para polaridade negativa). Considerando a diferença nas formas dos eletrodos, os resultados deste trabalho para o arranjo sem tubo são satisfatórios se comparados aos resultados de Kuffel e Abdullah.

Com relação às centelhas provocadas pelas descargas nos arranjos com e sem tubo, pode-se afirmar, conforme o relatado nas secções 5.2.3 e 5.2.4, que apresentam as mesmas características, ou seja, ambas se processam *no ar* iniciando nas bordas do disco do eletrodo de topo (panela-disco) e dirigindo-se ao eletrodo inferior caracterizando, portanto, no caso do arranjo com tubo, a ruptura do meio onde o tubo é inserido ou *centelhamento superficial*.

Os cálculos da tensão de iniciação de corona no ar, para a distribuição do campo não-uniforme do arranjo sem tubo (ver fig. 3.13b) mostram que os valores dessa tensão são consideravelmente menores que os valores da tensão de ruptura obtidos experimentalmente. O gráfico da figura 5.8 mostra as variações da tensão de ruptura e da tensão de iniciação de corona com a distância entre os eletrodos, para as mesmas condições. Nesse gráfico observa-se que a tensão de inicia -

ção de corona aumenta com o aumento de distância entre os e
letrodos mas o seu valor tende a se estabilizar para distân
cias maiores que 50 cm, enquanto a tensão de ruptura tende
a aumentar ainda mais.

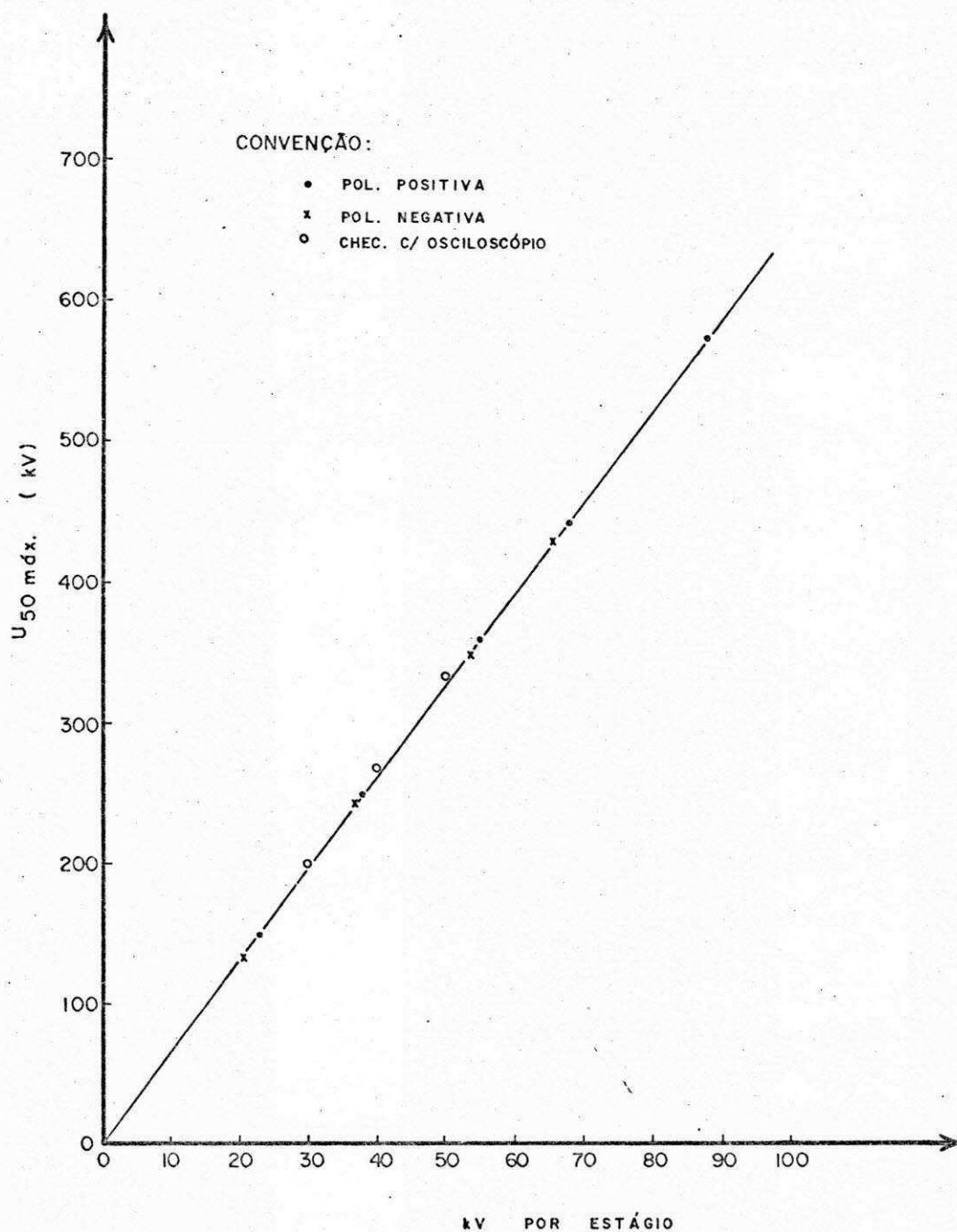


Fig. 5.1 - Curva de calibração do gerador de impulso.

Pol. positiva: $p = 715,4$ mm Hg; $t = 26$ °C; $k = 0,93$

Pol. negativa: $p = 715,7$ mm Hg; $t = 24,4$ °C; $k = 0,93$

Gerador: 7 estágios.

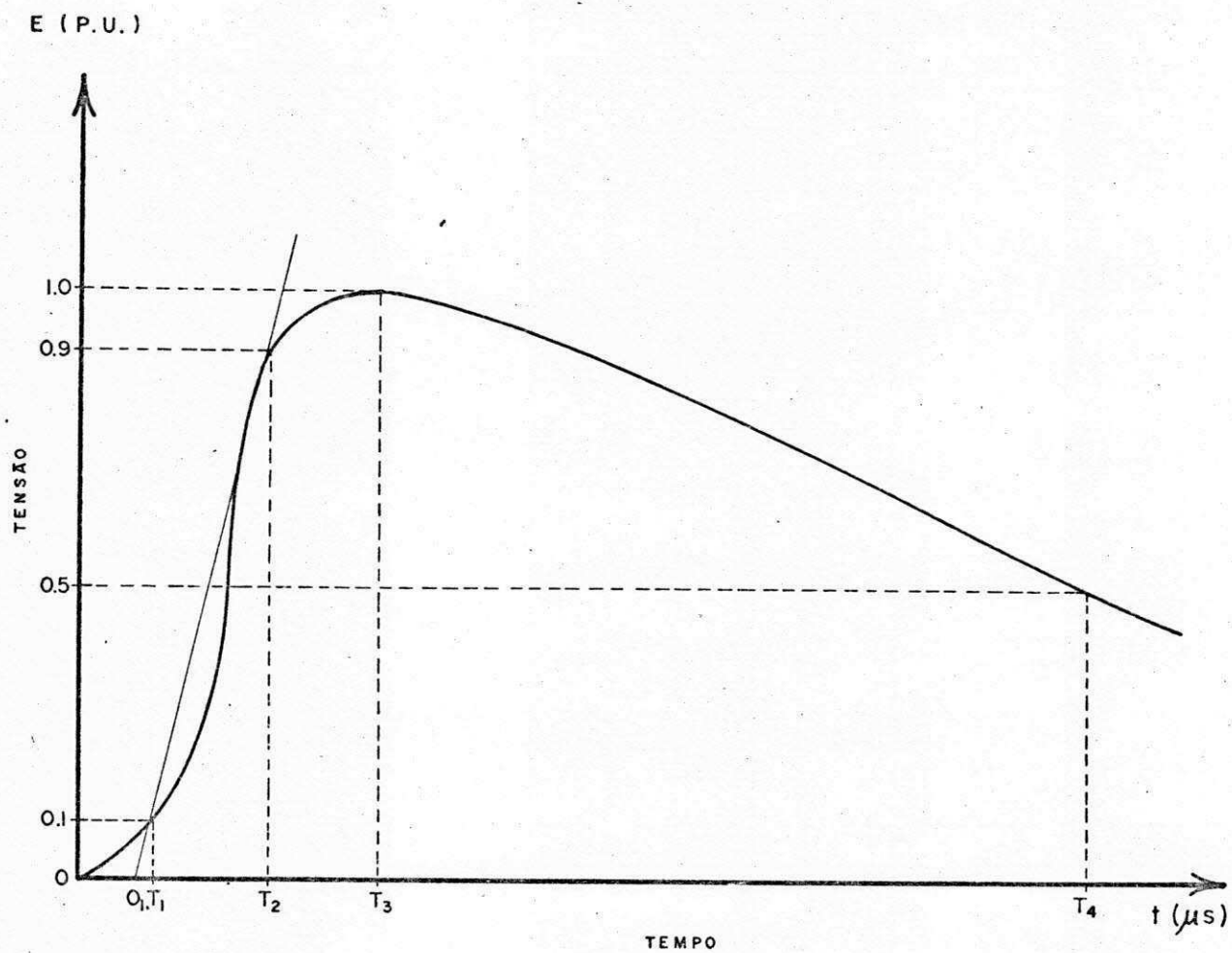


Fig. 5.2 - Forma de onda padronizada da tensão de impulso $1,2 / 50 \mu s$.

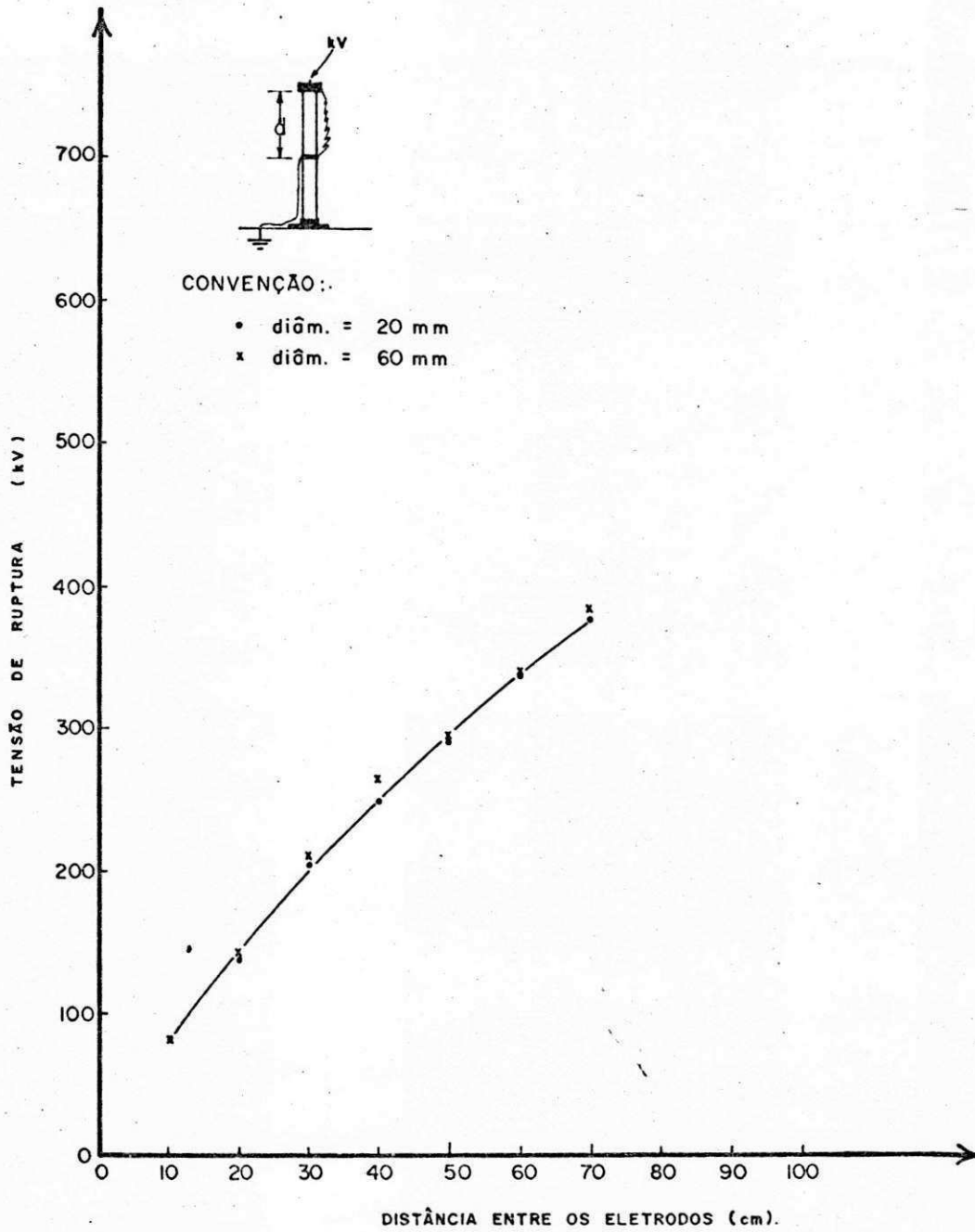


Fig. 5.3 - Característica distância entre os eletrodos - tensão de ruptura do 1º arranjo (polaridade positiva); $p = 718,5$ mm Hg; $t = 23,8$ °C; $k = 0,93$; gerador: 6 estágios.

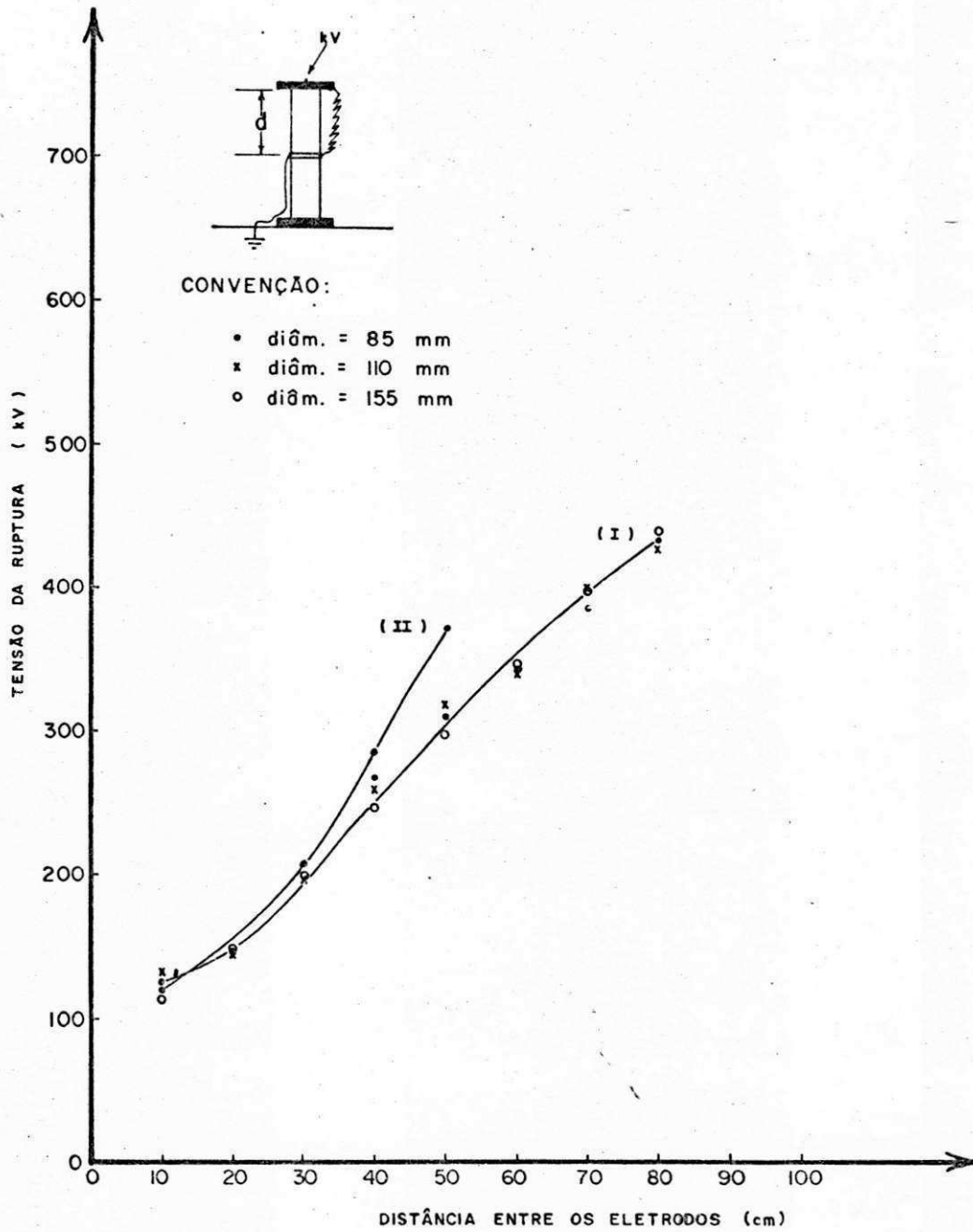


Fig. 5.4 - Características distância entre os eletrodos - tensão de ruptura do 2º arranjo; (I) polaridade positiva; (II) polaridade negativa; $p = 720,4$ mm Hg; $t = 24,8^\circ\text{C}$; $k = 0,93$; gerador: 5 estágios.

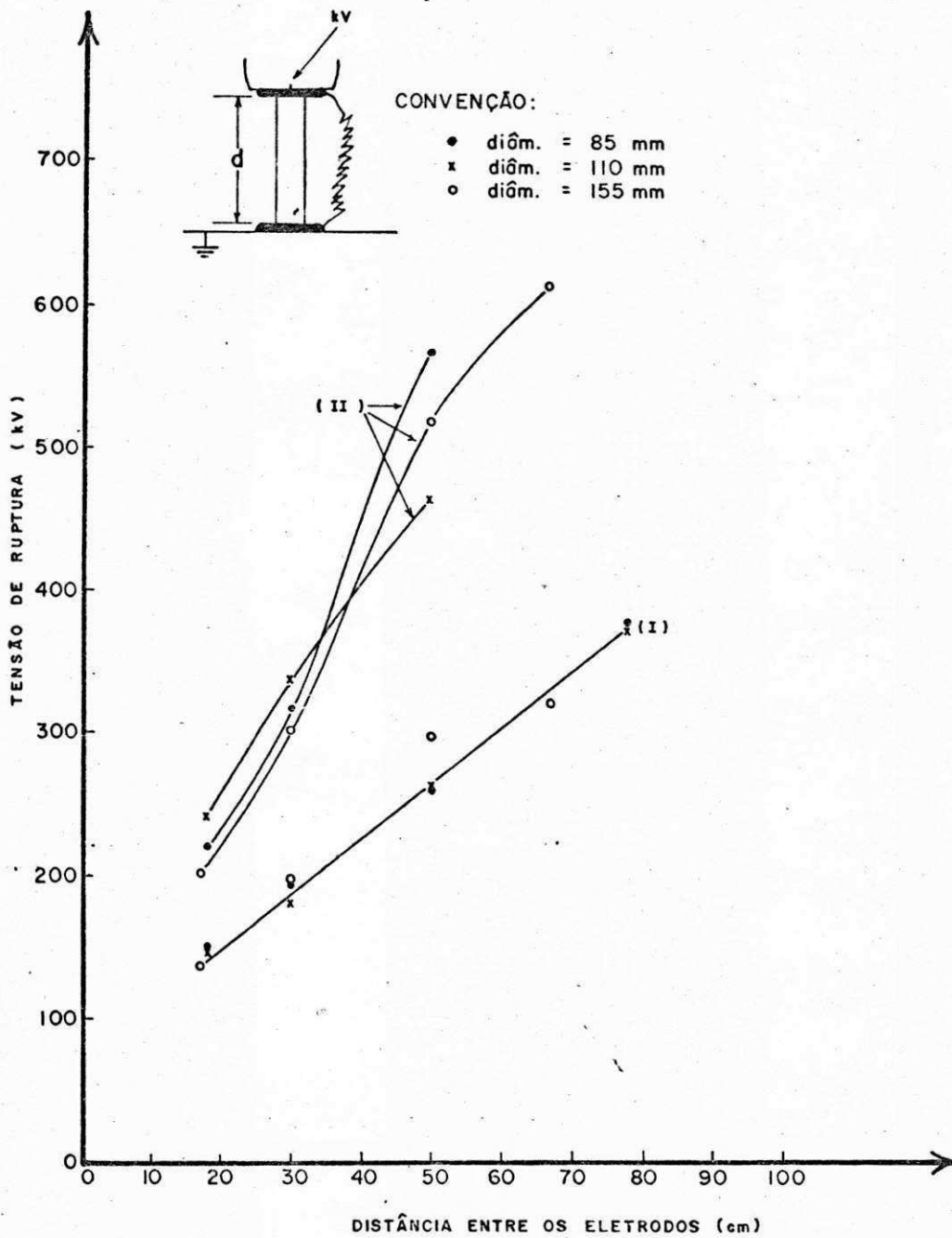


Fig. 5.5 - Características distância entre os eletrodos - tensão de ruptura do 3º arranjo; (I) polaridade positiva; (II) polaridade negativa; $p = 716,8$ mm Hg; $t = 24,3^\circ\text{C}$; $k = 0,93$; gerador = 7 estágios.

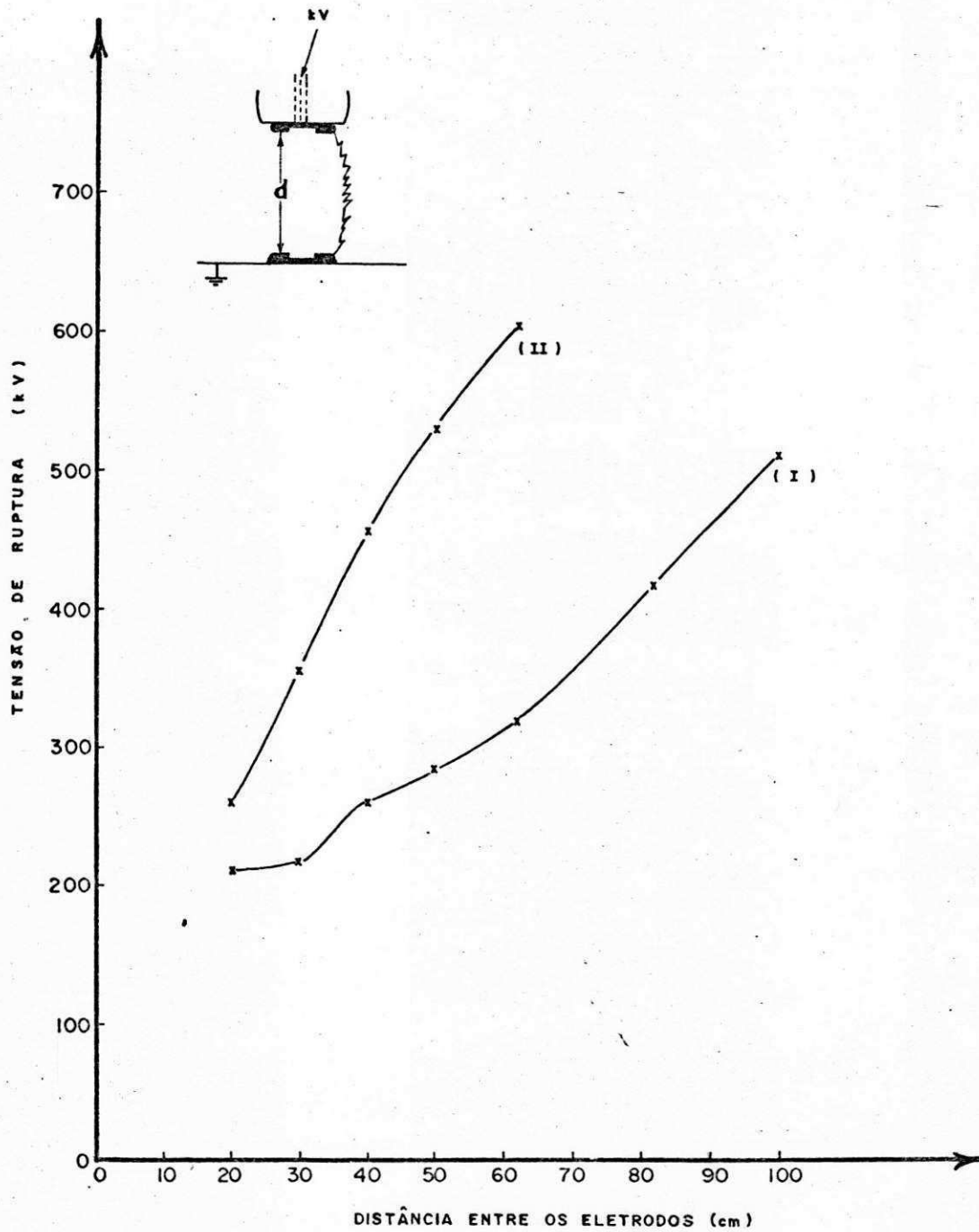


Fig. 5.6 - Características distância entre os eletrodos - tensão de ruptura do 4º arranjo; (I) polaridade positiva; (II) polaridade negativa; $p = 716,7$ mm Hg; $t = 25$ °C; $k = 0,93$; gerador: 7 estágios.

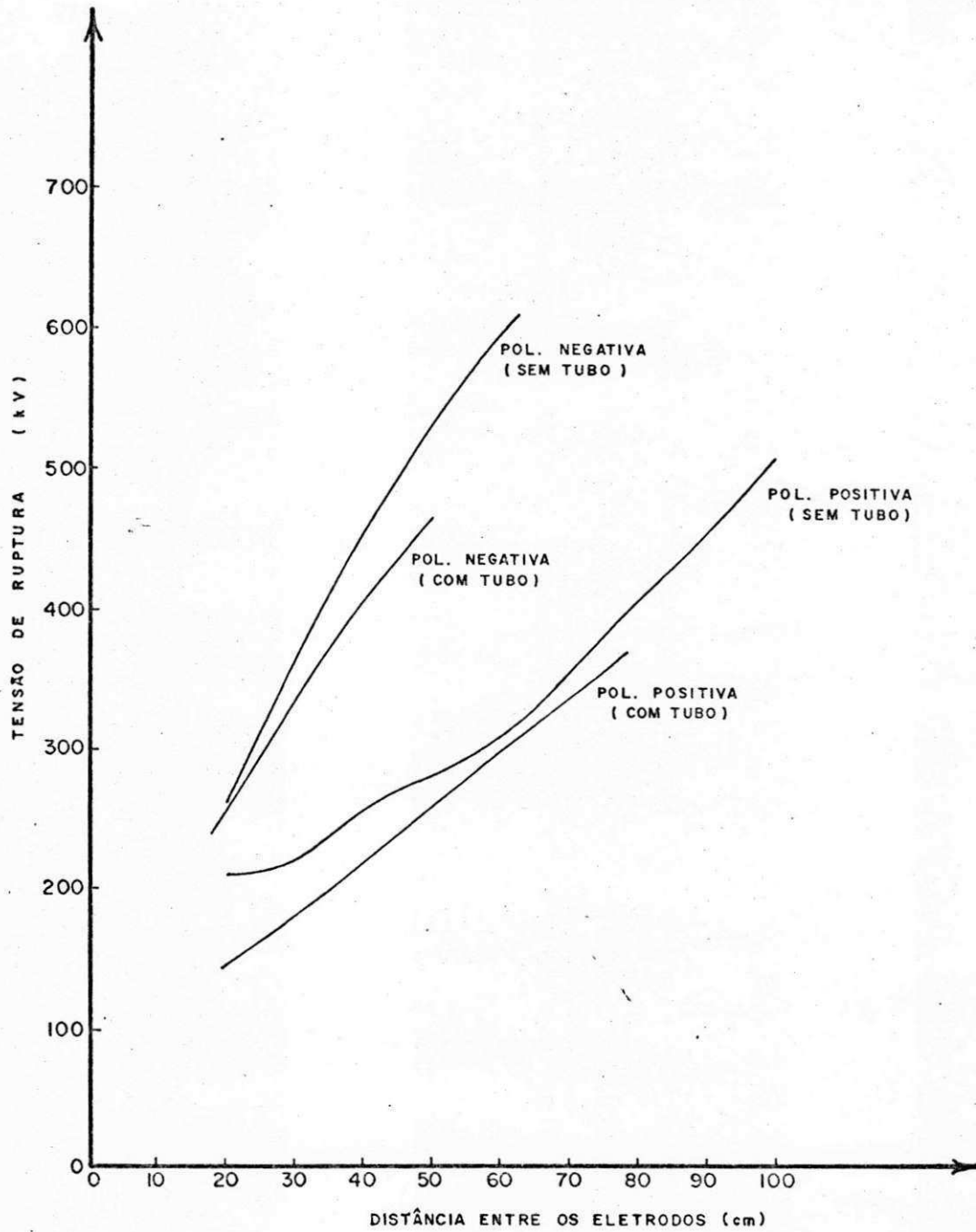


Fig. 5.7 - Comparação entre as características de ruptura do 3º e do 4º arranjos.

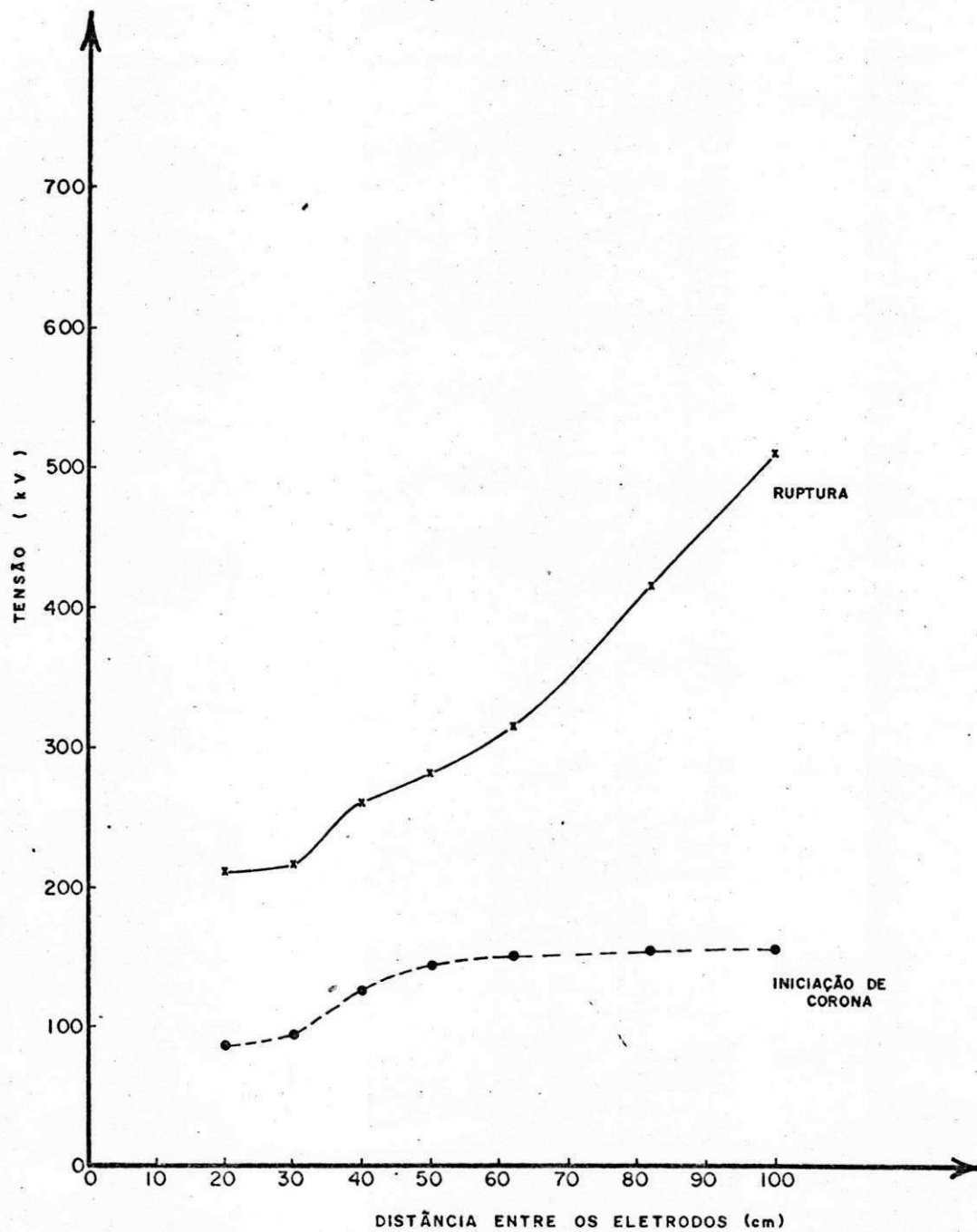


Fig. 5.8 - Tensões de ruptura (medida experimentalmente) e de iniciação de corona (calculada computacionalmente); 4º arranjo; pol. positiva.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Os resultados práticos e teóricos obtidos neste trabalho, conduziram às seguintes conclusões:

- (1) Quando os tubos de p.v.c. são limpos, a ruptura superficial é devido à ruptura do ar na vizinhança (centelhamento).
- (2) A tensão de ruptura é substancialmente influenciada pela polaridade do impulso aplicado. Os valores da tensão de ruptura para impulsos de polaridade negativa, em todos os casos, são superiores aos valores correspondentes para polaridade positiva.

- (3) A geometria do eletrodo panela-disco influenciou nos valores da tensão de ruptura para ambas as polaridades do impulso aplicado.
- (4) O diâmetro do tubo influenciou a tensão de ruptura para impulsos de polaridade negativa. O mesmo não ocorreu para polaridade positiva.
- (5) A presença do tubo de p.v.c. provocou uma queda na tensão de ruptura do arranjo panela-disco - plano, para ambas as polaridades de impulso.
- (6) Os valores das tensões de iniciação de corona computados, são bem inferiores aos das tensões de ruptura correspondentes. Os cálculos mostram que o valor da tensão de iniciação de corona aumenta com a distância entre os eletrodos mas tende a se estabilizar.

Com estas verificações, a finalidade deste trabalho foi atingida. Entretanto, a viabilidade do uso de tubos de p.v.c. como isolantes em equipamentos de alta tensão depende ainda de estudos mais detalhados das características de ruptura superficial nos mesmos, tendo em vista a grande variedade de práticas de laboratório. Mesmo assim, os ensaios realizados mostraram que os tubos de p.v.c. podem resistir a descargas disruptivas provenientes de impulsos atmosféricos de ambas as polaridades, sem que as suas superfícies sejam danifi-

cadas, considerando que as descargas se processam no ar, nas vizinhanças do tubo.

É sabido que a superfície interna do tubo de p.v.c. rígido resiste muito, bem à corrosão. Aliando essa característica do p.v.c. às observações registradas neste trabalho, pode-se confeccionar um arranjo no qual o tubo de p.v.c. é utilizado como suporte isolador que contenha no seu interior um circuito imerso em óleo isolante.

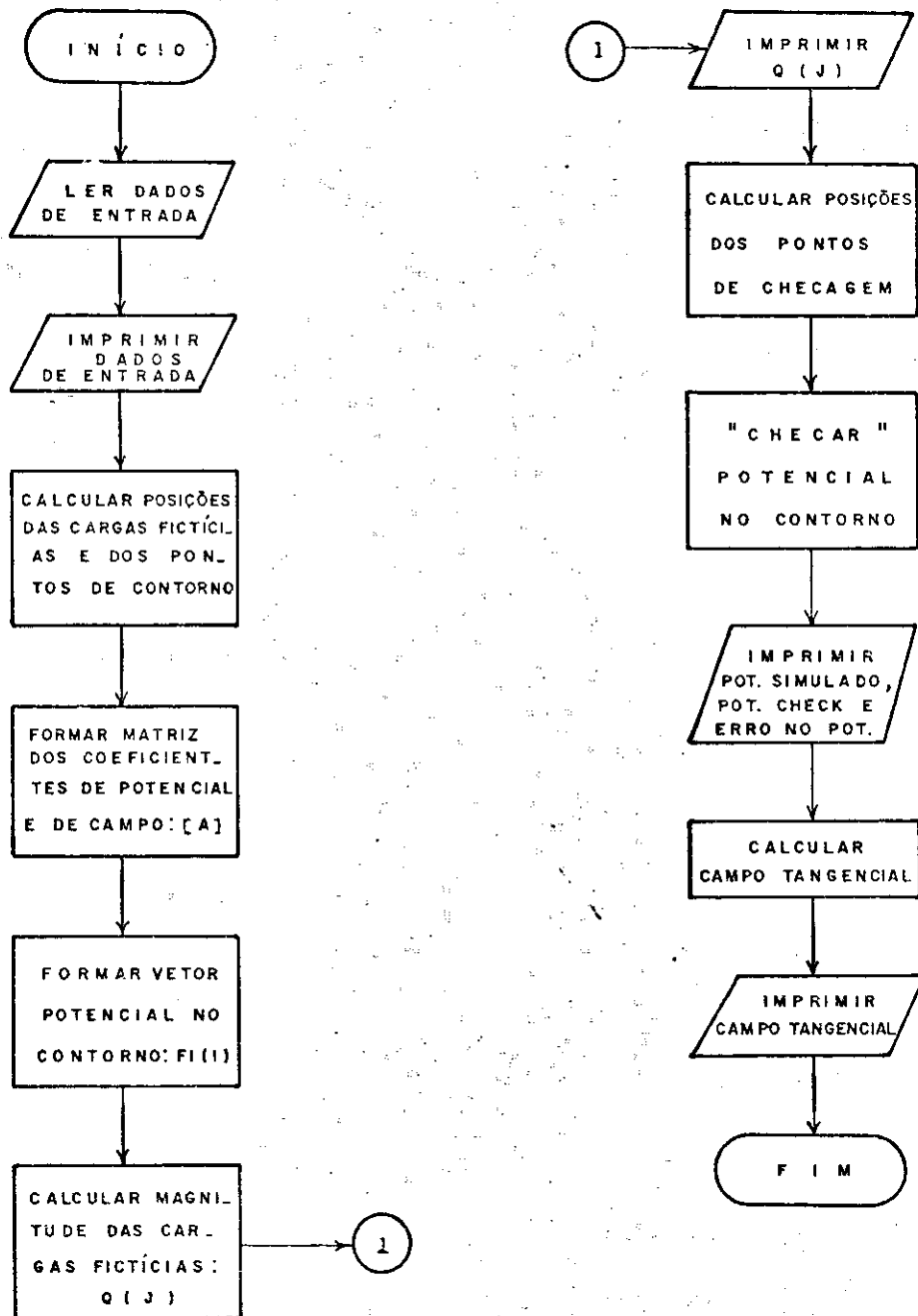
A utilização de tubos de p.v.c. se torna vantajosa no sentido de se poder substituir em pouco tempo um isolador deteriorado feito de material importado por um similar acessível e economicamente viável. Este aspecto pode servir de estimulante para a continuidade deste trabalho.

Para dar prosseguimento aos estudos ora realizados e fornecer maiores esclarecimentos sobre as características de ruptura superficial, pode-se sugerir que se realizem ensaios aplicando surtos de manobra, utilizando tubos de outros diâmetros e comprimentos, e fazer o registro fotográfico das descargas superficiais. Sugere-se também que os tubos tenham as suas superfícies envernizadas.

APÊNDICE

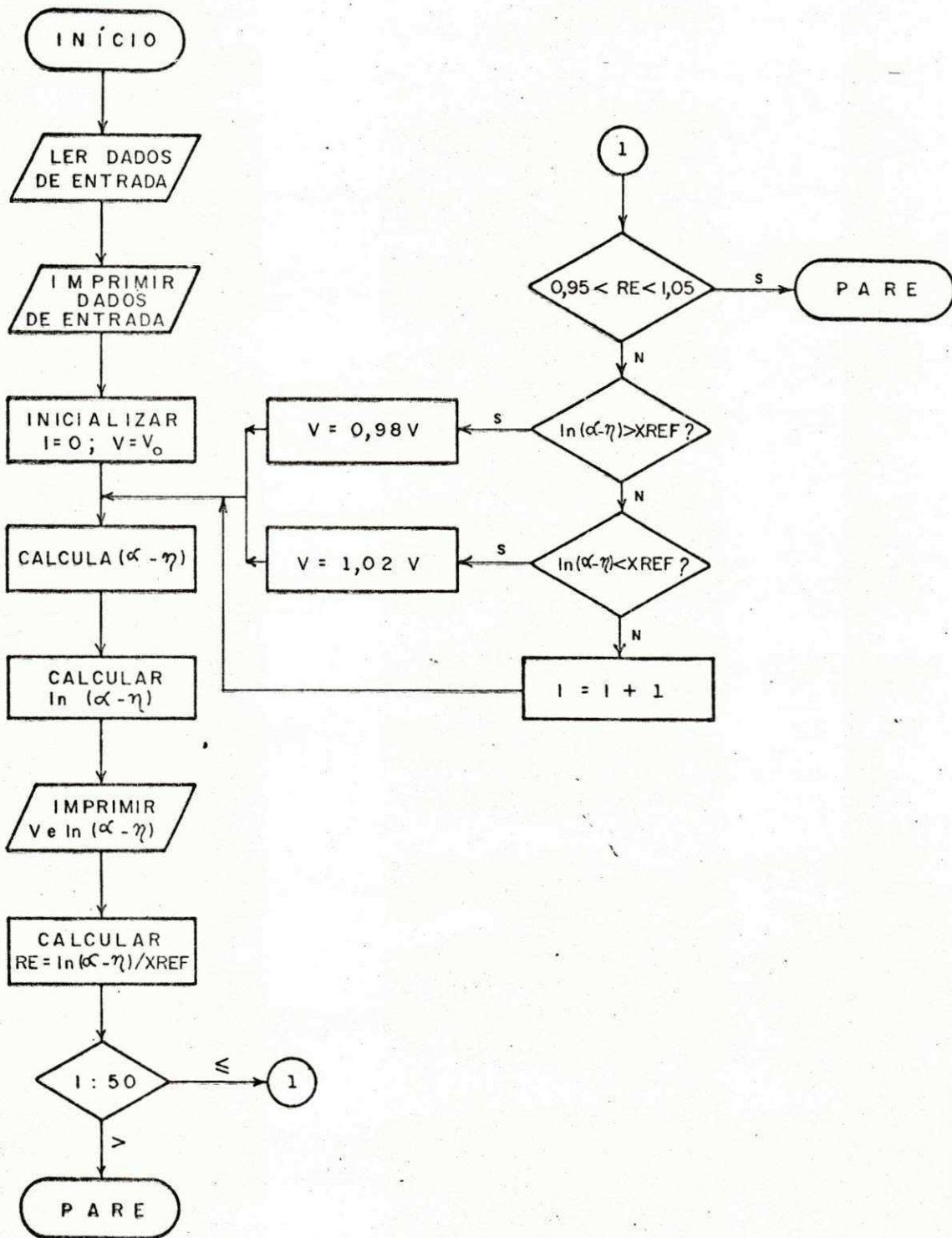
APÊNDICE - A

Fluxograma do Cálculo do Campo Elétrico



APÊNDICE - B

Fluxograma do Cálculo da Tensão de Iniciação de Corona



APÊNDICE-C

LISTAGEM DOS PROGRAMAS

IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)

DIMENSION FF(105), RC(105), ZF(105), ZC(105), FC1(105), ZC1(105),

1 SP(105), ZP(105), FI(105), TANG1(15,45), TANG2(15,30),

2 FLD1(15), FLD(15)

COMMON/NAME1/N, NM/NAME2/Q(105), A(105,106)

C

C

C

SIMULACAO DE ARRANJO COM TUBO

C

C

C

C

C

DATA

C

DO 123 NS=1,7

RF(1,5,1) DG, DF, DE, DI, R, R2, H, N

10 FORMAT(7F10.4, I5)

WRITE(6,2) DG, DF, DE, DI, R, R2, H, N

20 FORMAT(10X, 'DADOS DE ENTRADA', 2X, 7F10.4, 2X, I5, /)

C

C

POSICAO DAS CARGAS FICTICIAS E DOS PONTOS NO CONTOURU

C

NM=N+1

N1=N/7

N2=N1/5

N3=2*N2

N4=N3

N5=N1

N6=3*N1

N7=N1/5

N8=3*N6

N9=N8-N2

NK=2*N1

N3=NK+N3

NC=2*N5

ND=3*N5

NE=NK+N2+N3

NG=N1+NC+N5

DP=0.7*DG

DP2=0.7*DP

PI=3.141592654

EPSI=2.2

PI2=2./PI

C

C

DO 30 I=1, N1

RC(I)=3*DELTA(I)/DELOXT(N1)

ZC(I)=(H+DG)/2.

FF(I)=RC(I)

ZF(I)=(H+DP)/2.

30 CONTINUE

C

C

DTES=0.2-0

ARG=0.2/DTES

PHSI=DAT COS(ARG)

DELTA=PHSI/DELOXT(N1)

DO 31 I=1, N1

J=I+N1

```
TETA=DELTA*(PI/180)*T(1+M-2*1)
```

```
FC(J)=M*DCOS(TETA)-DIFB
```

```
7C(J)=M+D*DSIN(TETA)
```

```
FF(J)=D*DCOS(TETA)-DIFB
```

```
7F(J)=M+D*DSIN(TETA)
```

```
31 CONTINUE
```

```
C
```

```
C
```

```
DO 32 I=1,N3
```

```
J=N2+I
```

```
FC(J)=F+(F-D)*DFLOAT(N3+1-I)/DFLOAT(N3)
```

```
7C(J)=M-D*DP/2.
```

```
FF(J)=FC(J)
```

```
7F(J)=M-D*DP/2.
```

```
32 CONTINUE
```

```
C
```

```
C
```

```
DO 33 I=1,N2
```

```
J=I+M3
```

```
FC(J)=D1+(D2-D1)*DFLOAT(N2+1-I)/DFLOAT(N2+1)
```

```
7C(J)=M-D*DP/2.
```

```
FF(J)=FC(J)
```

```
7F(J)=M-D*DP/2.
```

```
33 CONTINUE
```

```
C
```

```
C
```

```
DO 34 I=1,N4
```

```
J=NM-M4+I
```

```
FC(J)=D1*DFLOAT(M4+1-I)/DFLOAT(M4+1)
```

```
7C(J)=M-D*DP/2.
```

```
FF(J)=FC(J)
```

```
7F(J)=M-D*DP/2.
```

```
34 CONTINUE
```

```
C
```

```
C
```

```
DELTA=(D2-D1)*0.25
```

```
DO 35 I=1,N5
```

```
J=NM+I
```

```
K=J+N5
```

```
L=K+N5
```

```
M=L+N5
```

```
FC(J)=D1-DELTA
```

```
FF(K)=D2+DELTA
```

```
FF(L)=D1+DELTA
```

```
FF(M)=D2-DELTA
```

```
7F(J)=(M-D*DP/2.)*DFLOAT(N5+1-I)/DFLOAT(N5+1)
```

```
7C(J)=7F(J)
```

```
7F(K)=7C(J)
```

```
7F(L)=7C(J)
```

```
7F(M)=7C(J)
```

```
FC(K)=D2
```

```
FC(L)=FC(J)
```

```
FC(M)=D1
```

```
7C(K)=7F(K)
```

```
7C(L)=7C(K)
```

```
7C(M)=7C(L)
```

```
35 CONTINUE
```

```
C
```

```
C
```

```
CALL CULO DE (A)
```

```

C
DO 40 J=1,NM
DO 40 J=1,NI
AK1=2.*DSORT(F*(J)+RC(I))
AK2=DSORT((F*(J)+RC(I))**2+(ZC(I)-ZF(J))**2)
AM2=DSORT((F*(J)+RC(I))**2+(ZC(I)+ZF(J))**2)
AK=AK1/AK2
AM=AK1/AM2
CALL SLINK(K,M,AK,AM)
A(I,J)=(2./PI)*((EK/AK2)-(EM/AM2))
40 CONTINUE

```

```

C
C
DO 41 I=1,NM
DO 41 I=1,NI
K=J+NI+NC
ZF(I,CT,ND,ND,I,LE,NE) GOTO 42
AK1=2.*DSORT(F*(K)+RC(I))
AK2=DSORT((F*(K)+RC(I))**2+(ZC(I)-ZF(K))**2)
AM2=DSORT((F*(K)+RC(I))**2+(ZC(I)+ZF(K))**2)
AK=AK1/AK2
AM=AK1/AM2
CALL SLINK(K,M,EK,EM)
A(I,K)=(2./PI)*((EK/AK2)-(EM/AM2))
GOTO 41
42 A(I,K)=0.
41 CONTINUE

```

```

C
C
DO 43 I=1,NM
DO 43 J=1,NC
K=J+NI
IF(I,LE,ND,ND,I,CT,NE) GOTO 44
AK1=2.*DSORT(F*(K)+RC(I))
AK2=DSORT((F*(K)+RC(I))**2+(ZC(I)-ZF(K))**2)
AM2=DSORT((F*(K)+RC(I))**2+(ZC(I)+ZF(K))**2)
AK=AK1/AK2
AM=AK1/AM2
CALL SLINK(K,M,EK,EM)
A(I,K)=(2./PI)*((EK/AK2)-(EM/AM2))
GOTO 43
44 A(I,K)=0.
43 CONTINUE

```

```

C
C
DO 45 I=1,NC
DO 45 J=1,NI
L=I+NI
K=I+NI+NC
AK1=2.*DSORT(F*(J)+RC(K))
AK2=DSORT((F*(J)+RC(K))**2+(ZC(K)-ZF(J))**2)
AM2=DSORT((F*(J)+RC(K))**2+(ZC(K)+ZF(J))**2)
AK=AK1/AK2
AM=AK1/AM2
CALL SLINK(K,M,EK,EM)
CALL SLINK(K,M,SK,SM)
F21=1.-AK*AK
F22=1.-AM*AM
F25=AK2*AK2
F26=AM2*AM2

```



```

F32=2.*F(L)/(X**K)
F33=F(L)+C(K)-F32
F34=(SM/F22)*F32+(F33**K)
F37=2.*F(L)/(A**M)
F36=F(L)+C(K)-F37
F31=(SM/F22)*F36+(F37**M)
FL=(2./P1)*(F34/F25-F38/F26)
STN(K,I)=F31*(F29**I)
A(I,J)=1.
IF(K,I,NS) GO TO 45
F22=7C(K)+7F(J)
F24=7C(K)+7F(J)
F27=F22/F25
F28=F24/F26
X4=F27**2/F21
X5=F28**2/F23
X6=X4*X5
F7=P12*X6
II=K-NC
TANC1(I,J)=F7

```

45 CONTINUE

C

```

DO 46 I=1,NC
DO 46 J=1,NC
K=I+M
L=I+M
N=K+M
AK1=2.*DSQRT(F(L)*C(K))
AK2=DSQRT((F(L)+C(K))**2+(7C(K)-ZF(L))**2)
AL2=DSQRT((F(L)+C(K))**2+(7C(K)+ZF(L))**2)
AK=AK1/AK2
AL=AL2/AL2
CALL SLINK(K,K,SM,SK,SM)
CALL SLINK(L,L,SK,SM)
A(I,L)=(2./P1)*((AK/AL2)-(F**M/AL2))
F21=1.-AK**K
F23=1.-AL**M
F25=K2**2
F26=M2**2
F32=2.*F(L)/(X**K)
F33=F(L)+C(K)-F32
F34=(SM/F22)*F32+(F33**K)
F37=2.*F(L)/(A**M)
F36=F(L)+C(K)-F37
F31=(SM/F22)*F36+(F37**M)
FL=(2./P1)*(F34/F25-F38/F26)
STN(I,J)=F31**J

```

46 CONTINUE

C

C

```

DO 47 I=1,NC
DO 47 J=1,NC
K=I+M
L=I+M+M
N=K+M
AK1=2.*DSQRT(F(L)*C(K))
AK2=DSQRT((F(L)+C(K))**2+(7C(K)-ZF(L))**2)
AL2=DSQRT((F(L)+C(K))**2+(7C(K)+ZF(L))**2)
AK=AK1/AK2

```

```

AM=AK1/AM2
CALL FLINK(K,AM,EK,FM)
CALL SLINK(K,AM,SK,SM)
A(K,L)=-((2./PI)*((EK/AK2)-FM/AM2))
F21=1.-AM*AK
F23=1.-AM*AM
F25=AK2**3
F26=AM2**3
F27=2.*(F(1)/(AK**K))
F30=FF(L)+FC(K)-F32
F34=(SK/F21)*F32+(F33**K)
F37=2.*(F(L)/(AM**M))
F35=FF(L)+FC(K)-F37
F39=(SM/F23)*F34+(F37**M)
A(L,L)=-((2./PI)*((F34/F25-F38/F26))
IF(M,LS,NS) GOTO 47
F22=2C(M)-7F(1)
F24=2C(M)+2F(L)
F27=F22/F25
F28=F24/F26
Y4=F27*SK/F21
Y5=F28*SM/F23
Y6=Y4-Y5
FZ=PI2*Y6
II=M-NS
TANG2(II,J)=FZ

```

```
47 CONTINUE
```

```

C -----
C VECTOR O(I)
C -----

```

```

DO 50 I=1,NN
O(I)=1.

```

```
50 CONTINUE
```

```

C -----
C CALCULO DE O(J)
C -----

```

```

DO 51 I=1,N
O(I,NN)=0.

```

```
51 CONTINUE
```

```

C -----
C -----

```

```

DO 52 I=1,N4
O(I,NN)=1.

```

```
52 CONTINUE
```

```

C -----
C -----

```

```

CALL GAUSS
WRITE(6,60)
60 FORMAT(//45X,'VECTOR O(J)',//)
WRITE(6,70)O(J),J=1,N)
70 FORMAT(572,'. ')

```

```

C -----
C POSICION DE LOS PUNTOS DE CHEQUEO
C -----

```

```

DO 80 I=1,N6
ZC1(I)=2*DFLOAT(I)/DFLOAT(N6)
ZC2(I)=(N+1)/2.

```

```
80 CONTINUE
```

```

ZC1A1=PHS1/DFLOAT(N6)
DO 81 I=1,N6

```

```

I=1+N6
TETA1=PI/180*(1*DEFLOCAT(14*N6-2*I)
ZC1(J)=D*E*F/COS(TETA1)+D*E*F
ZC1(J)=H+D*I*SIN(TETA1)
11 CONTINUE
C
C
DO 12 I=1,N6
I=2*N6+1-I
ZC1(J)=D*DEFLOCAT(I)/DEFLOCAT(N6)
ZC1(J)=I-D*E/2,
12 CONTINUE
C
C-----
C CHECKING OF POTENTIAL IN CENTER
C-----
WRITE(6,90)
90 FORMAT(//12X,'POTENCIAL SIMULADO',20X,'POTENCIAL CHECK',20X,
1'SERROR NO POTENCIAL',//)
DO 110 I=1,N7
SUM=0.
DO 110 J=1,N7
P5=(ZC1(I)+ZF(J))**2
P6=(ZC1(I)-ZF(J))**2
P7=(ZC1(I)+ZF(J))**2
P8=D*DEFLOCAT(I)*ZF(J)
LFA3=DSQRT(P5+P6)
LFA4=DSQRT(P5+P7)
TK6=2.*P8/LFA3
TK7=2.*P8/LFA4
CALL BLNK(TK6,TK7,TK8,TK9)
TK10=(TK6/4LFA3)-(TK9/4LFA4)
PBT=TK10*2./PI
SUM=SUM+PBT*(J)
110 CONTINUE
PBT=(SUM+PI(I))/PI(I)
WRITE(6,105)SUM,PI(I),PBT
105 FORMAT(6X,020.8,21X,020.8,16X,020.8)
120 CONTINUE
C
C-----
C CALCULO DE CAMPO TANGENCIAL
C-----
DO 121 I=1,N5
SUM1=0.
DO 122 J=1,N4
SUM1=SUM1+TANG1(I,J)*Q(J)
122 CONTINUE
FLD1(I)=SUM1
121 CONTINUE
DO 123 I=1,N5
SUM2=0.
DO 123 J=1,N5
J=I+N4+1
SUM2=SUM2+TANG2(I,J)*Q(J)
124 CONTINUE
FLD2(I)=SUM2+FLD1(I)
123 CONTINUE
WRITE(6,125)
125 FORMAT(//,60X,'CAMPO TANGENCIAL',//)
WRITE(6,126)(FLD(I),I=1,N5)
126 FORMAT(50X,9/)

```

WRITE(6,127)

127 FORMAT('11')

128 CONTINUE

STOP

END

C -----

C SUBROUTINE GAUSS

C -----

SUBROUTINE GAUSS

IMPLICIT REAL*8(A-H,I-Z)

COMMON/NA,41/I,NN/NAM2/Q(105),A(105,106)

C
DO 300 L=1,MC
DO 290 I=L,N

SPRIN=A(I,L)

IF(I.NE.L) GO TO 270

C
DO 250 J=L,NN

Z(I,J)=(I,J)/SPRIN

250 CONTINUE

C
GO TO 290C
270 DO 280 J=L,NN

Z(I,J)=(I,J)-SPRIN*A(L,J)

280 CONTINUE

290 CONTINUE

300 CONTINUE

C
M1=N-1

N1=N

K=N+1

L=N+1

C
DO 330 I1=1,M1

L=L-1

N1=N1-1

I=N1+1

C
DO 320 I1=1,M1

I=I-1

SPRIN=A(I,I)

C
DO 310 J=L,K

Z(I,J)=(I,J)-SPRIN*A(L,J)

310 CONTINUE

320 CONTINUE

330 CONTINUE

C
DO 340 I=1,N

Q(I)=Z(I,NN)

340 CONTINUE

RETURN

END

C -----

C SUBROUTINE ELINK

C -----

SUBROUTINE SLINK(XP,YP,ZP,JD)

IMPLICIT REAL*8(A-H,I-Z)

PP=1.-Z*XP

Q=1.-Y*Y*

IF (Q, .0, .0) GO TO 6

ZP=1.26229426+PP*(0.096663443+

1PP*(0.035909224+PP*(0.037425637+

2*(0.014511042*PP)))-DLOG(PP)*(0.5+PP*(0.12498554+PP*(0.068802486+PP*

3(0.03328355+0.0044178701*PP)))

5 IF (Q, .0, .0) GO TO 7

ZP=1.30329436+Q*(0.096663443+Q*(0.035909224+Q*(0.037425637+0.01451

11962*Q)))-DLOG(Q)*(0.5+Q*(0.12498594+Q*(0.068802486+Q*(0.03328355

25+0.0044178701*Q)))

RETURN

EX1=Q,

ZP=DEXP, EX1)

GO TO 5

7 EX2=Q,

YP=DEXP, EX2)

RETURN

END

C SUBROUTINE SLINK

SUBROUTINE SLINK(AK,AM,SK,SM)

IMPLICIT REAL*8(A-H,I-Z)

PP = 1.-AK*AK

QQ = 1.-AM*AM

IF (PP, .0, .0) GO TO 6

SK = 1.+PP*(0.44325141+PP*(0.062606012+PP*(0.047573236+

1 0.017365065*PP)))-DLOG(PP)*PP*(0.24998358+PP*

2 (0.0920018+PP*(0.040696975+0.0052644964*PP)))

5 IF (QQ, .0, .0) GO TO 7

SM = 1.+QQ*(0.44325141+(Q*(0.062606012+QQ*(0.047573236+

1 0.017365065*QQ)))-DLOG(Q)*QQ*(0.24998358+QQ*

2 (0.0920018+QQ*(0.040696975+0.0052644964*QQ)))

RETURN

6 SK = 1.

GO TO 5

7 SM = 1.

RETURN

END

CONTINUE


```

1 IMPLICIT REAL*8(A-H, O-Z)
2 DIMENSION FF(105), FC(105), ZE(105), ZC(105), RC(105), ZC1(105),
3         FP(105), ZP(105), FI(105), FID(60)
4 COMMON/NA1/N/NA2/2(105), P(105,105)

```

SIMULACAO DO ARRANJO SEM TUBO

C-----DADOS

```

4 DO 5 NS=1, 7
5 READ(5,1000) DG, DE, DE, B, B2, H, N
6 1000 FORMAT(6F10.4, I5)
7 WRITE(6,2000) DG, DE, DE, B, B2, H, N
8 2000 FORMAT(10X, 'DADOS DE ENTRADA', 2X, 6F10.4, 2X, I5, /)

```

C----- POSICAO DAS CARGAS FICTICIAS E DOS PONTOS DE CONTORNO

```

9 N1=N/3
10 N2=N/5
11 N3=3*N2
12 N4=N1
13 DP=0.7*DG
14 DP2=0.7*DP
15 S=H-DG/2.
16 P1=2.141592654

```

```

17 DO 10 I=1, N1
18 FC(I)=P*DELTA(I)/DELTA(N1)
19 ZC(I)=H+DG/2.
20 FF(I)=FC(I)
21 ZE(I)=H+DP/2.

```

10 CONTINUE

```

23 DIFB=B2-B
24 ASG=B2/DP
25 PHSI=0.45*COS(ASG)
26 DELTA=PHSI/DELTA(N1)
27 DO 20 I=1, N1

```

```

28 J=I+N1
29 TETA=DELTA*DELTA(I+N1-2*I)
30 FC(J)=DP*CCOS(TETA)-DIFB
31 ZC(J)=H+DP*DSIN(TETA)
32 RF(J)=DP2*CCOS(TETA)-DIFB
33 ZE(J)=H+DP2*DSIN(TETA)

```

20 CONTINUE

```

34 DO 30 I=1, N1
35 J=2*N1+1-I
36 FC(J)=P*DELTA(I)/DELTA(N1)
37 ZC(J)=H-DG/2.
38 RF(J)=FC(J)
39 ZE(J)=H-DP/2.

```

30 CONTINUE

C-----CALCULO DE P, I, J

```

42 DO 40 I=1, N
43 DO 40 J=1, N
44 P1=(FC(I)+RF(J))*2

```



```

5      P2=(ZC(I)-ZF(J))*2
6      P3=(ZC(I)+ZF(J))*2
7      P4=DSQRT(P2*P3)
8      ALFA1=DSQRT(P1+P2)
9      ALFA2=DSQRT(P1+P3)
10     TK1=2.*P4/ALFA1
11     TK2=2.*P4/ALFA2
12     CALL ELINK(TK1,TK2,TK3,TK4)
13     TK5=(TK3/ALFA1)-(TK4/ALFA2)
14     Q(I,J)=TK5*2./PI
15     40 CONTINUE
16     C
17     C-----POTENCIAL DO CONTOURNO
18     C
19     DO 50 I=1,N
20     F1(I)=1.
21     50 CONTINUE
22     C
23     C-----CALCULAR CARGAS
24     C
25     DO 60 I=1,N
26     Q(I)=F1(I)
27     60 CONTINUE
28     CALL GAUSS
29     WRITE(6,3000)
30     3000 FORMAT(//45X,'VETOR Q(J)',//)
31     WRITE(6,4000)(Q(J),J=1,N)
32     4000 FORMAT(6D20.8,/)
33     C
34     C-----POSICAO DOS PONTOS DE CHECKAGEM
35     C
36     DO 70 I=1,N2
37     FC1(I)=R*DFLOAT(I)/DFLOAT(N2)
38     ZC1(I)=H+DG/2.
39     70 CONTINUE
40     DELTA1=PHSI/DFLOAT(N2)
41     DO 80 I=1,N2
42     J=I+N2
43     TETA1=DELTA1*DFLOAT(I+N2-2*I)
44     RC1(J)=R*DCOS(TETA1)-DIFR
45     ZC1(J)=H+DF*DSIN(TETA1)
46     80 CONTINUE
47     DO 90 I=1,N2
48     J=3*N2+1-I
49     FC1(J)=R*DFLOAT(I)/DFLOAT(N2)
50     ZC1(J)=H-DG/2.
51     90 CONTINUE
52     C
53     C-----CHECKAGEM DO POTENCIAL NO CONTOURNO
54     C
55     WRITE(6,5000)
56     5000 FORMAT('1', 'POTENCIAL SIMULADO', 10X, 'POTENCIAL CHECK', 10X, 'ERRO NO
57     1 POTENCIAL', //)
58     DO 100 I=1,13
59     SUM=0.
60     DO 110 J=1,N
61     P5=(FC1(I)+RF(J))*2
62     P6=(ZC1(I)-ZF(J))*2
63     P7=(ZC1(I)+ZF(J))*2
64     P8=DSQRT(P5*P6)

```



```

22      ALFA3=DSORT(P5+P6)
23      ALFA4=DSORT(P5+P7)
24      TK6=2.*PB/ALFA3
25      TK7=2.*PB/ALFA4
26      CALL SLINK(TK6,TK7,TK8,TK9)
27      TK10=(TK9/ALFA3)-(TK9/ALFA4)
28      POT=TK10*2./PI
29      SUM=SUM+POT*2*(J)
30      110 CONTINUE
31      EERR=(SUM-EI(I))/EI(I)
32      WRITE(6,6000)SUM,EI(I),EERR
33      6000 FORMAT(A5,E7,4,21X,E7,4,16X,E9,6)
34      100 CONTINUE

```

```

C-----POSICAO DOS PONTOS ONDE SE QUER CALCULAR O CAMPO
C

```

```

35      DO 120 I=1,N4
36          RP(I)=1./2.
37          ZP(I)=S*DFLOAT(N4-I)/DFLOAT(N4-1)
38      120 CONTINUE

```

```

C-----CALCULO DO CAMPO TANGENCIAL
C

```

```

39      DO 130 I=1,N4
40          SUM=0.
41          DO 140 J=1,I
42              AK=2.*DSORT(P0(I)*RF(J))
43              ALFA5=DSORT(((RP(I)+RF(J))**2+(ZP(I)-ZP(J))**2)
44              ALFA6=DSORT(((RP(I)+RF(J))**2+(ZP(I)+ZP(J))**2)
45              BETA1=DSORT(((RP(I)-RF(J))**2+(ZP(I)-ZP(J))**2)
46              BETA2=DSORT(((RP(I)-RF(J))**2+(ZP(I)+ZP(J))**2)
47              F1=(ALFA5)*(BETA1)**2
48              F2=(ALFA6)*(BETA2)**2
49              AK1=AK/ALFA5
50              AK2=AK/ALFA6
51              CALL SLINK(AK1,AK2,-K1,-K2)
52              F3=(ZP(J)-ZP(I))*K1
53              F4=(ZP(J)+ZP(I))*K2
54              F5=F3/F1
55              F6=F4/F2
56              F7=F5+F6
57              F8=(-2./PI)*F7
58              SUM=SUM+C(J)*F8

```

```

59      140 CONTINUE
60      FLD(I)=SUM
61      130 CONTINUE
62      WRITE(6,7000)
63      7000 FORMAT('11',//,50X,'CAMPO TANGENCIAL',/)
64      WRITE(6,8000)FLD(I),I=1,N4)
65      8000 FORMAT(6020,8/)
66      WRITE(6,9000)
67      9000 FORMAT('11')
68      5 CONTINUE
69      STOP
70      END

```

```

C-----
C SUBROTINA GAUSS
C-----

```

```

41 SUBROUTINE GAUSS

```

```

02      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
03      COMMON/NAME1/1/NAM2/B(105),A(105,105)
04      DO 5 I=1,N
05          II=I+1
06          IF(DABS(A(I,II)),IF,1,D-10) GOTO 1
07          GOTO 15
08      1 CONTINUE
09          IF(I,EO,N) GOTO 10
10      DO 14 J=II,N
11          IF(DABS(A(J,I)),IF,1,D-10) GOTO 14
12          IPIV=J
13          GOTO 14
14      CONTINUE
15      GOTO 10
16      DO 2 K=1,N
17          PIV=A(I,IPIV,K)
18          A(IPIV,K)=A(I,K)
19      2 A(I,K)=PIV
20          PIV=B(IPIV)
21          B(I)=B(I)
22          B(I)=PIV
23      15 IF, I,EO,N) GOTO 3
24      DO 3 JI=II,N
25          A(I,JI)=A(I,JI)/A(I,I)
26          B(I)=B(I)/A(I,I)
27      DO 5 J=II,N
28      DO 4 K=II,N
29      4 A(J,K)=A(J,K)-(A(J,I)*A(I,K))
30      5 B(J)=B(J)-(B(I)*A(J,I))
31      3 B(N)=B(N)/A(I,N)
32      DO 6 K=2,N
33          I=N-K+1
34          I=I+1
35          SUM=0.
36      DO 7 J=I,N
37      7 SUM=SUM+A(I,J)*B(J)
38      6 B(I)=B(I)-SUM
39      GOTO 11
40      10 WRITE(6,9)
41      9 FORMAT('EQUATIONS ARE LINEARLY DEPENDENT')
42      STOP
43      11 RETURN
44      END

```

```

C -----
C SUBROUTINE FLINK
C -----

```

```

05      SUBROUTINE FLINK(XP,YP,ZP,WP)
06      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
07      PP = 1, -XP*XP
08      Q = 1, -YP*YP
09      IF (ZP,EO,0,) GO TO 5
10      ZP = 1, 33629436+PP*(0,096663443+PP*(0,035909924+PP*
11          ,0,037425637+0,014511962*PP))) -DLOG(PP)*
12          (0,5+PP*(0,12498594+PP*(0,068802486+PP*
13          (0,033283553+0,0044173701*PP)))
01      5 IF,0,EO,0,) GO TO 7
02      WP = 1, 33629436+Q*(0,096663443+Q*(0,035909924+Q*(0,0
11          37425637+0,014511962*Q))) -DLOG(Q)*(0,5+
12          Q*(0,12498594+Q*(0,068802486+Q*(0,03328

```



```

3553+0,0044173701*01111
02      RETURN
04      A      EX1 = 88,
06          Z0 = DEXP(EX1)
08          GO TO 5
10      7      EX2 = 88,
12          W0 = DEXP(EX2)
14      RETURN
16      END
C      *****
C      SUBROUTINE SLINK
C      *****
21      SUBROUTINE SLINK(AK,AM,SK,SM)
22      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
23      PP = 1./AK*AK
24      QQ = 1./AM*AM
25      IF (PP.EQ.0) GO TO 5
26      SK = 1.+PP*(0.44225141+PP*(0.062606012+PP*(0.047573836+
1          0.017365065*PP))) - 0.105*(PP)*PP*(0.24998262+PP*
2          (0.0920018+PP*(0.040696975+0.0052644964*PP)))
07      5      IF (QQ.EQ.0) GO TO 7
08      SM = 1.+QQ*(0.44225141+QQ*(0.062606012+QQ*(0.047573836+
1          0.017365065*QQ))) - 0.105*(QQ)*QQ*(0.24998262+QQ*
2          (0.0920018+QQ*(0.040696975+0.0052644964*QQ)))
20      RETURN
22      A      SK = 1.
24          GO TO 5
26      7      SM = 1.
28      RETURN
30      END

```

ENTRY

VECTOR (11)

-0.10E15360D C7	-0.100144E5D C8	0.65168974D 08	-2.14614874D 09	0.35815074D 09	-0.52542341D 09
0.6157094C9 C9	-0.57796915D 09	0.40919449D 09	-0.15541443D 09	-0.11057123D 09	0.32055623D 09
-0.43889999D 09	0.46820525D C9	-0.444633234D 09	0.42421560D 09	-0.44179583D 09	0.51245C53D 09
-0.6065431C9 C9	0.70948637D C9	-0.69454154D 09	0.64944142D 09	-0.50101222D 09	0.30278255D 09
-0.12842075D 09	-0.12562924D C8	0.87845935D 08	-0.10349470D 09	0.87283493D 08	-0.55455530D 08
0.29666727D 08	-0.11493719D C8	0.36618586D 07	-0.75919579D 06	0.94308805D 05	-0.41242166D 08
-0.1004E074D C9	0.82202027D 09	-0.13008146D 10	0.75990343D 09	0.75430351D 09	-0.24128892D 10
0.35999542D 10	-0.41740235D 10	0.42877442D 10	-0.41122139D 10	0.37922916D 10	-0.34206562D 10
0.30516025D 10	-0.27142766D 10	0.24227093D 10	-0.21825551D 10	0.19246311D 10	-0.18570744D 10
0.17666720D 10	-0.17174064D 10	0.17025190D 10	-0.17099197D 10	0.17207364D 10	-0.17043688D 10
0.16132775D 10	-0.13004197D 10	0.93350376D 09	-0.24754694D 09	-0.52864502D 09	0.57705070D 09
-0.639941242D C9	-0.52252852D C8	0.46356385D 09	-0.44555863D 09	0.28539300D 05	-0.13564893D 06
0.19807326D C6	0.15594226D C7	-0.10508813D 08	0.40042793D 08	-0.10672044D 09	0.23221691D 09
-0.41231597D 09	0.63510064D C9	-0.83854521D 09	0.95052035D 09	-0.94688426D 09	0.68500772D 09
-0.17096242D 09	-0.24027313D 09	0.11965726D 10	-0.21058597D 10	0.30420324D 10	-0.36073445D 10
0.92164887D 10	-0.40571960D 10	0.33743746D 10	-0.21229937D 10	0.57962016D 09	0.51825587D 09
-0.20306640D 10	0.25452554D 10	-0.24490872D 10	0.19208414D 10	-0.12367358D 10	0.64115810D 09
-0.25553641D 09	0.71257691D C8	-0.10715061D 08			
-0.36299667D 01	-0.35994228D C1	-0.35782462D 01	-0.35656909D 01	-0.35615317D 01	


```

1  IMPLICIT REAL*4(A, H, D, Z)
2  DIMENSION EQ(100), XINT(100)
3
4  C
5  C
6  C          PROGRAMA PARA CALCULAR A
7  C          TENSÃO DE INICIAÇÃO DE CORONA
8  C
9  C
10 C          DADOS DE ENTRADA
11 C
12 3      DO 2000 K=1, 5
13 4      READ(5, 100) VO, P, GAP, XREF, N, M
14 5      100 FORMAT(4F14.5, 2I5)
15 6      READ(5, 101) EQ(I), I=1, N)
16 7      101 FORMAT(5F14.5)
17 8      WRITE(6, 102) VO, P, GAP, XREF, N, M
18 9      102 FORMAT('11', 4F15.5, 2I10, //)
19 10     WRITE(6, 101) (EQ(I), I=1, N)
20 11     WRITE(6, 103)
21 12     103 FORMAT, //)
22 C
23 13     DELGAP=GAP/FLOAT(N-1)
24 14     I=0
25 15     V=VO
26 C
27 16     1000 CONTINUE
28 17     DO 10 J=1, N
29 18     X1=0.01*V*EQ(J)/P
30 19     CALL FUNC, X1, Y1)
31 20     YAN(J)=P*Y1
32 21     10 CONTINUE
33 C
34 22     CALL SIMPS(X1, N, DELGAP, N, XINT)
35 C
36 23     WRITE(6, 104) V, XINT
37 24     104 FORMAT(5X, 'TENSÃO= ', F14.5, 5X, 'LN(ALFA-META)= ', F14.5)
38 C
39 25     FE=XINT/XREF
40 26     IF(I.GT.N) GOTO 1001
41 27     IF(PE.GE.0.95.AND.PE.LE.1.05) GOTO 1001
42 28     IF(XINT.GT.XREF) V=0.98*V
43 29     IF(XINT.LT.XREF) V=1.02*V
44 30     I=I+1
45 31     GOTO 1000
46 32     1001 CONTINUE
47 33     2000 CONTINUE
48 34     STOP
49 35     END
50 C
51 C          SUBROTINA FUNCTION
52 C
53 36     SUBROUTINE FUNC(X1, Y1)
54 37     IF(X1 .LT. 30.) Y1=0.
55 C
56 38     IF(X1.GE.30.AND.X1.LT.60.) Y1=EXP(-0.835344E-07*X1**6+0.2439
57 1     56E-04*X1**5-0.295203E-02*X1**4+).1895
58 2     32E-00*X1**3-0.681555E-01*X1**2+0.1304

```


3 28E 03*X1 0.104493E 04) 111

C

39 IF(X1.GT.60.AND.X1.LT.160.) Y1=EXP(0.559337E 17*X1**10-0.5617
1 80E 14*X1**9+0.247436E 11*X1**8-0.6262
2 88E 09*X1**7+0.100009E -05*X1**6-0.1033
3 06E 04*X1**5+0.691192E -03*X1**4-0.2751
4 21E 01*X1**3+0.517119E 00*X1**2+0.1060
5 20E 01*X1 0.146993E 03)

C

40 IF,X1.GT.160.AND.X1.LT.360.1 Y1=EXP,-0.340817E -21*X1**10+0.660
1 666E -18*X1**9-0.531156E -15*X1**8+0.221
2 780E -12*X1**7 0.459761E -10*X1**6+0.125
3 234E 08*X1**5+0.166950E 05*X1**4-0.410
4 731E -03*X1**3+0.453014E 01*X1**2-0.243
5 744E 01*X1+0.502408E 02)

C

41 IF(X1.GT.360.AND.X1.LT.1000.) Y1=EXP(-0.797297E -27*X1**10+0.257
1 133E -23*X1**9 0.265003E -20*X1**8+0.291
2 228E 17*X1**7 0.109357E 13*X1**6+0.223
3 054E -10*X1**5 0.246763E -07*X1**4+0.153
4 063E -04*X1**3 0.553512E 02*X1**2+0.109
5 162E 01*X1 0.894411E 02)

C

42 RETURN

43 END

C

C-- SUBROUTINE SIMPSON

C

44 SUBROUTINE SIMPS(Y,H,N,XINT)

45 DIMENSION Y(N)

C

46 NE=(N-1)/2

47 NO=NE-1

48 SUM1=0.

49 SUM2=0.

C

C

50 DO 1 I=1,NE

51 J=2*I

52 SUM1=SUM1+Y(I)

53 1 CONTINUE

C

C

54 DO 2 I=1,NO

55 J=2*I+1

56 SUM2=SUM2+Y(J)

57 2 CONTINUE

C

C

58 TOT=Y(1)+Y(N)+4.*SUM1+2.*SUM2

59 XINT=TOT*H/3.

C

60 RETURN

61 END

ENTRY

44362E 02	0.20965E 02	0.23609E 02	0.19975E 02	0.17065E 02	112
14563E 02	0.12430E 02	0.10709E 02	0.93627E 01	0.83157E 01	
75270E 01	0.60221E 01	0.64445E 01	0.60554E 01	0.57284E 01	
54472E 01	0.52008E 01	0.49831E 01	0.47396E 01	0.46172E 01	
44634E 01	0.43261E 01	0.42035E 01	0.40944E 01	0.39974E 01	
30110E 01	0.38361E 01	0.37705E 01	0.37143E 01	0.36572E 01	
36289E 01	0.35994E 01	0.35782E 01	0.35656E 01	0.35615E 01	

TENSAD=	0.19000E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.33684E 03
TENSAD=	0.18620E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.31632E 03
TENSAD=	0.18248E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.29643E 03
TENSAD=	0.17883E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.28381E 03
TENSAD=	0.17525E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.27240E 03
TENSAD=	0.17174E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.25160E 03
TENSAD=	0.16831E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.23817E 03
TENSAD=	0.16494E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.22794E 03
TENSAD=	0.16164E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.22025E 03
TENSAD=	0.15841E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.20792E 03
TENSAD=	0.15524E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.19846E 03
TENSAD=	0.15214E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.18679E 03
TENSAD=	0.14910E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.17822E 03
TENSAD=	0.14611E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.16362E 03
TENSAD=	0.14319E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.15793E 03
TENSAD=	0.14033E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.14743E 03
TENSAD=	0.13752E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.13682E 03
TENSAD=	0.13477E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.12602E 03
TENSAD=	0.13208E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.11714E 03
TENSAD=	0.12943E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.10824E 03
TENSAD=	0.12685E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.10066E 03
TENSAD=	0.12431E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.93131E 02
TENSAD=	0.12182E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.85795E 02
TENSAD=	0.11939E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.79236E 02
TENSAD=	0.11700E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.73174E 02
TENSAD=	0.11466E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.67184E 02
TENSAD=	0.11236E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.61885E 02
TENSAD=	0.11012E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.56417E 02
TENSAD=	0.10791E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.51251E 02
TENSAD=	0.10576E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.47000E 02
TENSAD=	0.10364E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.42747E 02
TENSAD=	0.10157E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.39938E 02
TENSAD=	0.99537E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.35196E 02
TENSAD=	0.97546E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.31593E 02
TENSAD=	0.95595E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.30132E 02
TENSAD=	0.93684E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.27176E 02
TENSAD=	0.91810E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.24669E 02
TENSAD=	0.89974E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.22076E 02
TENSAD=	0.88174E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.19876E 02
TENSAD=	0.86411E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.17726E 02

40150E 02	0.22150E 02	0.17518E 02	0.15183E 02	0.13180E 02	
11442E 02	0.10031E 02	0.89140E 01	0.80191E 01	0.72373E 01	113
66771E 01	0.61600E 01	0.57157E 01	0.53287E 01	0.49370E 01	
46323E 01	0.44094E 01	0.41614E 01	0.39383E 01	0.37370E 01	
35561E 01	0.33940E 01	0.32498E 01	0.31119E 01	0.30093E 01	
20110E 01	0.23250E 01	0.27530E 01	0.26916E 01	0.26409E 01	
26002E 01	0.25691E 01	0.25472E 01	0.25342E 01	0.25299E 01	

TENSAC=	0.19000E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.23289E 03
TENSAC=	0.18620E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.21653E 03
TENSAC=	0.18248E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.21820E 03
TENSAC=	0.17883E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.20475E 03
TENSAC=	0.17525E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.19159E 03
TENSAC=	0.17174E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.18250E 03
TENSAC=	0.16831E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.17555E 03
TENSAC=	0.16494E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.16789E 03
TENSAC=	0.16164E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.15277E 03
TENSAC=	0.15841E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.14097E 03
TENSAC=	0.15524E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.13591E 03
TENSAC=	0.15214E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.12446E 03
TENSAC=	0.14910E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.11574E 03
TENSAC=	0.14611E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.10732E 03
TENSAC=	0.14319E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.99352E 02
TENSAC=	0.14033E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.91323E 02
TENSAC=	0.13752E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.84653E 02
TENSAC=	0.13477E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.78499E 02
TENSAC=	0.13208E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.72592E 02
TENSAC=	0.12943E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.67090E 02
TENSAC=	0.12685E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.61714E 02
TENSAC=	0.12431E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.56672E 02
TENSAC=	0.12182E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.52469E 02
TENSAC=	0.11939E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.48594E 02
TENSAC=	0.11700E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.44440E 02
TENSAC=	0.11466E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.40551E 02
TENSAC=	0.11236E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.37422E 02
TENSAC=	0.11012E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.33911E 02
TENSAC=	0.10791E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.30412E 02
TENSAC=	0.10576E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.29712E 02
TENSAC=	0.10364E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.26927E 02
TENSAC=	0.10157E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.24282E 02
TENSAC=	0.99537E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.22304E 02
TENSAC=	0.97546E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.20325E 02
TENSAC=	0.95595E 05	LN(ALFA-NETA)=	0.18613E 02

27520E 02	0.17890E 02	0.14190E 02	0.10618E 02	0.73308E 00	
61008E 01	0.50709E 01	0.44320E 01	0.39604E 01	0.25791E 01	114
32540E 01	0.29741E 01	0.27292E 01	0.25155E 01	0.23289E 01	
21650E 01	0.20220E 01	0.19002E 01	0.17926E 01	0.16990E 01	
16176E 01	0.15460E 01	0.14855E 01	0.14322E 01	0.13861E 01	
13462E 01	0.13122E 01	0.12833E 01	0.12590E 01	0.12390E 01	
12230E 01	0.12107E 01	0.12021E 01	0.11970E 01	0.11953E 01	

TENSAD=	0.19000E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.134 7E 03
TENSAD=	0.18620E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.12363E 03
TENSAD=	0.18240E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.11360E 03
TENSAD=	0.17883E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.10444E 03
TENSAD=	0.17525E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.95491E 02
TENSAD=	0.17174E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.86770E 02
TENSAD=	0.16831E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.79347E 02
TENSAD=	0.16494E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.72861E 02
TENSAD=	0.16164E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.66231E 02
TENSAD=	0.15841E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.59539E 02
TENSAD=	0.15524E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.56755E 02
TENSAD=	0.15214E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.51419E 02
TENSAD=	0.14910E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.46126E 02
TENSAD=	0.14611E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.41374E 02
TENSAD=	0.14319E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.37270E 02
TENSAD=	0.14032E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.33294E 02
TENSAD=	0.13752E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.29868E 02
TENSAD=	0.13477E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.26682E 02
TENSAD=	0.13208E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.23515E 02
TENSAD=	0.12943E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.211 9E 02
TENSAD=	0.12685E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.18603E 02

22400E 02	0.16442E 02	0.11865E 02	0.75952E 01	0.51463E 01	
40087E 01	0.24166E 01	0.30029E 01	0.25501E 01	0.23569E 01	115
21178E 01	0.19082E 01	0.17320E 01	0.15840E 01	0.14589E 01	
13530E 01	0.12626E 01	0.11850E 01	0.11192E 01	0.10302E 01	
10029E 01	0.96605E 00	0.92774E 00	0.82437E 00	0.85525E 00	
83009E 00	0.81813E 00	0.79954E 00	0.78383E 00	0.77033E 00	
76039E 00	0.75238E 00	0.74674E 00	0.74338E 00	0.74225E 00	

TENSAD=	0.19000E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.95319E 02
TENSAD=	0.18620E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.86002E 02
TENSAD=	0.18248E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.77523E 02
TENSAD=	0.17883E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.70060E 02
TENSAD=	0.17525E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.63716E 02
TENSAD=	0.17174E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.57667E 02
TENSAD=	0.16831E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.51937E 02
TENSAD=	0.16494E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.46790E 02
TENSAD=	0.16164E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.41665E 02
TENSAD=	0.15841E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.37061E 02
TENSAD=	0.15524E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.32574E 02
TENSAD=	0.15214E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.28691E 02
TENSAD=	0.14910E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.24769E 02
TENSAD=	0.14611E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.21214E 02
TENSAD=	0.14319E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.18179E 02

0.19000E 06 0.71400E 03 0.82000E 02 0.18420E 02 35 50

116

19892E 02	0.12134E 02	0.59855E 01	0.26338E 01	0.28581E 01
23445E 01	0.19381E 01	0.16254E 01	0.13874E 01	0.12042E 01
10609E 01	0.94662E 00	0.85357E 00	0.77659E 00	0.71200E 00
65715E 00	0.61014E 00	0.56958E 00	0.53437E 00	0.50369E 00
47690E 03	0.45345E 00	0.43296E 00	0.41502E 00	0.39940E 00
38502E 00	0.37412E 00	0.36415E 00	0.35574E 00	0.34979E 00
34320E 00	0.33892E 00	0.33592E 00	0.33412E 00	0.33353E 00

TENSAD=	0.19000E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.52309E 02
TENSAD=	0.19620E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.47462E 02
TENSAD=	0.18248E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.42791E 02
TENSAD=	0.17883E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.38418E 02
TENSAD=	0.17525E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.34291E 02
TENSAD=	0.17174E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.31467E 02
TENSAD=	0.16831E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.28207E 02
TENSAD=	0.16494E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.25783E 02
TENSAD=	0.16164E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.23202E 02
TENSAD=	0.15841E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.20880E 02
TENSAD=	0.15524E 06	LN(ALFA-NETA)=	0.18354E 02

REFERÊNCIAS

- (1) MASON, J.H. - "The Resistance of Sheet Insulation to Surface Discharges". Proc. Instn elect. Engrs, 107a, 551-67(1960).
- (2) MANDELCORN, L. - "The Effects of Electric Discharges Between Electrodes Across Insulation Surfaces-Some Basic Ideas and Preliminary Experiments". AIEE Winter General Meeting, paper No. 61-212, New York, January 29 - February 3, 1961.
- (3) MENDELCORN, L., HOFF, R.E., SPRENGLING, G.R. - "The Effects of Electric Discharges Between Electrodes Across Insulation Surfaces - Discharges Occurring in Static Air". AIEE Winter General Meeting, paper nº 61-244, New York, January 29 - February 3, 1961.
- (4) NASSER, E. - "Fundamental of Gaseous Ionization and Plasma Electronics". Wiley-Interscience, New York (1971), cap. 7, 8 e 9.
- (5) ALSTON, L.L. - "High-Voltage Technology". Oxford University Press(1968), cap. 1, 3 e 9.
- (6) KUFFEL, E., ABDULLAH, M. - "High-Voltage Engineering". Pergamon Press(1966), cap. 2, 3 e 4.

- (7) KUFFEL, E., ABDULLAH, M.-Proc. I.E.E. 113, No 6, 1113 (1966).
- (8) ALIBONE, T.E., MEEK, J.M.- Proc. Roy. Soc. A 166, 97 (1938).
- (9) PAREK, H., SRIVASTAVA, K.D. - "Effect of Avalanche Space Charge Field on the Calculation of Corona Onset Voltage". IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-14, No 4, August 1979.
- (10) PEDERSEN, A. - "Calculation of Spark Breakdown or Corona Starting Voltages in Nonuniform Fields". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No 2, February 1967.
- (11) PEDERSEN, A. - "Criteria for Spark Breakdown in Sulphur Hexafluoride". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No 8, November/December 1970.
- (12) SINGER, H., STEINBIGLER, H., WEISS, P. - "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields". IEEE PES Winter meeting, New York, January 27 - February 1, 1974.

- (13) ABOU-SEADA, M.S., NASSER, E. - "Digital Computer Calculation of the Potential and its Gradients of a Twin Cylindrical conductor". Trans. IEEE, pt. 3, 88(1969).
- (14) BRITISH STANDARD 358:1960 - "Method for the Measurement of Voltage With Sphere-gaps(one sphere earthed)". Incorporating amendment issued May, 1962(PD 4586).